

Modellgestützte Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) bei der Ultraschallprüfung großer Schmiedeteile

Juliana BERTHOLD¹, Johannes VRANA², Thomas HECKEL³, Daniel KANZLER⁴,
Philipp JATZLAU¹, Christian GROßE¹

¹ TU München, München

² Vrana GmbH, Rimsting

³ BAM, Berlin

⁴ Applied Validation of NDT, Berlin

Kontakt E-Mail: zfp@cbm.bgu.tum.de, juliana.berthold@tum.de, kontakt@vrana.net

Kurzfassung. Die Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen und bruchmechanischer Analysen großer Schmiedeteile werden zur Vorhersage der Bauteillebensdauer und zur Definition von Wartungszyklen verwendet. Bei der volumetrischen Ultraschallprüfung können Prüfstücke ohne Anzeige Materialinhomogenitäten mit einer Reflektivität kleiner der Nachweisgrenze aufweisen. Daher wird bei bruchmechanischen Berechnungen die konservative Annahme getroffen, dass das Bauteil Materialinhomogenitäten in der Größenordnung der prüfsystemspezifischen Nachweisgrenze enthält. Dadurch wird die Nachweisgrenze zum die Lebensdauer limitierenden Faktor. Bei probabilistischen Methoden werden verfügbare Informationen, wie beispielsweise die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung, in bruchmechanische Berechnungen einbezogen, um zu konservative Annahmen zu vermeiden.

Um die Anwendung probabilistischer Methoden an großen Schmiedeteilen zu unterstützen, soll eine „Model Assisted“-POD aufgebaut werden, die die reale volumetrische Ultraschallprüfung der Bauteile nachbildet. In vorangegangenen Arbeiten [1,2] wurde der Einfluss des Prüfrasters, welches nach der DGZfP-Richtlinie US 07:2014 festgelegt wird, auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit untersucht.

In diesem Beitrag werden die Methoden der Arbeiten [1,2] zur POD-Ermittlung überprüft und optimiert. Anschließend werden die bisherigen Analysen um eine Prüfraster-Summen-POD, die das Szenario der realen Bauteilprüfung beschreibt, erweitert. Zudem wird eine experimentell validierte, simulative und nicht-parametrische POD für schrägliegende Reflektoren bestimmt. Schließlich werden Untersuchungen zum Einfluss der Defektmorphologie auf die Echodynamik einer Mehrfachanzeige vorgestellt.

Diese Arbeit ist im Rahmen eines Stipendiums der DGZfP entstanden.

Einführung

Um die Lebensdauer und die Wartungszyklen großer Schmiedestücke, wie beispielsweise Generator- und Turbinenwellen zu ermitteln, werden unter anderem die Ergebnisse von wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen für bruchmechanische Berechnungen genutzt. Für die Volumenprüfung werden typischerweise mechanisierte Ultraschallverfahren mit mehreren Einschallrichtungen [3] und Signalrekonstruktionsalgorithmen [4] eingesetzt.



Bei diesen Untersuchungen muss berücksichtigt werden, dass Prüfstücke ohne detektierte Anzeigen Materialinhomogenitäten mit einer Reflektivität bzw. Signalamplitude kleiner der verwendeten Registrierschwelle aufweisen können. Bei konservativer Betrachtung folgt daraus, dass das Prüfstück Materialinhomogenitäten in Größe der Registrierschwelle aufweist, die umgerechnet in äquivalente KSR-Durchmesser als Parameter in bruchmechanische Betrachtungen eingehen. Um möglichst kleine Signale detektieren zu können, wird die Registrierschwelle möglichst dicht an die prüfsystemspezifische Nachweisgrenze gelegt. Dies macht die prüfsystemspezifische Nachweisgrenze bei konservativer Betrachtung zum die Lebensdauer limitierenden Faktor.

Im Gegensatz zu konservativen Annahmen wird beim Einsatz probabilistischer Methoden zusätzliches Wissen, wie beispielsweise zur Fehlerauffindwahrscheinlichkeit, Nachweisgrenzenverteilungen und Anzeigengrößenverteilungen in die Berechnung einbezogen [3]. In diesem Zusammenhang gewinnt eine zuverlässige Aussage über die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit bei Berücksichtigung einer realistischen Defektmorphologie an Bedeutung [3]. Insbesondere ist es notwendig, die Erhöhung der Zuverlässigkeit einer Prüfung durch Nutzung mehrerer Einschallrichtungen und -winkel [4] sowie durch den Einsatz von Signalrekonstruktionsverfahren, wie SAFT [5], einzuschätzen.

Zur Ermittlung einzelner Einflussfaktoren auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit eines Prüfsystems können Experimente verwendet werden. Eine ausschließlich empirische Ermittlung an Testkörpern bei statistischer ganzheitlicher Versuchsplanung, d. h. beispielsweise eine ausreichende Anzahl an zu vermessenden Defekten, ist kosten- und zeitintensiv [6] und wird mit steigender Parameterzahl unwirtschaftlich.

Um eine ganzheitliche POD effektiv zu ermitteln, die in probabilistischen bruchmechanischen Berechnungen angewandt werden kann, können ergänzend simulierte Signalantworten zur Bestimmung herangezogen werden. Das Ergebnis empirischer POD-Untersuchungen, die durch Simulationen erweitert werden, wird als „Model Assisted“-POD (MA-POD) bezeichnet [7]. Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es, Untersuchungen zu einer umfassenden und realitätsnahen MA-POD aufzubauen und diese zu validieren.

1. Grundlagen

1.1 Ultraschall

Bei der volumetrischen Ultraschallprüfung großer Schmiedebauteile werden die Bauteile im Impuls-Echo-Verfahren untersucht. Dabei werden Ultraschallwellen, die zunächst vom Prüfkopf ins Bauteil übertragen werden, durch Impedanzsprünge an Materialgrenzen wie Inhomogenitäten und Bauteilgrenzen reflektiert. Bei bekannter materialspezifischer Schallgeschwindigkeit kann unter Verwendung der Signallaufzeit der reflektierten Ultraschallwellen auf den Abstand einer Inhomogenität vom Prüfkopf s_R zurückgerechnet werden. Dieser Arbeit liegt ein Schmiedestahlprüfstück mit der Longitudinalwellengeschwindigkeit $c_l = 5920 \text{ m/s}$ und der Transversalwellengeschwindigkeit $c_t = 3255 \text{ m/s}$ zugrunde. Alle Simulationen wurden mit dem semianalytischen Ultraschallsimulationsprogramm CIVA durchgeführt.

