

POD, aber wie? Konzeption und Herstellung von Testkörpersätzen und Prüfvorschriften für die experimentelle Zuverlässigkeitsbestimmung von ZfP- Prüfansätzen

Anne JÜNGERT¹, Thomas HECKEL², Viktoriya TKACHENKO², Marija BERTOVIĆ²,
Johannes VRANA³, Daniel KANZLER⁴

¹ MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

³ Vrana GmbH, Rimsting

⁴ Applied Validation of NDT, Berlin

Kontakt E-Mail: anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Im Rahmen des WIPANO Vorhabens „normPOD“ wird eine Richtlinie zur experimentellen und simulationsgestützten Zuverlässigkeitsbewertung erstellt. In der Richtlinie wird die Zuverlässigkeitsbewertung beispielhaft für zwei praktische Anwendungsfälle vorgestellt. Ein Anwendungsfall beschäftigt sich mit konventionellen Ultraschallprüfungen an ferritischen Stählen und deren Schweißnähten.

Zur Berechnung von Probability-Of-Detection (POD)-Kurven ist es notwendig, dass ein geeigneter Testkörpersatz zur Verfügung steht, der sowohl leicht zu findende Fehlstellen als auch Fehlstellen, die an der Grenze der Detektierbarkeit liegen, enthält. Im Vorhaben kommen verschiedene Testkörper zum Einsatz, die entweder Ersatzfehler wie Nuten und Bohrungen oder künstlich eingebrachte realistische Fehlstellen wie Risse und Schweißfehler enthalten.

Zur Erstellung eines möglichst allgemeinen Leitfadens zur Testkörperherstellung für die Zuverlässigkeitsbewertung werden verschiedene Möglichkeiten betrachtet. Es wird ein Testkörpersatz mit Ersatzfehlern hergestellt und durch Testkörper mit realistischen Fehlstellen ergänzt. Mit Hilfe von Simulationen mit CIVA sollen die optimalen Konfigurationen und Anordnung von realistischen Fehlstellen und Ersatzfehlern identifiziert, und anschließend mithilfe geeigneter Fertigungsverfahren eingebracht und validiert werden. Neben den Testkörpern, die gezielt für das Vorhaben hergestellt werden, kommen außerdem kommerziell erhältliche Testkörpersätze mit realistischen Fehlstellen zum Einsatz.

Die Prüfaussage einer Ultraschallprüfung hängt weiterhin wesentlich von den Informationen ab, die dem Prüfpersonal vor Ort zur Verfügung steht. Es muss ein ausgewogenes Maß zwischen zu wenig und zu viel Informationen gefunden werden. Im letzten Schritt wird deshalb eine geeignete Vorlage für eine Prüfanweisung erstellt, die so formuliert ist, dass die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler (z. B. Missverständnis, Fehlinterpretation, Überspringen von Schritten usw.) möglichst gering ist.



Einführung

Die Zuverlässigkeitsbewertung zerstörungsfreier Prüfungen spielt in vielen Industriezweigen eine zunehmend große Rolle. In sicherheitskritischen Komponenten, z.B. in Kraftwerken, ist es wichtig, dass mit zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) bei wiederkehrenden Prüfungen alle relevanten Fehlstellen mit ausreichend großer Zuverlässigkeit detektiert werden, um den ausfallfreien Betrieb der Komponenten zu gewährleisten. In vollautomatisierten Fabriken werden ZfP-Untersuchungen in die Produktionsprozesse integriert um Herstellungsdefekte sicher auszuschließen. Dies führt dazu, dass ZfP-Dienstleister und Auftraggeber gleichermaßen interessiert sind, die Zuverlässigkeit der verwendeten Prüfsysteme zu quantifizieren und die Prüfsysteme vergleichbar zu machen. Hierfür fehlt bisher ein Leitfaden zur Ermittlung der Zuverlässigkeit.

Zur Zuverlässigkeitsbewertungen von ZfP-Verfahren wird heutzutage oft die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit oder Probability of Detection (POD) verwendet. Zur Ermittlung der POD steht als Richtlinie z.B. das für die Luftfahrt erstellte MIL-HDBK-1823 zur Verfügung [1].

