Experimentelle POD Bestimmung mittels Ultraschall Phased Array zur Einbeziehung zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen

Jochen H. KURZ*, Anne JÜNGERT**, Sandra DUGAN**,
Gerd DOBMANN*, Eberhard ROOS**
* Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Campus E3 1, 66123 Saarbrücken, Tel. 0681 9302 3880, Fax 0681 9302 11 3880,
E-Mail jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de
** Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart, Tel. 0711 685 66787, Fax 0711 685 62761,
E-Mail anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. In kerntechnischen Anlagen werden sowohl bei der Fertigung als auch im Zuge von Revisionen zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Art und Umfang der Prüfungen sind im KTA-Regelwerk festgeschrieben. Die Prüfungen müssen in der Kerntechnik grundsätzlich qualifiziert werden. In der Vergangenheit wurden diese Qualifizierungen durch umfangreiche Performance-Demonstrationen der Prüfteams einschließlich ihres Equipments durchgeführt, die gutachterlich beurteilt wurden. Die Arbeiten beinhalteten im Wesentlichen pragmatische Aussagen zum Fehlernachweisvermögen. In den USA qualifizieren sich die Prüfteams bei EPRI zusätzlich an Testkörpern mit verdeckten (unbekannten) Fehlern, von denen ein bestimmter Prozentsatz nachgewiesen werden muss. Angaben zur Auffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD), z.B. in Form von POD-Kurven, von spezifischen Fehlerstellen in bestimmten Prüfsituationen, unter Verwendung ganz spezifisch gewählter Prüftechniken sind nur teilweise vorhanden. Die Quantifizierung der POD und die Integration entsprechender Daten in die probabilistische Bewertungskette ist eines der wesentlichen Ziele eines Forschungsvorhabens, dessen erste Ergebnisse hier vorgestellt werden. Zunächst wird auf die verschiedenen POD Anwendungsbereiche eingegangen. Vorgestellt werden dann die konzeptionelle Ausarbeitung des Vorhabens und erste Ergebnisse von Ultraschall Untersuchungen an Testkörpern. Dazu werden die Arbeitspunkte Fehlerverteilungen in den Testkörpern, Versuchsplanung und Prüfanweisung näher behandelt. Ein wichtiges Ziel dieses Vorhabens ist in diesem Zusammenhang die Spezifizierung der Restunsicherheit für das Bauteilversagen, die auf Basis der genannten Untersuchungen. Hierzu wird ein Ausblick gegeben.

1. Einführung

In kerntechnischen Anlagen werden sowohl bei der Fertigung als auch im Zuge von Revisionen zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Art und Umfang der Prüfungen sind im KTA-Regelwerk festgeschrieben. Die Prüfungen müssen in der Kerntechnik

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

grundsätzlich qualifiziert werden. In der Vergangenheit wurden diese Qualifizierungen durch umfangreiche Performance-Demonstrationen der Prüfteams einschließlich ihres Equipments durchgeführt, die gutachterlich beurteilt wurden. Die Arbeiten beinhalteten im Wesentlichen pragmatische Aussagen zum Fehlernachweisvermögen. In den USA qualifizieren sich die Prüfteams bei EPRI zusätzlich an Testkörpern mit verdeckten (unbekannten) Fehlern, von denen ein bestimmter Prozentsatz nachgewiesen werden muss. Eine Möglichkeit das Fehlernachweisvermögen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zu quantifizieren ist die Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD) als statistische Verteilungsfunktion. Diese ist überall dort zu finden, wo Messverfahren eingesetzt werden, deren Resultat über die Angabe einer Zahl mit einem Fehlerintervall innerhalb eines Gültigkeitsbereichs hinausgeht. Eine einfache Messung z. B. einer Temperatur liefert zunächst nur einen Zahlenwert. Die Berücksichtigung möglichst aller Einflussfaktoren, um zur Aussage zu gelangen, ob die tatsächlich vorliegende Temperatur gemessen wurde, führt zur Thematik Detektionswahrscheinlichkeit. Literatur ist hierzu in den verschiedensten Gebieten zu finden (Medizin, Biologie, Werkstoffwissenschaften, Physik, Ingenieurwissenschaften, Telekommunikation etc.). Eine genaue Angabe welcher der aufgezählten Bereiche sich zuerst im Sinne der Ermittlung einer Detektionswahrscheinlichkeit mit diesem Thema beschäftigte, ist nach derzeitigem Stand nicht möglich. Vor allen Dingen sind aber für die im 2. Weltkrieg in der militärischen Luftfahrt genutzte Radartechnologie einige Ursprünge für Fragestellungen zur Detektionswahrscheinlichkeit zu finden. Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung hat das Thema POD in den letzten Jahren hinsichtlich der publizierten Fachartikel deutlich zugenommen (Abb. 1). Dies deutet darauf hin, dass Aspekte zur Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit zunehmend beim Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren Berücksichtigung finden. In den USA werden in dem Normungsgeschehen nach ASTM nur noch Normungsvorschläge zur ZfP diskutiert, wenn die Messunsicherheiten der Methode bekannt sind und dazu ein Konsens besteht.

