

# Verbesserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) durch den Einsatz von Modellierungs- und Bildgebungsalgorithmen am Beispiel von schwer prüfbar Schiffspropellerwerkstoffen

Martin SPIES, Hans RIEDER, Alexander DILLHÖFER, Sebastian HUBEL,  
Thomas ECKERT  
Fraunhofer ITWM, 67663 Kaiserslautern

**Kurzfassung.** Auf der Basis verschiedener, an Duplex- und Bronze-Testblöcken mit Modellfehlern aufgezeichneter Ultraschall-HF-Daten haben wir eine  $\hat{a}$  vs  $a$ -Analyse zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) durchgeführt. Die Vorgehensweise wird exemplarisch für einen Duplex-Testkörper illustriert. Die Anwendung von SAFT führt zu einer erheblichen Verbesserung der POD. Weitere, für die Verbesserung der Prüfaussage ebenso wichtige Punkte werden diskutiert.

## 1. Einleitung

Der sichere Betrieb von Transportmitteln wie Flugzeugen, Bahnen und Fähren erfordert die permanente Inspektion relevanter Bauteile und Komponenten. Wie auch bei der Anwendung von ZfP-Verfahren in anderen industriellen Bereichen wird die Auswahl der geeigneten Prüfmethode im Hinblick auf das zu untersuchende Material und die aufzufindenden Fehler bestimmt. Insbesondere in den genannten sicherheitsrelevanten Bereichen muss gezeigt werden, dass das gewählte Verfahren die erforderlichen Nachweiseigenschaften besitzt. Im Hinblick auf die Ultraschallprüfung von Schiffsantriebskomponenten und Bauteilen im Off-Shore-Bereich befassen wir uns in diesem Beitrag mit der Detektion und der Größenbestimmung von innen liegenden Fehlern. Die Grobkornstruktur und/oder die gemischte Phasenstruktur der aufgrund ihrer Festigkeitseigenschaften und ihrer Korrosionsbeständigkeit üblicherweise eingesetzten Werkstoffe wie Duplexstähle und Bronze-Gusslegierungen (CuNiAl-Bronze, 'Cu3') führen zu einer starken Schwächung des Ultraschalls durch Streuung. Die Ultraschallprüfung muss daher im Hinblick auf die kleinste zu detektierende Fehlergröße optimiert werden. Eine Möglichkeit bietet die Synthetische Apertur Fokus Technik SAFT, die zu einer Reduzierung des Gefügerauschens und damit zu einer Erhöhung des Nutzsignals bei der bildgebenden Ultraschallprüfung führt [1].

Auf der Basis verschiedener, an Duplex- und Cu3-Testblöcken mit Modellfehlern unterschiedlichen Durchmessers aufgezeichneter Ultraschall-HF-Daten haben wir eine  $\hat{a}$  vs  $a$ -Analyse zur Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD) durchgeführt. Dem internationalen Standard MIL-HDBK-1823A [2] folgend haben wir POD-Kurven aus den Ultraschall-HF-Daten und den SAFT-Daten ermittelt. Die Vorgehensweise wird exemplarisch für einen Duplex-Testkörper illustriert. Das Beispiel zeigt, dass die Anwendung von SAFT zu einer erheblichen Verbesserung der POD und damit zur

Verbesserung der Prüfaussage führt. Der Einsatz der Ultraschallprüfung als quantitatives ZfP-Verfahren zur Sicherung der Integrität solcher Bauteile aus schwerprüfbaren Werkstoffen wird darüber hinaus durch weitere, für die Verbesserung der Prüfaussage wichtige Punkte unterstützt.