Im Rahmen des Forschungsvorhabens NormPOD wird nun eine aktuelle Richtlinie erstellt, die Beispiele für die Ermittlung experimenteller und simulationsgestützter POD-Kurven für zerstörungsfreie Prüfverfahren enthält [2]. Das allgemeine Vorgehen im Vorhaben ist in [3] beschrieben. In der geplanten Richtlinie sollen alle Schritte, die zur Ermittlung einer korrekten POD notwendig sind, anhand konkreter Beispiele erläutert werden. Eines der Beispiele bildet die Ultraschallprüfung ferritischer geschweißter Bauteile. Diese Prüfung wird in der Regel nach aktuell geltenden Normen [4] durchgeführt und die Prüfung ist bei idealen Bedingungen von qualifiziertem Personal problemlos durchführbar.

Die Auswahl geeigneter Testkörpersätze ist essenziell für die spätere Ermittlung einer POD. Die in den Testkörpern enthaltenden Fehlstellen müssen verschiedene Kriterien erfüllen, die im Folgenden vorgestellt werden.

Speziell für Prüfaufgaben im Bereich kerntechnischer Anlagen, wurden bereits PODs für Ultraschallprüfungen experimentell ermittelt [5]. Hierfür wurden Testkörpersätze verwendet, die den speziellen Fragestellungen kerntechnischer Komponenten gerecht werden. Diese Testkörpersätze lassen sich für die hier geforderten grundsätzlicheren und allgemeineren Fragestellungen nicht verwenden.

1. Testkörper

Um die POD eines ZfP Verfahrens zu ermitteln, ist es notwendig eine ausreichend große Anzahl unabhängiger Prüfungen mit dem Verfahren durchzuführen, damit anschließend eine statistische Auswertung stattfinden kann. Zur POD-Ermittlung aus den Prüfergebnissen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die entweder allein die Detektion einer Fehlstelle verwenden, oder die mit dem Verfahren ermittelte Fehlstellengröße ebenfalls in Betracht ziehen. In allen Fällen ist es notwendig, die Größe der Fehlstelle zu kennen, um die POD in Beziehung mit der Fehlergröße zu setzen.

Im Vorhaben werden verschiedene Testkörpersätze auf ihre Eignung für die POD-Ermittlung hin untersucht. Neben kommerziell erstellter Testkörpersätze mit künstlich erzeugten Rissen Fehlstellen, kommen auch speziell hergestellte Testkörper mit Ersatzfehlern zum Einsatz.

1.1 Risse vs. Ersatzfehler

Grundsätzlich sollen die für die POD-Ermittlung verwendeten Testkörper realistisch sein im Hinblick auf die spätere Prüfaufgabe. Entsprechend müssen auch die Fehlstellen realistisch

sein. Bei der Herstellung realistischer Testkörper müssen verschiedene Kriterien berücksichtigt werden, die in Abbildung 1 zusammengefasst sind. Zunächst muss der Werkstoff der Testkörper den späteren Prüfobjekten im Hinblick auf die Prüfeigenschaften übereinstimmen. Das bedeutet, dass der Werkstoff sich bei Anwendung des Prüfverfahrens möglichst ähnlich verhalten sollte, wie es später im Einsatz zu erwarten ist. Dies ist die Grundvoraussetzung für einen realistischen Testkörper.

Die weiteren Kriterien bilden Geometrie, Fehlerart und Fehlerlage. Sie sind in Abbildung 1 als Venn-Diagramm dargestellt. Ein möglichst realistischer Testkörper enthält demnach einen realistischen Fehler (z.B. einen künstlich erzeugten Riss) in realistischer Lage (z.B. Riss in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht) und eine realistische Geometrie (z.B. Rohrleitungsschweißnaht) und läge im Diagramm im Feld 4. Für die POD-Ermittlung ist jedoch zusätzlich wichtig, dass die Fehlergröße für die spätere statistische Auswertung vorliegt. Für einen Riss bedeutet das, dass die Risstiefe bekannt sein muss, für eine Pore muss der Durchmesser bekannt sein. Dies ist nicht für alle Testkörperkonfigurationen gegeben.

