

# Zuverlässigkeitsbetrachtung zerstörungsfreier Prüfungen mittels experimenteller POD Bestimmung am Beispiel von Ultraschall Phased Array

Jochen H. KURZ\*, Sandra DUGAN\*\*, Anne JÜNGERT\*\*

\* 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](mailto:jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de)

\*\* MPA Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart, Tel. 0711 685 66787, Fax 0711 685 62761,  
E-Mail [anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de](mailto: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. Im Rahmen dieses Vortrags werden die Ergebnisse von Untersuchungen mittels Ultraschall Phased Array an verschiedenen Testkörpern mit realen und realitätsnahen Fehlern vorgestellt. Daraus lassen sich sogenannte POD Kurven berechnen, die eine quantifizierbare Aussage zur Zuverlässigkeit eines Prüfverfahrens für einen Fehlertyp ermöglichen. Auf einige Besonderheiten bei Verwendung von Ultraschall Phased Array Daten wird näher eingegangen werden. Abschließend wird ein Ausblick zur Spezifizierung der Restunsicherheit für das Bauteilversagen auf Basis der genannten Untersuchungen 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 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). Das auch in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) verwendete Prinzip findet insbesondere im Falle binärer Statistiken in verschiedenen Bereichen Anwendung. Literatur ist hierzu in den unterschiedlichen Gebieten zu finden (Medizin, Biologie, Werkstoffwissenschaften, Physik, Ingenieurwissenschaften, Telekommunikation etc. [1-6]). 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 die Quantifizierung der Fehlernachweiswahrscheinlichkeit zunehmend beim Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren Berücksichtigung findet. In den USA werden z.B. in dem Normungsgeschehen nach ASTM nur noch Normungsvorschläge zur ZfP diskutiert, wenn die Messunsicherheiten der Methode bekannt sind. Aufgrund der Entwicklung des schadenstoleranten Auslegungskonzepts in der Luftfahrt [7] war eine enge Verknüpfung von Strukturauslegung und ZfP in diesem Bereich vorgegeben. Eine Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Inspektionen ist bei schadenstoleranter Auslegung essentiell. Daher wurden in diesem Bereich die wesentlichen POD Konzeptentwicklungen vorangetrieben [8] und entsprechende Software entwickelt [9], die auch im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen zum Einsatz kam.

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. 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. Eine Verknüpfung von schädigungsmechanischer Bewertung und ZfP mittels POD wurde schon in einer Reihe von Arbeiten nachgewiesen. Khaleel & Simonen [10] beschreiben ein Modell zur Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeit von Druckgefäßen unter Berücksichtigung von durchgeführten Inspektionen in Form von POD Kurven. Garza & Millwater [11] stellen eine Sensitivitätsanalyse der Versagenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der POD vor. Ein weiterer Ansatz, der POD Informationen und probabilistische bruchmechanische Bewertungen verknüpft ist in [12] gegeben. Kurz et al. [13] beschreiben den Einfluss verschiedener POD Kurven auf die Versagenswahrscheinlichkeit rissartiger Fehler in Pipelines unter Berücksichtigung variierender Werkstoffparameter. Dobmann et al. [14] untersuchten den Einfluss der Verteilung von Werkstoffkennwerten und verschiedenen POD Kurven auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Rohrleitungen. Kwon & Frangopol [15] beschreiben einen Ansatz zur Bewertung der Ermüdungsschädigung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung von durchgeführten Inspektionen in Form der POD. 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 [16], den Sampling Phased Array Prinzip [17] im Vergleich zur Einwinkelprüfung [16] 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. Im Folgenden werden die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen sowie die dazugehörigen Testkörper beschrieben.