## 2. Vorgehensweise zur Verbesserung der Prüfaussage

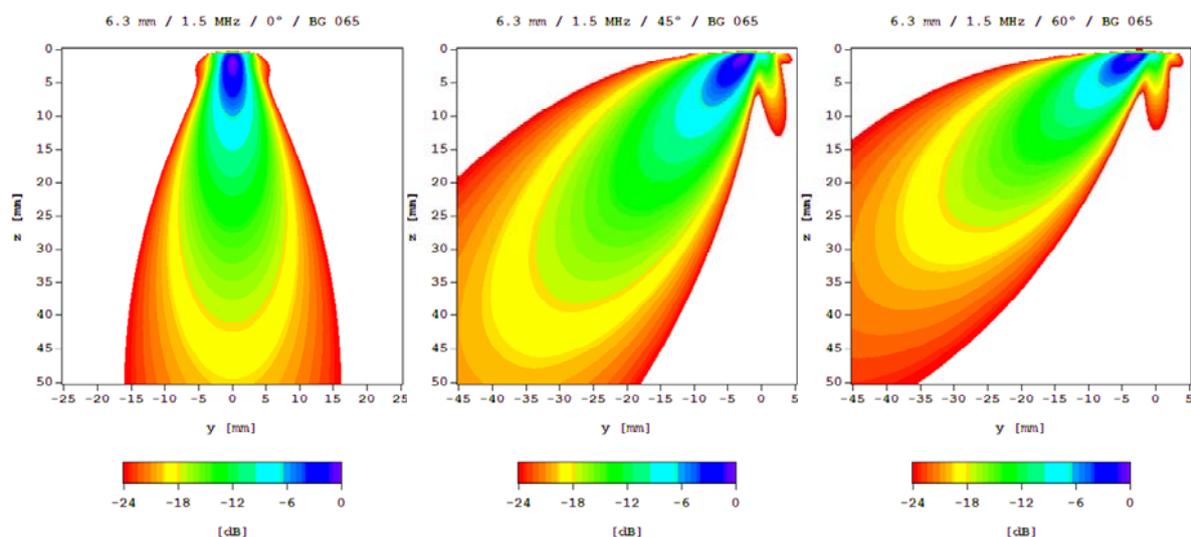
Gekrümmte Oberflächen, Schallschwächung sowie anisotrope und inhomogene Materialeigenschaften wirken sich nachteilig auf die Ultraschallprüfung aus. Andererseits können durch neue Prüftechniken, etwa durch den Einsatz von 2D-Phased-Arrays, Verbesserungen gegenüber konventionellen Prüfverfahren erzielt werden. Zur Verbesserung der Prüfaussage verfolgen wir daher über die POD-Analyse zur Verfahrensevaluierung hinaus verschiedene Aspekte, die wir im Folgenden am Beispiel der hier adressierten Schiffspropellerwerkstoffe illustrieren. Im Einzelnen sind dies:

- Sensorevaluierung und -optimierung durch den Einsatz von Simulationen;
- experimentelle Bestimmung der gefügeabhängigen Schallschwächung und deren Berücksichtigung bei der Schallfeldberechnung;
- Erfassung der Oberflächenkonturen durch mechanische Abtastung oder durch den Einsatz von Luft-Ultraschall;
- Anwendung der Synthetischen Apertur Fokus Technik SAFT<sup>++</sup>;
- Einsatz von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Fehlervermaßung.

Im Folgenden werden diese Punkte kurz erläutert und anhand von Beispielen illustriert.

### Sensorevaluierung und -optimierung durch den Einsatz von Simulationen

Um aufwändige experimentelle Untersuchungen zu vermeiden, setzen wir grundlegend Ray-Tracing-Berechnungsmethoden zur Visualisierung der Inspektionsbereiche und weiterführend Superpositionsmethoden [3,4] zur Evaluierung der Prüfkopfschallfelder, aber auch zur Sensoroptimierung ein. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die mittels der Generalisierten Punktquellensynthese GPSS berechneten Schallfelder eines Standardprüfkopfes, der mittels

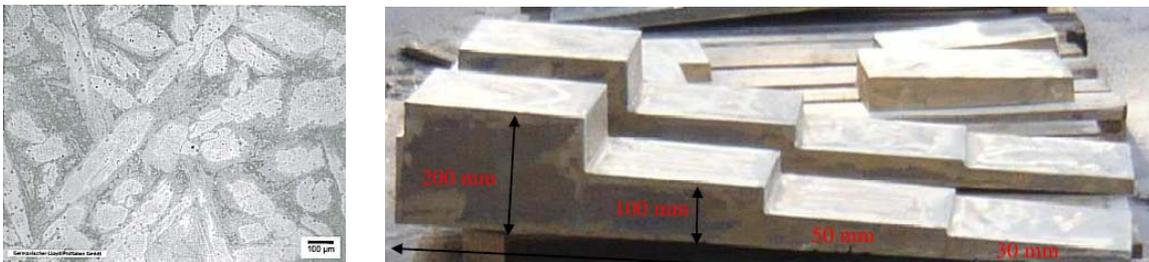


**Abb. 1** Berechnete Schallfelder für die Einschallwinkel 0°, 45° und 60° (Prüfkopf-Mittenfrequenz 1.5 MHz, Durchmesser 6.3 mm); der Radius der konkav gekrümmten Oberfläche beträgt 650 mm.

