

# Experimentelle und Modell-basierte POD-Bestimmung für Volumenfehler in gegossenen Bronze-Bauteilen unterschiedlicher Gefügestruktur

Martin SPIES, Hans RIEDER, Alexander DILLHÖFER

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Tel. +49-631-31600-4276, Email [Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de](mailto:Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de)

**Kurzfassung.** In diesem Beitrag berichten wir über Ergebnisse einer Studie, die wir in einem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt durchgeführt haben. Die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen bilden Flachbodenbohrungen unterschiedlichen Durchmessers, die in Bronze-Testblöcke mit verschiedenen Gefügestrukturen eingebracht wurden. Die Ultraschalldaten haben wir in einer  $\hat{a}$ -vs- $a$ -Analyse zur POD-Ermittlung verwendet. Wir präsentieren die Ergebnisse und geben einen Ausblick zu deren Nutzung bei der Prüfung von Schiffsantriebskomponenten.

## 1. Einführung

Bei schwerprüfbaaren Bauteilen wie z.B. Gusskomponenten müssen im Hinblick auf die Ultraschallprüfung eine Vielzahl von Material- und Geometrieparametern berücksichtigt werden. Mit Hilfe von validierten Simulationsverfahren kann der Einfluss von Oberflächenkrümmungen, unterschiedlicher Fehlerparameter, aber auch der durch die Gefügestruktur bedingten Schallschwächung virtuell untersucht werden. Dies ist insbesondere für die Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (‘Probability of Detection’, POD) von Vorteil, denn die Modell-basierte POD-Analyse (‘Model-assisted’, MAPOD) benötigt lediglich eine geringe Anzahl von Testkörpern zur Ermittlung verschiedener Eingangsparameter als Basis für die Simulation sowie zu deren Absicherung und Validierung.

In diesem Beitrag berichten wir über Ergebnisse, die wir im Rahmen einer umfangreichen Studie in einem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt erzielt haben. Die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen bilden Flachbodenbohrungen unterschiedlichen Durchmessers als Modellfehler, die in unterschiedlichen Tiefen in Bronze-Testblöcke eingebracht wurden. Die mittels konventionellen Prüfköpfen mechanisiert aufgezeichneten Ultraschalldaten haben wir hinsichtlich der maximalen Fehleramplituden ausgewertet (A-Scan-Bewertung) und in einer  $\hat{a}$  versus  $a$ -Analyse zur POD-Bestimmung verwendet. Anhand dieser Ergebnisse haben wir unseren auf der DACH-Tagung 2012 [1] vorgestellten Ansatz der Modell-basierten POD-Bestimmung unter Verwendung der Generalisierten Punktquellensynthese (GPSS) validiert. Wir zeigen die Ergebnisse unserer POD- und MAPOD-Berechnungen für repräsentative Gefügestrukturen in CuNiAl-Bronzen und geben einen Ausblick auf die Nutzung dieser Ergebnisse bei der Vor-Ort-Prüfung an Gussbauteilen wie beispielsweise Schiffsantriebskomponenten.



