

Zuverlässigkeit und ZfP - Lebensdauerbewertung von Komponenten unter Einbeziehung von Ultraschallprüfungen

Anne JÜNGERT¹, Georg WACKENHUT¹, Robert LAMMERT¹, Martin SPIES^{2a},
Hans RIEDER³

¹ MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

² Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

³ RD Systemtechnik, Saarbrücken

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

Kurzfassung. Die Lebensdauer von Komponenten in kerntechnischen Anlagen ist im Hinblick auf den sicheren Betrieb ein wichtiges Thema. Probabilistische Ansätze zur Bewertung der Integrität können hierbei quantitative Aussagen hinsichtlich des Einflusses der Streuung der Werkstoffparameter, aber auch der Auffindbarkeit von Rissen auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten.

Als Eingangsgrößen dienen Werkstoffkennwerte, wie z.B. die Bruchzähigkeit, und die Größe von Fehlstellen, die über zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie z.B. einer Ultraschallprüfung, ermittelt wurden. In verschiedenen Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass sowohl die Werkstoffkennwerte als auch die Fehlergrößenbestimmungen mithilfe von Ultraschallprüfungen an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißverbindungen zwischen austenitischen und ferritischen Stahl mit einem statistischen Fehler behaftet sind. Die Datenbasis der relevanten Werkstoffparameter ist für derartige Schweißverbindung gering.

In einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurden an austenitischen und Mischschweißverbindungen bruchmechanische Werkstoffuntersuchungen durchgeführt und eine Datenbasis für die probabilistische Bewertung zusammengetragen. Zur Einbindung der Ultraschallprüfungen in die probabilistische Lebensdauerbewertung ist es notwendig, die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit für bestimmte Messkonfigurationen zu bestimmen. Die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit wird in einer POD-Kurve (Probability of Detection) als Funktion der Fehlergröße beschrieben. Zur Erzeugung von realistischen POD-Kurven ist aus einer Vielzahl von Messungen mit verschiedenen Konfigurationen an unterschiedlichen Testkörpern ein statistischer Datensatz entstanden und durch simulierte Daten ergänzt worden. Hieraus konnten POD-Kurven für die untersuchten Werkstoffe und Messkonfigurationen erzeugt werden. Mithilfe der Kennwerte und der POD-Kurven konnte dann für realistische Werkstoffe und Fehlergrößen ein Bewertungsmodell entwickelt werden. Die Ermittlung der POD aus Messdaten und Simulationen wird in einem gesonderten Beitrag dargestellt. In diesem Beitrag wird die Einbindung der POD aus zerstörungsfreien Prüfungen in das Bewertungskonzept erläutert.

^a nun Process & Pipeline Services – Baker Hughes, a GE company, Stutensee

Einführung

Zum sicheren Betrieb von Anlagen sind Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbewertungen von Komponenten notwendig. In kerntechnischen Anlagen in Europa kommen hierfür oft probabilistische Methoden zum Einsatz, die den Zustand der Komponente berücksichtigen [1, 2]. Durch das Einbeziehen von spezifischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und betriebsbedingter Schädigungen, die bei wiederkehrenden Prüfungen mithilfe zerstörungsfreier Prüfungen ermittelt werden, kann eine Versagenswahrscheinlichkeit (Probability of Failure, POF) für die jeweilige Komponente ermittelt werden. Dadurch kann der sichere Weiterbetrieb von Anlagen auch im Fall von bekannten Vorschädigungen gewährleistet werden.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) und des Fraunhofer-Instituts für Zerstörungsfreie Prüfung Saarbrücken (IZFP) wurde ein Bewertungskonzept entwickelt, das die Streuung in den Werkstoffkennwerten und die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen berücksichtigt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit einer Komponente hängt maßgeblich von den Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe ab. In Anwesenheit von Anrissen ist es wichtig zu quantifizieren, wann ein Riss weiterwächst. In der elastisch-plastischen Bruchmechanik betrachtet man hierfür das J-Integral und den Rissinitiierungswert J_i . Für austenitische Schweißverbindungen und Mischschweißverbindungen sind diese Kennwerte bisher wenig untersucht und eine stabile Datenbasis über die Streuung dieser Kennwerte existiert nicht.

Sicherheitsrelevante Komponenten werden regelmäßig wiederkehrend geprüft. Für die im Projekt untersuchten Werkstoffe, Bauteilgeometrien und Wandstärken kommen in der Praxis Ultraschallverfahren zum Einsatz. Deren Prüfaussage ist durch die spezielle, schweißtechnisch bedingte, Kornstruktur der Schweißnähte eingeschränkt. In bereits abgeschlossenen Vorhaben wurden Methoden entwickelt, mit denen die Prüfaussage an austenitischen Schweißnähten und Mischnähten verbessert werden können [3–8]. Die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen kann über die Ermittlung der fehlergrößenabhängigen Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD) quantifiziert werden. Diese PODs werden für die Einbindung der Ultraschallprüfung in die probabilistische Bewertung benötigt. In einem abgeschlossenen Projekt wurden an verschiedenen Testkörpern aus einer Vielzahl von Ultraschallprüfungen POD-Kurven ermittelt [9]. Da diese Ergebnisse nur teilweise für die Bewertung von geschweißten Komponenten nutzbar sind, wurden im hier beschriebenen Vorhaben weitere Ultraschallprüfungen an Schweißnähten durchgeführt und mit Daten aus Ultraschallsimulationen erweitert (Model-Assisted POD, MAPOD) [10]. Für die Simulation der Ultraschallausbreitung kam ein am IZFP entwickelter Code basierend auf der Generalisierten Punktquellensynthese (GPSS) zum Einsatz [11]. Mithilfe der Simulation können Fehlerinflüsse, wie z.B. eine Verkippung des Prüfkopfs oder eine variierende Schallgeschwindigkeit im Bauteil gegenüber Vergleichskörpern aus vergleichbarem Material gezielt mit untersucht werden. Ebenfalls können Fehlerinflüsse durch den Mensch (Human Error), wie z.B. das Übersehen von Ultraschallanzeigen, mit einbezogen werden [12]. Über die Einbindung der POD-Kurven in das Bewertungskonzept können all diese Faktoren in der Komponentenbewertung mit erfasst werden.