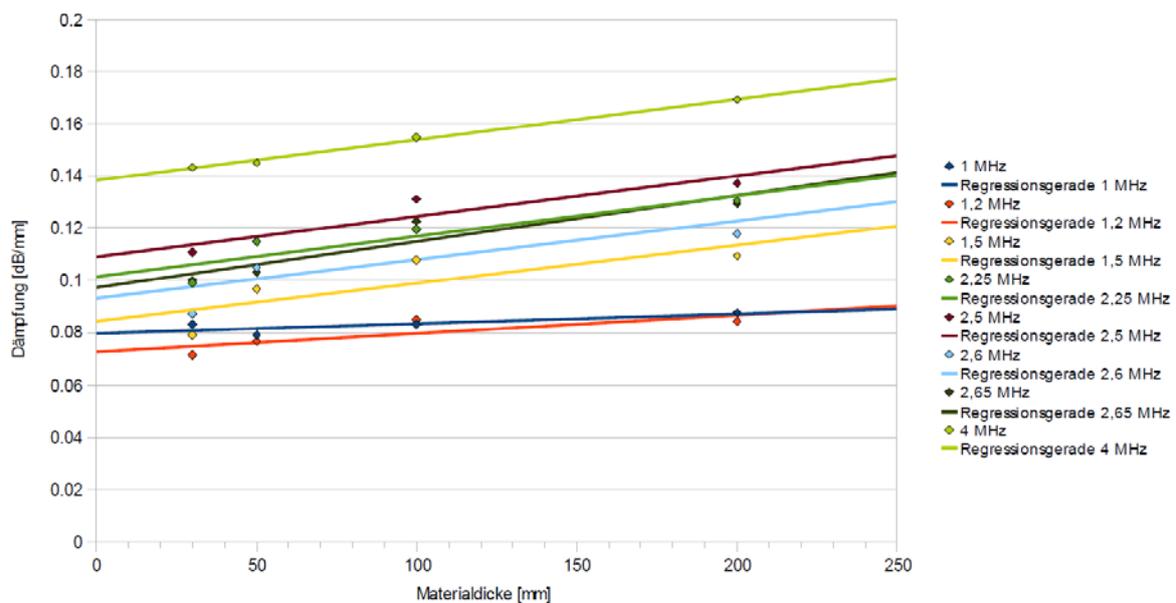
Vorlaufkeil an die Bauteilkrümmung angepasst wurde; bei dem Bauteil handelt es sich um eine Schiffsantriebskomponente aus feinkörniger CuNiAl-Bronze.

### Experimentelle Bestimmung der gefügeabhängigen Schallschwächung

Bedingt durch die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten nach dem Guss in Rand- bzw. Kernzone von dünnwandigen und dickwandigen Propellerbereichen kommt es mit zunehmender Wanddicke zur Grobkornbildung, die zu unterschiedlicher Streuung und Schallschwächung bei der Ultraschallprüfung führt. Abbildung 2, links, zeigt das Schliffbild der Mikrostruktur einer grobkörnigen CuNiAl-Bronze mit einer Korngröße von mehreren hundert Mikrometern. An einem speziell gegossenen Stufentestkörper (Abb. 2, rechts) haben wir die gefügebedingte Schallschwächung untersucht [5]. In Abbildung 3 sind die im Frequenzbereich von 1 MHz bis 4 MHz ermittelten Schallschwächungswerte, die bis zu etwa 1.7 dB/cm für die Longitudinalwelle betragen, als Funktion der Probendicke aufgetragen. Diese Werte werden bei der Schallfeldberechnung und weitergehenden Simulationen [6,7], aber auch beim Rekonstruktionsverfahren SAFT<sup>++</sup> berücksichtigt.



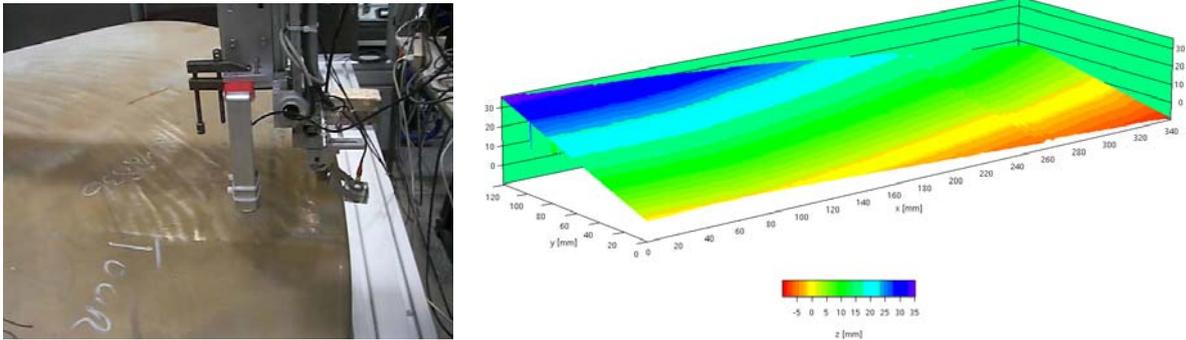
**Abb. 2** Schliffbild der Mikrostruktur einer CuNiAl-Bronze (links); Stufentestkörper zur Untersuchungen der gefügeabhängigen Schallschwächung.



