

# Ultraschallprüfung mit Matrix-Arrays zur schnellen Fehlerdetektion in Kupferlötsschichten

Jessica KITZE, Gerhard BREKOW, Hans-Joachim MONTAG, Rainer BOEHM,  
Daniel BRACKROCK, Marc KREUTZBRUCK  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

**Kurzfassung.** Es wird die Entwicklung einer Ultraschall-Prüftechnik unter Einsatz eines Matrix-Arrays in Kontakttechnik vorgestellt. Innerhalb kürzester Zeit können C-Bilder von flächig verlöteten Blechen erstellt werden, um die Integrität der Lötverbindung zu dokumentieren. Für den Einsatz des Matrix-Arrays wird ein rechnergesteuertes Ultraschallgerät benutzt, mit dem einerseits die einzelnen Schwingerelemente im Sende- und Empfangsbetrieb oder aber alle Elemente für die gezielte Steuerung des Schallbündels eingesetzt werden können. Die Ansteuerung einzelner Schwingerelemente ermöglicht die Erstellung von C-Bildern ohne Abtastbewegung des Matrix-Arrays. Werden alle Elemente des Matrix-Arrays eingesetzt, kann aus den Messdaten längs einer Fahrspur mit Aufnahme der Positionsdaten ein C-Bild erstellt und die Lötverbindung auf Fehlstellen analysiert werden.

## Einführung

Innovative Anwendungen für die detaillierte, zerstörungsfreie Werkstoffanalyse bieten Ultraschalluntersuchungen mit Matrix-Arrays, bei denen die aktive Wandlerfläche aus einer großen Anzahl von schachbrettartig, ring- oder spiralförmig angeordneten Schwingerelementen besteht. Diese ermöglichen eine elektronisch gesteuerte, mehrdimensionale Schallfeldsteuerung, wodurch ein Höchstmaß an Nachweisempfindlichkeit und Auflösungsvermögen erreicht wird. In der einschlägigen Fachliteratur wird auf vielfältige Einsatzmöglichkeiten der Matrix-Arrays hingewiesen:

In dem Beitrag von G. Maes et al. [1] aus dem Jahr 2008 wird auf den Einsatz von zweidimensionalen (2D) Arrays hingewiesen, mit denen bei der Schweißnahtprüfung Fehler mit verschiedenen Orientierungen nachgewiesen werden können. Bis zu 159 verschiedene Fokuspunkte (focal laws) können mit einem 2,25 MHz-SE-Matrix-Array eingestellt werden, das 2 x (6 x 6) Schwingerelemente aufweist.

In dem Beitrag von S. Chatillon et al. [2] werden für komplexe Ultraschall-Prüfeinsätze Simulationsrechnungen mit CIVA Software und experimentelle Untersuchungen vorgestellt, bei denen die Vorteile von Matrix-Arrays herausgestellt werden. So kann mit CIVA das Muster der aktiven Sende- und Empfangselemente bei dem Matrix-Array in beliebiger Form definiert werden. Ein Quadrat aus 16 Elementen oder 16 ringförmig angeordnete Elemente können jeweils als Sender und Empfänger simulationstechnisch aktiviert werden. Für diese Anordnungen können dann die Ansteuerungszeiten im Sende- und Empfangsfall berechnet werden. Bei der Messdatenverarbeitung kann aber auch die „Full Matrix Capture“ Methode eingesetzt werden. Bei dieser Art der Messdatenaufnahme

wird ein Element des Arrays als Sender und alle übrigen Elemente als Empfänger genutzt. Dies wird für alle Schwingerelemente sukzessive variiert und bei der Auswertung der Messdaten werden die in Pixeln abgespeicherten digitalen Werte der Signalamplituden entsprechend aufsummiert.

Lane et al. [3] haben in ihrer Arbeit ebenfalls einen Ultraschall-Abbildungsalgorithmus für 2D Arrays vorgestellt, der als Total Focusing Method (TFM) bezeichnet wird und nach der „Full Matrix Capture“ Methode arbeitet. Diese Methode ermöglicht eine effektive Fokussierung der Ultraschallenergie auf jeden Ort in dem Abbildungsfeld. Da die Anwendung der Prüftechnik auf kubisch anisotrope Einkristall-Turbinenschaufeln ausgerichtet ist, wurde im Abbildungsalgorithmus die Wellenausbreitung in kubisch anisotropen Medien berücksichtigt.

Die große Anzahl an Schwingerelementen wird als die zentrale Herausforderung für die dreidimensionale Ultraschallabbildung mit 2D Matrix-Array-Wandlern angesehen. Die Optimierung des Array Layouts im Hinblick auf eine Reduzierung der aktiven Elemente in der Apertur ist in den letzten Jahren eines der wichtigsten Forschungsziele gewesen. Die weiter fortgeschrittenen Herstellungstechnologien von 2D Arrays haben eine Produktion mit höherer Flexibilität in Bezug auf Elementgröße, -form und -position ermöglicht [4]. Andere Konfigurationen gegenüber der klassischen Matrix-Anordnung, wie z.B. zirkulare oder spiralförmige Layouts werden schon in Simulationsrechnungen berücksichtigt. In dem Beitrag werden die Eigenschaften einer spiralförmigen Elementanordnung mit anderen Elementanordnungen simulationstechnisch verglichen.

