

7 Jahre Erfahrung in der phased-array- Ultraschallprüfung von Platten aus Aluminiumlegierungen für die Luftfahrtindustrie (Konfiguration – Verifizierung – Referenzkörper – Normen)

Markus SPERL, Christoph HENKEL
AMAG rolling GmbH
Postfach 32, A-5282 Ranshofen
markus.sperl@amag.at
www.amag.at

Kurzfassung. Im Jahre 2005 wurde bei AMAG rolling eine phased-array Ultraschallanlage für die Prüfung von Aluminiumplatten für Luftfahrtanwendungen installiert. Von allen namhaften Flugzeugherstellern liegen die Zulassungen für diese Anlage vor. Obwohl die phased-array Ultraschalltechnik auf den gleichen physikalischen Grundlagen wie die konventionelle Prüftechnik beruht, wurde und wird sie durch die gängigen Spezifikationen nicht oder nur teilweise abgedeckt. Die Anlage arbeitet im Puls-Echo-Verfahren in Tauchtechnik. Mit der aktuellen Konfiguration werden Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 1m²/min unabhängig von den zu prüfenden Plattendicken erreicht. Es werden die zusätzlichen Maßnahmen erläutert, die notwendig sind, um eine ordnungsgemäße Empfindlichkeitsjustierung der Anlage und eine regelmäßige Überprüfung der Empfindlichkeit im Produktionsbetrieb durchzuführen.

Die Referenzkörper in der Anlage müssen in regelmäßigen Abständen erneuert werden. Diese Referenzkörper wurden gemäß ASTM E 127 selbst gefertigt und überprüft. Die dabei zu berücksichtigenden Randbedingungen sowie die Methoden zur Fertigungsüberwachung und Genauigkeitsüberprüfung werden dargelegt.

Die neuesten Projekte auf dem Gebiet der Normung für die Anwendung der phased-array Ultraschalltechnik werden vorgestellt.

1 Einleitung

Die AMAG rolling ist Österreichs führender Hersteller von Aluminium-Halbzeug und zugelassener Lieferant von Luftfahrtplatten der Legierungen AA2014, 2024, 2219, 6061, 7075, 7475 und 7050. Für die vorgeschriebene US-Prüfung dieser Platten wurde im Jahr 2005 auf Grund der hohen Flexibilität und des ausgezeichneten Durchsatzes eine US-Anlage mit einem phased-array-Prüfkopf installiert.

Die Anlage entspricht dem Stand der Technik und in den meisten Fällen wird von den Luftfahrtkunden eine US-Prüfung gemäß AMS-STD-2154 [1] bzw. ASTM B 594 [2] gefordert. Beide Normen decken aber die Verwendung eines phased-array-Prüfkopfes nicht ab. Deshalb waren zusätzliche Maßnahmen nötig, um die Luftfahrtzulassungen zu erhalten.



2 Ultraschallanlage – technische Daten – Durchführung der Prüfung

Bild 1 zeigt einen Überblick der Ultraschallanlage bei AMAG rolling. Das Tauchbecken hat eine Größe von 8 x 2 m. Die Hauptscanrichtung ist in Längsrichtung der Anlage. Die Ultraschallprüfung ist direkt in den Produktionsablauf eingebunden (Bild 2) und die Anlage wird typischerweise im 3-Schicht bzw. 4-Schicht Betrieb eingesetzt.