**Abb. 3** Am Stufentestkörper ermittelte Schallschwächungswerte in [dB/mm] in Abhängigkeit der Materialdicke und der Frequenz.

## Erfassung der Oberflächenkonturen

Die Oberfläche des untersuchten Bauteils wird während des Scan-Vorgangs mittels eines mechanischen Weggebers aufgezeichnet; eine weitere Möglichkeit besteht in der Abtastung der Oberfläche mittels eines fokussierenden Luft-Ultraschall-Prüfkopfes, der während des Scannens mitgeführt wird [8]. Aus der Laufzeit des an der Oberfläche reflektierten Signals werden der Abstand zum Sensor und damit die Oberflächenkontur bestimmt. Das Ergebnis einer solchen Aufzeichnung ist in Abb. 4 für ein Prüffeld der Größe 340 mm x 120 mm dargestellt; die Oberfläche weist bei der x-Koordinate 260 mm eine Unebenheit auf, die mit dem Luftschall-System ebenfalls erfasst wurde. Die so ermittelten Oberflächenkonturen werden beim Rekonstruktionsverfahren SAFT<sup>++</sup> bei der algorithmischen Verarbeitung der HF-Daten verwendet.



**Abb. 4** Links: Oberflächenerfassung mittels Luft-Ultraschall; rechts: während des Scannens aufgezeichnete Oberflächenkontur mit x-, y- und z-Koordinaten in Bezug auf die Scan-Startposition (0,0,0) (links, unten).

## Anwendung der Synthetischen Apertur Fokus Technik SAFT<sup>++</sup>

Im Hinblick auf die oben genannten Material- und Bauteileigenschaften und deren Einfluss auf die Ultraschallausbreitung haben wir das Verfahren SAFT modifiziert. Zur effektiven Fehlerdetektion und Fehlerrekonstruktion an den komplexen Gussbauteilen wurde SAFT<sup>++</sup> [9,10] entwickelt. Es nutzt die während des Scan-Vorgangs abgetastete Oberflächenkontur zur korrekten Bestimmung des Rekonstruktionsvolumens; darüber hinaus wird der Schallschwächung im Rahmen einer Vorverarbeitung der HF-Daten Rechnung getragen.

## Einsatz von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Fehlervermaßung

Für die weitergehende Fehlervermaßung werden derzeit auch Algorithmen aus dem Bereich der Bildverarbeitung entwickelt und eingesetzt. In einem ersten Ansatz werden bei gekrümmter Oberflächenkontur Ebenen im Rekonstruktionsraum senkrecht zur Einschallrichtung berechnet und ausgewertet [11] mit dem Ziel, die Bestimmung der Fehlergröße bei der Winkeleinschallung zu verbessern.

## 3. Probability of Detection POD

Das Konzept der ‚Probability of Detection‘ POD spielt eine wichtige Rolle bei der Untersuchung und Evaluierung der Integrität eines Bauteils [2,12]. Die POD bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, einen Fehler im Bauteil zu finden; sie wird in diesem Beitrag als Funktion der Fehlergröße  $a$  bestimmt. Die resultierende POD-Kurve liefert zusammen mit den auferlegten Konfidenzintervallen die Fehlergröße, die mit einer ‚vernünftigen‘ Wahr-

