

# Potential der POD(a)-Analyse in der Quantifizierung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien Prüfsystemen im kerntechnischen Bereich

Sascha FEISTKORN, Daniel ALGERNON, Michael SCHERRER, Klaus DRESSLER  
SVTI - Schweizerischer Verein für technische Inspektionen; Nuklearinspektorat  
Richtistrasse 15, 8304 Wallisellen, Schweiz

**Kurzfassung.** Bei der zerstörungsfreien Prüfung von drucktragenden Bauteilen in kerntechnischen Anlagen werden in Abhängigkeit des zu untersuchenden Bauteils Qualifizierungsfehler definiert, die zu detektieren sind und hinsichtlich ihrer Größe und Lage erfasst werden müssen. Das dafür verwendete Prüfsystem (Prüfanweisung, Prüfpersonal, Prüfgeräte) wird als qualifiziert betrachtet, wenn der vorher definierte Qualifizierungsfehler in praktischen Demonstrationen an realistischen Testkörpern zuverlässig detektiert und in seinen relevanten Eigenschaften ausreichend genau beschrieben wurde. Im Bereich der US-amerikanischen Luftfahrt wurde für eine ähnliche Problemstellung auf dem Gebiet der Fehlerauffindung das statistische Konzept der POD(a)-Analyse entwickelt, um beispielsweise die Detektionswahrscheinlichkeit von oberflächennahen Rissen zu quantifizieren. Dieses statistische Konzept wird mittlerweile auch im kerntechnischen Bereich vereinzelt angewendet. Dieser Beitrag soll die Möglichkeiten aufzeigen, wie die Aussagesicherheit bei der zerstörungsfreien Prüfung von kerntechnischen Anlagen durch die Anwendung von POD(a)-Analysen quantifiziert werden kann.

## 1 Einführung

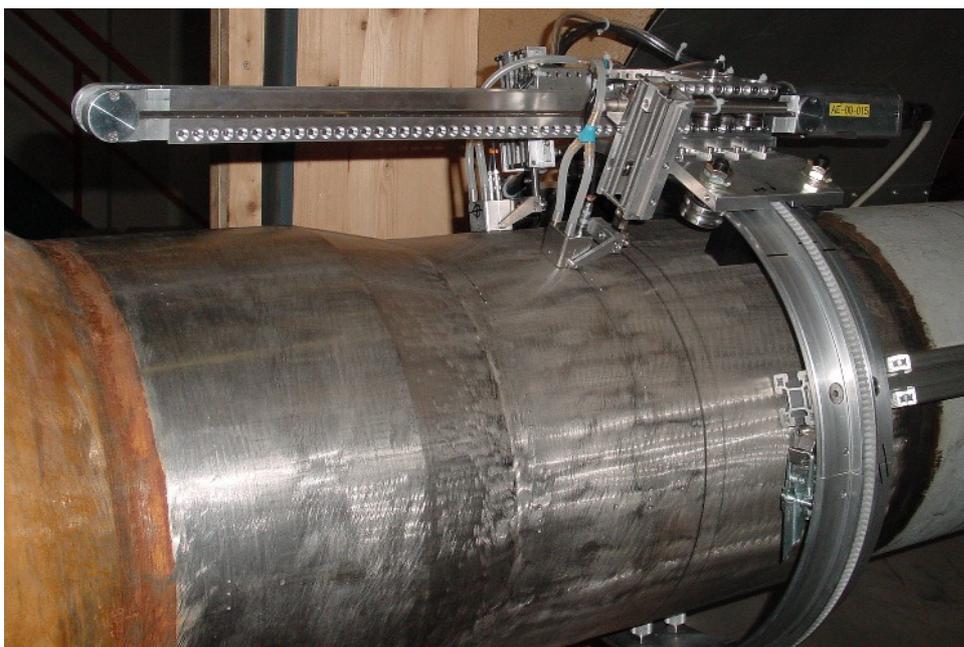
Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird die Methodik zur Qualifizierung von Prüfsystemen für zerstörungsfreie Prüfungen in den kerntechnischen Anlagen der Schweiz an einem Beispiel vorgestellt. Es geht hierbei um die Übernahme eines Prüfsystems, welches nach der PDI-Methodik (ASME Code Section XI, Appendix VIII [1]) im Rahmen von Praktischen Demonstrationen qualifiziert worden ist. Es gilt festzustellen, ob das Prüfsystem die gestellten Anforderungen der ENSI-Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen B07 [2] erfüllt. Das Prüfsystem besteht hierbei aus dem Prüfpersonal, den Prüfgeräten und der Prüfprozedur.