Bild 1: Ultraschallanlage bei AMAG rolling

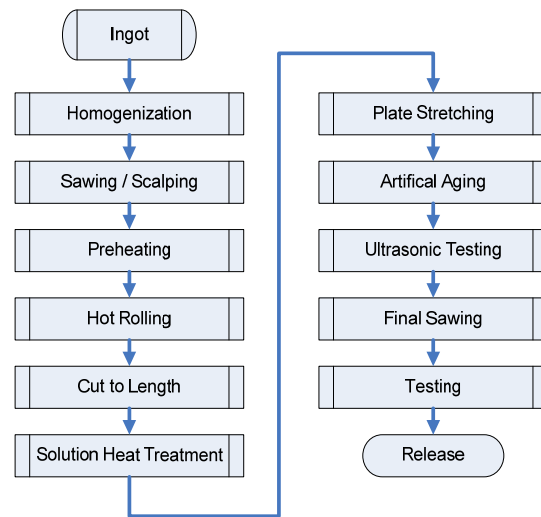


Bild 2: Einbindung der Ultraschallprüfung in den Fertigungsablauf

Die phased-array-Technik bietet den Vorteil, dass sich unterschiedlich viele Elemente zu einem virtuellen Prüfkopf mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammenfassen lassen. Es können unterschiedliche Strahlquerschnitte und Strahlformen über die Längsachse entsprechend den Anforderungen generiert werden. Um die geforderten Überlappungen garantieren zu können, ist es notwendig, die Form und Ausbildung der Schallkeule sowohl in aktiver (x) und passiver (y) Richtung, wie auch entlang der Ausbreitungsrichtung zu kennen. Mittels Simulationsrechnungen kann die Form der Schallkeule im Vorfeld abgeschätzt werden. Für eine endgültige Festlegung von Index und Prüfgeschwindigkeit ist die Schallkeule aber an einer ausgewählten Anzahl von virtuellen Prüfköpfen zu vermessen, um die Überlappungen von Schuß zu Schuß in x- und y-Richtung berechnen und mit den Vorgaben vergleichen zu können.

Der Index mit dem die virtuellen Prüfköpfe elektronisch in der aktiven Richtung ohne eine mechanische Bewegung durch den Prüfkopf getaktet werden, ist in Abhängigkeit von Auflösung und Durchsatz festzulegen. Bild 3 zeigt die Beschaltung des Prüfkopfes für den hochauflösenden Re-Scan mit einem Index von nur einem Element. Da nur lokal einzelne Fehler überprüft werden, ist hier der Durchsatz von untergeordneter Bedeutung. Für den Hauptscan wurde eine Beschaltung mit einem größeren Index gewählt, die ein Optimum aus Durchsatz und Auflösung darstellt. Die maximale Prüfgeschwindigkeit in passiver Richtung berechnet sich aus der geforderten Überlappung pro Schuss und der Pulsfolgefrequenz. Wie viele virtuelle Prüfköpfe letztendlich zum Einsatz kommen können, hängt auch von der zur Verfügung stehenden Anzahl der Auswertekanäle ab.

Die Anlage arbeitet im Impuls/Echo-Mode in Tauchtechnik. Als Koppelmedium wird Wasser ohne jegliche Zusätze verwendet. Der Prüfkopf mit einer Prüffrequenz von 10 MHz besteht aus 128 Elementen. Mit der aktuell verwendeten Konfiguration für den Hauptscan ergibt sich ein Vorschub in y-Richtung von 58,8 mm. Die Prüfgeschwindigkeit in x-Richtung beträgt maximal 500 mm/s. Dadurch läßt sich eine Prüfgeschwindigkeit von 1 m² / min erreichen. Die tote Zone an der Ober- und Unterseite der Platte ist kleiner 3 mm.

Die Empfindlichkeitsjustierung der Anlage entspricht den Anforderungen der Fehlerklasse A gemäß AMS-STD-2154 und ASTM B594.