1. Ermittlung von Streuung in Werkstoffkennwerten

Die bruchmechanischen Größen J-Integral und Rissinitiierungswert J_i werden in bruchmechanischen Versuchen ermittelt. Im Forschungsvorhaben wurde hierfür eine austenitische Schweißnaht hergestellt, aus der Drei-Punkt-Biegeproben (SE(B)) in

unterschiedlicher Orientierung zur Schweißnaht hergestellt wurden. Ebenfalls wurden Proben hergestellt, um den Bereich der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu untersuchen. Die insgesamt 22 Proben wurden entsprechend der ASTM E 1820 [13] geprüft und die Risswiderstandskurven ermittelt. Aus diesen kann anschließend der Rissinitiierungswert J_i mithilfe einer an der MPA entwickelten Methode berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt und in [14] genauer beschrieben.

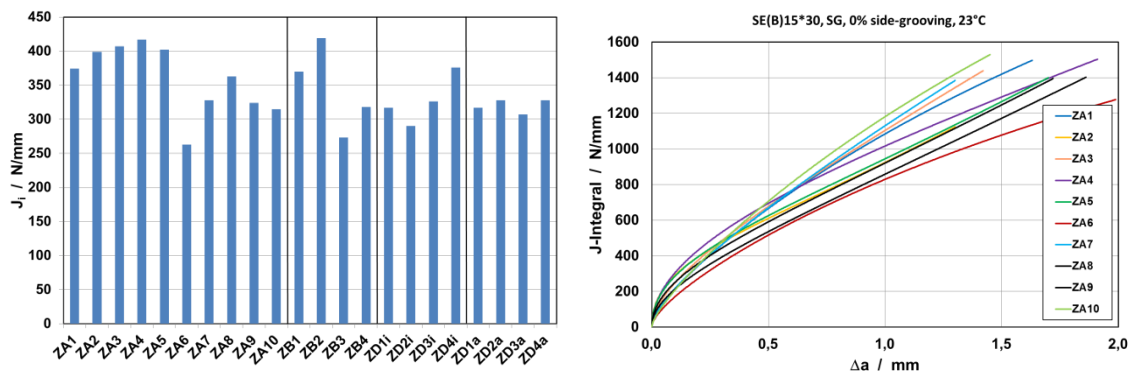


Abbildung 1: Ergebnisse der Bruchmechanikversuche: links: Rissinitiierungswert $J_i(a)$; rechts: Risswiderstandskurve $J(\Delta a)$ Schweißgut.

In Abbildung 1 links sind die ermittelten J_i -Werte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte eine große Streuung aufweisen. Deshalb muss bei der probabilistischen Betrachtung mit großen Konfidenzintervallen gearbeitet werden. Eine Vergrößerung der Datenbasis über weitere Versuche ist für weitere Untersuchungen sinnvoll.

2. Ultraschallprüfungen und POD-Berechnung am Beispiel von Nuten in einer Mischnaht

2.1 Ultraschallprüfung

In der Herstellung von austenitischen Schweißnähten und Mischschweißverbindungen zwischen austenitischem und ferritischem Stahl bilden sich in den Schweißnähten große stängelige Kristalle aus. Diese beeinflussen die Ultraschallausbreitung auf mehrere Arten. Zum einen erzeugen sie eine Anisotropie, die dazu führt, dass die Schallausbreitung entlang gekrümmter Linien stattfindet und Standardverfahren, die von geraden Schallwegen ausgehen, nicht angewandt werden können. Die Detektion von Fehlstellen wie Rissen und die Bestimmung ihrer Ausmaße (Länge und Tiefe) wird dadurch stark beeinträchtigt. Neben der Anisotropie spielt auch die Streuung von Ultraschall in den Schweißnähten eine Rolle. Durch die Ausbildung von großen Körnern, deren Abmessungen größer sind als die Wellenlänge des Ultraschalls, wirkt jede Korngrenze als Reflektor für den Ultraschall. Es kommt zu einer Streuung der Schallenergie und einem geringeren Signal-Rausch-Abstand in den Ultraschalldaten. In verschiedenen Forschungsvorhaben wurde und wird untersucht, wie die Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfungen an den genannten Schweißnähten verbessert werden kann [6–8].

2.2 POD-Berechnung

Zur Einbeziehung der Ergebnisse von Ultraschallprüfungen in die Zuverlässigkeitsbewertung wird die verfahrensspezifische Fehlerrückfindungswahrscheinlichkeit (Probability of

Detection, POD) verwendet. Diese wird in der Form von POD-Kurven ermittelt. Es gibt verschiedenen Methoden, um POD-Kurven aus Ultraschallmessungen zu berechnen. Die einfachste Möglichkeit ist zu untersuchen, ob eine Fehlstelle gefunden wurde oder nicht und das Ergebnis über der Fehlergröße aufzutragen (Hit-Miss-Analyse). Mithilfe einer statistischen Auswertung wird so eine Kurve erzeugt. Diese Art der Berechnung erfordert allerdings eine große Anzahl voneinander unabhängiger Messungen, die für die Ultraschallprüfungen an austenitischen und Mischschweißverbindungen auch unter Einbeziehung von Ergebnissen aus bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben nicht erreicht werden konnten.