Ist ein detektierter Reflektor kleiner als der Schallbündeldurchmesser in der entsprechenden Tiefe, kann die aufgezeichnete Schalldruckamplitude des Reflektors A_R herangezogen werden, um bei bekannter Referenzschalldruckamplitude A_0 , die Dimension der Inhomogenität mithilfe der AVG-Methode abzuschätzen [8]. Dabei ist darauf zu achten, dass das Verfahren durch die prüfaufgabenspezifische Wellenlänge λ bei einem betrachteten Reflektorabstand s_R limitiert ist (obere Grenze: $\sqrt{2\lambda s_R/\pi}$ [9], untere Grenze: $\lambda/4$ [10]). Sind die Bedingungen erfüllt, dient der folgende Ausdruck (1), dessen Herleitung [11]

entnommen wird, der Umrechnung zwischen dem Schalldruckamplitudenwert eines runden Prüfkopfs mit dem Schwingerdurchmesser D_S und dem kreisrunden Defektdurchmesser D_R :

$$D_R = \frac{4\lambda S_R}{\pi D_S} \sqrt{\frac{A_R}{A_0}} \quad (1)$$

1.2 Fehlerauffindwahrscheinlichkeit

Eine Fehlerauffindwahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit Materialfehler in Abhängigkeit eines prüfaufgabenabhängigen Parameters durch ein zerstörungsfreies Prüfverfahren detektiert werden können. Zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit bei der Ultraschallprüfung werden gemessene und simulierte Amplitudenwerte, oder deren äquivalente Kreisscheibendurchmesser verwendet [7].

Es werden zwei statistische Arten zur POD-Ermittlung unterschieden: die parametrische und die nicht-parametrische Methode. Bei parametrischen Abschätzungen wird den Daten eine bekannte Verteilung zugeschrieben, woraus Parameterschätzer und Hypothesentests generiert werden können. Die Genauigkeit parametrischer Abschätzungen ist zu hinterfragen, da die Annahme einer Verteilungsklasse häufig nicht gerechtfertigt ist [12]. In diesen Fällen können nicht-parametrische Modelle zur POD-Ermittlung herangezogen werden, die unabhängig von Datenpunktverteilungen sind [13].

Parametrisch und nicht-parametrisch ermittelte POD-Kurven unterscheiden sich im Erscheinungsbild: Die Annahme statistisch verteilter Datenpunkte ergibt eine stetige POD-Kurve, wie in Abbildung 1 a) dargestellt. Das nicht-parametrische Vorgehen resultiert hingegen in einzelnen Datenpunkten, die bei ausreichender Anzahl und zuverlässigen Ergebnissen zu einer stetigen Kurve verbunden werden können. Das Ergebnis kann in einfacher Annäherung eine intervallweise lineare POD-Kurve sein, wie sie in Abbildung 1 b) zu sehen ist [13]. Beide Abbildungen zeigen den $a_{90/95}$ -Wert, der üblicherweise als charakteristischer Wert ermittelter POD-Kurven verwendet wird [9, 13]. Der $a_{90/95}$ -Wert gibt an, welche Inhomogenität in Abhängigkeit des gewählten Parameters auf dem unteren 95 % - Konfidenzband mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % gefunden wird [14].

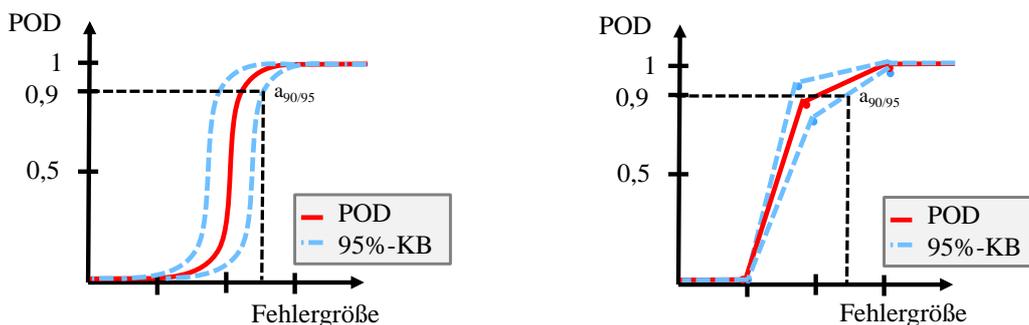


Abb. 1. a) Beispielhafte Darstellung einer parametrisch ermittelten POD-Kurve (links); b) Beispielhafte Darstellung einer nicht-parametrisch ermittelten POD-Kurve (rechts)

In diesem Beitrag wird die parametrische Signalantwortanalyse zur Auswertung der empirischen POD in Abhängigkeit des Prüfrasters verwendet. Dabei wird die Annahme getroffen und überprüft, dass die gemessenen und simulierten Signalantworten lognormalverteilt sind. Die Signalamplitudenwerte werden nach (1) in äquivalente KSR-Durchmesser transformiert und unter Anwendung der erreichten Nachweisgrenze $D_{NWG} = 1,5 \text{ mm}$ die POD bestimmt.

Zur Ermittlung der MA-POD in Abhängigkeit der Defektschräglage werden zunächst simulierte durch experimentell ermittelte Signalantworten validiert. Anschließend werden durch Monte-Carlo-Simulationen zufällige Prüfungen nachgestellt und deren Ergebnisse durch ein nicht-parametrisches Verfahren ausgewertet.

2. Prüfraster-POD

Das Prüfraster definiert die Spur- und Prüfpunktabstände bei der Ultraschallprüfung von Schmiedebauteilen auf Basis des verwendeten Prüfkopfs. Mit der Impulsfolgefrequenz ergibt sich aus dem Prüfraster die Prüfzeit eines Bauteils. Dadurch hat das Prüfraster einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Ultraschallprüfung. Das Prüfraster einer Ultraschallprüfung wird nach [15] durch seine Güte R_N , definiert. Eine Prüfrastergüte von $R_N = 1$ bedeutet, dass das -6 dB-Schallbündel eines Ultraschallprüfkopfs jedes Volumenelement des Prüfobjekts bei einem definierten Schallweg mindestens einmal trifft.

Wie in Abbildung 2 a) angedeutet, existieren auf einer Prüfstückoberfläche unendlich viele mögliche Prüfpunkte. Die Kreisfläche im Hintergrund stellt einen potentiellen Reflektor einer Ultraschallprüfung dar. Durch das nach [15] festgelegte Prüfraster wird in einer realen Bauteilprüfung die Prüfpunktdichte bei vorgegebener Prüfrastergüte auf ein notwendiges Minimum reduziert. Die Anwendung eines Prüfrasters zeigt Abbildung 2 b). Der Bereich um eine Prüfposition bis zu den nächsten wird im Folgenden als Prüfrasterquadrat bezeichnet, und ist in der der Abbildung 2 b) und 2 c) eingezeichnet.

In Abhängigkeit der Startposition der Prüfung werden bei gleichem Prüfraster unterschiedliche Prüfpositionen innerhalb des Prüfrasterquadrats vom -6 dB-Schallbündel erreicht, wie in Abbildung 2 c) dargestellt.