Eng verknüpft ist mit der statistischen Herangehensweise zur POD Bestimmung der Begriff des Risikos und der wahrscheinlichkeitstheoretischen Beschreibung des Eintretens eines Ereignisses, hier des Auffindens eines Fehlers mittels Ultraschall. Damit wird auch der Aspekt der Sicherheit berührt, der als Grundbedürfnis einer Gesellschaft angesehen werden kann [1]. Die POD Bestimmung liefert ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler bestimmter Größe gefunden wird. Damit wird nicht der Ausnahmefall eines singulären Ereignisses abgedeckt, dass z. B. ein relativ großer Fehler übersehen wird, sondern die realistische Bewertung der Detektionswahrscheinlichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung ermöglicht. Die Wahrscheinlichkeit zu kennen, mit der ein Fehler nachgewiesen werden kann, erlaubt dann die Auswirkungen dieses Fehlers probabilistisch zu bewerten. Das sich daraus ableitende Regelwerk kann nicht am Ausnahmefall ausgerichtet werden, dies ist gesellschaftlich nicht realisierbar [2], sondern am realistischen Nachweisvermögen eines Prüfverfahrens. Mit Kenntnis der POD steigt weder die Wahrscheinlichkeit einer Ausnahme noch fällt sie. Vielmehr ist eine realistische sicherheitsrelevante Auslegung und Bewertung möglich, da letztendlich Risiken bewertet werden können.

Die experimentelle POD Bestimmung, deren Versuchsplanung und Durchführung im Folgenden beschrieben wird, erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens „Einbeziehung der Aussagefähigkeit zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen“ gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung. Vor dem diskutierten Hintergrund der POD Bestimmung sind im Rahmen dieses Vorhabens Ultraschall Untersuchungen mittels Gruppenstrahlerprüfköpfen nach dem konventionellen Phased Array Prinzip [3], den Sampling Phased Array Prinzip [4] im Vergleich zur

Einwinkelprüfung [3] durchgeführt worden. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahler (Phased Array), da der Einsatz dieser Prüfköpfe in den verschiedensten Ultraschallanwendungen aktuell eine stark zunehmende Verbreitung findet, der Einsatz aber in Deutschland noch nicht durch eine Norm geregelt ist. Bislang Im Folgenden werden die im Rahmen dieses Vorhabens geplanten und durchgeführten Untersuchungen sowie die dazugehörigen Testkörper beschrieben.