Bei einer kleineren Datenbasis ist es sinnvoll, die gemessene Fehlertiefe in Bezug zur tatsächlichen Fehlertiefe zu setzen ($\hat{a}$ -vs- a -Analyse). Das ist jedoch nur dann möglich, wenn die tatsächliche Fehlertiefe bekannt ist. Hierfür gibt es ebenfalls verschiedene Ansätze. Der am häufigsten verwendete Ansatz nach MIL-HDBK1823 ist in [15] beschrieben. Für dessen Verwendung muss jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen Signalamplitude $\hat{a}$ und Fehlergröße a bestehen, was nicht für alle Datensätze gegeben ist. Deshalb wurden die POD-Kurven in diesem Beitrag mithilfe der Rayleigh-Rice-Methode berechnet, die z.B. in [16] beschrieben ist. Im Folgenden wird die POD-Ermittlung an einem Beispiel gezeigt.

2.3 Beispiel Mischnaht-Halbschale

Anhand von UT-Prüfungen an einem Rohrleitungstestkörper mit einer Mischnaht wurden POD-Kurven ermittelt, die für die Zuverlässigkeitsbewertung verwendet werden sollen. Der Rohrleitungstestkörper ist in Abbildung 2 links im Foto und rechts schematisch als Außenabwicklung dargestellt. In den austenitischen Grundwerkstoff wurden drei Nuten mit den Tiefen 3 mm, 5 mm und 7 mm parallel zur Rohrachse, also quer zur Schweißnaht eingebracht. Im Schweißgut wurden ebenfalls zwei Nuten mit 5 mm und 7 mm Tiefe quer zur Schweißnaht eingebracht. Außerdem wurde ein interkristalliner Spannungskorrosionsriss mit ca. 6 mm Tiefe quer zur Schweißnaht erzeugt [17]. Die Halbschale wurde mit ihrer anderen Hälfte nach dem Einbringen der Fehlstellen wieder zum Vollrohr verschweißt, wobei die Schweißnähte nur in kleinen Bereichen ausgeführt wurden. Die Lücke, die in den anderen Bereichen zwischen den zwei Halbschalen entstand, wurde mit Kunststoff verfüllt. Für den Ultraschall ergibt sich damit eine Kante in Umfangsrichtung am Ende der Halbschale.

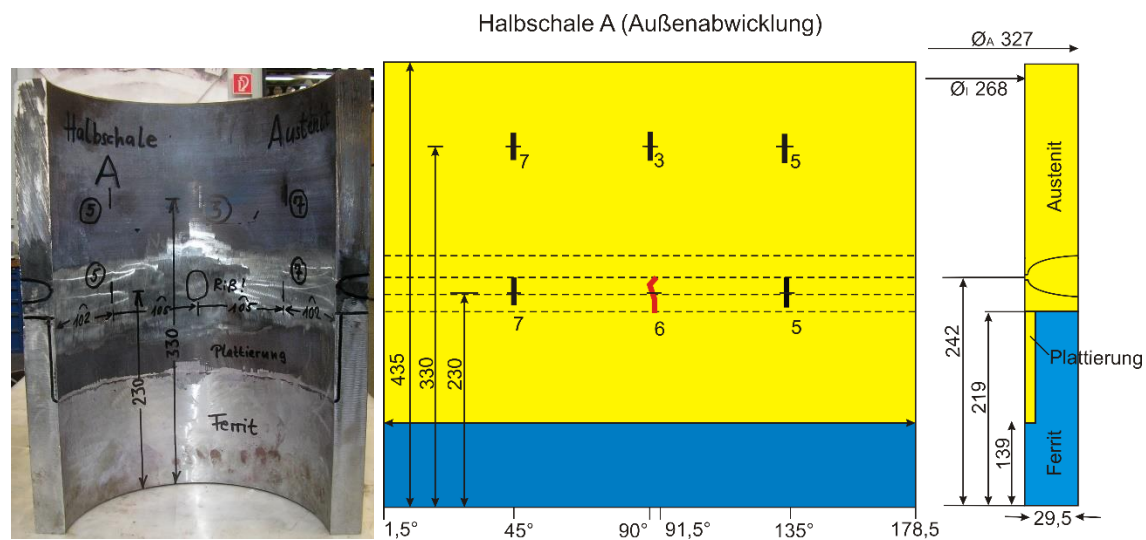


Abbildung 2: Testkörper Mischnahtalbschale, rechts: Foto vor Einbringen der Fehlstellen; links: Skizze der Außenabwicklung

Am Testkörper wurden Ultraschallprüfungen mit verschiedenen Prüfköpfen durchgeführt. Da die Ultraschallprüfungen allein für eine POD-Ermittlung nicht ausreichend Daten liefern, wurden die Datenbasis mit mittels GPSS simulierten Daten ergänzt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen mit einem 45° Einschwingerprüfkopf für 1 MHz Transversalwellen dargestellt. Dieser Prüfkopf ist grundsätzlich für die Anwendung an derartigen Schweißnähten geeignet, jedoch wird in der Praxis in der Regel auf Prüfköpfe zurückgegriffen, in denen Sender und Empfänger voneinander getrennt verbaut sind (Sende-Empfangs-Prüfkopf, SE-Prüfkopf). Da der Einschwingerprüfkopf sich leichter in die Simulationen einbinden lässt, werden hier die Ergebnisse dieses Prüfkopfes gezeigt, auch wenn andere Prüfköpfe bessere Ergebnisse geliefert haben.