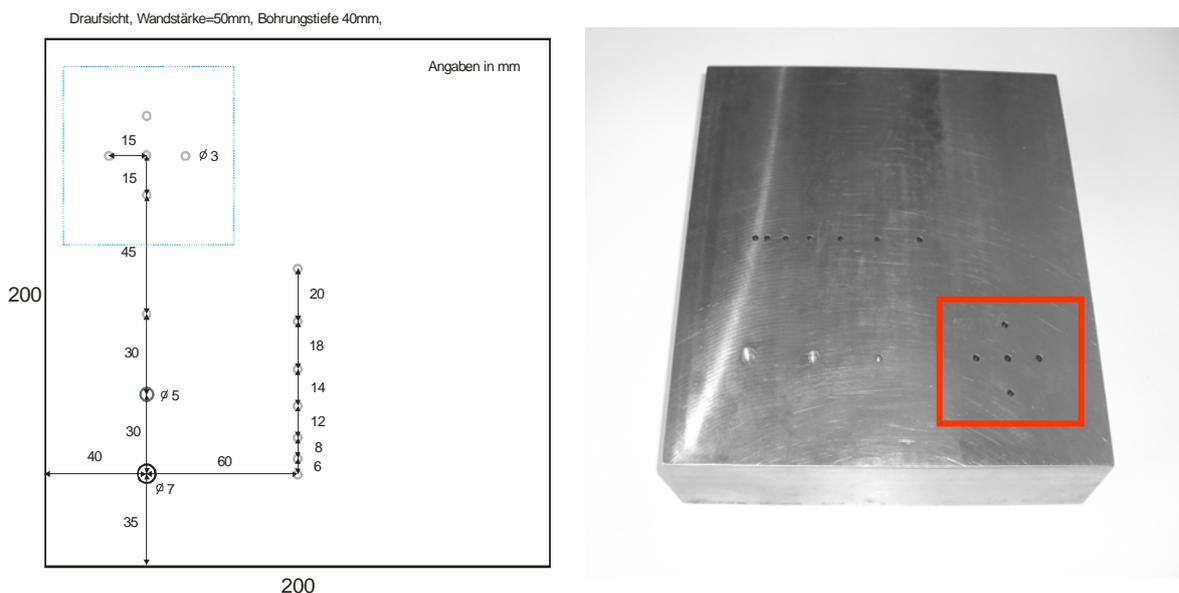
scheinlichkeit detektiert werden kann. Diese Fehlergröße wird dann mit den Anforderungen an die Bauteilintegrität verglichen.

Der prinzipielle Verlauf der POD-Kurve zeigt, dass mit zunehmender Fehlergröße auch die Detektionswahrscheinlichkeit ansteigt. An der Größe  $a_{90/95}$  schneidet die untere 95 % Konfidenzgrenze das 90 % POD-Niveau. Diese Größe wird üblicherweise als die Fehlergröße betrachtet, die sicher zu detektieren ist. Um experimentell POD-Kurven zu ermitteln, müssen wohl definierte Inspektionen an geeigneten Testkörpern durchgeführt werden. Die Vorgehensweise, eine POD mittels einer  $\hat{a}$  versus  $a$ -Analyse zu bestimmen, ist wie folgt: ein Fehler der Größe  $a$  erzeugt ein Signal der Amplitude  $\hat{a}$ . Üblicherweise wird ein Schwellwert  $\hat{a}_{th}$  definiert, der die kleinste vom Prüfsystem aufgezeichnete Amplitude darstellt, d.h. unterhalb dieses Wertes ist das Signal nicht mehr vom Rauschen zu unterscheiden. Die zweite Schwelle ist der Entscheidungsschwellwert  $\hat{a}_{dec}$ , oberhalb dessen das Signal als ‚Treffer‘ interpretiert wird. Die Schwellwert  $\hat{a}_{th}$  ist immer kleiner oder gleich dem Schwellwert  $\hat{a}_{dec}$ . Unter der Annahme, dass die Signalamplituden statistisch normalverteilt sind, kann das  $\hat{a}$  versus  $a$ -Diagramm in eine POD-Kurve überführt werden. Eine detaillierte mathematische Beschreibung dieser Prozedur ist in [2, Appendix G] zu finden.

Das Konzept der POD ist im Hinblick auf die Verbesserung der Prüfaussage von erheblicher Bedeutung: zum einen ermöglicht es die Charakterisierung bzw. Evaluierung der Leistungsfähigkeit eines Verfahrens im Hinblick auf die Anforderungen und Spezifikationen des vorliegenden Prüfproblems. Zum anderen können anhand der POD die Verbesserungen durch den Einsatz anderer bzw. modifizierter Prüfverfahren oder den Einsatz weiterer (algorithmischer) Datenverarbeitung quantifiziert werden. Dies wird im Folgenden an einem konkreten Beispiel demonstriert.

### 3.1 Testkörper, Ultraschall-HF-Daten und SAFT-prozessierte Daten

POD-Studien werden in der Regel an geeigneten Testkörpern mit künstlichen Modellfehlern durchgeführt, in unserem Fall an einem gegossenen Duplex-Testblock der Dicke 50 mm. Bei den Fehlern handelt es sich um Flachbodenbohrungen (FBB) unterschiedlicher Durchmesser und Tiefe (Abb. 5), wobei wir uns im Folgenden auf die FBB mit 3 mm, 5 mm und 7 mm Durchmesser sowie einer Tiefe vom 5 mm vor der Rückwand konzentrieren.