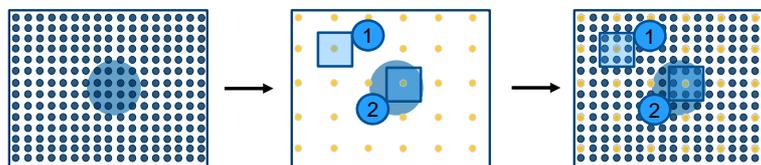


Abb. 2. a) Mögliche Prüfpunkte auf Prüfkörper (links); b) Aus Prüfraster resultierende Messpunkte und Prüfrasterquadrate (1,2) (mitte); c) Prüfrasterquadrate (1,2) einer Messung (rechts)

Durch die Wahl ausreichend vieler Punkte innerhalb des Prüfrasterquadrats, die die für die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit relevanten Informationen enthalten, kann eine zuverlässige POD-Ermittlung mit moderatem Rechen- oder Prüfaufwand erfolgen. Um den Simulationsaufwand zu minimieren, kann ein symmetrisches Prüfrasterquadrat in Prüfrasterdreiecke, wie in der nachfolgenden Abbildung 3 a) gezeigt, aufgeteilt werden. Bei der Auswertung der simulierten Signalantworten muss die Häufigkeit der Messpunkte im Prüfrasterquadrat berücksichtigt werden. Abbildung 3 b) zeigt die in dieser Arbeit verwendete Gewichtung der Signalantworten [11].

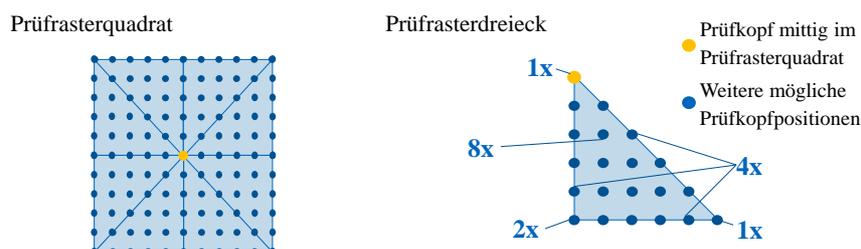


Abb. 3. Die Reduktion des Prüfrasterquadrats (a, links) auf ein Dreieck (b, rechts) erfordert für eine möglichst realistische Abbildung die Gewichtung der simulierten Werte

2.1 Diskussion der Ergebnisse aus vorangegangenen Arbeiten

In den vorangegangenen Arbeiten [1,2] wurde untersucht, wie sich die Wahl des Prüfrasters auf die Unterbewertung von Flachbodenbohrungen (FBH) auswirkt. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen der Unterbewertung und dem FBH-Durchmesser festgestellt. Preißel [1] untersuchte die Abhängigkeit zwischen der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit und dem Prüfraster für Prüfrasterdreiecke bei großen Schmiedebauteilen simulativ. Da die Häufigkeiten der Signalantworten im Prüfrasterquadrat vernachlässigt wurden, wurden zu konservative Fehlerauffindwahrscheinlichkeiten ermittelt.

Die folgende Abbildung 4 zeigt die anhand der $a_{90/95}$ -Werte aus [11,16], die für ungewichtete Prüfrasterdreiecke höher, also konservativer, sind als die der gewichteten Dreiecke. In allen Fällen ist eine deutliche Abnahme der $a_{90/95}$ -Werte mit steigender Prüfrastergüte zu sehen. Die Ergebnisse aus [1] weichen von [11,16] ab. So werden bei [1] konservativere $a_{90/95}$ -Werte bei kleinen Prüfrastergüten und umgekehrt erzeugt.

In [11,16] und [1] wurden für die Untersuchung ein 2 MHz-Senkrechtprüfkopf mit kreisrundem Schwinger des Durchmessers $D_S = 24 \text{ mm}$ simuliert. Das Prüfraster wurde mit der Güte $R_n = 1$ beim Schallweg von $s_n = 100 \text{ mm}$ definiert. Der Prüfkopf detektierte FBHs der Durchmesser $D_{FBH} = 0,7 \text{ mm} \dots 8 \text{ mm}$ bei einem Schallweg von $s_{FBH} = 200 \text{ mm}$ [1, 11].

Die Abweichungen der Ergebnisse von Preißel [1] zu den ungewichteten Daten aus [11,16] sind auf den abweichenden simulierten Ultraschallimpuls zurückzuführen. In [11] wurde ein realistischer, idealisierter Ultraschallimpuls mit einhüllender Gaußkurve und 70 % Bandbreite bei -12 dB verwendet [11]. Die Abweichungen zwischen den POD-Ergebnissen der ungewichteten Daten aus [1] und [11,16] zeigen, wie stark die Ergebnisse der Ultraschallprüfung von Prüfkopfparametern, wie dem Sendeimpuls, abhängen können.

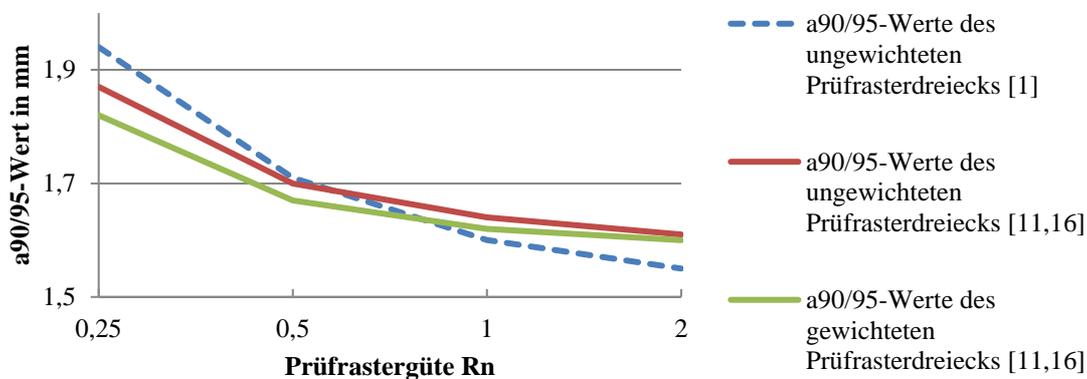


Abb. 4. Die $a_{90/95}$ -Werte des ungewichteten Dreiecks sind konservativer als das Ergebnis bei Berücksichtigung der Häufigkeiten; (2 MHz-Prüfkopf, $D_S = 24 \text{ mm}$, $s_n = 100 \text{ mm}$, $s_R = 200 \text{ mm}$, $D_{FBH} = 0,7 \text{ mm} \dots 8 \text{ mm}$)

2.2 Prüfraster Summen-POD

Ist das Prüfraster auf einen Schallweg eingestellt, steigt der Grad der Überschneidung der Schallbündel mit zunehmendem Schallweg. Unter der Voraussetzung, dass der Signal-Rausch-Abstand groß genug ist, um die Signalantwort des Reflektors eindeutig zu identifizieren, wirkt sich die Überlagerung positiv auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit eines Reflektors aus [1].