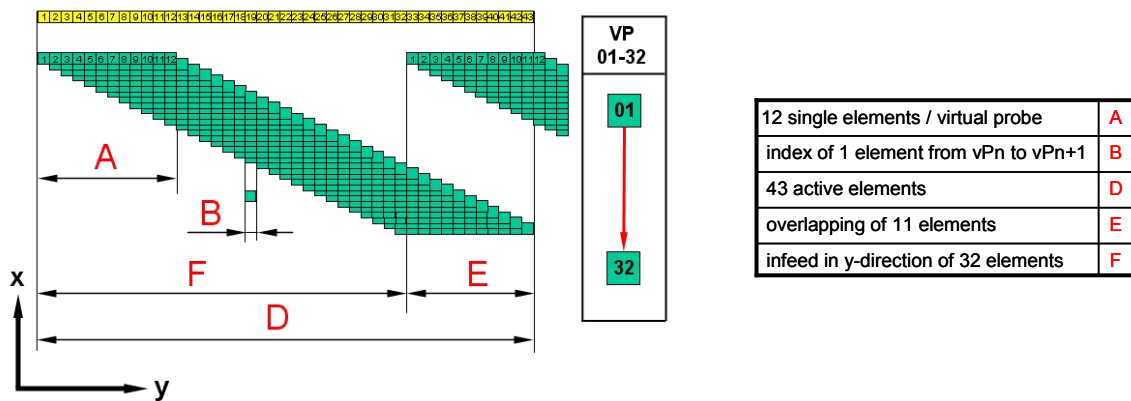


Bild 3: Konfiguration des phased-array-Prüfkopfes für hochauflösenden Re-Scan

Im Halbautomatikbetrieb werden alle relevanten Plattendaten aus dem Fertigungsleitsystem übernommen und die Ultraschallparameter (Blenden, Nachführung von Eingangs- und Rückwandecho) entsprechend der aktuellen Dicke angepasst. Auf Grund der hinterlegten DAC-Kurve werden alle Anzeigen während des Scans in Echtzeit bezüglich der Fehlergröße und Fehlertiefe ausgewertet und beurteilt. Ein Such-Scan, so wie er in verschiedenen Normen beschrieben und gefordert wird, ist somit nicht notwendig. Nach dem Scannen muss durch den Bediener ein Auswertebereich definiert werden, der sich mit ausreichendem Randabstand innerhalb der Platte befindet (Bild 4). Innerhalb dieses Auswertebereiches werden alle Anzeigen ausgewertet und in einer Fehlerliste (x- / y-Koordinaten, Amplitude, Vergleichsfehlergröße und Fehlertiefe) eingetragen sowie in einem C-Bild (Bild 5) grafisch dargestellt. Grenzwertige Anzeigen werden automatisch mit Hilfe eines hochauflösenden Detail-Scan erneut geprüft und bewertet (Bild 5). Dazu ist nur ein Wechsel der Konfiguration desselben phased-array-Prüfkopfes notwendig.

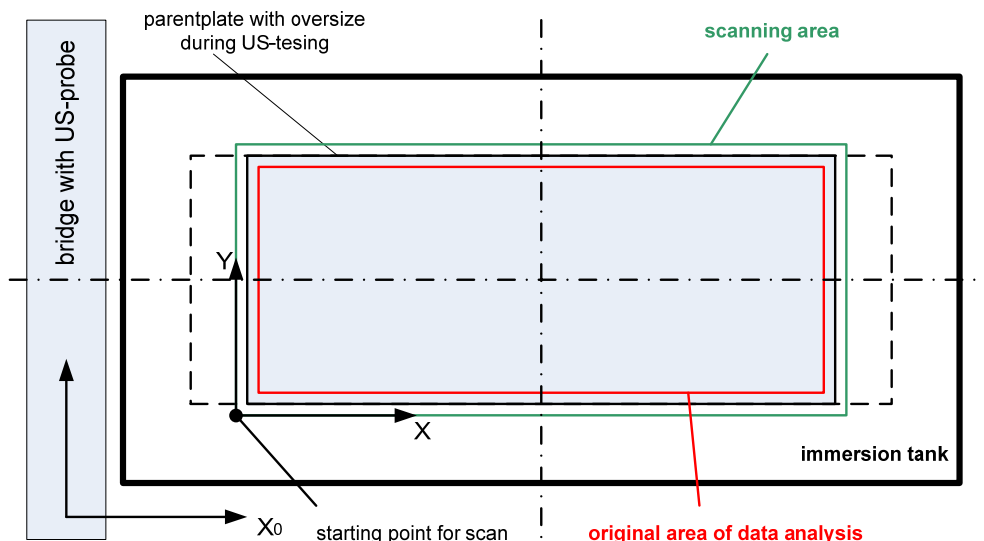


Bild 4: Referenzpunkte, Scan-Bereich und Analysebereich

Die Ecken des Auswertebereiches und alle registrierpflichtigen Anzeigen werden auf der Plattenoberfläche markiert. Nach dem Fertigsägen der Platten müssen die markierten Ecken des Auswertebereiches entfernt worden sein. In diesem Fall ist sichergestellt, dass die Finalplatte keine ungeprüften und unbewerteten Bereiche enthält.