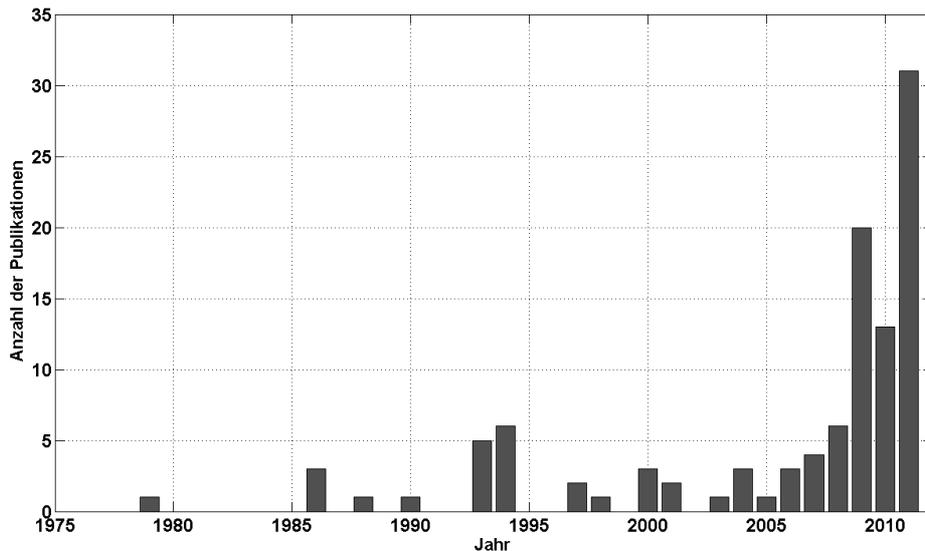


Abbildung 1. Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema POD in der ZfP in den Jahren 1975 bis 2011.

## 2. Testkörper, Fehlerarten und Prüfdurchführung

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 [2] entnommen werden. Bei den Testkörpern handelte es sich um 29 austenitische Testkörpern mit X bzw. V Schweißnähten, fünf ferritische Testkörper mit austenitischer Plattierung, eine Rohrleitungsschweißnaht (Mischnaht) (Abb. 2) und zwei ferritische Schweißnähte.

Insgesamt standen mit diesen Testkörpern über 317 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.

### Dickwandige, plattierte Testkörper



### Austenit Testkörper mit und ohne Schweißnaht



### Rohrleitungstestkörper mit Mischnaht

Abbildung 2. Untersuchte Testkörper.

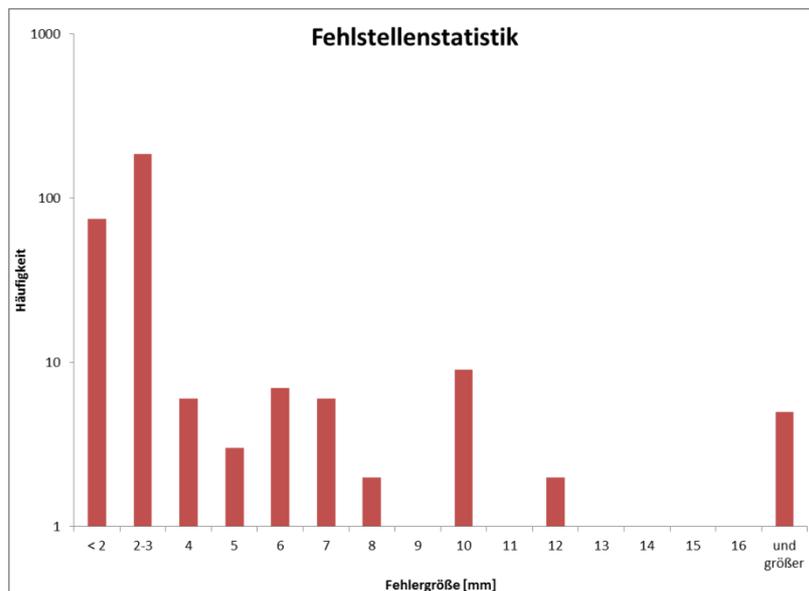


Abbildung 3. Verteilung der Fehlergrößen in den zur Verfügung stehenden Testkörpern.

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 Schlibbild.