In bisherigen Untersuchungen zur Fehlerauffindwahrscheinlichkeit lagen die Reflektoren bei einem definierten Schallweg. In einer realen Prüfung hingegen befinden sich die Reflektoren in unbekanntem Abständen zum Prüfkopf. Um das Szenario einer realen

Prüfung zu simulieren, wird die in Abbildung 5 a) dargestellte Konfiguration verwendet. Als Prüfrasterschallweg wird $s_n = 100 \text{ mm}$ mit einer Prüfrastergüte von $R_n = 1$ gewählt. Die Reflektoren (FBHs mit $D_{FBH} = 0,7 \text{ mm} \dots 8 \text{ mm}$) sind in 100 mm-Schritten bei Schallwegen von $s_R = 200 \text{ mm}$ bis $s_R = 900 \text{ mm}$ angeordnet. Werden die Signalantworten ausgewertet, ergibt sich die in Abbildung 5 b) gezeigte POD-Kurve mit einem $a_{90/95}$ -Wert von $a_{90/95} = 1,62 \text{ mm}$, wobei das Konfidenzband sich aufgrund der hohen Anzahl an Werten stark an die POD-Kurve annähert.

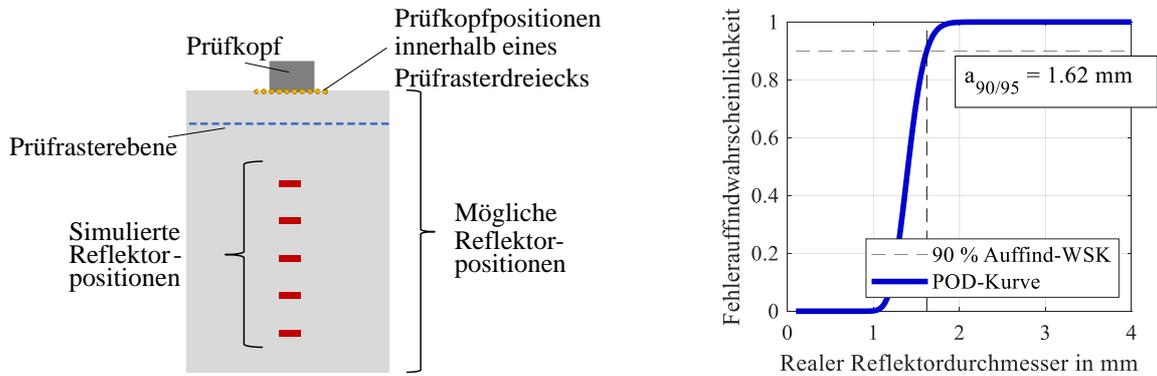


Abb. 5. a) Simulationskonfiguration zur Bestimmung einer Prüfraster-Summen-POD
b) Prüfraster-Summen-POD Kurve eines 2 MHz-Prüfkopfs mit $D_S = 24 \text{ mm}$, $s_n = 100 \text{ mm}$ und $s_R = 200 \dots 900 \text{ mm}$ und $D_{FBH} = 0,7 \text{ mm} \dots 8 \text{ mm}$

3. Experimentelle Validierung der Prüfraster-POD-Ergebnisse

Die Aussagefähigkeit einer „Model Assisted“-POD steigt durch Validierung von Zwischenergebnissen durch empirische Untersuchungen. In der vorliegenden Arbeit wurde dazu der von Preisel [1] entwickelte Prüfkörper verwendet. Der Messpunktastand und Spurversatz der automatisierten Prüfung wurde aufgrund der erreichbaren Manipulatorgenauigkeit zu $d_x = d_y = 0,2 \text{ mm}$ gewählt. Für die Prüfung im Labormaßstab wurde ein 2 MHz-Prüfkopf mit einem Schwingerdurchmesser von $D_S = 10 \text{ mm}$ vom Typ MB2S der Firma GE verwendet. Der Prüfkopf stammt aus Vorverwendungen an der BAM und hat laut Datenblatt einen Öffnungswinkel von 9° . Eine schematische Darstellung des Messbereichs inklusive der durch Funkenerosion eingebrachten Flachbodenbohrungen, sowie eine exemplarische Messung sind in der Abbildung 6 dargestellt.

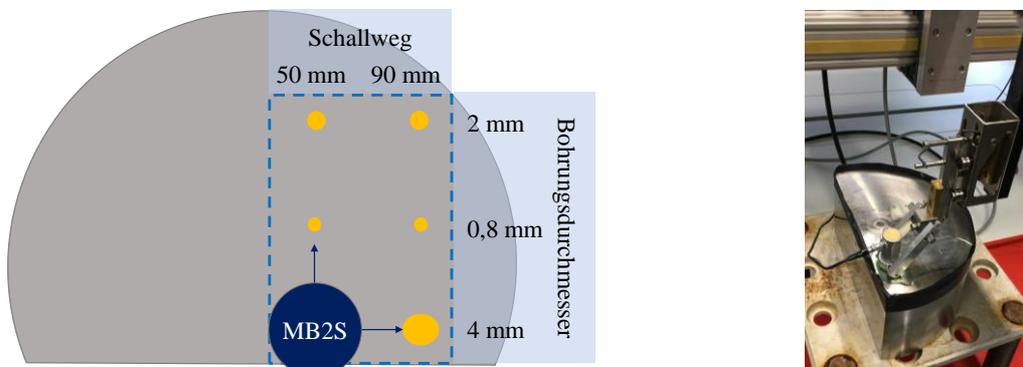


Abb. 6. a) schematische Darstellung des Prüfbereichs (links); b) realer Messaufbau

Abbildung 7 zeigt eine aus den experimentell ermittelten Signalantworten resultierende POD-Kurve im Vergleich zu einer simulativ ermittelten POD-Kurve.

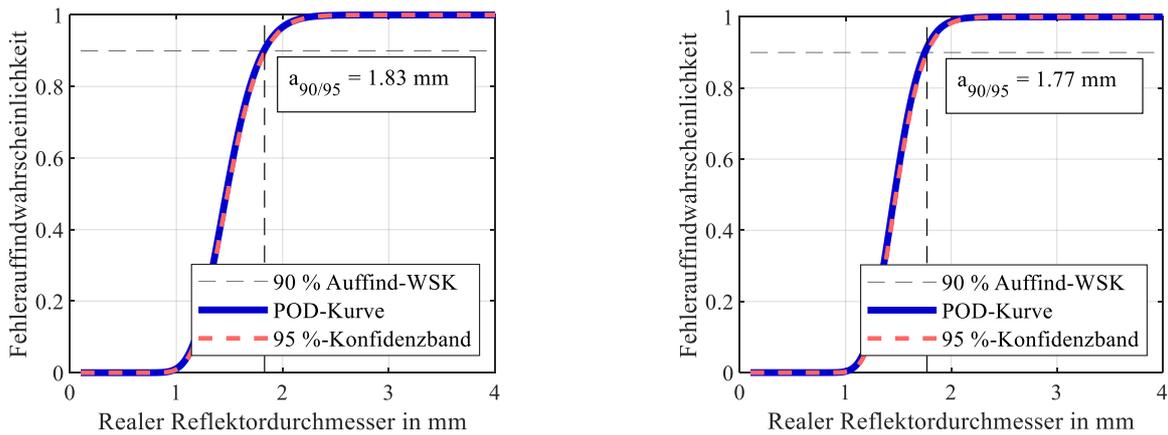


Abb. 7. Experimentell (links) und simulativ (rechts) ermitteltes POD Diagramm eines 2 MHz-Prüfkopfs mit $D_S = 10$ mm und Reflektoren der Durchmesser $D_{FBH} = 0,8...4$ mm bei $s_R = 50$ mm