**Abb. 5** Schematische Darstellung (links) der Anordnung der FBB; die kreuzförmig angeordneten FBB (rechts, rote Box, 10 mm vor der Rückwand) wurden bei der POD-Analyse nicht berücksichtigt.

Die Messungen wurden mit kommerziellen Einelement-Prüfköpfen der jeweiligen Mittenfrequenz von 2.25 MHz, 3.5 MHz und 5 MHz (Durchmesser 9.5 mm) durchgeführt. Schallschwächungswerte im Bereich von 0.9 dB/cm bis 1.2 dB/cm wurden für Longitudinalwellen bei 2.25 MHz ermittelt. Um vergleichbare Sensoreigenschaften in die POD-Ermittlung einzubringen, wurde die Analyse für eine Frequenz von 2 MHz durch Einsatz eines entsprechenden Filters durchgeführt. Dazu wurden die mit allen Prüfköpfen durchgeführten Messungen verwendet; Details hierzu sind in [13] zu finden. Aufgrund der ferritisch-austenitischen Mikrostruktur, die zudem stark inhomogen ist, ergeben sich für die FBB gleichen Durchmessers unterschiedliche Fehleramplituden. Darüber hinaus können einige der 3 mm FBB nicht detektiert werden: die beiden 6 mm voneinander separierten Bohrungen (No. 7 und 8 in Tabelle 1) können nicht einzelnen aufgelöst werden, während das Signal von Bohrung No. 1 im Rauschen verschwindet. Durch den Einsatz des SAFT-Algorithmus werden die Fehlersignale verstärkt, während gleichzeitig die gefügebedingten Rauschsignale verringert werden. Die durch SAFT erzielbare Verbesserung wird durch den Vergleich der HF-Daten und der rekonstruierten Daten deutlich. Tabelle 1 zeigt die mit den beiden Verfahren erzielten maximalen Fehleramplituden: im Gegensatz zur konventionellen A-Scan-Bewertung wurden mittels SAFT alle Modellfehler detektiert.

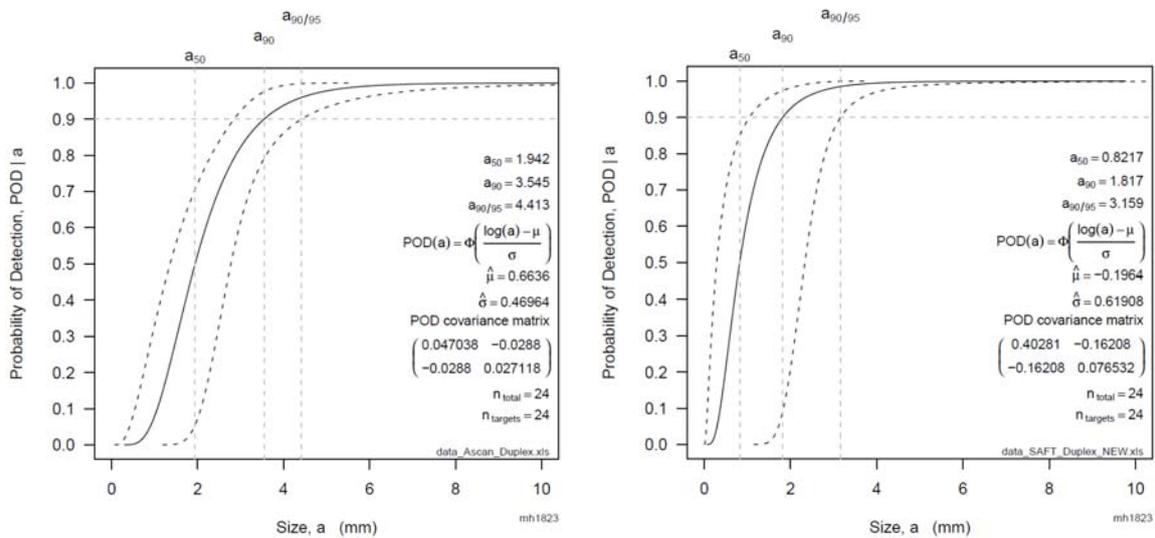
	A-Scan Amplitude linear (über Rauschen)	A-Scan Amplitude logarithmisch [dB]	SAFT Amplitude linear	SAFT Amplitude logarithmisch [dB]	Amplitudenzugewinn [dB]
Rauschen	1.0	0.0	1.0	0.0	
FBB 7 mm	8.1	18.2	20.0	26.0	9.8
FBB 5 mm	4.1	12.3	12.6	22.0	9.7
FBB 3 mm					
No. 1	1.0	0.0	4.5	13.1	13.1
No. 2	1.8	5.1	4.5	13.1	8.0
No. 3	5.4	14.6	14.1	23.0	8.4
No. 4	5.6	15.0	7.1	17.0	2.0
No. 5	2.4	7.6	7.1	17.0	9.4
No. 6	4.3	12.7	7.9	18.0	5.3
No. 7	nicht aufgelöst	-	-	-	
No. 8	nicht aufgelöst	-	-	-	