Weiterhin wird in diesem Artikel anhand des vorgestellten Beispiels erläutert, welches Potential das Konzept der POD(a)-Analyse (Probability of Detection) in der Quantifizierung der Aussagesicherheit haben könnte und in welchen Einsatzgebieten die POD(a)-Analyse in Zukunft im kerntechnischen Bereich die Ermittlung der Zuverlässigkeit unterstützen kann.

## 2 Methodik der Qualifizierung für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von ZfP-Prüfsystemen im kerntechnischen Bereich

In den kerntechnischen Anlagen der Schweiz wird für die zerstörungsfreie Untersuchung drucktragender Bauteile im Rahmen einer Qualifizierung eine zulässige Fehlergröße für das entsprechende Bauteil auf Grundlage bruchmechanischer Untersuchungen festgelegt. Die zulässige Fehlergröße zu einem fixen Prüfzeitpunkt beschreibt hierbei einen Fehler, dessen Abmessungen nach einem festgelegten Prüfintervall mit einem entsprechendem Risswachstum noch unterhalb der kritischen Fehlergröße liegen. Die Qualifizierungsfehlergröße wird aus dieser zulässigen Fehlergröße abgeleitet. Der so definierte Qualifizierungsfehler ist nun mithilfe einer Prüfanweisung (aufgestellt von der entsprechenden Prüffirma) aufzufinden, wobei diese Prüfanweisung das zerstörungsfreie Prüfsystem und das Vorgehen zur Fehlerauffindung genau beschreibt. Qualifiziert wird die Prüfanweisung bei einer unabhängigen Institution - in der Schweiz ist dies die Qualifizierungsstelle ZfP Schweiz (QSt) -, indem Praktische Demonstrationen an realistischen Testkörpern als Blindtests oder offene Tests durchgeführt werden und analysiert wird, ob die festgelegte Qualifizierungsfehlergröße aufgefunden werden kann. Wenn nun eine vorher festgelegte Anzahl von Fehlern detektiert und in ihren Größenabmessungen ausreichend genau bestimmt werden kann, gilt die Prüfanweisung als qualifiziert. Auch muß das Prüfpersonal (Datenaufnahmepersonal und Datenauswerter) in Praktischen Demonstrationen zeigen, dass es in der Lage ist, die Prüfanweisung richtig anzuwenden und das gesetzte Qualifizierungsziel zu erreichen. Die Prüfmanipulatoren werden ebenfalls für die vorgesehene Aufgabenstellung qualifiziert. Nach erfolgreichem Abschluss der Praktischen Demonstrationen kann dann das komplette Prüfsystem für die entsprechenden Prüfaufgaben an realen Bauteilen angewendet werden. Die QSt stellt dafür entsprechende Zertifikate aus.

Anhand einer mechanisierten Ultraschallprüfung von austenitischen Rundschweißnähten wird die vorgestellte Qualifizierungsmethodik für den kerntechnischen Bereich der Schweiz näher erläutert. Wie aus Bild 1 ersichtlich, besteht die Schwierigkeit bei der Prüfung dieser Rundnaht sowohl in ihrem austenitischen Gefüge als auch in der konischen Rohrgeometrie und der damit verbundenen begrenzten einseitigen Zugänglichkeit.