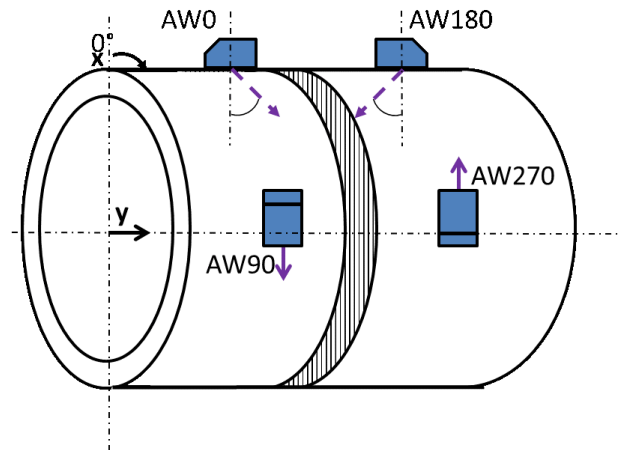


Abbildung 3: Einschallrichtungen auf dem Rohrleitungstestkörper

In Abbildung 3 sind die möglichen Einschallrichtungen auf einem Rohrleitungstestkörper dargestellt. Für den hier verwendeten Testkörper mit Querfehlern sind die Einschallrichtungen AW90 und AW270 relevant. Der Prüfkopf schallt in Rohrumfangsrichtung entweder nach oben oder nach unten schauend ein. Die Schweißnaht ist derart bearbeitet, dass der Prüfkopf auch auf der Schweißnaht stehend prüfen kann. Bei dieser Einschallgeometrie wird das Prüfergebn neben der Streuung in der Schweißnaht aufgrund der Kornstruktur auch durch die Rohrkrümmung beeinflusst. Die Prüfkopfsohle wurde für die Prüfung nicht an die Rohrkrümmung angepasst, so dass es zu leichtem Verkippen des Prüfkopfs kommen kann.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen für die Prüfung in Einschallrichtung AW270 zu sehen. Die Verstärkung wurde so gewählt, dass die Echohöhe der tiefsten Nut im Grundwerkstoff bei 80 % Bildschirmhöhe lag. In der Praxis prüft man die Nahtbereiche mit deutlich höheren Verstärkungen, um in den relevanten Bereichen eine möglichst große Dynamik zu erhalten. Für die POD-Berechnung ist es allerdings notwendig, die Amplituden quantifizieren zu können, was nicht mehr möglich ist, wenn die Verstärkung so groß gewählt wird, dass die Signalamplituden für die tiefen Nuten im Grundwerkstoff in Sättigung gehen.

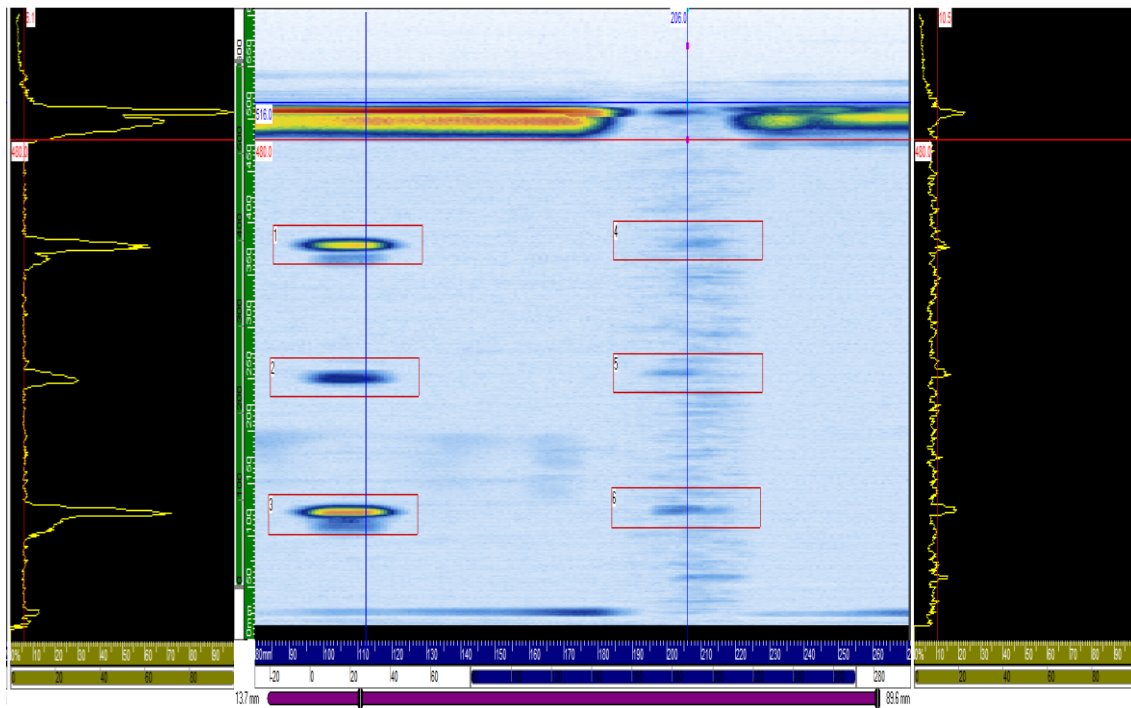


Abbildung 4: Draufsicht der UT-Prüfung an Mischnahthalschale mit AW270 und Einschwingerprüfkopf 45°, Transversalwelle.

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen an den Nuten der Schweißnaht als B-Scan dargestellt. Es sind deutlich vier Reflexionen zu erkennen, die den beiden Nuten, den Rissen und der Kante am Ende der Halbschale zuzuordnen sind. Die Echos lassen sich einer Tiefe von 30 mm, was der Wanddicke entspricht, zuordnen. Eine Bestimmung der Nuttiefe bzw. Risstiefe über ein Risspitzenecho ist nicht möglich.