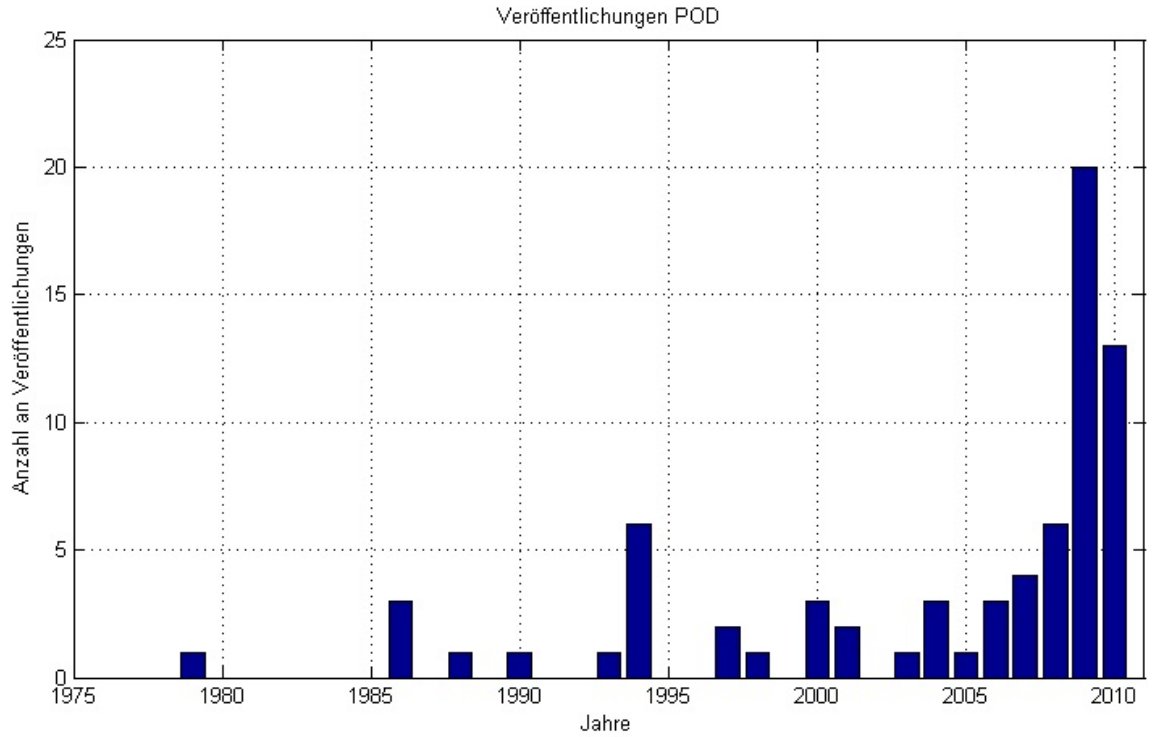


Abbildung 1. Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema POD in der ZfP in den Jahren 1975 bis 2010.

2. Testkörper und Fehlerarten

Untersuchungen zur Bestimmung der POD bedürfen einer gewissen Anzahl von zur Verfügung stehenden Fehlern, so dass eine statistisch abgesicherte Auswertung möglich ist. Für eine binäre Analyse (Fehler gefunden / nicht gefunden) sind mindestens 60 Fehler erforderlich, bei einer quantitativen Analyse des Signals reduziert sich diese Zahl auf 40. Details zur Bestimmung der Anzahl der erforderlichen Fehlerzahl können [5] entnommen werden. Bei den Testkörpern handelte es sich um 29 austenitische Testkörpern mit X bzw. V Schweißnähten, fünf ferritische Testkörper mit austenitischer Plattierung und eine Rohrleitungsschweißnaht (Mischnaht) (Abb. 2).

Insgesamt standen mit diesen Testkörpern über 117 Fehler zur Untersuchung zur Verfügung. Testkörper ohne Fehlstellen sind in diesem Testkörpersatz ebenfalls enthalten. Ergänzend werden während der Projektlaufzeit noch ein weiterer Testkörper mit einer Mischnaht und mehrere Testkörper mit ferritischen Schweißnähten angefertigt. Die Verteilung der in den vorhandenen Testkörpern befindlichen Risse und künstlichen Fehler ist in Abb. 3 gezeigt. Dabei handelt es sich überwiegend um echte Risse (Abb. 4 und 5) und nur in geringer Anzahl um künstlich eingebrachte Nuten. Die erkennbare Asymmetrie in der Verteilung der Fehlergrößen ist wesentlich für eine realistische Versuchsdurchführung,

da im Bereich der kleinen Fehler die Grenzen des Nachweisvermögens liegen und die Nachweiswahrscheinlichkeit größerer Fehler generell höher ist.