**Bild 1:** mechanisiertes Ultraschallsystem zur Prüfung von austenitischen Rundschweißnähten mit Außendurchmessern zwischen 324 mm und 632 mm und Wanddicken zwischen 15 mm und 45 mm

Die möglichen Schadensmechanismen sind interkristalline Spannungsrisskorrosion und Risse infolge von Materialermüdung im Grundmaterial bzw. in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht, die von der medianbenetzten Innenoberfläche ausgehen. Aufgrund der bruchmechanischen Betrachtungen des ASME Codes Section XI [1], Division 1, IWB-3514.3, werden die Qualifizierungsfehlergröße der Längs- und Querfehler festgelegt. Die so ermittelten Fehlergrößen müssen dann in praktischen Demonstrationen mit einer vorgegebenen Zuverlässigkeit detektiert werden.

Tabelle 1 stellt die Geometrie der verwendeten Testkörper aus warmumgeformtem austenitischem Chrom-Nickel-Stahl dar, bei denen die Rohroberfläche außen kerbfrei beschliffen und innen wie geschweißt belassen wurde. Durch die Nahtüberhöhung auf der äußeren Oberfläche ergibt sich bei der Qualifizierung eine erschwerte Prüfsituation.

**Tabelle 1:** Aufbau, modellierte Schadensmechanismen und Prüfaufgaben der verwendeten Testkörpersets bei der PDI-Qualifizierung

	<b>Wanddicke/Rohraußen-durchmesser in mm</b>	<b>Postulierter Schadensmechanismus</b>	<b>Prüfaufgaben</b>
<b>Testkörperset 1</b>	11.0/152.0	Ermüdung	Detektion, Positionierung, Längenbestimmung
<b>Testkörperset 2</b>	12.7 - 41.0/324.0 - 711.0	Ermüdung; interkristalline Spannungsrisskorrosion	Detektion, Positionierung, Längenbestimmung, Bestimmung der Tiefenausdehnung

Der Qualifizierungsfehler hat im vorliegenden Fall folgende Eigenschaften:

- Fehlerorientierung: Längs- und Querfehler
- Fehlertiefe:  $\geq 10\%$  der Rohrwanddicke
- Fehlerlänge:  $\geq 20$  mm
- Lage: im Grundwerkstoff und der Wärmeeinflusszone, ausgehend von der inneren Oberfläche

Im Rahmen der praktischen Demonstrationen bedeutet dies, daß jeder Fehler, der diese Abmessungen erreicht oder überschreitet, vom ausgewählten Prüfsystem detektiert werden muß.

Für die zugrunde liegende PDI-Qualifizierung kann die Verteilung der Fehlertiefenausdehnung für das Testkörperset aus dem ASME Code Section XI, Division 1, Mandatory Appendix VIII, Supplement 2 (Qualification Requirements For Wrought Austenitic Piping Welds) [1] ausgelesen werden. Die QSt hat überprüft, dass die für die schweizerische Qualifizierung maßgebliche Qualifizierungsfehlergröße in diesem Testkörperset angemessen vertreten ist. Diese Testfehler sollen den realen Testfehlern infolge der zu erwartenden Schadensmechanismen (Ermüdung, Spannungsrisskorrosion) möglichst nah kommen. Dies hat zur Folge, daß an die künstlichen Fehler und somit an deren Herstellung hohe Anforderungen gestellt werden.

**Tabelle 2:** Anforderungen an die einzubringenden Testfehler bei der PDI-Qualifizierung

<b>Fehlerdetektion</b>	<b>Fehlerlängenbestimmung</b>	<b>Fehlertiefenbestimmung</b>
maximal 10 % der eingebrachten Testfehler für die Detektion sind Querfehler	$\geq 1/3$ der eingebrachten Testfehler zwischen 5 – 30 % der nominalen Wanddicke	$\geq 1/5$ der eingebrachten Testfehler zwischen 5 – 30 % der nominalen Wanddicke
	$\geq 1/3$ der eingebrachten Testfehler > 30 % der nominalen Wanddicke	$\geq 1/5$ der eingebrachten Testfehler zwischen 31 – 60 % der nominalen Wanddicke
		$\geq 1/5$ der eingebrachten Testfehler zwischen 61 – 100 % der nominalen Wanddicke