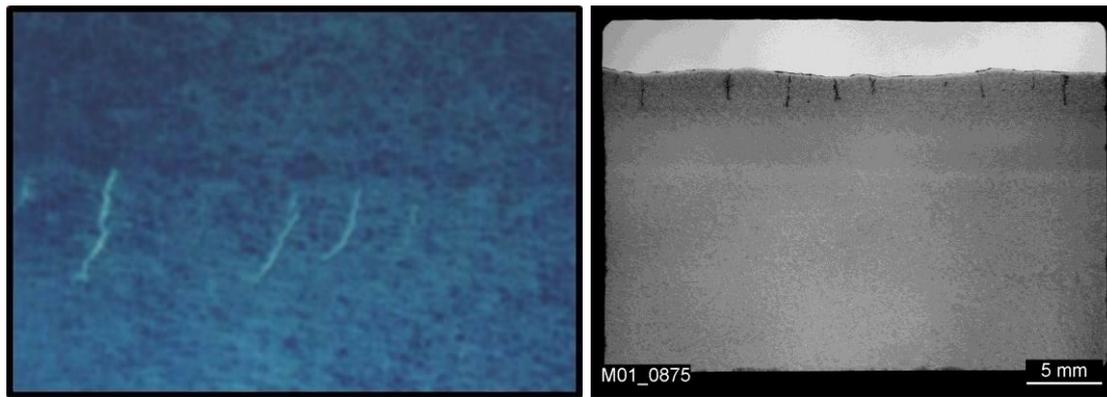


Abbildung 4. Risse in den in dem Vorhaben untersuchten plattierten Testkörpern: Unterplattierungsrisse.  
Links: Ergebnisse einer fluoreszierenden Magnetpulverprüfung. Rechts: Schlibbild.

Bei den austenitischen Testkörpern wurden interkristalline Spannungskorrosionsrisse, Schwingrisse und Nuten eingebracht. Abb. 5 zeigt Schlibbilder 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.

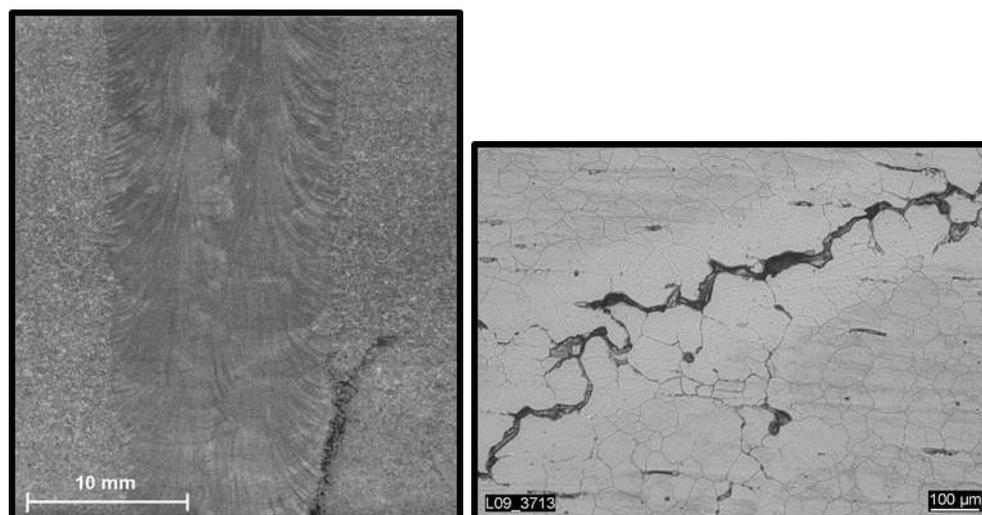


Abbildung 5. Risse in den in dem Vorhaben untersuchten Austenit Testkörpern. Links: Austenit-Probe mit interkristallinem Spannungskorrosionsriss neben der Schweißnaht. Rechts: Riss im Grundwerkstoff.

Für die Durchführung der Prüfungen, deren Daten letztendlich zur POD Bestimmung verwendet werden, war in Form der Prüfanweisung der Rahmen für die Untersuchungen zu schaffen.

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 [18]), wurde eine entsprechend 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“ [19]. 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. 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. Der Schussabstand war für alle Testkörper 1 mm und der Spurbabstand 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 wurden entsprechende regelwerkskonforme Referenzkörper zur Verfügung gestellt, wobei für die Untersuchung des Rohrleitungstestkörpers mit Mischnaht ebenfalls die Austenit Referenzkörper zu verwenden waren. Bei den Austenit 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.