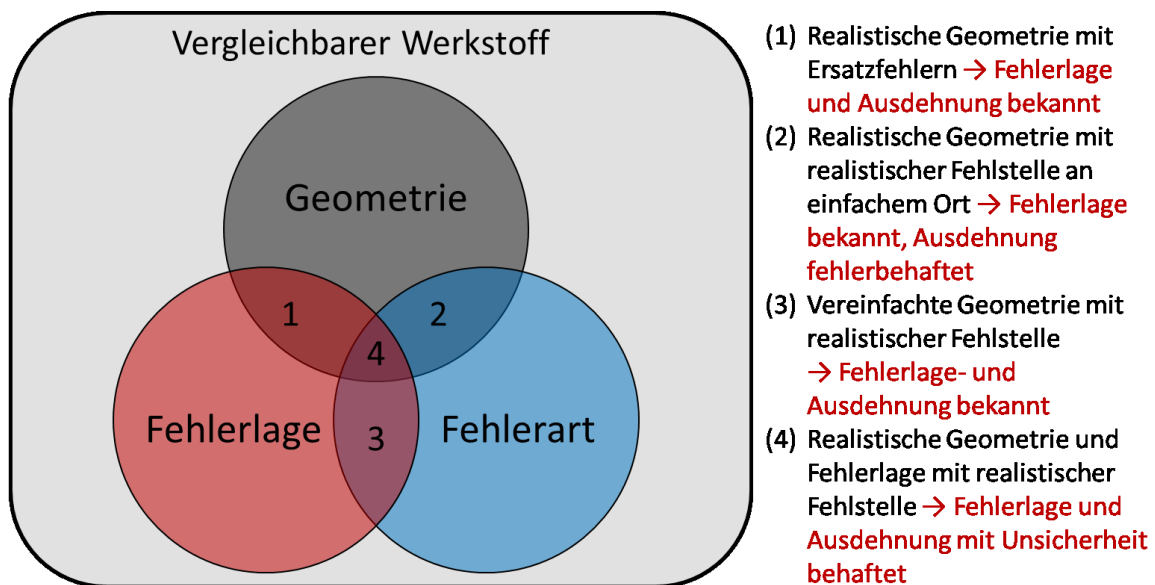


Abbildung 1: Was macht einen realistischen Testkörper aus?

In der Praxis ist die Bestimmung der realen Fehlergröße mit einem weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren oft schwierig. Ein Beispiel hierfür bilden absichtlich erzeugte Schweißfehler, wie Bindefehler und Poren, in Rohrleitungsschweißnähten, die mit Ultraschall geprüft werden. Der Testkörper ist hinsichtlich der Geometrie und Herstellung, der Fehlerlage und der Fehlerart realistisch. Die tatsächliche Fehlerausdehnung ist allerdings nicht bekannt und kann aus Röntgenaufnahmen nur abgeschätzt werden. Dies bildet für POD-Ermittlungen einen erheblichen Nachteil und meist sind diese Testkörpersätze ungeeignet.

Deshalb ist es sinnvoll für die POD-Ermittlung Testkörper zu verwenden, die in die Felder 1, 2 und 3 einzuordnen sind. Die Testkörper sind dann nur hinsichtlich 2 von 3 Kriterien realistisch, jedoch wird eine Fehlergrößenbestimmung über ein Referenzverfahren möglich. Es ist einfacher, realistische Fehlstellen, wie künstlich erzeugte Risse in Platten- oder riegelförmigen Testkörpern zu erzeugen als in ganzen Rohrsegmenten. In Rohrsegmente können allerdings sehr einfach Ersatzfehler in Form von Nuten und Bohrungen in die Bereiche der erwarteten Fehlerlage eingebracht werden. Für die Berechnung von POD-Kurven ist die Verwendung von Ersatzfehlern vorteilhaft, da die Fehlergröße bekannt ist und die Fehlergrößenverteilung selbst festgelegt werden kann.