Nach der Festlegung der Testkörpergeometrie und der einzubringenden Testfehler wird nun eine Prüftechnik und ein Prüfsystem ausgewählt, welches für die beschriebene Prüfaufgabe von der Qualifizierungsstelle ZfP Schweiz (QSt) in der Regel auf Basis praktischer Demonstrationen an den erstellten Testkörpern qualifiziert wird. Im vorliegenden Fall wurde ein mechanisiertes Ultraschall-Phased-Array-Prüfsystem verwendet, welches in zwei Achsen verfahren werden kann. Dieses Prüfsystem wird in der einzureichenden Prüfvorschrift genau beschrieben (Kontrolleinheit, Prüfkopf, Kabel etc.), so dass das Prüfsystem, basierend auf der Festlegung der Prüfproblematik, des Testkörpers und der Prüftechnik, nun bei der QSt qualifiziert werden kann.

Hierbei hat sich in der Regel ein zweistufiger Qualifizierungsablauf etabliert. Im ersten Schritt erfolgt die Qualifizierung der Prüfvorschrift, des Prüfmanipulators und des Datenaufnahmepersonals (Kalibrierung und Aufzeichnung der Messdaten), wobei dies in einem offenen Test erfolgen kann. In diesem Fall sind den Prüfern die Lage, Anzahl und Größe der Testfehler bekannt. Deshalb wird hauptsächlich darauf geachtet, ob die Prüfvorschrift plausibel ist und ob nach dieser Anleitung geprüft werden kann. Weiterhin wird der Prüfmanipulator hinsichtlich der Positioniergenauigkeit sowie der Reproduzierbarkeit getestet.

Nachdem die Zuverlässigkeit des Prüfsystems bei der Datenaufnahme bestätigt wurde, findet im zweiten Schritt eine praktische Demonstration des Auswertepersonals in der Regel als Blindtest statt. Dies bedeutet, daß den Kandidaten sowohl die Lage, als auch die Anzahl und die Größe der Testfehler nicht bekannt sind. In diesem Teil der Qualifizierung wird überprüft, ob die Testfehler detektiert werden und ob die Bestimmung der Fehlerabmessungen (Fehlerlänge und Fehlertiefe) eine bestimmte Mess- und Positioniergenauigkeit nicht überschreitet.

Im vorliegenden Fall wird die Prüfvorschrift nur dann qualifiziert, wenn im offenen Test 100 % der Testfehler, die größer als der Qualifizierungsfehlergröße sind, detektiert werden, die Fehlerlängenbestimmung eine Messungenauigkeit von RMS 3 mm nicht überschreitet und die Fehlertiefenausdehnung keine größere Messungenauigkeit als 19 mm aufweist. Auf die Berechnung der Messungenauigkeit wird an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen.

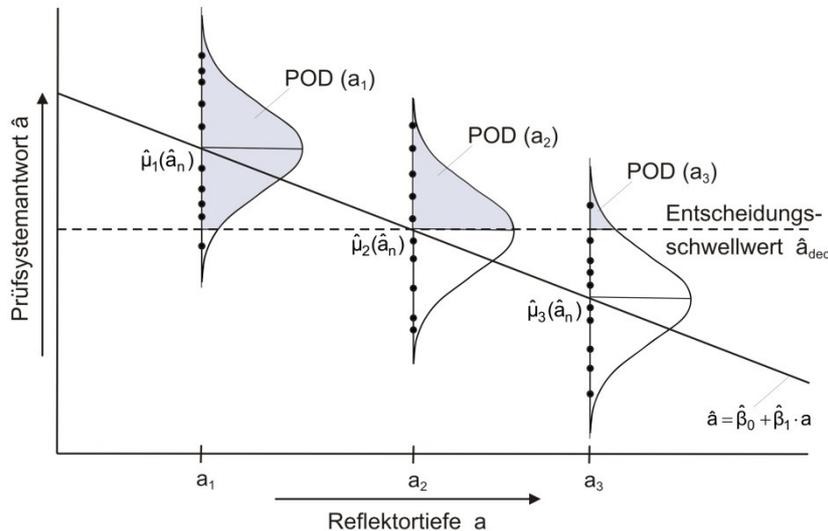
Im Normalfall reicht es im zweiten Teil der Qualifizierung der Datenauswertung aus, wenn das Personal im entsprechenden Blindtest 80% der Testfehler detektieren (wobei jeder Testfehler von mindestens einem Datenauswerter detektiert werden muß) und deren Größenabmessungen in einem ebenfalls vorgegebenen Rahmen richtig angeben kann.