Nach einer Prüfkopfcharakterisierung können die geringfügigen Abweichungen auf die alterungsbedingt veränderte Mittenfrequenz und Schallfeldgeometrie zurückgeführt werden. Die veränderte Schallfeldgeometrie ist in der folgenden Abbildung 8 zu sehen, die die in ovaler Form erscheinenden Signalantworten der Flachbodenbohrungen beim Schallweg von $s_R = 50$ mm zeigt. Die Mittenfrequenz des verwendeten Prüfkopfes lag bei 3 MHz an Stelle der nominalen 2 MHz, wodurch sich der Öffnungswinkel von nominal 9° auf 6° reduziert. Die gezeigten Ausschnitte sind Prüfrasterquadrate, die Werte bis -6 dB des Reflektoramplitudenmaximums beinhalten sollten. Durch das schmalere und asymmetrische Schallbündel sind Abweichungen bis -12 dB zu erkennen. Dies resultiert in der Berücksichtigung zu kleiner Werte und dadurch in einer Verfälschung der POD-Ergebnisse. Um derartige Abweichungen zu vermeiden, sollten daher, in einer realen Prüfung, die kritischen Parameter von Prüfköpfen regelmäßig überprüft werden und Prüfköpfe mit bekannten Charakteristiken eingesetzt werden.

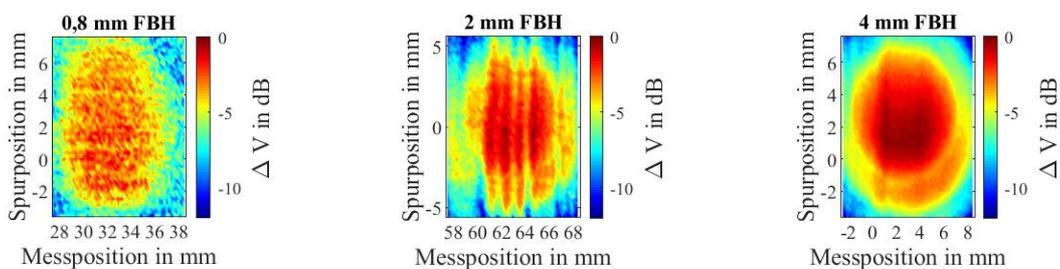


Abb. 8. Die Signalantworten innerhalb eines Prüfrasterquadrats zeigen bei allen vermessenen FBHs die veränderte ovale Schallfeldgeometrie und den Effekt des schmaleren Schallbündels (2 MHz-Prüfkopf, $D_S = 10$ mm, $D_{FBH} = 0,8...4$ mm, $s_R = 50$ mm)

4. Schräglagen-POD

Die bisher vorgestellten Untersuchungen zur Fehlerauffindwahrscheinlichkeit aus [1] und [11] berücksichtigen orthogonal zur Einschallachse liegende Reflektoren. In der Prüfrealität ist diese Annahme unzutreffend, weswegen im Folgenden der Einfluss der Schräglagenabhängigkeit auf die POD untersucht wird. Preißel [1] belegte, dass Reflektoren mit steigender Schräglage zunehmend unterbewertet werden und dass der Einfluss der Unterbewertung große Reflektoren stärker betrifft als kleine. Die folgende Abbildung 9 a) zeigt die Simulationskonfiguration und 9 b) die resultierenden simulierten Signalantworten, die ein 2 MHz-Prüfkopf mit $D_S = 10$ mm in Abhängigkeit von der Schräglage eines

Reflektors in $s = 50 \text{ mm}$, empfängt. Die abnehmenden Signalamplituden bekräftigt die Relevanz der Ultraschallprüfung aus drei orthogonalen Einschallrichtungen.

Die empfangenen Amplituden der 0,8 mm FBH, der 2 mm FBH und der 4 mm FBH wurden experimentell validiert [11]. Die Limitierung der AVG-Methode bei der Umrechnung in KSR-Durchmesser ist bei der FBH mit $D_{FBH} = 10 \text{ mm}$, die mit $D_{KSR} = 9 \text{ mm}$ deutlich unterbewertet wird, zu sehen.

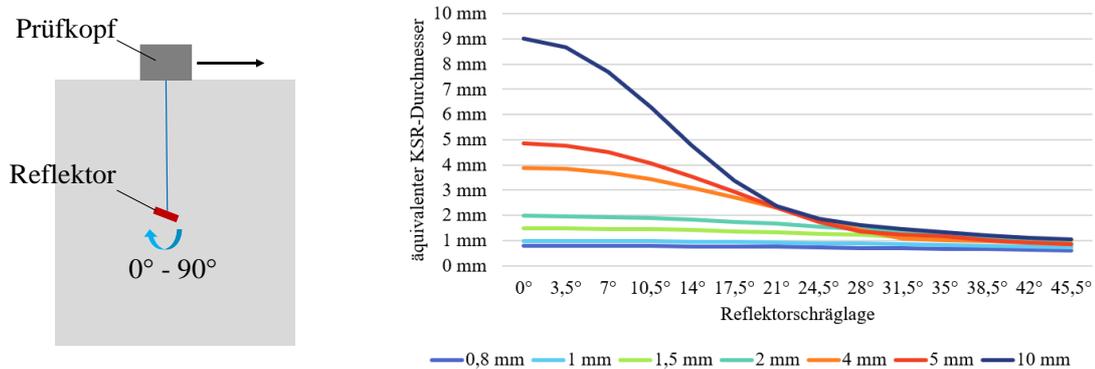


Abb. 9. a) Konfiguration zur Simulation der Schräglagenechoamplituden (links); b) resultierende Schräglagenechos in äquivalenten KSR-Durchmessern (2 MHz-Prüfkopf, $D_S = 10 \text{ mm}$, $s_R = 50 \text{ mm}$)

4.1. Aufbau einer Monte-Carlo-Simulation zur Ermittlung der POD

Zur Ermittlung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Reflektorschräglage werden zufällige Messungen mit einer Monte-Carlo-Simulation modelliert.

Im ersten Schritt werden dazu die Signalamplitudenwerte für verschiedene FBH-Durchmesser für die Winkel von 0° bis 90° berechnet und in äquivalente KSR-Durchmesser umgerechnet. Nachfolgend werden als Pseudozufallszahlen $n = 100$ und $n = 1000$ zufällige Winkel erzeugt und der entsprechende KSR-Durchmesser ermittelt. Die $n = 1000$ Winkel dienen der statistischen Absicherung der Ergebnisse und werden aufgrund des Rechenaufwands nur vereinzelt zum Vergleich herangezogen.

Im nächsten Schritt wird aus den n Signalantworten für jeden FBH-Durchmesser die Auffindwahrscheinlichkeit ermittelt, also wie hoch der prozentuale Anteil der Werte oberhalb der Nachweisgrenze von $a_{NWG} = 1,5 \text{ mm}$ ist.