1.2 Verteilung von Fehlergrößen

Die Prüfungen an den Testkörpern sollen statistisch auswertbar sein. Es müssen demnach in den Testkörpern Fehlstellen unterschiedlicher Größe enthalten sein. Man geht davon aus, dass kleinere Fehlstellen auch schwieriger zu detektieren sind und mit größerer Wahrscheinlichkeit übersehen werden. Es existiert eine minimale Fehlergröße unterhalb derer die Fehlstellen nicht mehr detektiert werden. Diese kann durch physikalische Grenzen der Prüfverfahren gegeben sein, also für das Beispiel der Ultraschallprüfung, wenn sich das Signal vom Rauschpegel nicht mehr abhebt. In der Prüfpraxis wird in der Regel durch Prüfanweisungen oder Normen eine Registrierschwelle angegeben, unterhalb derer Fehlstellen nicht mehr registriert werden. Die minimal auffindbare Fehlergröße ist dann durch die Registrierschwelle gegeben.

Gleichermaßen werden Fehlstellen, die eine bestimmte Größe überschreiten, mit einer POD von nahe an 100% detektiert. Soll ein Testkörpersatz für eine Hit/Miss-Analyse erstellt werden, also eine Statistik auf Basis einer binären gefunden/nicht gefunden-Aussage, ist es wichtig, dass eine ausreichend große Anzahl von Fehlstellen enthalten ist, die sich zwischen der minimal detektierbaren Fehlergröße und der Fehlergröße bewegen, ab der alle Fehlstellen detektiert werden. Demnach muss schon vor der Testkörperherstellung ein Gefühl für die zu erwartenden minimalen und maximalen Fehlergrößen bestehen.

Es kann jedoch vorkommen, dass ein Testkörpersatz lediglich Fehlstellen enthält, die so eindeutig zu detektieren sind, dass eine 100 % POD für alle enthaltenen Fehlstellen erreicht wird. Hier sind statistische Auswertungen allein aus einer Hit/Miss-Analyse nicht mehr möglich. Es kann zusätzlich die bestimmte Fehlergröße und der Vergleich mit der tatsächlichen Fehlergröße zur Rate gezogen werden.

Ebenso kann es dazu kommen, dass die Fehlstellen insgesamt zu klein gewählt wurden und nur mit großer Anstrengung detektiert werden können. Diese Testkörpersätze sind für eine sinnvolle POD-Ermittlung nicht gut geeignet.

2. Testkörperherstellung für Ultraschallprüfungen

In der Richtlinie, die im genannten Vorhaben erstellt werden soll, wird eine Schweißnahtprüfung mit Ultraschall als Beispielverfahren präsentiert. Es sollte dafür ein geeigneter Testkörpersatz erworben, bzw. erstellt werden.

Zunächst wurde ein Testkörpersatz bestehend aus ferritischen Platten mit Rissen auf der einen Seite, beschafft. Da das Ultraschallverfahren sehr empfindlich selbst auf kleinste Risse reagiert, wurde versucht, möglichst kleine Risse zu erzeugen. In mehreren Platten wurden kleine Risse erzeugt. In der Praxis erwiesen sich die kleinen Risse insgesamt als schwer zu detektieren. Zusätzlich zum hohen Schwierigkeitsgrad der Prüfung an sich, fehlten bei den künstlich erzeugten Rissen Angaben zur Risstiefe. Die Risstiefe lässt sich lediglich grob aus den Anzeigenlängen abschätzen, die über eine Magnetpulverprüfungen ermittelt wurden. Es war mit keinem anderen Referenzverfahren möglich, genauere Aussagen über Risstiefen zu erhalten. Verwendet wurde hierfür z.B. Ultraschall TFM/FMC, Ultraschall TOFD und hochauflösende Magnetfeldsensoren (BAM-GMR-Sensor). Diese Testkörper sind demnach für die Bestimmung einer POD für die Ultraschallprüfung nicht geeignet.

2.1 Geplante Ersatzfehlerkonfigurationen

Im Vorhaben wird deshalb ein Testkörpersatz mit Ersatzfehlern in den Schweißnahtflanken und der Schweißnahtwurzel hergestellt. Hierfür stand an der MPA Stuttgart Material in Form von ferritischen Rohrleitungen (Außendurchmesser 273 mm) zur Verfügung. Eine Nahtvorbereitung für eine 60° V-Naht wurde eingebracht. Die Schweißnähte wurden über

WIG-Handschiessen hergestellt und mit Magnetpulverprüfung und Röntgenprüfung auf Fehlstellen geprüft. Es wurden keine unzulässigen Fehlstellen an den Oberflächen und im Volumen detektiert.