Zusammengefasst wird also im Prozess der Qualifizierung geprüft, ob das ausgewählte Prüfsystem die Anforderungen erfüllt, um die gestellte Prüfaufgabe unter den gegebenen Randbedingungen zuverlässig zu lösen.

### **3 Konzept der POD(a)-Analyse für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von ZfP-Prüfsystemen im Rahmen einer Qualifizierung**

Eine andere Vorgehensweise zur Bewertung der Zuverlässigkeit eines Prüfsystems wurde im Bereich der US-amerikanischen Luftfahrt entwickelt ([3], [4]). Hier wird das statistische Konzept der POD(a)-Analyse genutzt, um beispielsweise die Tiefe  $a$  eines Reflektors (z. B. eines Fehlers), in der dieser Reflektor mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit noch zu detektieren ist, quantitativ zu beschreiben. Das Prinzip der POD(a)-Analyse beruht hierbei auf einem physikalischen Zusammenhang zwischen dieser charakteristischen Größe  $a$  (also der Tiefenlage des Reflektors) und einer Prüfsystemantwort  $\hat{a}$  (z. B. einer Signalamplitude). Bild 2 stellt eine mögliche Grundlage der POD(a)-Analyse – das  $\hat{a}$  vs.  $a$  Modell – dar, in dem die Prüfsystemantworten  $\hat{a}$  den Tiefenlagen  $a$  eines Reflektors zugeordnet werden.

Nach der Festlegung eines Schwellwerts wird im Allgemeinen der Kennwert  $a_{90/95}$  berechnet. Dieser Wert beschreibt die Größe von  $a$ , in diesem Fall also Tiefenlage des Fehlers, in der dieser mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% im 95% Konfidenzintervall detektiert werden kann. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird aus Platzgründen auf die POD(a)-Analyse nicht weiter eingegangen, sondern auf [3], [4], [6] und [7] verwiesen.



**Bild 2:** Darstellung des  $\hat{a}$  vs.  $a$  Modells als Grundlage der POD(a)-Analyse am Beispiel der Detektion von Reflektoren in Abhängigkeit ihrer Tiefenlage

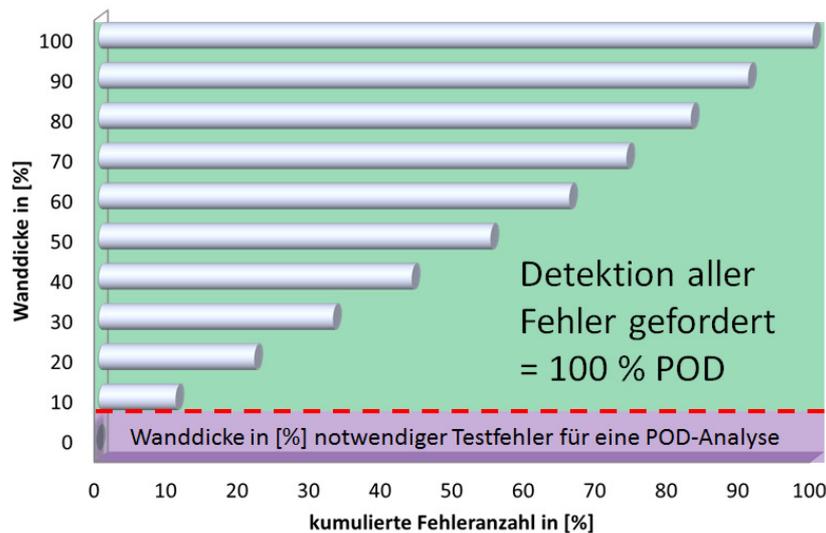
Zusammengefasst hat die Vorgehensweise der POD(a)-Analyse den Vorteil, daß sie als qualitatives Gütekriterium dient und einen objektiven Kennwert liefert, anhand dessen die Zuverlässigkeit eines ZfP-Systems für eine bestimmte Prüfaufgabe quantitativ bewertet werden kann. Unter Zuverlässigkeit versteht man hierbei den Grad, mit dem ein ZfP-System in der Lage ist, den vorgesehenen Zweck bezüglich der Entdeckung, der Charakterisierung und der Falschanzeigen zu ermitteln [5]. Ist die so ermittelte Risslänge  $a_{90/95}$  kleiner als die Risslänge, die entsprechend den Vorgaben aufgefunden werden muß, ist das Prüfsystem für die Lösung der Prüfaufgabe geeignet [6], [7].