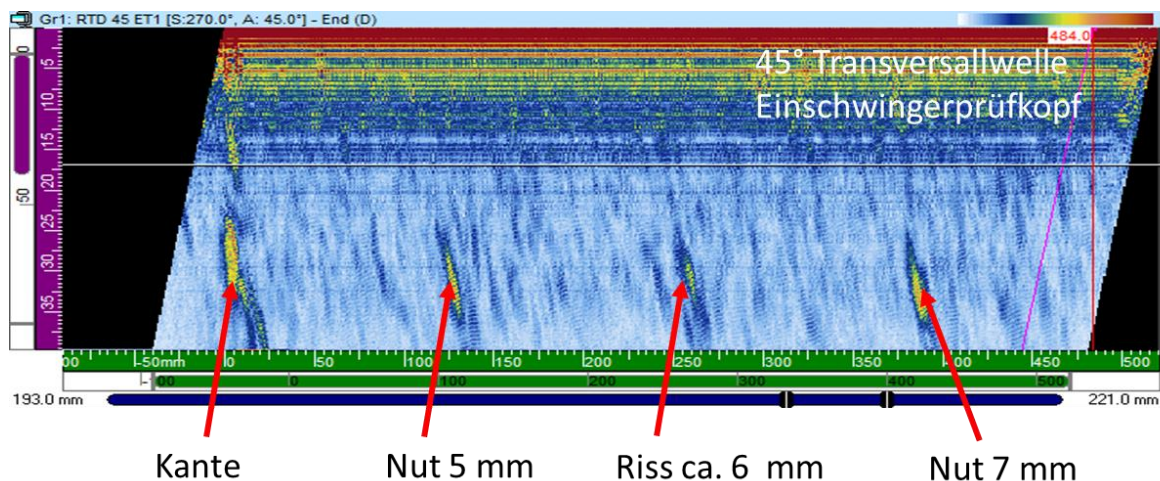


Abbildung 5: B-Scan der der UT-Prüfung an Mischnahthalschale mit AW270 und Einschwingerprüfkopf 45°, Transversalwelle.:

In Abbildung 4 links und rechts ist jeweils die Echohöhenmanik für die Nuten im austenitischen Grundwerkstoff und in der Schweißnaht dargestellt. Die gemessenen Echohöhen sind für jede Fehlstelle und beide Einschallrichtungen außerdem in Tabelle 1 aufgelistet. Die Echohöhen für die Nuten im Grundwerkstoff korrelieren mit der Nuttiefe. Die Echohöhen in der Schweißnaht sind deutlich reduziert, was auf die bereits genannten Anisotropie- und Streueffekte im austenitischen Schweißgut zurück zu führen sind. Ebenfalls ist zu erkennen, dass das Grundrauschen in der Schweißnaht gegenüber dem im Grundwerkstoff erhöht ist.

Tabelle 1: Echohöhen

Einschallrichtung AW90				Einschallrichtung AW270			
A _{Max} %	Länge [mm]	Tiefe [mm]		A _{Max} %	Länge [mm]	Tiefe [mm]	
57,9	22	5	Nut GW	59,9	21	5	Nut GW
30,2	22	3	Nut GW	25,4	20	3	Nut GW
72,2	22	7	Nut GW	79,4	21	7	Nut GW
15,1	20	5	Nut SN	15,1	16	5	Nut SN
11,9	22	6	Riss SN	13,9	11	6	Riss SN
19,4	22	7	Nut SN	15,5	20	7	Nut SN

Die gemessenen Daten wurden durch Simulationen, die am IZFP über den dort entwickelten GPSS-Algorithmus durchgeführt wurden, ergänzt. In den Simulationen wurde der Keilwinkel im Prüfkopf um bis zu $\pm 3^\circ$ variiert, um die Streuung zu ermitteln, die in den Echohöhen entsteht, wenn der Einschallwinkel nicht den 45° entspricht, für die der Prüfkopf hergestellt wurde. Ein veränderter Einschallwinkel kann in der Praxis neben einer mechanischen Verkipfung auf der Rohroberfläche auch durch Variationen in der Schallgeschwindigkeit zustande kommen. In Abbildung 6 links sind die Amplituden der gemessenen (Kreuze) und für verschiedene Winkeländerungen simulierten Daten für den austenitischen Grundwerkstoff über der Fehlertiefe dargestellt. In Abbildung 6 rechts ist die daraus berechnete POD-Kurve dargestellt. Die POD-Kurve wurde über das Rayleigh-Rice-Modell berechnet [16]. Die POD-Kurve für den austenitischen Grundwerkstoff ist sehr steil. Der $a_{90/95}$ -Wert, im Diagramm der Wert, an dem das untere Konfidenzintervall die 90 % POD Linie schneidet, gibt an, ab welcher Tiefe eine Nut sicher gefunden wird. Für den hier gezeigten Fall, Nuten in Rohrlängsrichtung im Grundwerkstoff, beträgt dieser Wert 1,58 mm.

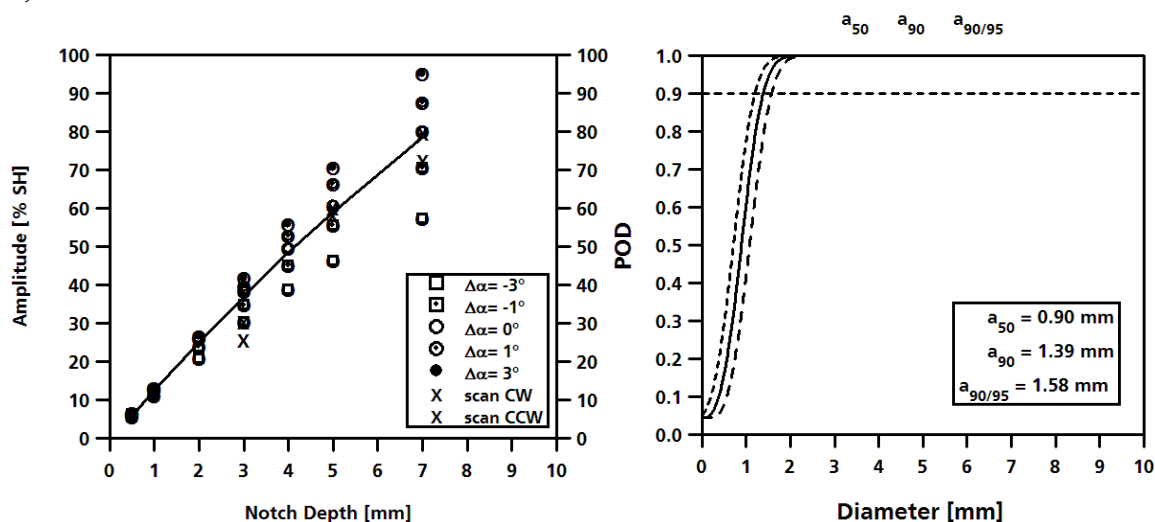


Abbildung 6: links: Amplitudenwerte von gemessenen und simulierten Daten im Grundwerkstoff, rechts: POD-Kurve.