Rohrleitungstestkörper bieten sich für die Durchführung von POD-Ermittlungen an, da die Prüfungen in der Regel blind durchgeführt werden. Beim Einbringen von Testfehlern an der Rohrinneenseite, sind die Testfehler für den Prüfenden nicht sichtbar, sofern das Rohr auf beiden Seiten verschlossen wird. Rohrleitungsschweißnähte sind zudem eine Standardprüfungsaufgabe überall dort, wo Röntgenprüfungen z.B. aufgrund der Zugänglichkeit, nicht möglich sind.

Im nächsten Schritt werden nun Ersatzfehler in die Testkörper eingebracht. Als Ersatzfehler für die Ultraschallprüfung sind grundsätzlich Nuten (Ersatzfehler für Risse) oder Flachbodenbohrungen (Ersatzfehler für Poren, Einschlüsse, Materialtrennungen in beliebigen Winkeln) geeignet. Nuten, die senkrecht von der Innen- oder Außenseite eingebracht werden, sind über eine Schrägeinschallung mit Winkelprüfkopf sehr einfach über den Winkelspiegeleffekt zu detektieren. Um Nuten zu erzeugen, die bei der Prüfung keine 100 % POD erzeugen, müssen die Nuten entweder eine sehr geringe Tiefe haben, oder sie müssen in Bereichen liegen, wo sie von Formanzeigen schwer zu unterscheiden sind, z.B. in der Schweißnahtwurzel.

Im Vorhaben wurden mehrere Konfigurationen von Ersatzfehlern geplant. Von den Rohrinneenseiten sollen Nuten in die Schweißnahtwurzel eingebracht werden (Abbildung 2 oben). Die Schweißnahtwurzeln sind unbeschiffen und können von sich aus bereits Signale liefern, die sich mit Fehlerechos überdecken können.

In Abbildung 2 in der Mitte und unten sind Konfigurationen für punktuelle Fehlstellen in den Schweißnahtflanken zu sehen. Die Flachbodenbohrungen sollen parallel zu den Nahtflanken eingebracht werden, um kleine Bindefehler oder Poren in der Schweißnaht zu simulieren. Die Herstellung der Ersatzfehler findet aktuell an der MPA Stuttgart statt