Abbildung 2. Untersuchte Testkörper.

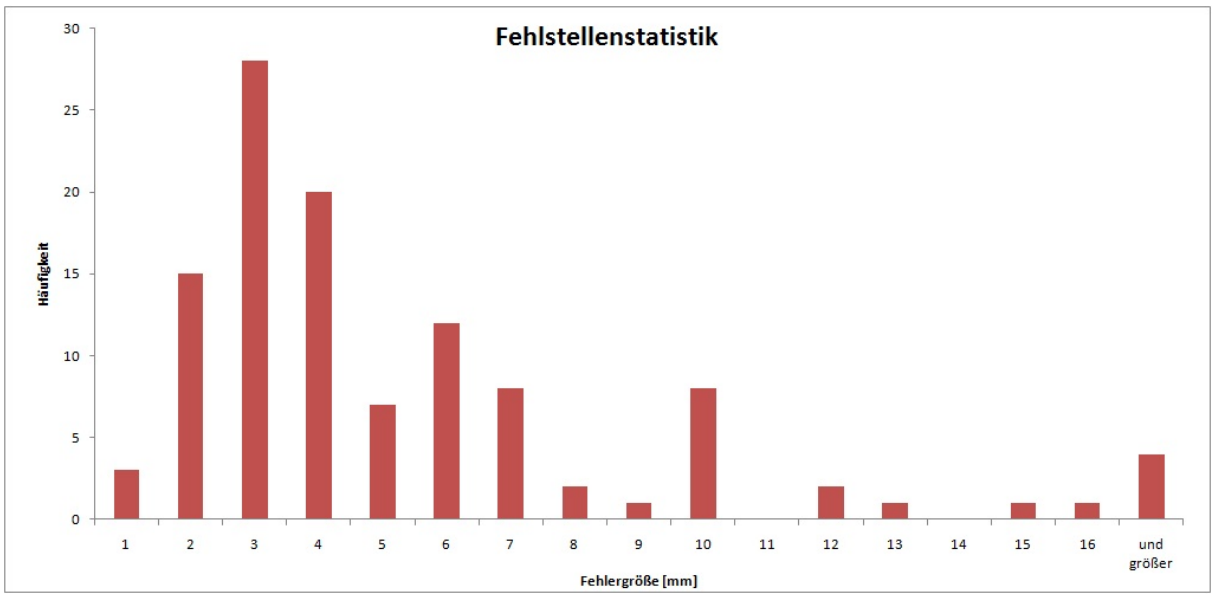


Abbildung 3. Verteilung der Fehlergrößen in den zur Verfügung stehenden Testkörpern.

Die überwiegende Zahl der Fehler in den in Abb. 2 gezeigten Testkörpern sind rissartige Fehler, deren Lage und Tiefe entsprechend verifiziert wurde. Abb. 4 (links) zeigt das Ergebnis einer fluoreszierenden Magnetpulverprüfung nach Abarbeitung der Plattierung an einem abgetrennten Stück von einem der Testkörper. Abb. 4 (rechts) zeigt die Unterplattierungsrisse im Schliffbild.