Weiterhin können mit der Methode der POD(a)-Analyse unterschiedliche ZfP-Systeme, die für die Lösung dieser bestimmten Prüfaufgabe in Frage kommen, objektiv anhand des Kennwerts  $a_{90/95}$  miteinander verglichen und somit ihre Zuverlässigkeit bei der Lösung der Prüfaufgabe eingeschätzt werden. Generell ist jedoch zu beachten, daß eine POD(a)-Kurve die Zuverlässigkeit eines ZfP-Systems immer nur für eine konkrete Prüfaufgabe angibt, sodass die Gültigkeit der Aussage auf den Umgebungskontext des ZfP-Systems beschränkt ist [6], [7].

#### 4 Kombination der Qualifizierungsmethodik in der Kerntechnik mit der POD(a)-Analyse

Die Idee der Kombination beider Methoden zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Prüfsystems liegt darin, daß mithilfe der POD(a)-Analyse die Aussagesicherheit im kerntechnischen Bereich quantifiziert werden könnte, also ob eine Aussage möglich ist, welche Fehlergröße (z. B.  $a_{90/95}$  in mm) noch zuverlässig detektiert werden kann. Dazu wird untersucht, ob die POD(a)-Analyse auf das in Kapitel 2 erläuterte Beispiel übertragen werden kann. Zu diesem Zweck ist die in Tabelle 2 dargestellte Testfehlerpopulation nach den Anforderungen des ASME Codes Section XI, Division I, Mandatory Appendix VIII, Supplement 2 (Qualification Requirements For Wrought Austenitic Piping Welds) [1] für

die Fehlertiefenbestimmung grafisch in Bild 3 zusammengestellt. Im Folgenden wird nun überprüft, ob die geforderte Fehlerverteilung für die PDI-Qualifizierung die Anforderungen an die POD(a)-Analyse erfüllt.



**Bild 3:** Beispiel für die Fehlertiefenverteilung in einem Testkörper auf Grundlage der Anforderungen des ASME Codes Section XI für die Fehlertiefenbestimmung im Rahmen der PDI-Qualifizierung

In Bild 3 ist die kumulierte prozentuale Fehleranzahl der Fehlergröße gegenübergestellt, wobei diese als prozentuale Wanddicke dargestellt wird - bei gleichzeitiger Annahme einer Gleichverteilung der Fehler über die Wanddicke. Daraus ergibt sich, daß z. B. ein Anteil von 10 % aller Fehler eine Größe von 10 % der Wanddicke aufweist. Weitere 10 % der Fehler haben eine Größe bis 20 % der Wanddicke, sodass aufsummiert 20 % der Fehler eine Größe zwischen 0 % bis 20 % der Wanddicke zuzuordnen ist. Die Anforderungen an die Größenverteilung der Fehlertiefen in den entsprechenden Testkörpern für die PDI-Qualifizierung liegen hierbei ebenfalls dem ASME Code Section XI [1] zugrunde.