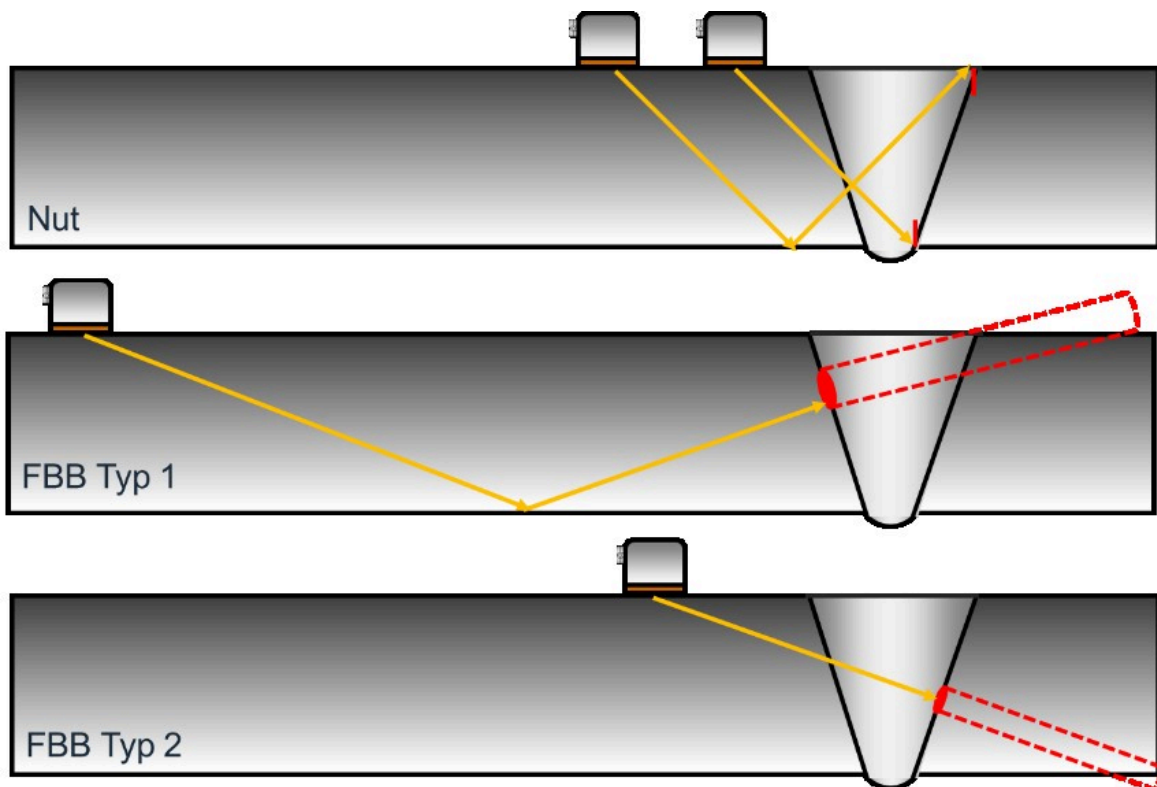


Abbildung 2: Konfigurationen für Ersatzfehler: oben: Nuten in Decklage und Schweißnahtwurzel, Mitte: Flachbodenbohrung von außen, unten: Flachbodenbohrung von innen.

Neben den in Abbildung 2 gezeigten Fehlstellenkonfigurationen, sollen außerdem Ersatzfehler für ausgedehnte Flankenbindefehler eingebracht werden. Hierfür werden breite Nuten parallel zur Nahtflanke eingebracht, so dass ein flächiger Reflektor in der Flanke entsteht (siehe Abbildung 3).

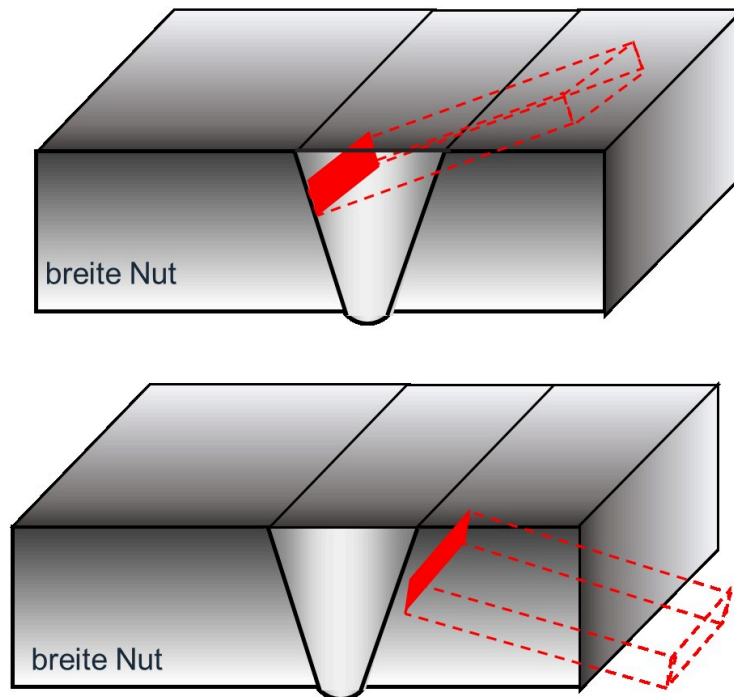


Abbildung 3: Fehlstellenkonfiguration mit breiten Nuten senkrecht in den Nahtflanken

Durch den Bohrkanal, der zwangsläufig bei der Herstellung der Flachbodenbohrungen und Nuten entsteht, werden die Ultraschallprüfungen lediglich von einer Seite der Schweißnaht aus durchgeführt. Es ist demnach nicht notwendig, die volle Länge der Testkörper zu erhalten. Die Testkörper wurden deshalb einseitig etwa 50 mm hinter Schweißnaht abgeschnitten. Zur besseren Ultraschallprüfbarkeit wurde außerdem die Nahtüberhöhung abgedreht. Die Abmessungen der Testkörper sind nun in etwa: Länge 300 mm, Außendurchmesser 271 mm, Wandstärke 13 mm.