### 3. Ergebnisse

Für die Bestimmung einer POD können sowohl Daten in Form einer Aussage „Fehler gefunden/Fehler nicht gefunden“ (binäre Daten, hit/miss) verwendet als auch eine Korrelation von Signalantwort und Fehlergröße ( $\hat{a}$  vs.  $a$ ) ausgewertet werden. Die Auswertung von hit/miss Daten bedarf einer Maximum-Likelihood Regression, und  $\hat{a}$  vs.  $a$  Daten unter Annahme einer Log-Normal Verteilung können entweder ebenfalls durch eine Maximum-Likelihood Regression bzw. bei nicht-zensierten Daten durch eine einfache lineare Regression bestimmt werden (Details s. [2]). Die hier ausgewerteten Daten, die mittels Phased Array Technik aufgenommen wurden, sind in Form einer  $\hat{a}$  vs.  $a$  POD Berechnung ausgewertet worden. Die  $\hat{a}$  vs.  $a$  Analyse wurde ursprünglich für die Verwendung der direkten Signalantwort entwickelt, wobei Signalantwort und Fehlergröße direkt korrelieren. Dies ist bei Phased Array Daten nicht möglich, da hier eine Registrierlänge für die Größenbestimmung ausgewertet wird. Aus diesem Grund war zunächst nachzuweisen, dass die ermittelten Daten auch für eine POD Analyse verwendet werden können, d. h. dass auf die zu Grunde liegenden Modelle anwendbar sind. Hierfür müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden: Linearität zwischen Fehlergröße und Prüfsystemantwort (hier ermittelte Fehlergröße), Normalverteilung der Prüfsystemantworten, unkorrelierte Prüfsystemantworten müssen vorliegen, die Homogenität der Varianzen der Prüfsystemantworten muss ebenfalls gegeben sein. Der Nachweis, dass die hier mittels Ultraschall Phased Array Technik aufgenommenen Daten diese vier Randbedingungen erfüllen ist in [20] beschrieben.

Ein wesentlicher Punkt bei der Bestimmung der POD nach der  $\hat{a}$  vs.  $a$  Methode ist die Bestimmung des Entscheidungsschwellwerts. Hierdurch wird der Wert der Fehlergröße mit 50% Detektionswahrscheinlichkeit und somit die Lage der POD Kurve relativ zur x-Achse festgelegt. Für die Bestimmung des Entscheidungsschwellwerts war es für die Phased Array Daten erforderlich ein neues Kriterium zu entwickeln, da für die POD hier die ermittelte über der tatsächlichen Fehlergröße aufgetragen wird und nicht die Signalantwort in Form eines Amplitudenwerts. In letzterem Fall könnte, wie sonst üblich, z. B. das Detektionskriterium (6 dB über Registrierschwelle) verwendet werden. Hier aber ist eine Längeninformation für den Entscheidungsschwellwert erforderlich. Es wäre natürlich möglich, den Entscheidungsschwellwert einfach auf den größten nicht

detektierten Fehler zu legen. Allerdings besteht so nicht die Möglichkeit, False Positive Anzeigen zu berücksichtigen. Als Kriterium wurde daher die Standardabweichung der Verteilung der Abweichung der Fehlergrößenbestimmung gewählt. Eine genaue Beschreibung dieses Ansatzes ist in [20] zu finden.

Damit sind die Grundvoraussetzungen zur Berechnung der POD nach den in [2] beschriebenen Modellen erfüllt. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen entsprechend berechnete POD Kurven ( $\hat{a}$  vs.  $a$  Methode) von Daten, die mittels Ultraschall Sampling Phased Array Technik (Abb. 6 und 7, links) und konventioneller Ultraschall Phased Array Technik (Abb. 6 und 7, rechts) an den in Abschnitt 2 beschriebenen Austenit Testkörpern aufgenommen wurden. Dafür wurde die mh1823 Software verwendet [9].