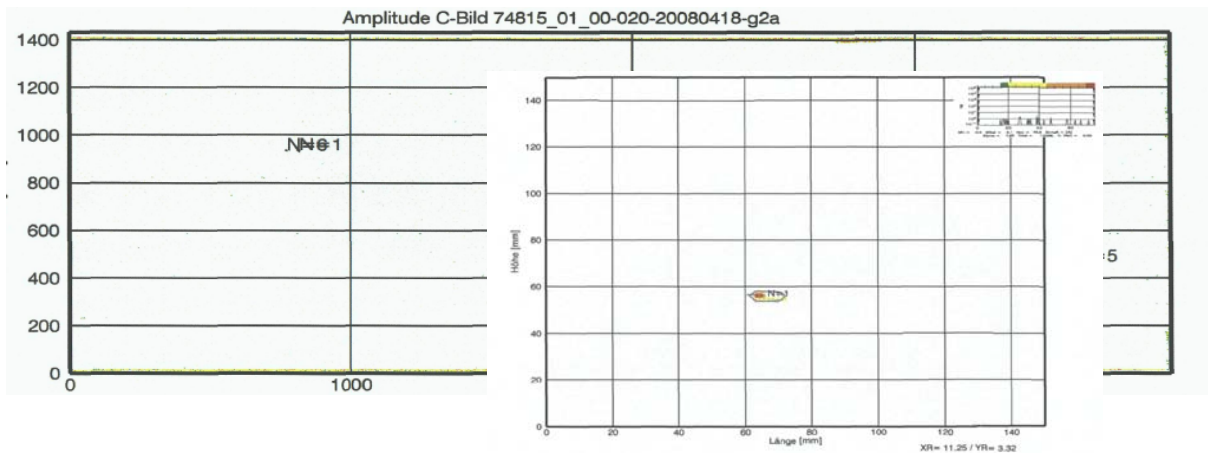


Bild 5: typisches C-Bild einer Mutterplatte und einer grenzwertigen Anzeige nach hochauflösendem Detail-Scan mit 150 x 150 mm

Um eine ordnungsgemäße Empfindlichkeitsjustierung der Anlage zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen, werden die Anzeigen für KSR 1,2 und 2,0 mm in allen Fehlertiefen in regelmäßigen Abständen eigenständig durch die Ultraschallprüfer der Stufe 1 und 2 überprüft. Dabei werden alle Referenzkörper mit den für sie relevanten Einstellungen (Fehlerblende, Rückwandblende) mit der maximalen Prüfgeschwindigkeit geprüft. Diese Einzel-Scans werden zu einem "Batch-Scan" zusammengefasst und geben dem Bediener die Möglichkeit, diese Überprüfung auf einfache Art und Weise halbautomatisch durchzuführen. Entsprechen die Ergebnisse den Vorgaben, ist die Empfindlichkeit ordnungsgemäß eingestellt und die Prüfung darf durchgeführt werden. Bei Abweichungen sind in Absprache mit dem Ultraschallprüfer der Stufe 3 die Empfindlichkeitsjustierungen teilweise oder vollständig zu wiederholen. Alle Ergebnisse werden in Regelkarten abgespeichert.

Die Anlage ist seit Juli 2007 durch NADCAP zertifiziert. Das Wiederholungsintervall beträgt derzeit 24 Monate.

3 Ultraschallanlage – Empfindlichkeitsjustierung

Die Empfindlichkeitsjustierung der Anlage erfolgt üblicherweise gemäß ASTM E 317 [3] und ASTM B 594. Da beide Normen die Besonderheiten der phased-array-Technik nicht abdecken, sind zusätzliche Maßnahmen durchzuführen, um eine ordnungsgemäße Empfindlichkeitseinstellung sicherzustellen. Es sind die nachfolgend genannten Punkte zu überprüfen und neu einzustellen:

- Überprüfung der mechanischen Komponenten (Ausrichtung des Rollganges, Portalpositionen)
- Ausrichtung der Referenzkörper und des phased-array-Prüfkopfes
- Abgleich der virtuellen Prüfköpfe untereinander
- Ausmessen der Schallkeule an ausgewählten virtuellen Prüfköpfen
- Erstellung Distance-Amplitude-Correction-Kurve (KSR 2,0 = 80% BSH)
- Nachweis Nah- und Fernauflösung
- Nachweis des Signal – Rausch Verhältnisses
- Überprüfung der vertikalen und horizontalen Linearität

Speziell der Abgleich der virtuellen Prüfköpfe untereinander ist ein Prüfschritt, der nicht durch die oben genannten Normen abgedeckt wird, aber notwendig ist, um sicherzustellen, dass alle virtuellen Prüfköpfe eine gleiche Empfindlichkeit innerhalb gewisser Grenzen aufweisen (Bild 6). Außerdem ist zu überprüfen, ob "tote Elemente" das Ergebnis beeinflussen. Um den gesamten prüfbareren Dickenbereich abzudecken, wird diese Überprüfung an künstlichen Fehlern (Nut, Querbohrung) in Tiefen von ca. $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ der maximalen Dicke durchgeführt. Der Prüfkopf wird dazu in der aktiven Richtung (y-Richtung) quer über diesen Fehler bewegt. Dadurch werden alle virtuellen Prüfköpfe an der gleichen Stelle des künstlichen Fehlers überprüft. Toleranzbedingte Schwankungen im künstlichen Fehler haben somit keine Auswirkung auf die Überprüfung.