Vergleicht man diese Randbedingungen der Fehlerverteilung für eine Qualifizierung mit den Anforderungen, die an eine gültige POD(a)-Analyse im Regelfall nach [3] gestellt werden, kommt man zu folgendem Ergebnis:

- Für eine aussagekräftige POD(a)-Analyse sind nach [3] im Idealfall 30 bis 40 Testfehler nötig. Diese Testfehlerzahl ist jedoch aufgrund der hohen Herstellungskosten im kerntechnischen Bereich im Normalfall nicht realisierbar. Neue Ansätze, die Testfehlerpopulation unter bestimmten Umständen zu reduzieren, könnten hier zukünftig eine Rolle spielen.
- Weiterhin müssen die Fehlergrößen für eine gültige POD(a)-Analyse zwischen 10% und 90% Detektionswahrscheinlichkeit liegen. Wird die Leistungsgrenze des ausgewählten Ultraschallprüfsystems betrachtet, so liegt diese im Fall einer Fehlerdetektion im Bereich von Fehlergrößen zwischen 5% bis 10 % der Wanddicke (siehe Bild 3). Dies bedeutet, daß die eingebrachten Fehler mit dem ausgewählten Prüfsystem im Regelfall zu 100 % detektiert werden können und deshalb kein Detektionsproblem vorliegt, da die eingebrachten Testfehler nicht im Bereich der Leistungsgrenzen des Prüfsystems liegen.

Somit eignet sich die POD(a)-Analyse im vorgestellten Beispiel nicht dafür, die Aussagesicherheit zu quantifizieren, da eine Anwendung dieser Methodik aufgrund der vorliegenden Randbedingungen nicht zielführend ist.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurde die Qualifizierungsmethodik im kerntechnischen Bereich der Schweiß am Beispiel der Ultraschallprüfung von austenitischen Rundschweißnähten vorgestellt. Diese Methodik beruht auf der Einzelfallqualifizierung eines zerstörungsfreien Prüfsystems im Rahmen von praktischen Demonstrationen. Anschließend wurde kurz auf die POD(a)-Analyse eingegangen, die für die Gütebewertung von qualitativen Prüfaufgaben, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, angewendet wird. Diese Anwendbarkeit der Methode, die eine objektive Aussage zur Detektionswahrscheinlichkeit eines Fehlers in Abhängigkeit seiner Eigenschaften trifft, wurde dann an dem vorgestellten konkreten Beispiel pragmatisch überprüft. Aufgrund der Anforderungen an die Fehlergrößen im Rahmen der PDI-Qualifizierung stellte sich die POD(a)-Methode in diesem Fall als ungeeignet dar, da der ASME Code bei der Bemessung der Komponenten entsprechende Tragreserven berücksichtigt und die Bauteilquerschnitte dadurch nur gering ausgelastet werden. Zusätzlich liegt der zu detektierende Qualifizierungsfehler mit einer Fehlertiefe von 10 % der Wanddicke weit unterhalb der bruchmechanisch kritischen Fehlergröße, die bei ca. 70 % der Wanddicke liegt. Zusammen mit den Verfahrensgrenzen eines Prüfsystems, die im Fall einer reinen Fehlerdetektion zwischen 5 % und 10 % der Wanddicke liegen und der in der Qualifizierung der Prüfvorschrift geforderten 100 %-igen Detektion ist ersichtlich, daß der Fehlergrößenbereich für eine PDI-Qualifizierung (ab 10 % der Wanddicke) nicht deckungsgleich mit der notwendigen Fehlerverteilung für eine gültige POD(a)-Analyse (Verfahrensgrenzen ungefähr zwischen 5 % und 10 % der Wanddicke) ist.