2.2 Größenverteilung der Ersatzfehler

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, ist es notwendig, Fehlstellen in geeigneter Größenverteilung für eine POD-Ermittlung zu erstellen. Hierfür ist es nötig, die Normen zu betrachten, nach der die Prüfung stattfinden wird. Die Zulässigkeitsgrenzen für Prüfung von Schweißnähten mittels Ultraschall ist in der DIN EN ISO 11666:2018-05 [4] beschrieben. Für die Bewertungsgruppe 2, also die strengste Bewertungsgruppe, ist für die gegebene Wandstärke eine Registrierschwelle auf einen Kreisscheibenreflektor von 1,5 mm festgelegt. Das bedeutet, dass eine 1,5 mm Flachbodenbohrung noch detektiert werden muss. Die Erfahrung zeigt, dass Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm in ferritischen Werkstoffen sicher gefunden werden, sowie das Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von weniger als 0,7 mm zunehmend schwierig zu detektieren sind. Durch Simulationen wird diese Einschätzung gestützt.

Hieraus ergibt sich eine geplante Fehlstellenkonfiguration, die in Tabelle 1 aufgelistet ist. Insgesamt sind 28 Fehlstellen geplant. Die unterschiedlichen Fehlertypen sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die Verteilung der Fehlstellen über drei vorhandene Rohrleitungstestkörper und über die Tiefenlagen soll zufällig erfolgen.

Tabelle 1: Geplante Fehlstellenkonfiguration

Flachbodenbohrungen in Flanke (Poren)			
Durchmesser [mm]		Fläche [mm²]	Anzahl
	0,6	0,3	2
	0,8	0,5	2
	1	0,8	4
	1,2	1,1	4
	1,5	1,8	4
	2	3,1	2
	3	7,1	2
breite Nuten in Flanke (Bindefehler)			
Länge [mm]	Breite [mm]	Fläche [mm²]	Anzahl
5	1	5	1
10	1	10	1
5	2	10	1
10	2	20	1
schmale Nuten (Risse)			
Länge [mm]	Tiefe [mm]	Fläche [mm²]	Anzahl
5	2	10	1
10	2	20	1
5	1	5	1
10	1	10	1

3. Prüfanweisung

Das Prüfergebnis einer Ultraschallprüfung hängt in hohem Maße von den Informationen ab, die dem Prüfpersonal vor Ort zur Verfügung stehen. Die wichtigste Information ist oft die Prüfanweisung. Die Prüfanweisung wird in der Regel im Vorfeld von qualifiziertem Personal gemäß den verfügbaren Normen verfasst und enthält alle notwendigen Informationen zur Durchführung der Prüfung. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Prüfanweisung zwar korrekt verfasst sein kann, aber vom Prüfpersonal nicht immer gleich verstanden wird. Das kann zu Fehlern bei der Prüfdurchführung und ggf. zu schlechteren Ergebnissen führen [6] [8]. Außerdem muss auf deren Länge, den Schreibstil und die Konsistenz geachtet werden und die Prüfanweisung sollte auf ihre Verständlichkeit überprüft werden, damit die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler (z. B. Missverständnisse, Fehlinterpretationen, Überspringen von Schritten usw.) minimiert wird.

Für die internen Schweißnahtprüfungen an der BAM sowie für den geplanten Ringversuch im Vorhaben wurde eine Prüfanweisung mit Prüfprotokoll nach ISO 9271:2021-02 [7] entwickelt. Für die Erstellung der Prüfanweisung wurde das Layout verwendet, das in den UT-Kursen der DGZfP gelehrt wird. Neben allgemeinen Informationen wie Datum, Ort usw. enthält die Prüfanweisung detaillierte Angaben zum Prüfobjekt, zur Prüftechnik, zum Prüfsystem, zu den Prüfparametern und zu den Ergebnissen, einschließlich einer Prüfskizze. Da die Prüfanweisung zwar vorschriftsmäßig

verfasst ist, aber auch vom Verfasser abhängt und somit zu Missverständnissen und potenziellen Fehlern führen kann [6] [8], wurde die Prüfanweisung unter dem Gesichtspunkt der menschlichen Faktoren im Hinblick auf Verständlichkeit und Konsistenz kontrolliert und optimiert.