## 2. Fehlerauffindwahrscheinlichkeit - Bestimmung der POD und MAPOD

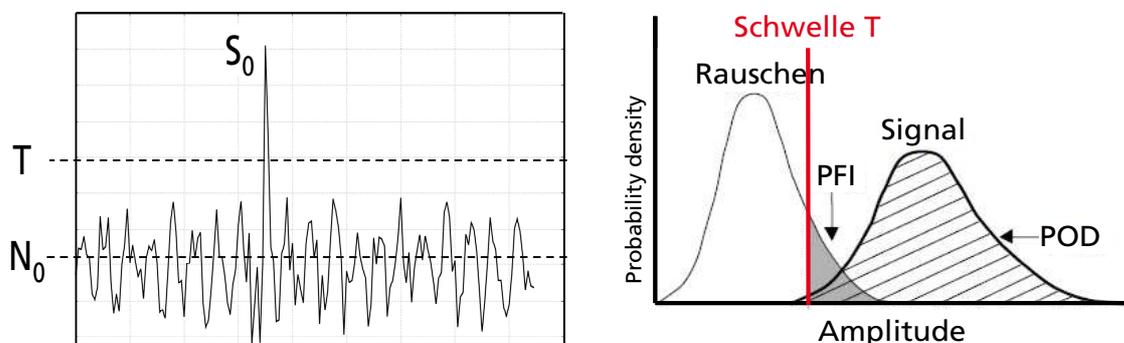
### 2.1 Hintergrund

Die experimentelle Ermittlung von POD-Kurven erfordert die Planung und Durchführung von wohl definierten Inspektionen an geeigneten Testkörpern. Dabei spielen neben der aufzufindenden Fehlergröße auch die Materialeigenschaften und die Geometrie der zu untersuchenden Bauteile eine Rolle. Die POD-Kurve (in diesem Beitrag ermittelt als eine Funktion der Fehlergröße  $a$ ) liefert zusammen mit den relevanten Konfidenzintervallen die Fehlergröße, die mit einer ‚vernünftigen‘ Wahrscheinlichkeit detektiert werden kann. Der prinzipielle Verlauf der POD-Kurve zeigt, dass die Detektionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Fehlergröße ansteigt. An der Größe  $a_{90/95}$  schneidet die untere 95 % Konfidenzgrenze das 90 % POD-Niveau. Der Wert  $a_{90/95}$  wird üblicherweise als die sicher zu detektierende Fehlergröße und im Hinblick auf die Anforderungen an die Bauteilintegrität als relevant betrachtet [2].

Zur POD-Bestimmung anhand einer  $\hat{a}$ -vs- $a$ -Analyse verwenden wir Testkörper mit Modellfehlern unterschiedlicher Größe. Bei der Prüfung erzeugt ein Fehler der Größe  $a$  ein Signal der Amplitude  $\hat{a}$ , das als ‚Treffer‘ interpretiert wird, wenn es den festgelegten Entscheidungsschwellwert  $\hat{a}_{dec}$  (z.B. 6 dB über Rauschen) übersteigt. Unter der Annahme einer spezifischen statistischen Verteilung der Daten kann das resultierende  $\hat{a}$ -vs- $a$ -Diagramm in eine POD-Kurve überführt werden. Die im Handbuch MIL-HDBK-1823 beschriebene, international als Standard akzeptierte Vorgehensweise und die dazugehörige Berechnungssoftware (‚mh1823‘) gehen dabei von der Annahme aus, dass die Signalamplituden mit konstanter Varianz statistisch normalverteilt sind. Außerdem wird ein linearer Verlauf zwischen der Amplitude  $\hat{a}$  und der Fehlergröße  $a$  angenommen [2].

### 2.2 MAPOD-geeignetes Modell zur Berechnung von POD

Demgegenüber nutzen wir in diesem Beitrag ein Modell zur POD-Berechnung, das nicht diesen beiden Annahmen unterliegt [1]. Im Folgenden bezeichnen wir mit  $S$  die Fehleramplitude (entspricht  $\hat{a}$ ) und mit  $T$  den Entscheidungsschwellwert (entspricht  $\hat{a}_{dec}$ ). Wir gehen von einer (z.B. berechneten) Fehleramplitude  $S_0$  aus, die durch Überlagerung mit dem statistischen Rauschen (‚weißes Rauschen‘, bedingt durch das Prüfsystem und die Mikrostruktur des Werkstoffs) zum resultierenden Signal der Amplitude  $S$  wird. Unter der Annahme, dass das Rauschen unabhängig von der Prüfkopfposition ist, kann das Rauschsignal  $N$  durch eine mittlere Rauschamplitude  $N_0$  charakterisiert werden [3,4] (Abb. 1, links).



**Abb. 1** Links: schematische Darstellung von Fehleramplitude  $S_0$ , Rauschen mit mittlerer Amplitude  $N_0$  und Schwellwert  $T$ . Rechts: schematische Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Rausch- bzw. Fehleramplituden und der Abhängigkeit von POD und Fehlanzeigenwahrscheinlichkeit PFI vom Schwellwert.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für  $N$  folgt dann mit der Varianz  $\sigma_0$  in Form einer Rayleigh-Verteilung gemäß [5]

$$P(N) = \frac{N}{\sigma_0^2} \exp\left[-\frac{N^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (1)$$

wobei  $N_0 = \sigma_0\sqrt{\pi}/2$ . Die Überlagerung dieses Rauschens mit dem Fehlersignal  $S_0$  führt zum Gesamtsignal  $S$  mit der Rice-Wahrscheinlichkeitsverteilung [5]

$$P(S) = \frac{S}{\sigma_0^2} \exp\left[-\frac{(S^2 + S_0^2)}{2\sigma_0^2}\right] I_0\left(\frac{S S_0}{\sigma_0^2}\right), \quad (2)$$

wobei  $I_0(x)$  die Bessel-Funktion nullter Ordnung ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass  $S$  die Schwelle  $T$  übersteigt folgt dann gemäß

$$POD = \int_T^\infty P(S) dS, \quad (3)$$

während die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlanzeige (PFI: Probability of False Indication, d.h. das Rauschen  $N$  übersteigt die Schwelle  $T$ ) gegeben ist durch

$$PFI = \int_T^\infty P(N) dN. \quad (4)$$

POD und PFI werden also durch das Verhältnis von  $S_0$  und  $N_0$  zum Entscheidungsschwellwert  $T$  bestimmt (siehe Abbildung 1).