Die Mehrzahl der Austenit Testkörper enthielt reale Risse (27), jedoch standen auch neun Ersatzfehler in Form von schrägen Nuten unterschiedlicher Tiefe zur Verfügung. Der Einfluss dieser Ersatzfehler auf die POD wurde im Rahmen der Analyse der Daten ebenfalls untersucht. Abbildung 6 (links) zeigt die berechnete POD Kurve der mittels Sampling Phased Array Technik (SPA) aufgenommenen Daten ohne die genannten Ersatzfehler, Abbildung 6 (rechts) die entsprechende POD Kurve der mittels Phased Array Technik (PA) aufgenommenen Daten. Der Entscheidungsschwellwert lag bei den SPA Daten bei 3,2 mm, der der PA Daten bei 3,6 mm. Die 90% POD mit einem Konfidenzintervall von 95% ( $a_{90/95}$ ) liegt bei den SPA Daten bei 7,9 mm und bei den PA Daten bei 10,4 mm. Der POD Wert von 50% ( $a_{50}$ ), d.h. der Wert, bei dem eine 50% Detektionswahrscheinlichkeit vorliegt, liegt bei den SPA Daten bei 2,6 mm und bei den PA Daten bei 5,3 mm. Ein Abgleich mit Erfahrungswerten von anderen Untersuchungen mittels Phased Array Technik zeigt, dass die  $a_{50}$  Werte plausibel sind.

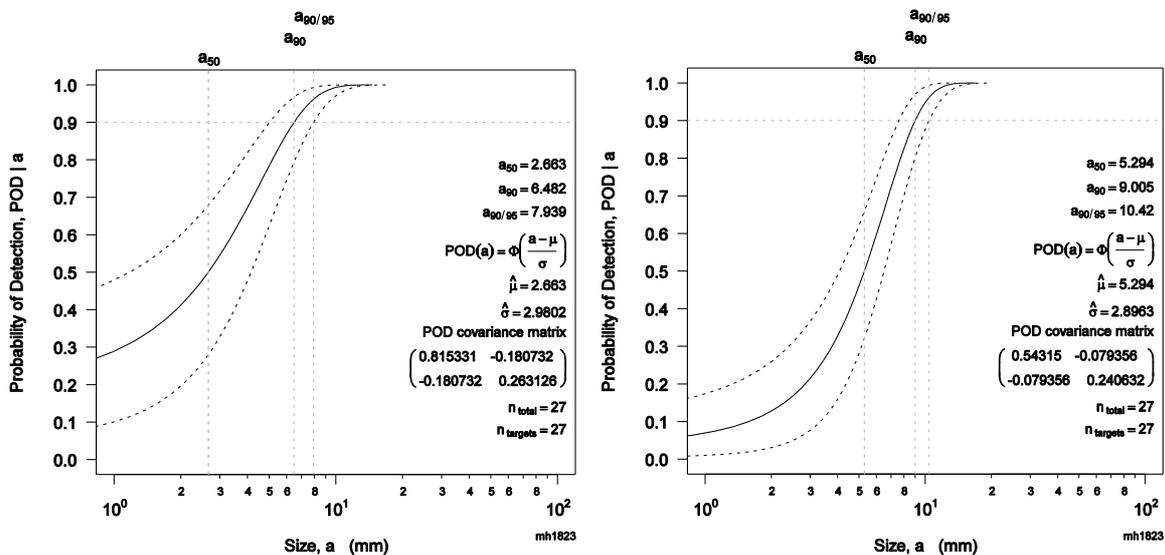


Abbildung 6. POD Kurven zu den Messungen an den Austenit Testkörpern ohne Ersatzfehler. Für die POD Berechnung wurde die mh1823 Software [9] verwendet. Links: POD Kurve der Ergebnisse, die mittels Sampling Phased Array Technik erzielt wurden. Rechts: POD Kurve der Ergebnisse, die mittels Phased Array Technik (Team I) erzielt wurden.