Auf diese Weise werden je Simulationskonfiguration 1500 Einzelmessungen nachgestellt und ausgewertet. Die zugehörigen Mittelwerte der Auffindwahrscheinlichkeit je Reflektordurchmesser bilden die POD-Kurve. Das Konfidenzintervall wird durch die Standardabweichung σ in Form eines 2σ -Bands angegeben [11].

4.2 Resultierende POD-Kurven und Ergebnisse

Um verschiedene Prüfsituationen zu vergleichen, wurden weitere Parameter, wie der Prüfkopf ($D_S = 10 \text{ mm}$; $D_S = 24 \text{ mm}$), der betrachtete Winkelbereich ($\pm 10^\circ$ bis $\pm 90^\circ$) und die statistische Verteilung (Gleich- und Normalverteilung) der Winkel variiert und ihr Einfluss auf die resultierende POD-Kurve untersucht. Die vollständigen Ergebnisse können [11] entnommen werden. In der folgenden Abbildung 10 sind die POD-Kurven des modellierten Prüfkopfs (Prüffrequenz 2 MHz , $D_S = 24 \text{ mm}$) der Schräglagenprüfung für die Winkelbereiche $\pm 10^\circ$, $\pm 45^\circ$ und $\pm 90^\circ$ dargestellt.

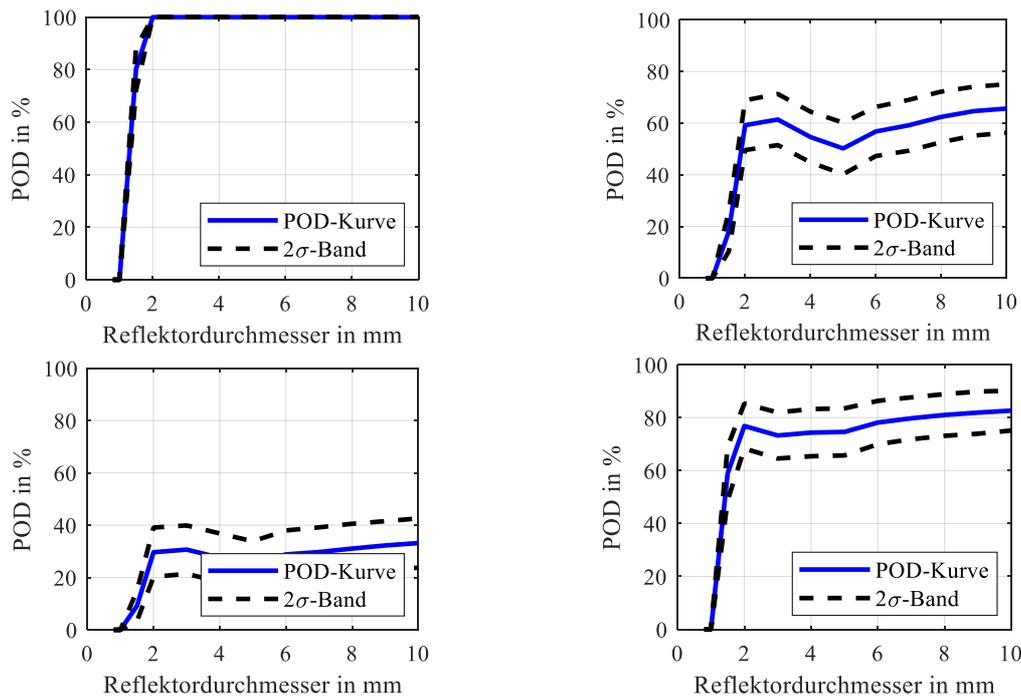


Abb. 10. POD-Kurven für den 24 mm-Prüfkopf: a) Winkelbereich $\pm 10^\circ$, Gleichverteilung (oben links); b) Winkelbereich $\pm 45^\circ$, Gleichverteilung (oben rechts); c) Winkelbereich $\pm 90^\circ$, Gleichverteilung (unten links); d) Winkelbereich $\pm 90^\circ$, Normalverteilung (unten rechts)

Zusammenfassend können aus den Ergebnissen der Schräglagen-POD Untersuchung die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Befinden sich die Reflektorwinkel im Bereich bis $\pm 10^\circ$ (Abbildung 10 a)), werden Defekte vom Prüfsystem zuverlässig detektiert und die POD nähert sich 100 % an. Der $a_{90/95}$ -Wert wird zu $a_{90/95} = 1,82$ ermittelt.
- Bei der Änderung der Winkelverteilung von $\pm 90^\circ$ (Abbildung 10 c)) auf $\pm 45^\circ$ (Abbildung 10 b)) und von $\pm 45^\circ$ auf $\pm 10^\circ$ kann eine deutliche Steigerung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit, bis hin zur Verdopplung festgestellt werden.
- Die Änderung der statistischen Verteilung der Winkel von Gleichverteilung (Abbildung 10 c)) auf Normalverteilung (Abbildung 10 d)) hat einen steigernden Einfluss auf die POD von etwa 50 %. Das 2 σ -Band, welches 95 % der Signalantworten enthält, zeigt bei 100 Winkeln für beide Verteilungsarten eine vergleichbare Streuung. Mit steigender Winkelanzahl nähert sich das 2 σ -Band an die POD-Kurve an [11].
- Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des Winkelbereichs und der Winkelverteilung auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit. Zur Bestimmung einer aussagekräftigen MA-POD wird daher empfohlen, diese Parameter für reale Materialdefekte zu bestimmen.

4.3 Experimentelle Verifikation

Die Zuverlässigkeit einer MA-POD steigt mit der experimentellen Validierung und erfolgt an ausgewählten, anwendungsspezifisch geeigneten Prüfkörpern. Testkörper mit schrägliegenden Reflektoren unterschiedlicher Durchmesser herzustellen und diese zu vermessen ist kosten- und zeitintensiv. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine vergleichbare Phased-Array-Prüfkopf-basierte Methode zur Validierung der Signalantworten von schrägliegenden Reflektoren Methode entwickelt. Dabei werden Reflektoren, die parallel zur Einschalloberfläche im Prüfkörper liegen, in $3,5^\circ$ -Schritten mit einem Phased-Array-Prüfkopf mit 8 Elementen der Länge 10 mm geprüft und die maximal empfangene Amplitude

je Schräglage ausgewertet. Die simulierten Signalantworten zeigen gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen [11].

5. Einfluss der Defektmorphologie auf die Zuverlässigkeit der Charakterisierung

Häufig basieren empirisch ermittelte Fehlerrückmeldungswahrscheinlichkeit auf der Vermessung künstlicher Defekte wie Flachbodenbohrungen. Reale Materialinhomogenitäten, wie in Abbildung 11 dargestellt, weichen geometrisch von der idealisierten Annahme einer Flachbodenbohrung ab. Bei der Ultraschallprüfung hat die Defektmorphologie einen Einfluss auf die Signalantwort, die Fehlerrückmeldungswahrscheinlichkeit und die Charakterisierung einer Inhomogenität und muss in einer ganzheitlichen MA-POD berücksichtigt werden [17].