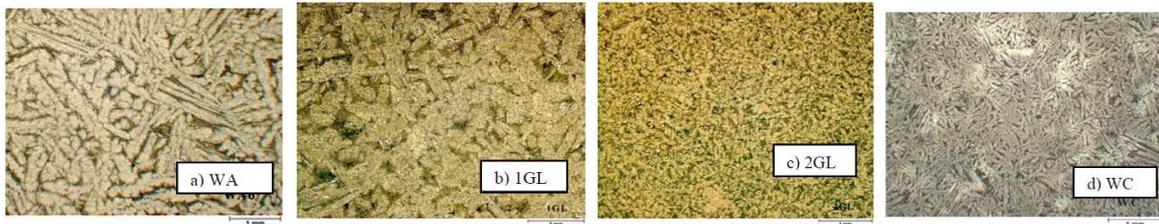
### 2.3 Simulation der Fehleramplituden

Die Modell-basierte POD-Bestimmung stützt sich auf die Berechnung von Fehlersignalen in simulierten (,virtuellen') Experimenten. Wir verwenden hierzu die Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS, [6-9]). Zunächst erfolgt die Berechnung der Prüfkopfschallfelder durch die Modellierung der Abstrahlung der Ultraschallwellen durch den Prüfkopf sowie deren Ausbreitung im jeweiligen Medium, unter Berücksichtigung des Reflexions- und Transmissionsprozesses an der ebenen oder gekrümmten Grenzfläche zwischen Vorlaufmedium und Bauteil. Darüber hinaus wird werkstoffabhängig bei den Berechnungen auch die Schallschwächung berücksichtigt. Die Modellierung des Abstrahlverhaltens von Streuern und die Berechnung von Fehlersignalen in Nah- und Fernfeld erfolgt unter Anwendung der Kirchhoffschen Näherung. Die numerische Berechnung der jeweiligen Oberflächenintegrale erfolgt sukzessiv auf der Basis äquidistanter Gitter unter Beachtung des Sampling-Theorems. Die Modellierung der Zeitsignale erfolgt durch Berechnung der harmonischen Wellenfelder für viele Frequenzen mit einer geeigneten Anregungsfunktion zur Charakterisierung des Prüfkopfsignals und deren anschließende numerische Fourier-Transformation in den Zeitbereich.

## 3. Experimentelle Untersuchungen

### 3.1 CuNiAl(Cu3)-Gusswerkstoffe

Für die experimentellen Untersuchungen standen vier unterschiedliche Werkstoffe in Form von ganzen Gussteilen oder als vorkonfektioniertes Plattenmaterial zur Verfügung. In Abbildung 2 sind für diese Werkstoffe repräsentative Schlifffbilder dargestellt. Man erkennt die großen hellen Bereiche der  $\alpha$ -Phase sowie mehr oder weniger große Teilchen einer wei-



**Abb. 2** Mikrostruktur der untersuchten CuNiAl-Bronze-Werkstoffe a) WA mit grobem, b) 1GL mit mittlerem, c) 2GL mit feinem und d) WC mit sehr feinem Gefüge [10].

Material	Gussgefüge	Streckgrenze $R_{p0.2}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Bruchdehnung $A_t$ [%]
WA	grob	204±7	457±27	8±2
1GL	mittel	184±4	533±5	21±1
2GL	fein	216±4	594±15	23±4
WC	sehr fein	255±7	746±32	20±5

**Tabelle 1** Mechanische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe [10].

teren Phase aus Eisen, Nickel und Aluminium. Anhand der in den Schlibfbildern sichtbaren Größe der  $\alpha$ -Phasen lassen sich die Werkstoffe einordnen in: WA grobes, 1GL mittleres, 2GL feines und WC sehr feines Gefüge. Verschiedene Blöcke mit der Bezeichnung WB, vergleichbar mit Werkstoff 2GL, standen uns ebenfalls zur Verfügung.