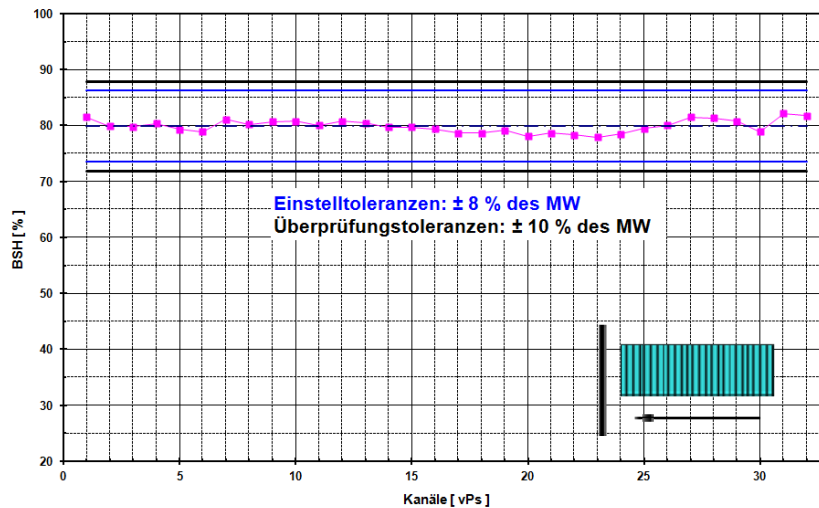


Bild 6: typisches Ergebnis nach dem Abgleich eines phased-array Prüfkopfes mit 32 virtuellen Prüfköpfen

Die restlichen Überprüfungen der Leistungsfähigkeit der US-Anlage erfolgt nach ASTM E 317 bzw. ASTM B 594.

4 Referenzkörperherstellung nach ASTM E 127

Für die Anlage existieren zwei identische Referenzkörpersätze mit den zum Nachweis der Fehlerklasse A notwendigen Flachbodenbohrungen von 1,2 und 2,0 mm. Ein Satz ist in der Anlage im Einsatz und ein Satz verbleibt außerhalb als Reserve bzw. als Referenz für Handmessungen. Die gewählten Fehlertiefen decken mit den in ASTM B594 angegebenen Toleranzen den gesamten Fehlerbereich von 3 bis ca. 100 mm ab. Zusätzlich steht ein Mastersatz gemäß ASTM E 127 [4] zur Verfügung, mit dem die Referenzblöcke in regelmäßigen Abständen verglichen werden, um nachzuweisen, dass keine, äußerlich nicht sichtbare, Beschädigungen der Flachbodenbohrungen aufgetreten sind und alle Referenzkörper noch den Anforderungen entsprechen.

4.1 Überprüfung der Flachbodenbohrungen mittels mechanischer Messung

Als Vormaterial wurde eine gewalzte Platte der Legierung AA7075-T6 verwendet. Messungen der Schallschwächung an Platten aus der Legierungsfamilie 2xxx, 5xxx, 6xxx und AA7075 ergaben keine signifikanten Unterschiede. Referenzkörper der Legierung AA7075-T6 können deshalb für die Prüfung dieser Legierungsgruppen verwendet werden. Um sicherzustellen, dass das Vormaterial frei von inneren Fehlern ist, wurde das Material gemäß ASTM B 594 Prüfklasse AA geprüft und bewertet. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Fertigungstoleranzen, die bei der Herstellung der Referenzblöcke und der

Flachbodenbohrungen einzuhalten sind. Bei den Toleranzen ist besonderes Augenmerk auf die Planheit des Flachbodens und den Durchmesser der Bohrung zu legen. Diese Toleranzen lassen sich nur mit ausgewählten Werkzeugen und Fertigungsparametern prozeßsicher darstellen.