Die gleichen Untersuchungen wurden entsprechend auch für die Nuten und den Riss in der Schweißnaht durchgeführt. In Abbildung 7 links sind die Amplituden der gemessenen (Kreuze) und simulierten Daten über der Fehlertiefe dargestellt. Die Amplituden sind wesentlich kleiner. Die Registrierschwelle wurde 6 dB über dem Rauschlevel gewählt. Die gemessenen Signale des Risses mit 6 mm Tiefe, liegen etwas unterhalb der Kurve. Das kann verschiedene Gründe haben. Zum einen kann das Reflexionsverhalten eines verzweigten Risses deutlich von dem einer Nut abweichen. Zum anderen ist die angegebene Risstiefe von 6 mm über ein Ultraschalldurchschallungsverfahren ermittelt worden und kann durchaus um

1 mm variieren. Die berechnete POD-Kurve ist daneben dargestellt. Aufgrund des verringerten Signal-Rausch-Abstands der Signale in der Schweißnaht, ist die POD-Kurve deutlich flacher. Der $a_{90/95}$ -Wert liegt bei 10 mm, was im Falle des verwendeten Testrohrs bereits einem Drittel der Wanddicke entspricht. Wie bereits erwähnt, ist der verwendete Prüfkopf aus Gründen der leichteren Simulation ausgewählt worden. Für die Ultraschallprüfungen in bestehenden kerntechnischen Anlagen kommen Sende-Empfangs-Einschwingerprüfköpfe oder Sende-Empfangs-Matrixprüfköpfe zum Einsatz, die ein deutlich verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis liefern und Fehler besser detektierbar machen.

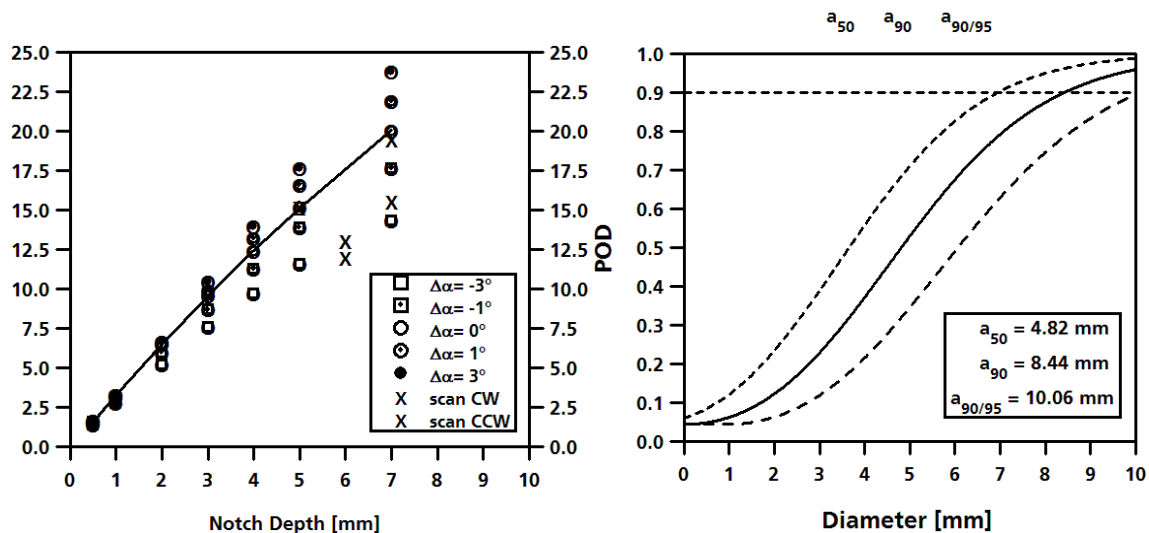


Abbildung 7: links: Amplitudenwerte von gemessenen und simulierten Daten in der Schweißnaht, rechts: POD-Kurve.

3. Bewertungskonzept

Zur Lebensdauerbewertung von Komponenten unter Einbeziehung von Ultraschallprüfungen ist ein Bewertungskonzept entwickelt worden, das auf der Verwendung von probabilistischen Berechnungen in Zusammenhang mit einer Grenzfunktion beruht, die den Übergang von sicheren zu unsicheren Zuständen und somit dem Versagen definiert. Die MPA Stuttgart verwendet hierfür das selbstentwickelte Software-Paket Xpipe™, das in der Lage ist, unterschiedliche Eingangsgrößen als Zufallsvariablen zu modellieren. Die Grenzfunktion von Xpipe™ ist die sogenannte R6-Grenzkurve [18], auch als 2-Kriterien-Verfahren bekannt. Sie ist im 2-dimensionalen Raum (L_r , K_r) definiert, wobei L_r den Plastifizierungsgrad (durch Lasten induziertes Versagen) und K_r den Rissantrieb (Versagen aufgrund bruchmechanischer Eigenschaften) darstellt.

Das Bewertungskonzept sieht nun vor, die durch experimentelle Untersuchungen ermittelten Lasten und die Komponentengeometrien, als verteilte Zufallsgrößen oder im Einzelfall, bei Fehlen einer stochastischen Verteilung, auch als feste Größen zu definieren. Die Unsicherheiten aus der Ultraschallprüfung (POD) werden durch Berücksichtigung charakteristischer Größen (z.B. des $a_{90/95}$ Wertes) in das System eingebracht und tragen somit zur Bewertung bei. Im Falle einfacher Risse kann nun durch Monte-Carlo-Simulationen das Verhalten des Systems analysiert und insbesondere eine Versagens-wahrscheinlichkeit (PoF) ermittelt werden, wobei die stochastischen Eingangsgrößen durch entsprechende Zufallszahlengeneratoren variiert werden.