Die Ursache für die Variation der Mikrostruktur ist die Abkühlgeschwindigkeit bei der Verarbeitung des Werkstoffes. Sie wird in der Praxis im Wesentlichen durch die Größe des Abgusses bestimmt. Eine Vergrößerung der Gusswandstärken führt zu einer geringeren Abkühlgeschwindigkeit und geht mit einer zunehmenden Vergrößerung der Mikrostruktur einher. Im Fall des Werkstoffes WC handelt es sich um Gussstücke mit geringer Wanddicke. Dieser Werkstoff zeigt ein aufgrund der schnellen Abkühlung sehr feines Gefüge, während der Werkstoff WA ein sehr grobes Gefüge aufweist. Er wurde aus einem etwa 350 mm x 350 mm x 800 mm großen Gussstück entnommen. Diese vier untersuchten Werkstoffe decken eine Gefügevariation ab, wie sie in gegossenen Cu3-Schiffspropellern im Dickenbereich von etwa 20 mm (Flügelspitze) bis 500 mm (Fußbereich) auftritt. Tabelle 1 zeigt für diese Werkstoffe eine Aufstellung der gefügebedingt unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften [10].

### 3.2 Testkörper, Ultraschall-Daten

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf die Untersuchungen, die wir an den aus den Werkstoffen WA und WB gefertigten Testblöcken (WA2 mit Wanddicke  $d=50$  mm und WB4 mit  $d=115$  mm, Abb. 3) durchgeführt haben. Während WB4 bei einer Frequenz von 2 MHz für Longitudinalwellen eine moderate Schallschwächung von 0.3 dB/cm aufweist, beträgt diese beim Testblock WA2 mit 1.4 dB/cm etwa das Fünffache. Bei den eingebrachten Modellfehlern handelt es sich um Flachbodenbohrungen (FBB) unterschiedlicher Durchmesser (2 mm bis 8 mm) in einer Tiefe von 5 mm (WA2) bzw. 10 mm (WB4) vor der Rückwand. Die Messungen wurden mit verschiedenen kommerziellen Enelement-Prüfköpfen der jeweiligen Mittenfrequenz von 1.5 MHz und 2.25 MHz durchgeführt. Um vergleichbare Sensoreigenschaften in die POD-Ermittlung einzubringen, wurde die Analyse für eine Frequenz von 2 MHz durch Einsatz eines entsprechenden Filters durchgeführt<sup>1</sup>.

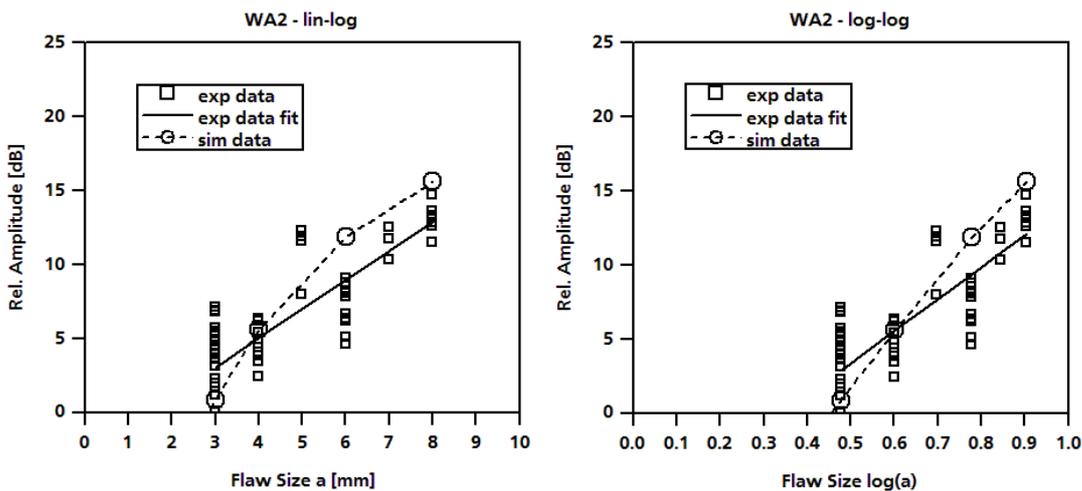
<sup>1</sup>Bei dem durch Testblock WA2 repräsentierten Gefüge wäre eine Prüffrequenz von 1 MHz oder darunter angemessen; dies hätte allerdings die Vergleichbarkeit der experimentellen Daten zunichte gemacht.



**Abb. 3** Links: Testblock WA2, Abmessungen 310 x 285 x 50 mm<sup>3</sup>; rechts: Testblock WB4, Abmessungen ca. 250 x 125 x 115 mm<sup>3</sup> mit FBB der Durchmesser 2 mm bis 8 mm.