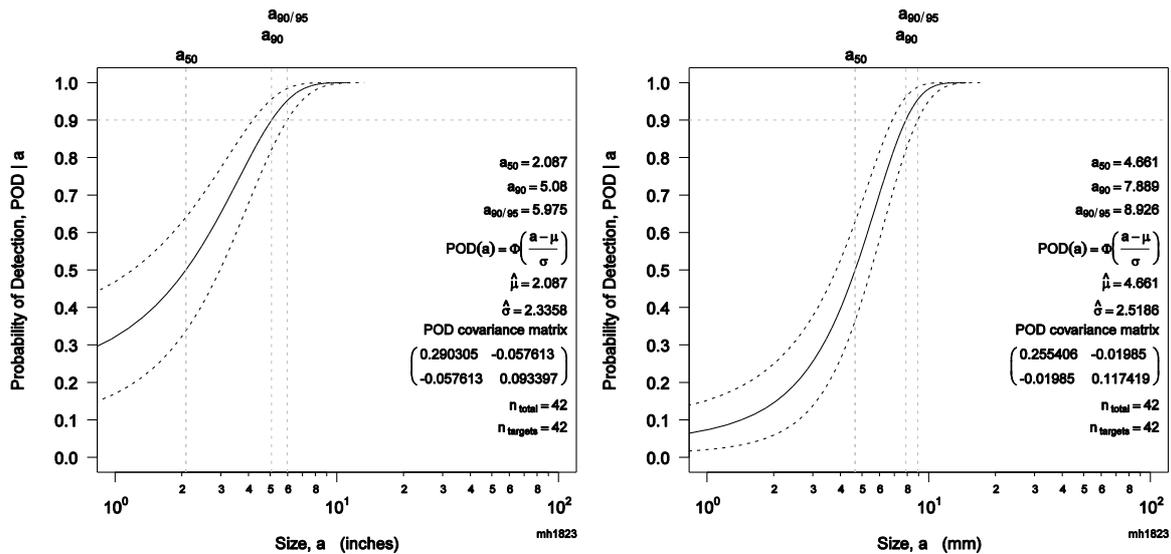


Abbildung 7. POD Kurven zu den Messungen an den Austenit Testkörpern inklusive Ersatzfehler. Für die POD Berechnung wurde die mh1823 Software [9] verwendet. Links: POD Kurve der Ergebnisse, die mittels Sampling Phased Array Technik erzielt wurden. Rechts: POD Kurve der Ergebnisse, die mittels Phased Array Technik (Team I) erzielt wurden.

Bei zusätzlicher Verwendung der Daten, die an den Testkörpern mit Ersatzfehlern (schräge Nuten) aufgenommen wurden, zeigt sich, dass wie zu erwarten die Kennwerte der POD Kurven besser werden (Abb. 7). Der SPA  $a_{90/95}$  Wert sinkt auf 5,9 mm und der PA  $a_{90/95}$  Wert auf 8,9 mm, ebenso wird das Konfidenzintervall schmäler. Da die Abweichung bei der Bestimmung der geometrischen Abmessungen der Ersatzfehler generell kleiner ist als bei realen Rissen, war dies zu erwarten. Anhand der  $a_{90}$  Werte aus den Abbildungen 6 und 7 ist erkennbar, dass hier der Unterschied bei Berücksichtigung von Ersatzfehlern im Mittel bei 1,2 mm liegt.

#### 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.

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 Ultraschalluntersuchungen mit mehreren Prüfteams 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. Die aufgenommenen Daten sind auch mit den für eine POD Bestimmung erforderlichen Randbedingungen konform.

Die wesentlichen Kennwerte der POD Kurven, die mit den SPA und PA Daten von den Austenit Testkörpern berechnet wurden, stimmen mit Erfahrungswerten überein. Weiterhin ist ein deutlicher Unterschied bei zusätzlicher Verwendung von Ersatzfehlern, deren

geometrische Abmessungen genauer bestimmt werden können, gegeben. Es ist daher an den Ergebnissen erkennbar, dass für quantitative Aussagen zur Fehlernachweishrscheinlichkeit auch reale Risse verwendet werden sollten oder ein entsprechender Korrekturfaktor eingeführt werden müsste.

## 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 Technologie (BMWi) im Rahmen des Reaktorsicherheitsforschungsprogramms, durchgeführt. Weiterhin wird allen Prüfteams für die durchgeführten Arbeiten gedankt.