Eine zusätzliche wichtige Prüfaufgabe ist im kerntechnischen Bereich jedoch durch die notwendige genaue Tiefenbestimmung von Testfehlern gegeben, um ihre Zulässigkeit prüfen zu können. Die Fehlertiefe wird hierbei ermittelt, indem der Abstand zwischen der Rissspitze und dem Fußpunkt einer Anzeige bestimmt wird. Dies setzt jedoch die Detektion dieser beiden Anzeigen eines Fehlers voraus. Somit beruht die Tiefenbestimmung einer Auffälligkeit im kerntechnischen Bereich auf einem Detektionsproblem, sodass eine qualitative Prüfaufgabe der quantitativen Risstiefenbestimmung zugrunde liegt. Für diese Prüfaufgabe könnte deshalb die POD(a)-Analyse eine objektive Aussage liefern, also unter welchen Randbedingungen eine Rissspitzenanzeige oder eine Fußpunktanzeige zuverlässig detektiert werden kann. Anschließend kann die Genauigkeit der Risstiefenbestimmung auf Grundlage der durchgeführten POD(a)-Analysen ermittelt werden. Da es sich dabei um eine metrische Fragestellung handelt, ist die Angabe der Messunsicherheit von besonderer Bedeutung, da auf Grundlage der Fehlertiefenmessung eine Aussage getroffen wird, ob die Anzeige zulässig ist oder nicht. Im vorliegenden Fall setzt sich die Messunsicherheit aus mehreren Einflüssen (z. B. Ankopplungsbedingungen, Oberflächenbeschaffenheit, Prüfgerät, Ausbreitungsgeschwindigkeit etc.) zusammen, sodass die Messunsicherheit analytisch aus allen einwirkenden Einflussgrößen bestimmt werden muß, indem Unsicherheitsbeiträge, die einer Einflussgröße zugeordnet werden können, quantifiziert werden. Dazu stellt der GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, [8]) eine Methodik zur Verfügung, die ausführlich in [7] und [9] erläutert ist.

Ein weiteres Einsatzgebiet für die POD(a)-Analyse im kerntechnischen Bereich kann in der Zuverlässigkeitsbewertung von Serienprüfungen liegen. In diesem Bereich wurde die POD(a)-Analyse beispielsweise schon für die Gütebewertung von Prüfsystemen bei Heizrohrprüfungen in Wärmetauschern erfolgreich eingesetzt [10], [11].

Zusammengefasst kann die POD(a)-Analyse im kerntechnischen Bereich somit bei ausgewählten Prüfaufgaben angewendet werden. So eignet sich die POD(a)-Analyse neben der Bewertung von Serienprüfungen auch im Rahmen von zukünftigen

Qualifizierungsvorhaben dazu, die Genauigkeit der Fehlertiefenbestimmung im Anschluss an eine POD(a)-Analyse zu quantifizieren.

## Referenzen

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2010, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Includes 2011 Addenda Reprint, American Society of Mechanical Engineers / 01-Jul-2010 / 574 pages, ISBN: 9780791832561
- [2] Sicherheitstechnisch klassierte Behälter und Rohrleitungen: Qualifizierung der zerstörungsfreien Prüfungen, Ausgabe September 2008, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen B07
- [3] MIL-HDBK-1823A, Department of Defence Handbook, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, 7. April 2009
- [4] Berens, A. P.: NDE Reliability Analysis, Reprinted from METALS HANDBOOK® Volume 17, 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, University of Dayton Research Institute, ASM International 1989
- [5] Müller, C., Ewert, U., Pavlovic, M., Scharmach, M., Ronneteg, U. und H. Ryden: Zuverlässigkeit von ZfP-Verfahren zur Gewährleistung der Integrität von Cu-Schweißnähten zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle In: DGZfP; DGZfP-Jahrestagung 2007, Fürth, 14.-16. Mai 2007, Berichtsband 104-CD, ISBN 978-3-931381-98-1
- [6] Feistkorn, S.: Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradars. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 603, Beuth Verlag, Berlin (2012), Dissertation
- [7] Taffe A. und S. Feistkorn: Methoden zur Gütebewertung von ZfPBau-Verfahren, in: Beton- und Stahlbetonbau 108 (4). 2013
- [8] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
- [9] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation
- [10] United States Nuclear Regulatory Commission (US NRC), prepared by D.S. Kupperman, S. Bakhtiari, W.J. Shack, J.Y. Park, and S. Majumdar: Eddy Current Reliability Results from the Steam Generator Mock-up Analysis Round-Robin, NUREG/CR-6791 Revision 1 ANL-08/30, Date Published: October 2009
- [11] Electric Power Research Institute (EPRI): Steam Generator Management Program: Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines, Revision 7, Final Report, October 2007