Die Ergebnisse zeigen: (a) aufgrund der stark inhomogenen Gefügestruktur ergeben sich für die FBB gleichen Durchmessers unterschiedliche Fehleramplituden mit Schwankungen von ca.  $\pm 3$  dB (WA2, Abb. 4) bis  $\pm 5$  dB (WB4, Abb. 5); (b) die 2 mm FBB (WB4) konnten nicht detektiert werden; (c) die beiden 6 mm voneinander separierten 3 mm Bohrungen in WA2 konnten nicht einzeln aufgelöst werden; (d) die am Testblock WA2 detektierten Fehleramplituden liegen trotz des geringeren Schallwegs bei gleicher Fehlergröße im Mittel etwa 8 dB unter denen von WB4.

Bei der nachfolgenden Auswertung haben wir die jeweils höchsten und niedrigsten Werte aus den Daten verworfen. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen für die beiden Testblöcke jeweils die aus allen mechanisiert aufgezeichneten Datensätzen ermittelten Maximalamplituden in dB im direkten Vergleich mit den unter Berücksichtigung aller Prüfparameter (inklusive Schallschwächung) mittels GPSS simulierten Fehleramplituden. Die Normierung erfolgte jeweils auf die 4 mm FBB. Um die POD-Analyse auf Basis des oben beschriebenen Modells (Glg. (3)) mit der Berechnung gemäß MIL-DBK-1823 [2] vergleichen zu können, verwenden wir die in Abb. 4 und 5 jeweils rechts gezeigte log-log-Darstellung mit einem linearen Fit-Modell<sup>2</sup>.



**Abb. 4** Simulierte und experimentelle Maximalamplituden als Funktion der Fehlergröße, Testblock WA2.

<sup>2</sup>Die simulierten Maximalamplituden zeigen die bekannte Abhängigkeit vom Radius  $r$  eines Kreisscheibenreflektors gemäß  $r^2$  im Fernfeld, die sich aus den experimentellen Daten aufgrund der starken Varianz der Messwerte nicht unmittelbar herauslesen lässt. Auch deshalb haben wir uns für die Auswertung der log-log-Daten entschieden.

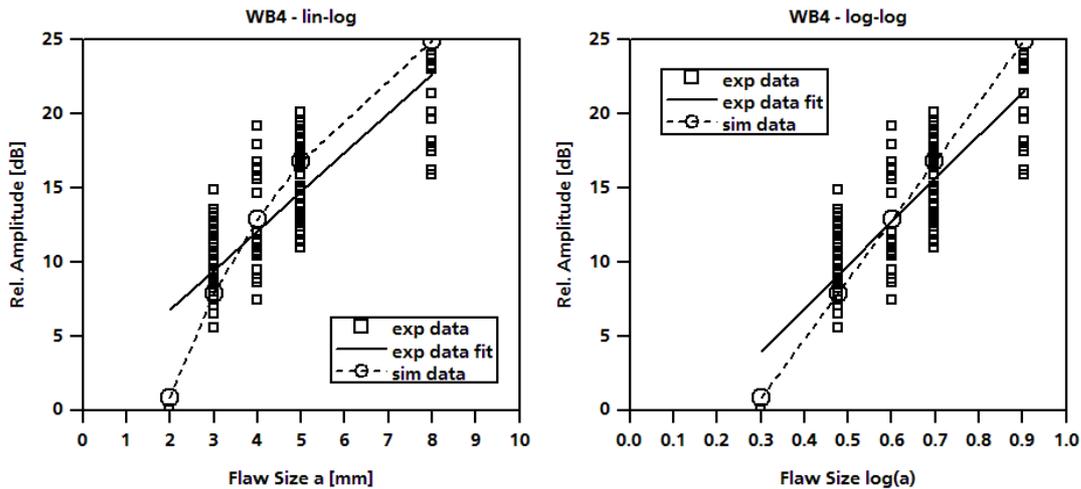


Abb. 5 Simulierte und experimentelle Maximalamplituden als Funktion der Fehlergröße, Testblock WB4.

#### 4. POD-Ergebnisse und MAPOD-Validierung

Die POD- und MAPOD-Berechnungen für die in Abb. 4 und 5 gezeigten Daten haben wir gemäß Gleichung (3) mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Varianz  $\sigma_0 = 2.5$  dB ( $N_0 = 3.1$  dB) für WA2;
- Varianz  $\sigma_0 = 4.0$  dB ( $N_0 = 5.0$  dB) für WB4;
- Entscheidungsschwellwert  $T = \hat{a}_{dec} = 6$  dB über Rauschen  $N_0$ .