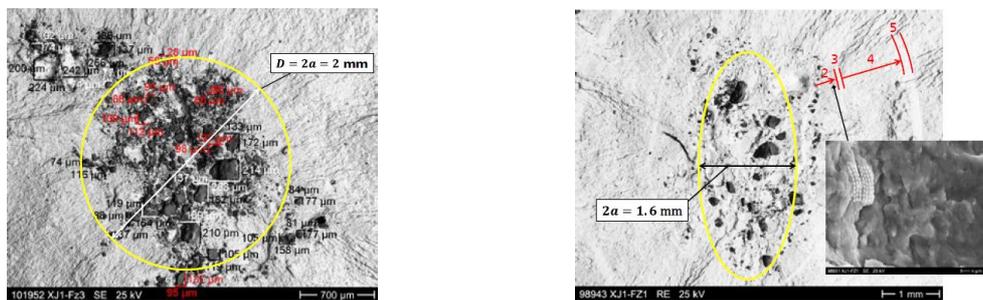


Abb. 11. Reale Materialinhomogenitäten geschmiedeter Testkörper aus [18]

Im Folgenden wird der Einfluss der Defektmorphologie auf die Echodynamik anhand eines einfachen Modells untersucht. Darin wird die Ultraschallechoamplitude einer Flachbodenbohrung (FBH A) mit der zwei kleineren Flachbodenbohrungen (FBH B und FBH C) mit lateralem Abstand d_A zueinander, verglichen. Die addierten Flächeninhalte der FBHs B und C entsprechen dabei dem Flächeninhalt der FBH A. Alle FBHs sind beim selben Schallweg angeordnet.

Abbildung 12 zeigt die Echodynamikkurven eines 2 MHz-Prüfkopfs mit dem Schwingerdurchmesser $D_S = 24$ mm für die FBH A ($D_{FBH A} = 1$ mm, Abbildung 12 a)) im Vergleich zur FBH B und C ($D_{FBH B} = D_{FBH C} = 0,707$ mm) beim Schallweg von $s_{FBH} = 200$ mm. Der Abstand der FBHs in der Abbildung 12 b) beträgt $d_A = 17,5$ mm. In Abbildung 12 a) ist ein Amplitudenmaximum zu sehen, aus welchem der äquivalente KSR-Durchmesser der Anzeige bestimmt werden kann. Die resultierende Echodynamik der beiden FBHs B und C in Abbildung 12 b) zeigt drei Amplitudenmaxima, ein Haupt- und zwei Seitenmaxima (A_{Max}) mit geringem Abstand zueinander. Das mittige Maximum überragt die Seitenmaxima in dieser Konfiguration. Die Amplitudenminima (A_{Min}) weisen geringfügig kleinere absolute Amplitudenwerte auf, wodurch diese Echodynamik trotz dem Abstand der FBHs von $d_A = 17,5$ mm als Gruppenanzeige interpretiert werden könnte.

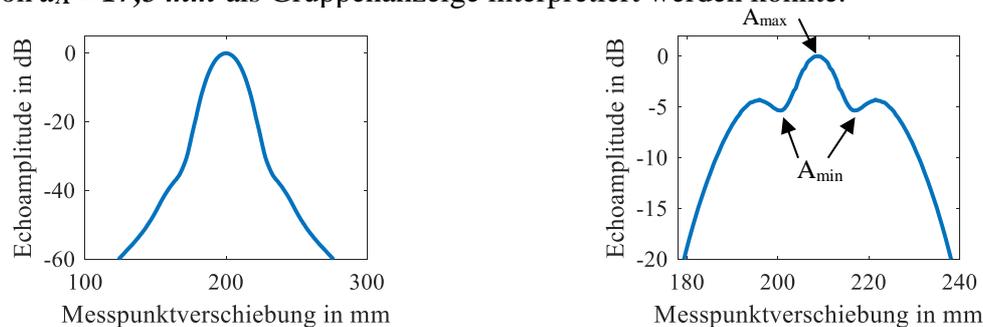


Abb. 12. a) Echodynamikkurve einer 1 mm-FBH (links); b) Echodynamikkurve zweier 0,707 mm-FBHs beim Schallweg $s = 200$ mm mit dem Abstand $d_A = 17,5$ mm (rechts)

Die Ergebnisse der Simulation bis zum Reflektorenabstand $d_A = 50 \text{ mm}$ sind in [11] ausführlich dargestellt und in der nachfolgenden Abbildung 13 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass räumlich nahe FBH-Reflektoren beim selben Schallweg bis zu einer Entfernung von $d_A = 2/3 D_{\text{Schallbündel}} = 17,5 \text{ mm}$ aufgrund des eindeutigen Maximums in ihrer Echodynamik als Einzelanzeige (EA) interpretiert werden können. Ohne explizite Nachprüfung mit Fokussierung hat ein Ultraschallprüfer keine Möglichkeit, die EA anhand der Echodynamik als Mehrfachanzeige zu erkennen. Abbildung 13 zeigt, dass bis zu dem Reflektorabstand $d_A = 2/3 D_{\text{Schallbündel}} = 17,5 \text{ mm}$ das mittige Amplitudenmaximum der EA abnimmt, wodurch es im Falle einer als EA interpretierten Fläche zu einer Unterbewertung kommen kann.

Mit steigender Reflektorenentfernung werden Seitenmaxima ausgebildet, welche erstmals bei $d_A = 2/3 D_{\text{Schallbündel}} = 17,5 \text{ mm}$ so groß werden, dass die Anzeige als nicht auflösbare Gruppenanzeige (NAGA) interpretiert werden kann. Der Abstand von A_{Max} zum benachbarten A_{Min} beträgt dann mindestens 6 dB. Ab einem Reflektorabstand von $d_A = 3/2 D_{\text{Schallbündel}} = 40 \text{ mm}$ kann in Anlehnung an [19] von einer auflösbaren Gruppenanzeige (AGA) bzw. mehreren Einzelanzeigen ausgegangen werden, da die Differenz zwischen A_{Max} und dem benachbarten Fußpunkt A_{Min} ab dieser Entfernung größer als 18 dB ist.