Zusammenfassung

Im Vorhaben NormPOD wird eine Richtlinie zur Bestimmung der POD von zerstörungsfreien Prüfungen entwickelt. Anhand je eines konkreten Beispiels aus Maschinenbau und Bauwesen [9] wird das Vorgehen von der Versuchsplanung bis hin zur statistischen Auswertung erläutert. Eines der Beispiele, die hierfür untersucht werden, ist eine Ultraschallprüfung an ferritischen (Rohrleitungs-)Schweißnähten. Hierfür wurden verschiedene Testkörpersätze untersucht und ein Testkörpersatz, bestehend aus Rohrleitungsschweißnähten hergestellt. Der Testkörpersatz ist im Hinblick auf die Geometrie der Testkörper und der Fehlerlagen – und -größen an realistische Prüfaufgaben angepasst. Als Fehlstellen werden Ersatzfehler in Form von Nuten und Flachbodenbohrungen verwendet.

Die Größenverteilung der Testfehler ist wichtig im Hinblick auf eine spätere POD-Berechnung. Die Fehlergrößen wurden entsprechend ausgewählt, um sämtliche Fehlergrößen von der minimal detektierbaren Fehlstelle bis zur sicher detektierten Fehlstelle abzudecken. Anhand der Vorgehensweise kann ein Vorschlag für standardisierte POD-Testkörper abgeleitet werden.

Auch die Qualität der Prüfanweisungen spielt eine große Rolle bei der zuverlässigen Durchführung von Ultraschallprüfungen. Für das vorgestellte Vorhaben wurde eine standardisierte Prüfanweisung für interne Tests und Ringversuche erstellt, die gleichzeitig optimiert wurde, um die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler bei der Interpretation oder dem Ausfüllen der Prüfanweisung und bei der Durchführung der Prüfung zu verringern.

Danksagung

Die Untersuchungen fanden im Projekt „normPOD“ statt, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Namen „Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren“ unter dem Förderkennzeichen 03TN0006D gefördert wird.

Referenzen

- [1] MIL-HDBK-1823 *Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation (NDE) System, Reliability Assessment* (1999)
- [2] Kanzler, D., Bertovic, M., Heckel, T., Jüngert, A., Kessler, S., Vrana, J., Dethof, F., Rentala, V.K., Rosenthal, M., Stolz, R. (2021): *Die deutschen Bestrebungen zur Normierung der Fähigkeits- und Zuverlässigkeitsbewertung der zerstörungsfreien Prüfung*. In: DGZfP Jahrestagung 2021, 10.-11.5.21, virtuell.
- [3] Kanzler, D., Rentala, V.K., Bertovic, M., Heckel, T., Tkachenko, V., Given, J., Kessler, S., Dethof, F., Jüngert, A., Vrana, J. (2022): *Lasst uns mal POD standardisieren!* In: DGZfP Jahrestagung 2022, 23.-25.5.2022, Kassel.
- [4] DIN EN ISO 11666:2018-05: *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Ultraschallprüfung – Zulässigkeitsgrenzen*.
- [5] Kurz, J.H.; Jüngert, A.; Dugan, S.; Dobmann, G.; Boller, C. (2013): *Reliability considerations of NDT by probability of detection (POD) determination using ultrasound phased array*. In: *Engineering failure analysis*, 35, pp. 609-617, ISSN: 130-6307.

- [6] Bertovic, M. and Ronneteg, U. (2014): *User-centered approach to the development of NDT instructions [SKB Report R-14-06]*, Svensk Kärnbränslehantering AB., Oskarshamn, Sweden.
- [7] DIN EN ISO 9712:2021-02: *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung*.
- [8] McGrath, B., Wheeler, J., Bainbridge, H. (2009): *PANI and the Role of the Written NDT Procedure*. In: DGZfP Proceedings BB 116-CD: 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, 24-26 June 2009, Berlin, Germany, pp. 1–7.
- [9] Dethof, F., Keßler, S. (2022): *Simulation von Impakt Echo Inspektionen in Beton zur Analyse der Detektionswahrscheinlichkeit*. In: DGZfP Jahrestagung 2022, 23.-25.5.2022, Kassel.