Für die experimentell ermittelten Daten haben wir zusätzlich eine POD-Berechnung mit der Software mh1823 durchgeführt, da bei Nutzung des log-log-Modells die Bedingungen einer linearen  $\hat{a}$ -vs- $a$ -Abhängigkeit und konstanter Varianz der Messdaten erfüllt ist. In Abbildung 6 vergleichen wir die Ergebnisse dieser Berechnungen zunächst für den Testblock WB4. Unsere Berechnungen (Glg. (3)) sind hinsichtlich der sicher detektierbaren Fehlergröße  $a_{90/95}$  etwas konservativer, die geringe Breite der Konfidenzintervalle der mh1823-Berechnungen (auch für WA2, Abb. 8) überrascht ohnehin angesichts der Varianz der Messdaten. Die ermittelten Werte für  $a_{90/95}$  von 3.4 mm bzw. 3.9 mm entsprechen den Erwartungen auf der Basis unserer langjährigen Erfahrungen aus den Labor- und Vor-Ort-

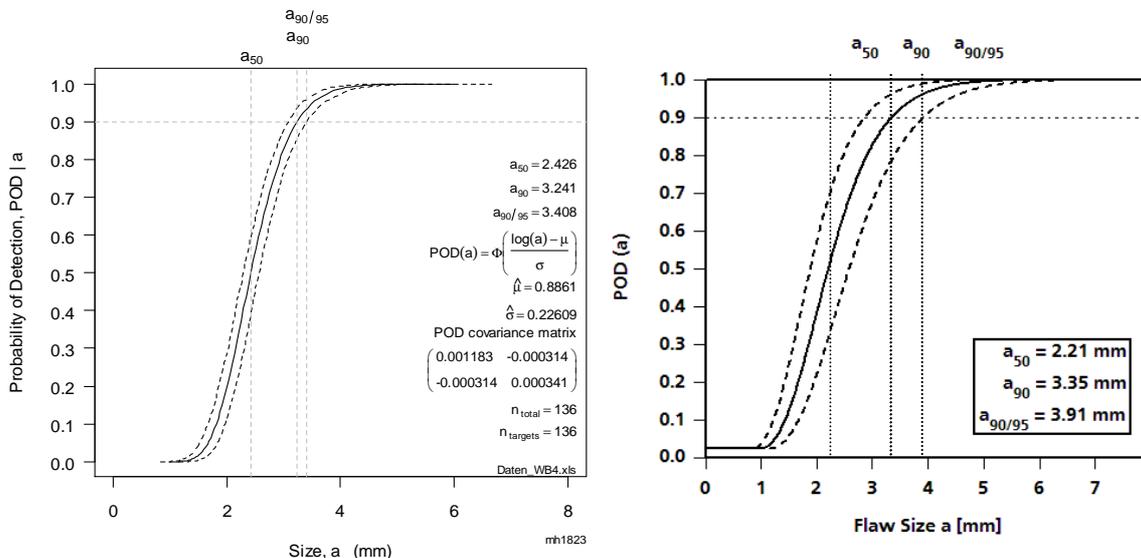


Abb. 6 POD-Kurven für Testblock WB4: links nach ‚mh1823‘, rechts gemäß Gleichung (3).