Tabelle 1: Übersicht über die Fertigungstoleranzen für Referenzblöcke und Flachbodenbohrungen (gemäß ASTM E 127)

Toleranzen - Referenzblöcke		Toleranzen - Flachbodenbohrungen	
Länge	± 0,5 mm	Fehlertiefe	± 0,125 mm
Höhe	± 0,25 mm	Winkeligkeit	90 ± 0,1°
Breite	± 0,5 mm	Planheit des Flachboden KSR 1,2	≤ 0,025 mm
Planheit Ober- und Unterseite	< 0,0001 mm / mm Breite oder Länge	Planheit des Flachboden KSR 2,0	≤ 0,025 mm
Parallelität Ober- und Unterseite	< 0,0005 mm / mm Breite oder Länge	Durchmesser KSR 1,2	± 0,013 mm
Rauhigkeit Oberseite	max. 0,76 µm	Durchmesser KSR 2,0	± 0,013 mm
Rauhigkeit Unterseite	max. 1,6 µm		

Die Vermessung der Planheit des Flachbodens kann zerstörungsfrei mit Hilfe eines Silikonkautschukabdruckes durchgeführt werden, welcher anschließend am Mikroskop (Bild 7a) oder am Konoskop (Bild 7b) vermessen wird. Die Verifizierung erfolgt an Hand eines Makroschliffes. Hierzu muss der Referenzkörper aber zerstört werden (Bild 8). Das Ausmessen des Durchmessers erfolgt in analoger Weise entweder zerstörungsfrei am Silikonkautschukabdruck (Bild 8) oder zerstörend am Makroschliff (Bild 9).

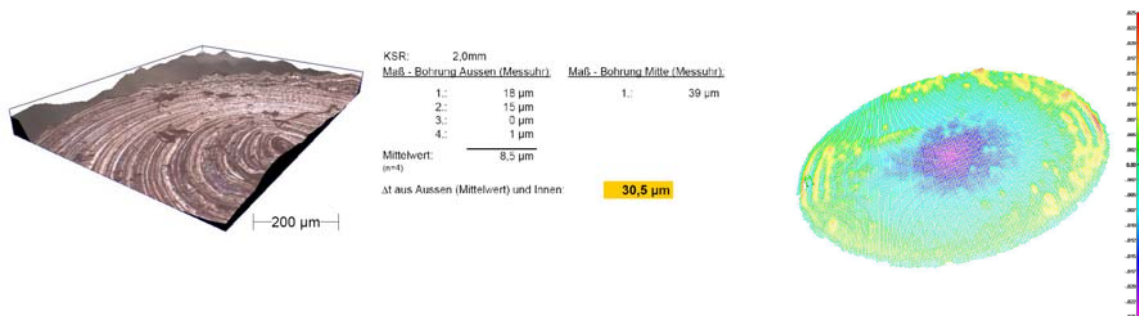


Bild 7: Vermessung der Planheit des Flachbodens am Silikonkautschukabdruck mittels
a) Stereomikroskop
b) Konoskop

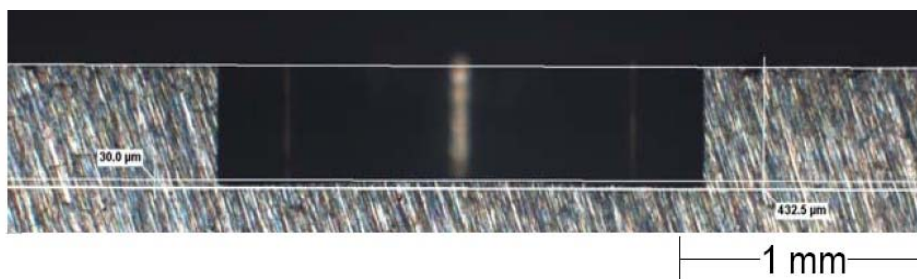


Bild 8: Vermessung der Planheit des Flachbodens am Makroschliff

Nach Bestimmung und Fixierung der Fertigungsparameter konnte in zahlreichen Vergleichsmessungen zwischen den beiden Methoden eine gleichbleibende Prozessstabilität nachgewiesen werden (Tabelle 2). Es ist zulässig, die eingebrachten Flachbodenbohrungen mechanisch mittels Silikonkautschukabdruckes zu vermessen und so die Qualität zerstörungsfrei zu beurteilen.