Die POD-Kurven der hier dargestellten Messungen und zusätzlicher Messungen an Testkörpern mit echten Rissen, werden gerade in das Bewertungskonzept eingebunden, so

dass im nächsten Schritt die Versagenswahrscheinlichkeiten für Bauteile mit derartigen Schweißverbindungen ermittelt werden können.

3.1 Bewertung von Mehrfachrissen

Mehrfachrisse bzw. Rissfelder werden durch das sogenannte Rissäquivalenz-Modell in einfache Risse umgewandelt, bevor sie durch das o.a. Verfahren für einzelne Risse bewertet werden. Die Grundlage für die äquivalente Umwandlung von Rissen bilden FE-Simulationen, in denen die Spannungsintensitätsfaktoren (K-Werte) bestimmter Risskonfigurationen vorab ermittelt werden. Der äquivalente Einzelriss ist somit derjenige, dessen Spannungsintensitätsfaktor am kritischen Punkt mit dem höchsten Wert aus der entsprechenden FE-Berechnung übereinstimmt. Zur Lösung dieser Gleichung wird die Geometrie des einzelnen Risses, ebenfalls unter Verwendung von Xpipe™, variiert. Für diese Parameterstudien werden Risslänge und –tiefe angepasst, wobei das konstante Verhältnis dieser beiden Größen (hier: $2c/a=6$) beibehalten wird (die Variation der Risstiefe allein hat sich, zumindest in den bisher untersuchten Konfigurationen, als nicht geeignet erwiesen).

Die Durchführung von FE-Simulationen, sowie von Parameterstudien zur Bestimmung des äquivalenten Einzelrisses sind aufwändige Verfahren, die jedoch nur einmal je Rissfeld-Konfiguration zu durchlaufen sind. Abbildung 8 zeigt schematisch eine untersuchte Rissfeld-Konfiguration, bestehend aus halb-elliptischen, parallelen Oberflächenrissen in einem Rohr unter Innendruck. Dabei wurden Versatz und Abstand variiert und für 12 Konfigurationen FE-Berechnungen durchgeführt (Abbildung 8).

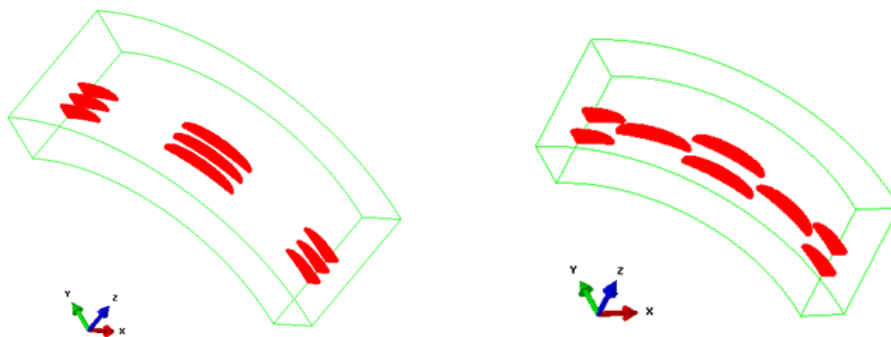


Abbildung 8: FE-Simulation von Rissfeldern: Versatz der Rissebenen um 0° (links) und $22,5^\circ$ (rechts)

Abbildung 9 zeigt die äquivalenten Risslängen, die zu den 12 mit FE berechneten Risskonfigurationen (mehrere Risse mit konstanter Rissgeometrie, Risslänge $2c=49,5$ mm, $2c/a=6$) ermittelt worden sind, als dunkle Balken. Die diskreten Ergebnisse dieser Berechnungen lassen sich in einem letzten Schritt durch Extrapolation stetig erweitern, wie die extrapolierten Flächen in Abbildung 9 zeigen. Dadurch werden Bewertungen im gesamten abgedeckten Bereich möglich, wobei in diesem Fall auf die Güte der Extrapolation, d.h. die verwendete Regressionsgleichung, zu achten ist. Wie Abbildung 9 demonstriert, ist die (lineare) Regression eines 2-dimensionalen Polynoms von Rang $r=1$ mit einem größeren Approximationsfehler (Residualfehler: 11,6) verbunden als dies bei einem Polynom von Rang $r=2$ (Residualfehler: 4,9) der Fall ist.

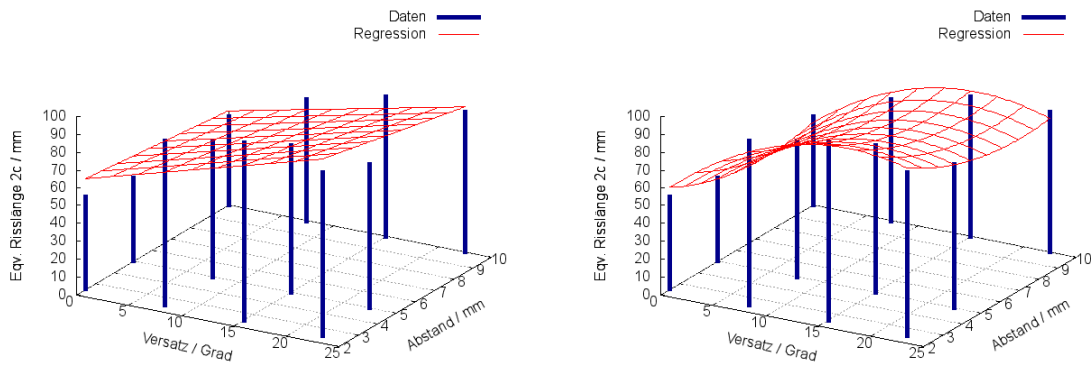


Abbildung 9: Anpassung an das Äquivalenz-Modell: linear, $r=1$ (links) und linear, $r=2$ (rechts)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde ein Bewertungskonzept für Komponenten mit austenitischen Schweißnähten oder Mischschweißverbindungen zwischen Austenit und Ferrit entwickelt. Die Eingangsgrößen hierfür sind bestimmte materialspezifische Kennwerte und die statistischen Fehlereinflüsse durch zerstörungsfreie Prüfungen. Anhand verschiedener Testkörper wurden POD-Kurven für einfache Fehlergeometrien und Prüfkopfbauweisen aus Messungen und Simulationen ermittelt, die gerade in ein für entsprechende Komponenten entwickeltes Bewertungssystem eingebunden werden.