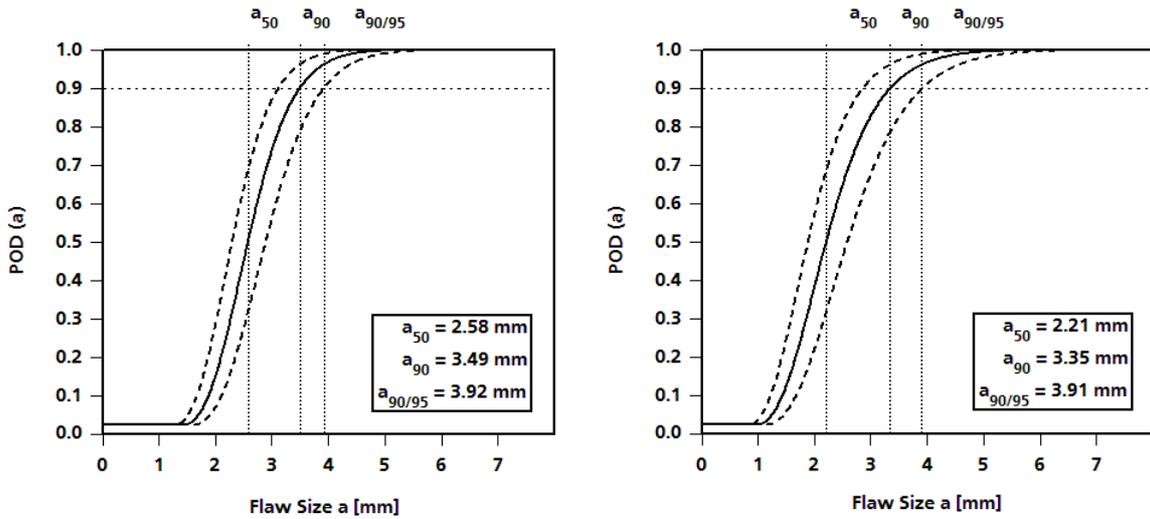


Abb. 7 MAPOD-Kurve (simulierte Daten, links) und POD-Kurve (gemessene Werte, rechts) für WB4.

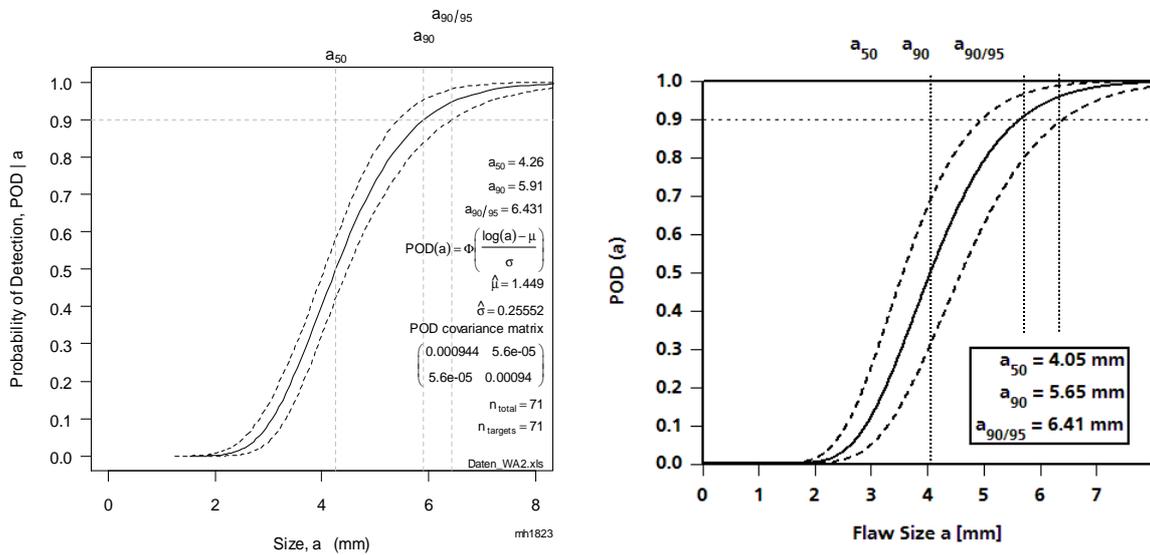


Abb. 8 POD-Kurven für Testblock WA2: links nach ‚mh1823‘, rechts gemäß Gleichung (3).

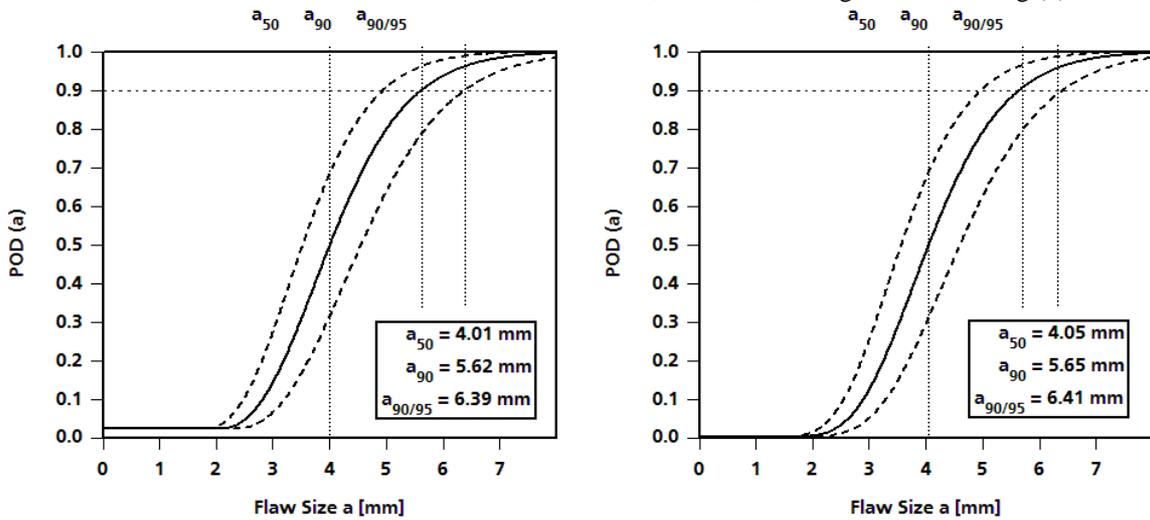


Abb. 9 MAPOD-Kurve (simulierte Daten, links) und POD-Kurve (gemessene Werte, rechts) für WB4.