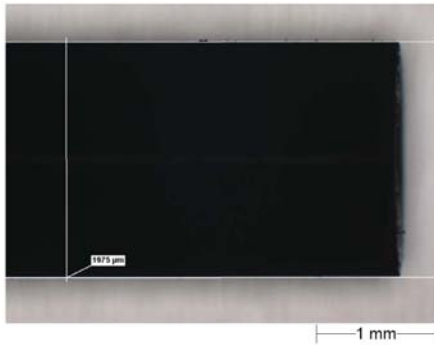


Bild 8: Vermessung des Durchmessers einer Flachbodenbohrung am Silikonkautschukabdruck

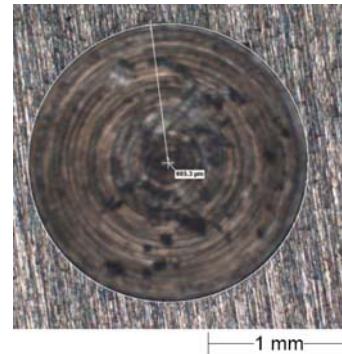


Bild 9: Vermessung des Durchmessers einer Flachbodenbohrung am Makroschliff

Tabelle 2: Vergleich der Messergebnisse am Beispiel eines KSR 2,0 mm

	Planheit des Flachbodens			Durchmesser	
	Makroschliff [μm]	Silikonkautschukabdruck [μm]	Konoskop [μm]	Makroschliff [mm]	Silikonkautschukabdruck [mm]
KSR 2,0	30,0	30,5	$\sim 30,0$	1,971	1,975

4.2 Überprüfung der Flachbodenbohrungen mittels Ultraschall

Die Überprüfung der fertigen Referenzkörper mittels Ultraschall erfolgt im Impuls/Echo-Verfahren in Tauchtechnik (Wasser). Es ist unbedingt ein Prüfkopf mit 5 MHz und einem Fokus zwischen 81 und 91 mm (3,2 bis 3,6 inch) zu verwenden [3]. Die an einer 12,7 mm Stahlkugel aufgenommene Charakteristik der Schallkeule und die DAC-Kurve muss den in ASTM E 127 angegebenen Vorgaben entsprechen.

Für die eigentliche Vermessung der Referenzkörper erfolgt die Empfindlichkeitsjustierung an folgenden Stahlkugeln:

- für KSR 2,0 mm (5/64 inch) Stahlkugel mit $\varnothing = 7,9$ mm (5/16 inch)
- für KSR 1,2 mm (3/64 inch) Stahlkugel mit $\varnothing = 3,2$ mm (1/8 inch)

Die im Fokuspunkt an der entsprechenden Kugel ermittelte Grundverstärkung ist für die Überprüfung der Referenzkörper mit einer Fehlertiefe (MTD) von 12,7 mm (0050) bis 76,2 mm (0300) gültig und anzuwenden (Kurve A gemäß ASTM E 127). Da die Anzeigen mit zunehmender Fehlertiefe kleiner werden, lässt die Messgenauigkeit nach. Deshalb ist ab einer Fehlertiefe von 44,45 mm (0175) bis 154,2 mm (0600) eine um 9 dB erhöhte Verstärkung zu verwenden (Kurve B gemäß ASTM E 127). Bild 10 zeigt am Beispiel des mit Zertifikat zugekauften Mastersatzes den Vergleich zwischen interner und externer