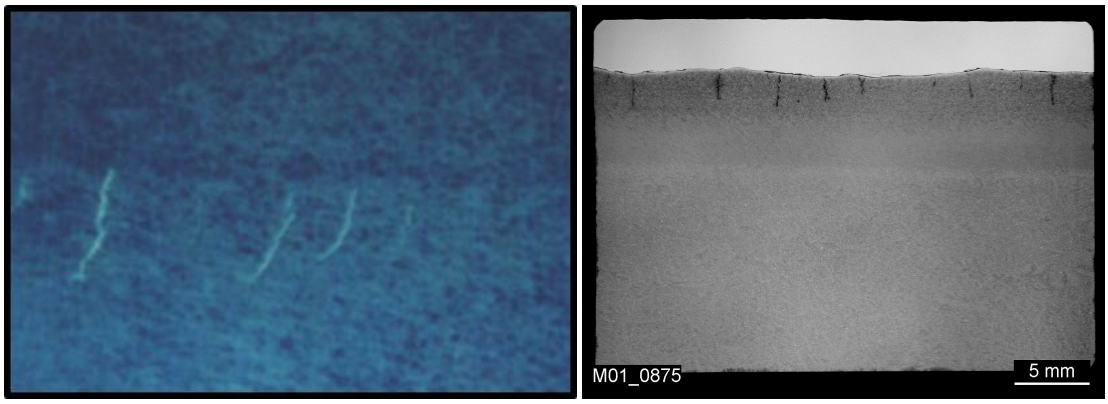


Abbildung 4. Risse in den in dem Vorhaben untersuchten plattierten Testkörpern: Unterplattierungsrisse. Links: Ergebnisse einer fluoreszierenden Magnetpulverprüfung. Rechts: Schliffbild.

Bei den austenitischen Testkörpern wurden interkristalline Spannungskorrosionsrisse, Schwingrisse und Nuten eingebracht. Abb. 5 zeigt Schliffbilder eines Risses neben einer Schweißnaht (links) und im Grundwerkstoff (rechts). Der Rohrleitungstestkörper mit Mischnaht (Abb. 2) enthält künstliche Fehler in Form von funkenerosiv eingebrachten Nuten längs zur Schweißnaht an verschiedenen axialen Positionen.

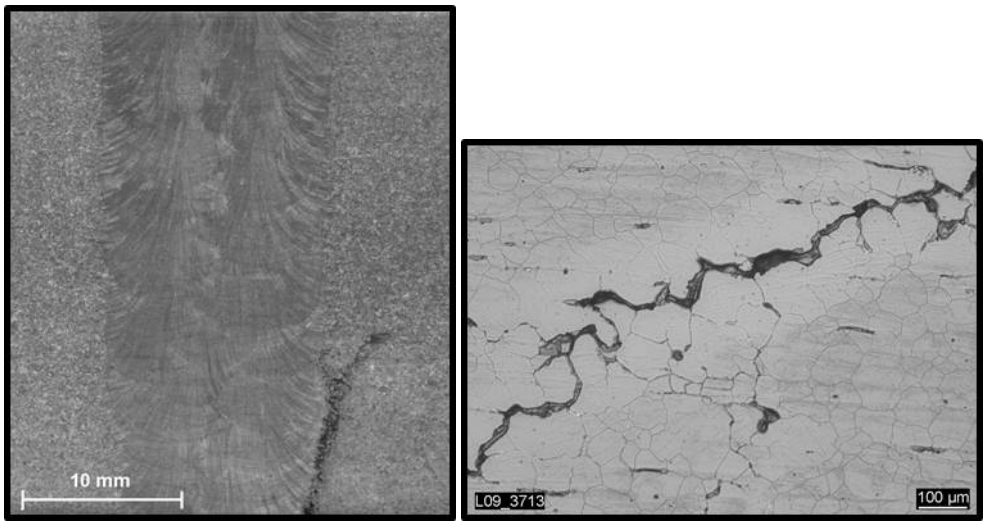


Abbildung 5. Risse in den in dem Vorhaben untersuchten Austenit Testkörpern. Links: Austenit-Probe mit interkristallinem Spannungskorrosionsriss neben der Schweißnaht. Rechts: Riss im Grundwerkstoff.