Untersuchungen ähnlicher Cu3-Gefüge an Propellerbereichen mittlerer Dicke; gleiches gilt für die  $a_{90/95}$ -Werte von ca. 6.5 mm für WA2. Die MAPOD-Kurven auf Basis der simulierten Daten (Abb. 7 und 9) zeigen mit einem vergleichbaren Verlauf und ähnlichen Kennwerten eine hervorragende Übereinstimmung mit den aus den Messdaten erstellten POD-Kurven. Die MAPOD-Kurve für WA2 wurde dabei mit einer größeren Varianz ( $\sigma_0=4.0$  dB) berechnet, um der größeren Streuung der Messwerte gerecht zu werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der an zwei repräsentativen Testblöcken erstellten Datenbasis haben wir den in [1] präsentierten MAPOD-Ansatz verifiziert. Dieser erlaubt den Einfluss der Oberflächenkrümmung oder unterschiedlicher Fehlerparameter, aber auch von durch die Mikrostruktur bedingten variierenden Schallschwächungen auf die Fehlersignale zu untersuchen. Dazu werden experimentelle Basis-Ergebnisse als Input für die Simulation benötigt, unter anderem im Hinblick auf die bei der POD-Berechnung zu berücksichtigenden Größen für die Varianz der Messwerte und die mittlere Rauschamplitude. Die MAPOD-Basis bildet ein geeignetes, leistungsfähiges und validiertes Simulationsverfahren, das in der Lage ist, alle relevanten Komponenten des Prüfvorganges realitätsnah abzubilden.

Ziel unserer Untersuchungen ist nicht zuletzt die Erarbeitung einer Datenbasis, die für die Detektion und Bewertung von innen liegenden Fehlstellen in Schiffspropellern mit Profildicken im Bereich von etwa 20 mm bis 450 mm genutzt werden kann. Dabei können wir auf frühere Arbeiten des Propellerherstellers und assoziierten Projektpartners Wärtsilä Netherlands [11] zurückgreifen, der anhand von vielen unterschiedlich großen Cu3-Gussstücken den Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Gusswanddicke untersucht und quantifiziert hat. Es hat sich gezeigt [10], dass die Zugfestigkeiten der Werkstoffe WA, 1GL, 2GL und WC den in [11] untersuchten Zugfestigkeitsbereich und den in unserem Forschungsvorhaben angestrebten Wanddickenbereich von 20 mm bis 450 mm weitgehend abdecken. Dies erlaubt den Transfer der in unserer Studie erzielten Ergebnisse in die Prüfpraxis.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Forschungsvorhabens ‚ProRepaS II - Entwicklung und Validierung von Methoden zur Zerstörungsfreien Prüfung von Propellerwerkstoffen mit Ultraschall‘ (Kennzeichen 03SX278) durchgeführt.

## Referenzen

- [1] M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer. DGZfP Berichtsband 136-CD DACH-Jahrestagung (2012), Mi.3.B.1
- [2] Department of Defense Handbook Draft 2009. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823, Draft 14 April 2009
- [3] T.A. Gray, R.B. Thompson. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 5, Plenum Press, New York, 911-918 (1986)
- [4] J.A. Ogilvy. NDT&E International 26, 19-29 (1993)
- [5] S.O. Rice. Bell Syst. Tech. J24, 46-156 (1945)
- [6] M. Spies. J. Acoust. Soc. Am., 110, 68-79 (2001)
- [7] M. Spies. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 21, Melville, New York, American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings CP509), 807-814 (2002)
- [8] M. Spies. J. Acoust. Soc. Am. 107, 2755-2759 (2000)
- [9] M. Spies. DGZfP Berichtsband 113-CD DACH-Jahrestagung (2008), P35
- [10] J. Heerens, D. Hellmann. Abschlussbericht Forschungsvorhaben 03SX209F, GKSS-Forschungszentrum GmbH, Geesthacht (2007)
- [11] P. Wenschot. Naval Engineers Journal, 58-69 (1986)