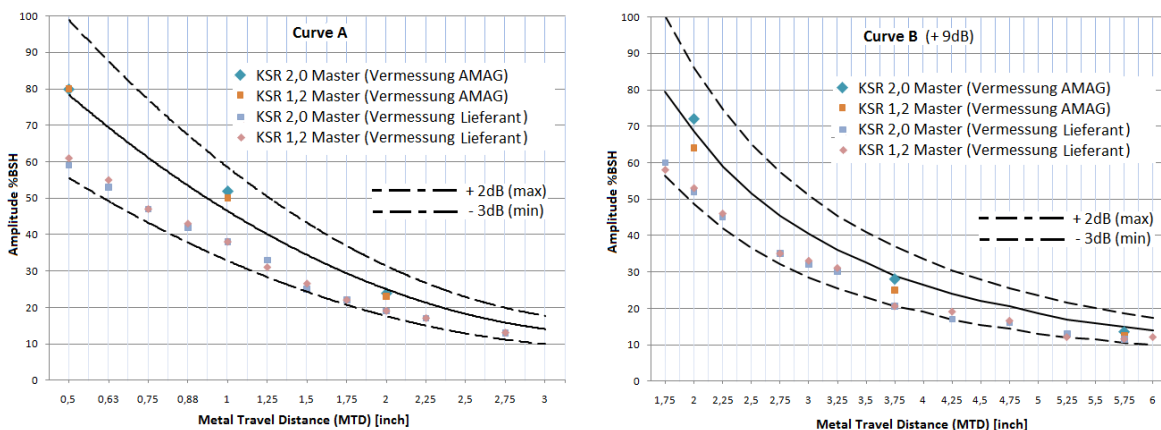


Bild 10: Vermessung der Flachbodenbohrungen mittels Ultraschall gemäß ASTM E 127

Messung. Beide Messergebnisse liegen innerhalb des Toleranzbandes und bestätigen die Qualität und die Gültigkeit der eingebrachten Flachbodenbohrungen.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden die Winkelabweichungen der Flachbodenbohrungen bestimmt. Nachdem der Prüfkopf an der Rückwand des Referenzkörpers senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet wurde, ist die Anzeige der Flachbodenbohrung durch Winkelmanipulation des Prüfkopfes zu maximieren. Die Abweichung darf nicht mehr als 10% des Ausgangswertes betragen.

5 Normung – Mitwirkung an der Erstellung neuer phased array Normen

Innerhalb CEN/TC 138 Working Group 2 (ultrasonic testing) beteiligt sich AMAG rolling aktiv an der Erarbeitung von Normen für die Charakterisierung und Überprüfung von phased-array-Ultraschall-Systemen. Derzeit sind folgende 3 Teile der prEN 16392 in der Bearbeitung:

- Teil 1: Instrumente
- Teil 2: phased-array-Prüfköpfe
- Teil 3: vollständige Systeme

Zur Eröffnung eines neuen Normungsvorhabens müssen mindestens 5 Länder zustimmen und ihre Experten in das Komitee entsenden. Änderungen, Ergänzungen und Verbesserungen können von allen europäischen Ländern mit Hilfe einer standardisierten Kommentarliste eingebracht werden, die dann während der Sitzungen diskutiert, angenommen oder abgelehnt wird. Aktive Mitglieder in der WG2 sind derzeit Frankreich, England, Deutschland, Österreich und die Niederlande.

6 Zusammenfassung

Die phased-array-Technik basiert auf den gleichen physikalischen Grundlagen wie die konventionelle US-Technik. Sie wird aber durch die gängigen Normen, die die Prüfung und Empfindlichkeitsjustierung beschreiben, nicht oder nur teilweise abgedeckt. Deshalb sind zusätzliche Maßnahmen nötig, um eine korrekte Prüfung zu garantieren und in weiterer Folge die notwendigen Luftfahrtzulassungen zu erhalten. Alle virtuellen Prüfköpfe sind untereinander abzugleichen, um innerhalb gewisser Grenzen eine gleiche Empfindlichkeit sicherzustellen. Die restlichen Überprüfungen der Leistungsfähigkeit der US-Anlage erfolgte nach ASTM E 317. Alle Anforderungen werden erfüllt.

Die phased-array-Anlage bei AMAG rolling ist seit 7 Jahren erfolgreich im Dauereinsatz und von allen namhaften Flugzeugherstellern zugelassen. Trotz des erhöhten Aufwandes für die Justierung sind Prüfgeschwindigkeit und Durchsatz höher als bei einer konventionellen Anlage.

Es wurden Referenzkörper gemäß ASTM E 127 selbst gefertigt und überprüft. Die dabei zu berücksichtigenden Randbedingungen sowie die Methoden zur Fertigungsüberwachung und zur Überprüfung der Genauigkeit der Flachbodenbohrungen wurden verifiziert und können nun in der Praxis angewendet werden.

AMAG rolling beteiligt sich innerhalb CEN/TC 138 Working Group 2 (ultrasonic testing) aktiv an der Erarbeitung von Normen für die Charakterisierung und Überprüfung von phased-array-Ultraschall-Systemen. Derzeit sind 3 Normungsvorhaben zu diesem Thema in Arbeit.

7 Referenzen

- [1] AMS-STD-2154: 1998-03 – Inspection, Ultrasonic, Wrought Metals, Process for
- [2] ASTM B 594: 2009-12 - Standard Practice for Ultrasonic Inspection of Aluminum-Alloy Wrought Products for Aerospace Applications
- [3] ASTM E 317: 2011-08 - Standard Practice for Evaluating Performance Characteristics of Ultrasonic Pulse-Echo Testing Instruments and Systems without the Use of Electronic Measurement Instruments.
- [4] ASTM E 127: 2010-02 - Standard Practice for Fabricating and Checking Aluminum Alloy Ultrasonic Standard Reference Blocks