Im nächsten Schritt soll der Einfluss komplizierterer Rissgeometrien, wie sie z.B. bei interkristalliner Spannungsrisskorrosion entstehen, genauer untersucht werden. In ersten Berechnungen konnte bereits der Einfluss von parallel verlaufenden Verzweigungen quantifiziert werden. POD-Daten für Ultraschallprüfungen an austenitischen Nähten mit Rissen stehen bereits zur Verfügung. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Datenbasis für Mischschweißnähte noch nicht ausreichend ist. Dazu kommt, dass für die Bewertung von verzweigten Rissen, die Rissgeometrie möglichst genau bekannt sein muss. Die POD beinhaltet bisher nur die Aussage der Auffindwahrscheinlichkeit für einen Riss einer bestimmten Tiefe. Bei Mehrfachverzweigungen ist eine Ristiefe allerdings keine eindeutige Größe mehr, so dass hier neue Ansätze benötigt werden.

Literatur

- [1] Aldemir, T.: A survey of dynamic methodologies for probabilistic safety assessment of nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy* 52 (2013), S. 113–124.
- [2] Birolini, A.: *Reliability engineering. Theory and practice*. Heidelberg, New York: Springer 2010.
- [3] Jüngert, A., Dugan, S., Homann, T., Mitzscherling, S., Prager, J., Pudovikov, S., Schwender, T.: Advanced Ultrasonic Techniques for Nondestructive Testing of Austenitic and Dissimilar Welds in Nuclear Facilities. In: Chimenti, D. E., Bond, L. J. (Hg.): *44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, volume 37. Conference date, 16-21 July 2017 : Provo, Utah, USA.
- [4] Dugan, S., Wagner, S.: Abschlussbericht über die von der MPA Universität Stuttgart im Unterauftrag des Fraunhofer-IZFP Saarbrücken durchgeführten Arbeiten BMWi-Vorhaben 1501370. MPA-Auftragsnummer 8404 000 000 2013.
- [5] Bulavinov, A., Walte, F., Pudovikov, S.: Entwicklung einer innovativen Ultraschall- Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (Vorwiegend Längsfehlerprüfung). IZFP Bericht Nr. 130103-E. Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben Nr. 1501370. Saarbrücken 2013.
- [6] Jüngert, A.: Verbesserung und Qualifizierung der Ultraschallprüfung von Mischnähten im Primärkreis von KKW. Prüfkörperherstellung und Bewertung der erweiterten Prüftechnik. Abschlussbericht - RS-Vorhaben Nr.1501476A. Stuttgart 10.10.2018.

- [7] *Prager, J., Mitzscherling, S., Homann, T.*: Verbundprojekt: Verbesserung der Qualifizierung der Ultraschallprüfung von Mischnähen im Primärkreis von KKW. Teilprojekt: Querfehlerprüfung. Abschlussbericht zum Vorhaben 14035016. Berlin 2018.
- [8] *Pudovikov, S., Rabe, U.*: Verbesserung und Qualifizierung der Ultraschallprüfung von Mischnähen im Primärkreis von KKW. Teilprojekt Längsfehlerprüfung, Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben Nr. 1501376B, IZFP Bericht Nr. 190101-TW. Saarbrücken 2019.
- [9] *Kurz, J. H., Jüngert, A., Dugan, S., Dobmann, G., Boller, C.*: Reliability Considerations of NDT in Probabilistic Damage Assessments by Probability of Detection (POD) Determination Using Ultrasound Phased Array. *Engineering Failure Analysis* 35 (2013), S. 609–617.
- [10] *Spies, M., Jüngert, A., Rieder, H., Dugan, S., Weber, D.*: Evaluating the Reliability of Ultrasonic Testing of Safety Relevant Components by Model-Assisted Determination of the POD: Proceedings of 12th ECNDT.
- [11] *Spies, M., Orth, T.*: Vergleichende Schallfeldberechnungen für 2D-Phased-Array Prüfköpfe mittels Generalisierter Punktquellensynthese und CIVA. In: DGZfP (Hg.): Jahrestagung 2011. Berichtsband BB-127-CD.
- [12] *Spies, M., Rieder, H.*: An approach to the Question "How to Account for Human Error in MAPOD?": Proceedings of 12th ECNDT.
- [13] *E08 Committee*: Test Method for Measurement of Fracture Toughness. West Conshohocken, PA: ASTM International (2015).
- [14] *Jüngert, A., Dugan, S., Wackenhut, G., Lammert, R., Spies, M., Rieder, H.*: Bewertung der Zuverlässigkeit geschweißter Komponenten unter Einbeziehung von Ultraschallprüfungen an realistischen Testfehlern. In: DGZfP (Hg.): Jahrestagung 2017.
- [15] *Annis, C. P.E.*: Department of Defense Handbook. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment 2009.
- [16] *Spies, M., Rieder, H., Dillhöfer, A.*: Modell-basierte Bestimmung der Auffindwahrscheinlichkeit (POD) von Volumenfehlern in schwerprüfbar Bauteilen. In: DGZfP (Hg.): DACH Jahrestagung. DGZfP-Berichtsband BB-136-CD.
- [17] *Mletzko, U., Zickler, S., Waidele, H.*: Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken. Erste Bewertung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien Prüfungen an Mischschweißverbindungen auf Querrisse. BMU-Vorhaben SR 2501. Stuttgart Juni 2007.
- [18] *Ainsworth, R. A., Hooton, D. G.*: R6 and R5 procedures: The way forward. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85 (2008), S. 175–182.