3. Prüfanweisung und erste Untersuchungen

Für die Durchführung der Prüfungen, deren Daten letztendlich zur POD Bestimmung verwendet werden, ist in Form der Prüfanweisung der Rahmen für die Untersuchungen zu schaffen. Dabei gilt es zu beachten, dass ein zuverlässiges zerstörungsfreies Prüfverfahren sich dadurch auszeichnet, dass eine regelwerkskonforme Anwendung durch eine Reihe von qualifizierten Prüfern zu einem konsistenten Nachweis aller relevanten Fehler führt. Folgende Einflussfaktoren auf das Detektionsvermögen von ZfP Verfahren sind dabei vorhanden: Qualität der Regelwerke, Qualität (auch Tagesform) des Prüfers, Geometrie und Werkstoff der Komponente, Technische Qualität des Messgeräts, Prüfungsumfeld, Orientierung des Fehlers, Werkstoffzustand. Um konsistente Ergebnisse erhalten zu können, sind daher prüf- und werkstofftechnische Aspekte bei Ausarbeitung der Prüfanweisung und Zusammenstellung der Testkörper zu beachten.

Da die Anwendung des Ultraschallprüfung mit Gruppenstrahler (Phased Array) in Deutschland noch nicht durch eine Norm geregelt ist (bislang liegt nur der Entwurf der DIN EN ISO 13588 vor [6]), wurde eine entsprechend umfangreiche Prüfanweisung für die mechanisierte Phased Array-Ultraschallprüfung von Testkörpern erstellt. Diese Prüfanweisung gilt für mechanisierte Prüftätigkeiten der Ultraschallprüfungen mittels Gruppenstrahler-Technik (Phased Array Technik) an austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen sowie an plattierten ferritischen Testkörpern der MPA Universität Stuttgart im Rahmen des Projekts *„Einbeziehung der Aussagefähigkeit zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen“* [7]. Mitgeltende Vorschriften sind: DIN EN 473, ISO/DIS 13588, KTA 3201.3, KTA 3201.4, DIN EN 12668, DIN EN 22825. Die Untersuchungen wurden von drei verschiedenen Prüfteams durchgeführt. Je ein Prüfteam kam von: der MPA Universität Stuttgart, dem IZFP Saarbrücken und intelligeNDT Systems & Services. Dadurch mussten in der Prüfanweisung zwei verschiedene Phased Array Systeme berücksichtigt werden, da intelligeNDT Systems & Services mit SE Prüfköpfen arbeitet. In der Prüfanweisung wurde den Prüfteams Phased-Array-Ultraschallgerät, Manipulatorsteuerung und notwendige Software freigestellt, und es war ein Prüfkopf aus dem Frequenzbereich zwischen 1 und 6 MHz auszuwählen. Letztendlich kamen Prüfköpfe von 1.5, 2.25 und 3 MHz zum Einsatz. Die MPA Universität Stuttgart und das Fraunhofer IZFP Saarbrücken benutzten die gleichen Geräte- und Sensortypen. Der Schussabstand war für alle Testkörper 1 mm und der Spurabstand 2 mm. Ausgewertet wurden die Befunde nach Lage, Amplitude und Abmessungen. Als Registrierhöhe ist in der Prüfanweisung die Bezugshöhe + 6 dB definiert. Alle Anzeigen, deren Echo Höhe bei der eingestellten Verstärkung gleich oder größer als 40% Bildschirmhöhe waren, mussten registriert werden. Die Bewertungskriterien zur Bestimmung der Fehlerart und Fehlergrößen (Tiefenausdehnung, Längsausdehnung) waren freigestellt.

Für die Prüfdurchführung (Abb. 6) wurden entsprechende regelwerkskonforme Referenzkörper zur Verfügung gestellt, wobei für die Untersuchung des Rohrleitungstestkörpers mit Mischnaht ebenfalls die Austenit Referenzkörper zu verwenden waren. Bei den austenitischen Testkörpern erfolgte die Prüfung als Längsfehlerprüfung von beiden Seiten, ebenso beim Mischnaht-Testkörper. Die plattierten Testkörper wurden von der Seite der Plattierung geprüft. Die gesamte Plattierung sowie der angrenzende Grundwerkstoff mussten geprüft werden.



Abbildung 6. An den Testkörpern durchgeführte mechanisierte Prüfungen mitPhased Array prüfköpfen.