**Tabelle 1** Maximalamplituden der FBB bei der konventionellen A-Scan-Bewertung und die Bewertung anhand der SAFT-rekonstruierten Daten; in der rechten Spalte ist der Amplitudenzugewinn aufgeführt, der durch den Einsatz von SAFT für den jeweiligen Modellfehler erzielt wurde.

### 3.2 POD-Analyse

Anhand dieser Daten haben wir mit der **mh1823** POD-Software (Version 2.5, MIL-HDBK-1823A, <http://StatisticalEngineering.com>) eine POD-Analyse durchgeführt. Bei der Anwendung der Software ist folgendes zu beachten: (1) das eingesetzte ZfP-Verfahren/-System muss ein quantitatives Signal  $\hat{\mathbf{a}}$  liefern; (2) die Testkörper müssen ‚Ziele‘ mit messbaren Charakteristiken haben, in unserem Fall als ‚Größe‘ den Bohrungsdurchmesser; (3) die Software geht davon aus, dass die Input-Daten korrekt sind, also dass die angegebene Größe die korrekte Größe ist und die zugehörige Response die korrekte Response – ist dies nicht der Fall, liefert die Software ‚nur‘ Näherungsergebnisse. Punkt 2 bedeutet für unseren Fall, dass wir auf Modellfehler mit eindeutig zuzuordnenden Größen für die POD-Bestimmung zurückgegriffen haben.

Der erste Schritt in der POD-Analyse ist die Darstellung der Daten in der Form von  $\hat{a}$  vs  $a$ -,  $\hat{a}$  vs  $\log(a)$ -,  $\log(\hat{a})$  vs  $a$ - und  $\log(\hat{a})$  vs  $\log(a)$ -Plots und der Auswahl des einen linearen Zusammenhang am Besten annähernden Modells. Die **mh1823** POD-Software stellt die linearen Approximationen der Daten zur Auswahl dar. Die entsprechenden POD-Kurven werden dann mit den wichtigen Informationen des angewandten Modells dargestellt, nämlich: die Modellparameter und ihre Kovarianzmatrix; die Fehlergröße  $a_{50}$ , die Größe mit 50 % POD;  $a_{90}$ , die Größe mit 90 % POD;  $a_{90/95}$ , die 95 % Konfidenzgrenze für die  $a_{90}$ -Schätzung; die Gleichung für das POD-Modell wird auch angegeben. Wir haben hier das  $\log(\hat{a})$  vs  $\log(a)$ -Modell ausgewählt. Als Wert  $\hat{a}_{th}$  haben wir 0 dB (Rauschen, siehe Tab. 1) angesetzt, als  $\hat{a}_{dec}$  im Hinblick auf den schwerprüfbaren Werkstoff 3 dB und nicht die üblicherweise verwendeten 6dB.



**Abb. 6** POD(a) Kurve auf der Basis des  $\log(\hat{a})$  vs  $\log(a)$ -Modells für die A-Scan-Daten (links) und die SAFT-verarbeiteten Daten (rechts).

Die resultierenden POD-Kurven für die A-Scan-Daten und die SAFT-verarbeiteten Daten sind in Abb. 6 dargestellt. Man erkennt, dass mit dem SAFT-Algorithmus ein wesentlich besseres Ergebnis erzielt wird, was sich auch an dem steileren Verlauf der POD-Kurve zeigt. Die Größe  $a_{90/95}$ , die als die sicher detektierbare Fehlergröße angesehen wird, beträgt etwa 4.4 mm bei der A-Scan-Bewertung, während sie mit 3.2 mm im Falle der SAFT-Bewertung etwa 30 % niedriger liegt.

## 5. Zusammenfassung/Fazit

Wir führen derzeit umfangreiche Untersuchungen unter Variation der Messparameter durch mit dem Ziel, POD-Kurven für drei repräsentative Cu3-Gefügekassen zu bestimmen. Dabei werden Frequenz, Prüfkopf-Durchmesser, Einschallwinkel, Koppelmittel und weitere Parameter variiert. Die untersuchten Gefüge korrelieren mit den jeweiligen Wanddickenbereichen in realen Propellerflügeln; entsprechende Testkörper wurden aus einem solchen Flügel herausgearbeitet. Über die Untersuchungen werden wir zum gegebenen Zeitpunkt berichten.