## 6. Referenzen

- [1] Schoefs F, Clement A, Nouy A. Assessment of ROC curves for inspection of random fields. *Structural Safety* 2009; 31: 409-419.
- [2]. Annis C. MIL-HDBK-1823A. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment. Department of Defense Handbook, Wright-Patterson AFB, USA 2009.
- [3] Georgiou GA. Probability of Detection (PoD) curves. Derivation, application and limitations, Jacobi Consulting Limited, Research Report 2006: 454.
- [4] Kharin VV, Zwiers FW. On the ROC Score of Probability Forecasts. *Journal of Climate* 2003; 16: 4145-4150.
- [5] Sabelnikov A, Zhukov V, Kempf R. Probability of real-time detection versus probability of infection for aerosolized biowarfare agents: A model study. *Biosensors and Bioelectronics* 2006; 21 (11): 2070-2077.
- [6] Alvseike O, Skjerve E, Probability of detection of Salmonella using different analytical procedures, with emphasis on subspecies diarizonae serovar 61:k:1,5,(7) [S. IIIb 61:k:1,5,(7)]. *International Journal of Food Microbiology* 2000; 58 (1-2): 49-58.
- [7] Gallagher JP, Giessler FJ, Berens AP. USAF Damage Tolerant Design Handbook: Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 1984.
- [8] Berens AP. NDE Reliability Data Analysis. In: ASM Handbook, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 3rd Edition, ASM International USA 1994; 17: 689-701.
- [9] Annis C. Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models. R package mh1823, Version 2.5.4.4 <http://StatisticalEngineering.com/mh1823/> 2010.
- [10] Khaleel MA, Simonen FA. A model for predicting vessel failure probabilities including the effects of service inspection and flaw sizing errors. *Nuclear Engineering and Design* 2000; 200: 353-369.
- [11] Garza J, Millwater H. Sensitivity of probability-of-failure estimates with respect to probability of detection curve parameters. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2011; doi:10.1016/j.ijpvp.2011.11.009.
- [12] Kurz JH, Cioclov DD, Dobmann G. On the Integrating of Non-Destructive Testing and Probabilistic Fracture Mechanics. In: Graubner, CA (Ed.), Schmidt H (Ed.). Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Proceedings of 6th International Probabilistic Workshop. Darmstadt, Technische Universität 2008: 43-56.
- [13] Kurz JH, Cioclov D, Dobmann G, Boller C. Quantitative NDI Integration with Probabilistic Fracture Mechanics for the Assessment of Fracture Risk in Pipelines. In: Proceedings of 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, Berlin, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) 2009: p. 10 (DGZfP-Berichtsbände 116-CD).
- [14] Dobmann G, Cioclov DD, Kurz JH. NDT and fracture mechanics. How can we improve failure assessment by NDT? Where we are – where do we go? *Insight* 2011; 53 (12): 1-5.
- [15] Kwon K, Frangopol DM. Bridge fatigue assessment and management using reliability-based crack growth and probability of detection models. *Probabilistic Engineering Mechanics* 2011; 26: 471-480.
- [16] Moore PO (Ed.), Workman GL (Ed.), Kishoni D (Ed.). Ultrasonic Testing. *Nondestructive Testing Handbook* 7, 3rd ed. American Society for Nondestructive Testing (ASNT), (Nondestructive Testing Handbook; 7); 2007: ISBN 978-1-57117-105-4.
- [17] Bulavinov A, Joneit D, Kröning M, Bernus L, Dalichow MH, Reddy KM. Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging. *Insight* 2006; 48 (9): 545-549.

- [18] DIN EN ISO 13588, 2010. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Verwendung von (halb-) automatisierter phasengesteuerter Array Technologie (ISO/DIS 13588:2010);Deutsche Fassung prEN ISO 13588:2010.
- [19] 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.
- [20] Kurz JH, Jüngert A, Dugan S, Dobmann G. Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments. In: South-African Insitute for Non-destructive Testing: World Conference on Nondestructive Testing (18), WCNDT 2012; paper 329.