Der Großteil der Prüfungen mit Phased Array erfolgte an den Testkörpern in einem komprimierten Zeitfenster. D. h. es wurde ein Zeitfenster vorgegeben, dem zwei der drei Prüfteams die Untersuchungen durchführten. Das dritte Prüfteam dann im Anschluss. Abb. 6 zeigt zwei Fotos von den mechanisierten Prüfungen an den Testkörpern mit Plattierung und den Austenit Testkörpern.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

In der Luftfahrt werden ZfP Qualifizierungsmaßnahmen, und die im Rahmen des dort verwendeten schadenstoleranten Auslegungskonzepts erforderliche POD Bestimmung, durch Bauteilversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt. Durch Kenntnis der POD ist eine realistische sicherheitsrelevante Auslegung möglich, da letztendlich Risiken bewertet werden können. Eine Aussage über die POD bei wiederkehrenden Prüfungen in kerntechnischen Anlagen fehlt bislang. Zur Einbindung zerstörungsfreier Prüfungen in die probabilistische Bewertungskette ist die Bestimmung einer jedoch POD notwendig.

Die Berechnung einer POD erfordert eine statistisch abgesicherte Anzahl an Untersuchungen. Um dies zu gewährleisten, wurden im Rahmen des vorgestellten Forschungsvorhabens verschiedene Testkörper zusammengestellt und daran Ultraschall-untersuchungen durchgeführt. Die systematische Testkörperauswahl und Prüfvorbereitung war ein wesentlicher Arbeitspunkt dieses Vorhabens. Bei der Auswahl der Testkörper wurde darauf geachtet möglichst viele realistische Fehler verwenden zu können. Durch den Einsatz von drei verschiedenen und unabhängigen Prüfteams für die zur Anwendung kommenden Phased Array Techniken ist eine vergleichende POD Bestimmung möglich. Prüfdurchführung und Auswertung der Ultraschalldaten sind noch nicht vollständig abgeschlossen. Die noch durchzuführende POD Bestimmung wird zeigen, wo Optimierungspotential liegt, um möglicherweise den Prüfaufwand reduzieren zu können. Die experimentellen Ergebnisse sollen außerdem durch Simulationen ergänzt und abgesichert werden. Abgesicherte Ergebnisse sind für eine Verknüpfung mit einer bruchmechanischen Bewertung letztendlich erforderlich.

5. Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens „Einbeziehung der Aussagefähigkeit zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen“, Förderkennzeichen 1501386, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technolgie (BMWi) im Rahmen des Reaktorsicherheitsforschungs-programms, durchgeführt. Weiterhin wird allen Prüfteams für die durchgeführten Arbeiten gedankt.

6. Referenzen

[1] Münkler, H., 2011. Essay Sicherheit und Risiko. Spiegel Online, 28. März 2011.
[2] Joffe, J., 2011. Gegen den Strom. DIE ZEIT, No. 14, S. 49.
[3] Moore, P. O. (Ed.), Workman, G. L. (Ed.), Kishoni, D. (Ed.), 2007. Ultrasonic Testing. Nondestructive Testing Handbook 7, 3rd ed. American Society for Nondestructive Testing (ASNT), (Nondestructive Testing Handbook; 7). - ISBN 978-1-57117-105-4.
[4] Bulavinov, A., Joneit, D., Kröning. M., Bernus, L., Dalichow, M.H., Reddy, K.M., 2006. Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. Insight. Vol. 48, No. 9, pp. 545-549.
[5] Anis, C., 2009. MIL-HDBK-1823A. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment. Department of Defense Handbook, Wright-Patterson AFB, USA.
[6] DIN EN ISO 135888, 2010. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Verwendung von (halb-) automatisierter phasengesteuerter Array Technologie (ISO/DIS 13588:2010);Deutsche Fassung prEN ISO 13588:2010.
[7] Pudovikov, S., 2011. Prüfanweisung: Mechanisierte Phased Array-Ultraschallprüfung von Testkörper im Rahmen des Projektes „Einbeziehung der Aussagefähigkeit zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistische Versagensanalysen“. Fraunhofer IZFP, unveröffentlicht.