Ergänzend hierzu verfolgen wir das Konzept des Model-Assisted POD (MAPOD), um weitere, den Propeller charakterisierende Parameter im Rahmen von Simulationsrechnungen zu berücksichtigen; damit wird erreicht, dass die kostspielige Anfertigung von Testkörpern in Grenzen gehalten werden kann. Dazu werden entsprechende Simulationsverfahren zur ‚virtuellen‘ Fehlerprüfung eingesetzt [14], die auch im Hinblick auf die

Verbesserung der Prüfaussage eine wichtige Rolle spielen. Gerade bei komplexen Prüfsituationen erleichtern geeignete Simulationsverfahren die Evaluierung, Optimierung und Interpretation der Experimente.

## Literatur

- [1] M. Spies, H. Rieder. Dreidimensionale Ultraschall-Tomographie an schwer prüfbar strukturellen Werkstoffen; Berichtsband BB 115-CD DGZfP-Jahrestagung 2009, DGZfP, Berlin, Mi.2.A.1 (2009)
- [2] Department of Defense Handbook 2007 Update. Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823A, released 7 April 2009
- [3] M. Spies. Ultrasonic Field Modeling for Immersed Components Using Gaussian Beam Superposition. Ultrasonics, Vol. 46, 138-147 (2007)
- [4] M. Spies. Efficient Optimization of Single and Multiple Element Transducers For the Inspection of Complex-shaped Components. NDT&E International, Vol. 37, 455-459 (2004)
- [5] S. Hubel et al. Bestimmung der strukturabhängigen Ultraschallschwächung in Gusswerkstoffen am Beispiel von gegossenen Nickel-Aluminium-Bronzen. Berichtsband zur DGZfP-Jahrestagung 2011, DGZfP, Berlin, P74 (erscheint demnächst)
- [6] M. Spies, H. Rieder. Der Einfluss der Schallschwächung in Guss- und Verbundwerkstoffen auf die Schallfelder von Standard- und Gruppenstrahler-Prüfköpfen. Berichtsband BB 122-CD DGZfP-Jahrestagung 2010, DGZfP, Berlin, P40 (2010)
- [7] S. Maack, M. Spies, B. Hillemeier. 3D Schallfeldcharakterisierung niederfrequenter Ultraschall-Prüfköpfe in Beton – Experimentelle Untersuchungen und Simulation. Berichtsband zur DGZfP-Jahrestagung 2011, DGZfP, Berlin, P70 (erscheint demnächst)
- [8] A. Dillhöfer, H. Rieder, M. Spies. Roboterbasierte Detektion von Oberflächenstrukturen in komplexen Freiformflächen mittels Luftultraschall und Methoden der Bildverarbeitung. Berichtsband BB 115-CD DGZfP-Jahrestagung 2009, DGZfP, Berlin, P45
- [9] A. Junglewitz, M. Spies, H. Rieder. Operational Challenges: Extension of Propeller Welding Repairs for a Higher Availability of Ships. In: Proceedings of The Riviera Annual Marine Propulsion Conference 2008, London, <http://rivieramm.com> (2008)
- [10] A. Junglewitz, M. Spies, A. van Kooij. Auffinden und Bewerten von Schweißfehlstellen in NiAl-Bronze Propellern. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft e.V., 101. Band, 2007, Schifffahrts-Verlag Hansa C. Schroedter & Co., Hamburg, 427-438 (2008)
- [11] Th. Eckert. Entwicklung eines Algorithmus zur Volumenbildung und winkelabhängigen Größenbestimmung in rekonstruierten Ultraschalldaten. Bachelor-Arbeit, Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Mannheim (2011)
- [12] W.D. Rummel. NDE Procedure Validation and Use in NDE System Calibration for NDE Applications. In: Review of Progress in Quantitative NDE (2004), Vol. 24, Melville, New York, American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings CP760), 1982-1986 (2005)
- [13] M. Spies, H. Rieder. Synthetic Aperture Focusing of Ultrasonic Inspection Data to Enhance the Probability of Detection of Defects in Strongly Attenuating Materials. NDT&E International, Vol. 43, 425-431 (2010)
- [14] M. Spies. Validierung semi-analytischer Simulation der Fehlerprüfung an ebenen und gekrümmten Bauteilen anhand des internationalen UT Benchmarks 2007. DGZfP-Berichtsband BB 113-CD DACH Jahrestagung 2008, P35 (2008)