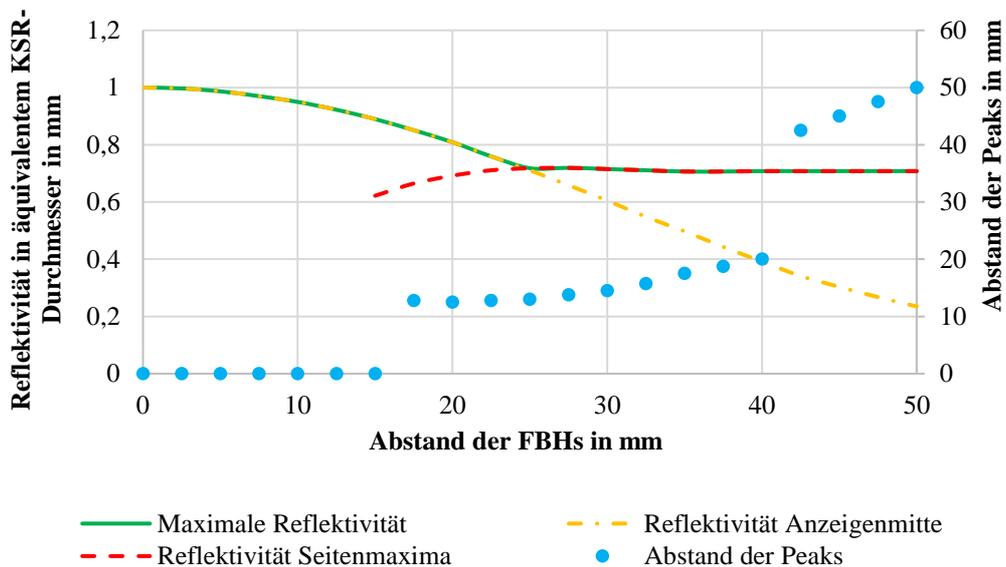


Abb. 13. Charakterisierung einer Anzeige zweier Reflektoren (FBH B und C, $D_{\text{FBH B}} = D_{\text{FBH C}} = 0,7 \text{ mm}$, 2MHz-Prüfkopf, $D_S = 24 \text{ mm}$, $s_{\text{FBH}} = 200 \text{ mm}$) in Abhängigkeit des Reflektorabstands d_A und der Reflektivität

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit eines mechanisierten Ultraschallprüfsystems mit semianalytisch berechneten Signalantworten ermittelt werden kann. Dabei wurde ein enger Zusammenhang zwischen der POD und den schallfelddefinierenden Prüfkopfparametern festgestellt. Auf dieser Erkenntnis aufbauend konnte die Prüfraster-Summen-POD, die die volumetrische Schmiedeteilprüfung abbildet, ermittelt werden.

Der erwartete Einfluss der Reflektorschräglage auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit hat sich in weiterführenden Simulationen bestätigt. Dabei wurden Messungen durch Signalamplitudenwerte aus Monte-Carlo-Simulationen nachgebildet, und diese mit nicht-parametrischen Methoden ausgewertet. Außerdem wurde

ein effizientes Verfahren entwickelt, um die Schräglagenamplituden mithilfe eines Phased-Array-Prüfkopfs zu validieren. Haupteinflussparameter der Untersuchungen auf die POD waren die statistische Winkelverteilung und der Gradzahlbereich der Winkel. Einen geringeren Einfluss hatten der Reflektorschallweg oder die Anzahl der Winkel.

Die Analysen zum Einfluss des lateralen Abstands zweier FBHs auf die Charakterisierung ergaben, dass Mehrdeutigkeiten möglich sind. So zeigt beispielsweise die Echodynamik zwei räumlich naher FBHs die Form einer typischen Einzelanzeige.

Da die schallfelddefinierenden Prüfkopfparameter einen großen Einfluss auf die POD haben, muss für die ganzheitliche MA-POD der Schmiedebauteile die Varianz der verwendeten Prüfköpfe berücksichtigt werden. Weiterführende Analysen sollten weitere systemspezifische Parameter, wie nichtmetallische und metallische Einschlüsse, sowie weitere geometrische Morphologien untersuchen. Für eine ganzheitliche POD nach Müller [20] müssen außerdem nicht-prüfsystemspezifische Faktoren, wie Human Factors und die Prüfumgebung berücksichtigt werden.

Es wird empfohlen, eine regelmäßige Prüfkopfcharakterisierung in die Standardisierung aufzunehmen, damit sichergestellt ist, dass nur Prüfköpfe mit Kennwerten innerhalb der Toleranzen verwendet werden.

Referenzen

- [1] M. Preißel: „Ermittlung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Rastergröße bei der Ultraschallprüfung großer Schmiedestücke“ Diplomarbeit, TU Dresden, 2015
- [2] M. Preißel, T. Heckel, J. Vrana: „Ermittlung der Auffindwahrscheinlichkeit von Reflektoren in Abhängigkeit der Rastergröße bei der Ultraschallprüfung großer Schmiedestücke“ ZfP Zeitung, Volume 150, Seite 52-57, 2016
- [3] J. Vrana et al: “Evolution of the Ultrasonic Inspection over the Past Decades on the Example of Heavy Rotor Forgings” 19th WCNDT, München, Germany, 2016
- [4] J. Vrana et al: “Ultrasonic Computed Tomography: Pushing the Boundaries of the Ultrasonic Inspection of Forgings”, Steel Research Int. 89 Volume 4, 2018
- [5] J. Vrana et al: “Smart Data Analysis of the Results of Ultrasonic Inspections for Probabilistic Fracture Mechanics” VGB Journal 2018, Volume 7, Seite 38-42, 2018
- [6] M. Carboni, S. Cantini: “Advanced ultrasonic “Probability of Detection” curves for designing in-service inspection intervals”, International Journal of Fatigue, Vol. 86, Seite 77-87, 2016
- [7] R. M. Meyer et al: „Review on Literature for Model Assisted Probability of Detection”, Edited by Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department for Energy, Richland, Washington, 2014
- [8] J. Krautkrämer., H. Krautkrämer: „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, Springer, Berlin, Heidelberg, 1986
- [9] J. Vrana, Experteninterview-mündlich. Berlin, 09.08.2018
- [10] A. Seeber et al: “Correct sizing of reflectors smaller than one wavelength”, 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018
- [11] J. Berthold: „Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit bei der Ultraschallprüfung großer Schmiedebauteile“, Masterarbeit, TU München, 2018
- [12] A. Oelerich: Robuste Ratingverfahren-Zur Steigerung der Prognosequalität quantitativer Ratingverfahren, Dissertation, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 2005
- [13] D. Kanzler, Experteninterview-mündlich. Berlin, 09.08.2018
- [14] A. Berens & P. Hovey: „Flaw Detection Reliability Criteria-AD-A 141 001 Final Technical rept.”, University of Dayton, Ohio, U.S.A, 1984
- [15] DGZfP: „Richtlinie zur Festlegung des Prüfrasters bei der automatisierten Ultraschallprüfung großer Schmiedestücke“, DGZfP-Richtlinie US 07, 2014
- [16] Y. Wack, T.Heckel: CIVA-Simulation. Berlin, 15.03.2019
- [17] R. Thompson, „A Unified Approach to the Model-Assisted Determination of Probability of Detection”, In AIP Conference Proceedings 975, Volume 1 Seite 1685-1692, 2008
- [18] I. Varfolomeev et al: „Study on fatigue crack initiation and propagation from forging defects”, Procedia Structural Integrity, Elsevier, Volume 7, 2017, Seite 359-367
- [19] SEP1923:2009-02: „Ultraschallprüfung von Schmiedestücken aus Stahl mit höheren Anforderungen, insbesondere für Bauteile in Turbinen- und Generatoranlagen“, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009
- [20] C. Müller et al: „Theory and Application of the Modular Approach to NDE Reliability Bridging the Gap between Safety Requirements and Economy”, NDT.net, Volume 6 No. 9, 2001