Velichko et al. [5] führen in ihrem Beitrag einen quantitativen Vergleich verschiedener Anordnungen von Schwingerelementen bei 2D Matrix-Arrays mit jeweils einer Frequenz von 3 MHz durch. Die Apertur des konventionellen Matrix-Arrays mit 121 Elementen (11 x 11) beträgt 12 mm und die Apertur des kreisförmigen Matrix-Arrays mit 128 Elementen beträgt 30 mm. Die wiedergegebenen Ergebnisse zeigen, dass ein kreisförmiges Matrix-Array mit 128 Elementen und optimierter Geometrie eine zweifach bessere Bildauflösung gegenüber einem konventionellen quadratisch angeordneten Matrix-Array mit 121 Elementen erreicht.

In dem Beitrag von Tremblay et al [6] werden ebenfalls fortgeschrittene Anwendungen der Phased Array Technologie vorgestellt, bei denen Komponenten mit komplexen und wellen-förmigen Oberflächen einer Inspektion unterzogen werden können. Optimierte focal laws werden hier für jede Prüfkopfposition berechnet und für die Durchführung der Prüfung abgespeichert.

Weitere Vorteile der 2D Arrays liegen in der Verkürzung der Prüfzeiten und in den kleineren Schallbündelabmessungen, wie im Beitrag von Braconnier et al. [7] geschildert wird. Auf die Volumenfokussierung ohne Prüfkopfbewegung wird ebenfalls hingewiesen. Auch bei der Ultraschallprüfung von Rohren wird in zunehmendem Maße ein Nachweisvermögen verlangt, dass die Detektion von Fehler mit unterschiedlichen Orientierungen sicherstellt [8]. Längs- und Querfehler sowie schräg liegende Fehler am Rohr können mit einem 2D Array aus einer Prüfkopfposition erfasst werden, da die elektronische Schallfeldsteuerung eines 2D Arrays ein höheres Maß an Flexibilität bietet, als bei einem Linear Array.

In weiteren Arbeiten wurde gezeigt, dass die große Anzahl an Schwingerelementen des Matrix-Arrays genutzt werden kann, um die „Full Matrix Capture“ Methode mit der Technik des getakteten Gruppenstrahlers anzuwenden. In dem Beitrag von Bulavinov et al. [9] werden die Ergebnisse der Ultraschallprüfung mittels getakteter Gruppenstrahlertechnik und Echtzeit-Rekonstruktion von 3D-Bildern präsentiert. Die Vorteile und das Potential der quantitativen Bildgebung werden für mehrere praktische Anwendungen demonstriert [9].

Auch für den vorliegenden Beitrag sind Matrix-Arrays für die detaillierte, zerstörungsfreie Werkstoffanalyse eingesetzt worden, da durch eine mehrdimensionale Schallfeldsteuerung ein Höchstmaß an Empfindlichkeit und Auflösung erreicht werden kann. Es werden Messungen vorgestellt, bei denen mit dem Matrix-Array Messdaten erzeugt worden sind, aus denen sich u.a. voxelisierte Echobilder mit einer Geschwindigkeit herstellen lassen, die mit einem Linear-Array nicht erreichbar ist. Die räumliche Verteilung von Defekten lässt sich damit gut darstellen.

## Prüfkonzepte

Bei der Durchführung der Messungen an Kupferlötproben mit künstlich eingebrachten Defekten sind zwei Prüftechniken erprobt worden: die *Touch down*- und die *Scan*-Technik. Die künstlichen Defekte haben dabei die Form von flächenhaft unverlöteten Bereichen in einer Lotschicht, die zwischen einem 2 mm bzw. 3 mm Deckblech und einem 10 mm dicken Kupferblech vorliegt. Der Probekörper ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

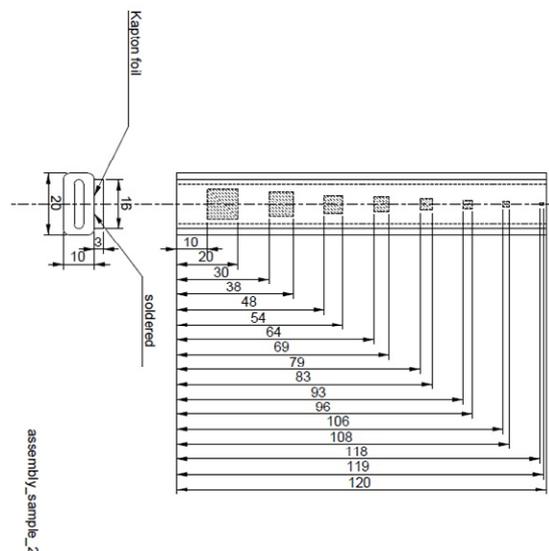


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kupferlöt-Probekörper mit 8 künstlich eingebrachten Lötfehlstellen unter einem 2 mm bzw. einem 3 mm dicken Kupferdeckblech, aufgebracht auf ein jeweils 10 mm dickes Kupferblech

Bei der *Touch down*-Technik wird das Matrix-Array auf der Oberfläche der 3 mm dicken Kupferplatte aufgesetzt und mit Wasser angekoppelt. Ohne eine Prüfkopfbewegung werden die einzelnen Schwingerelemente des Matrix-Arrays elektronisch sukzessive paarweise als Sender und Empfänger aktiviert. Auf diese Weise wird ohne eine Abtastbewegung beim Messvorgang ein Abscannen der Oberfläche in kürzester Zeit ermöglicht. Abbildung 2 zeigt schematisch die Messdatenaufnahme.

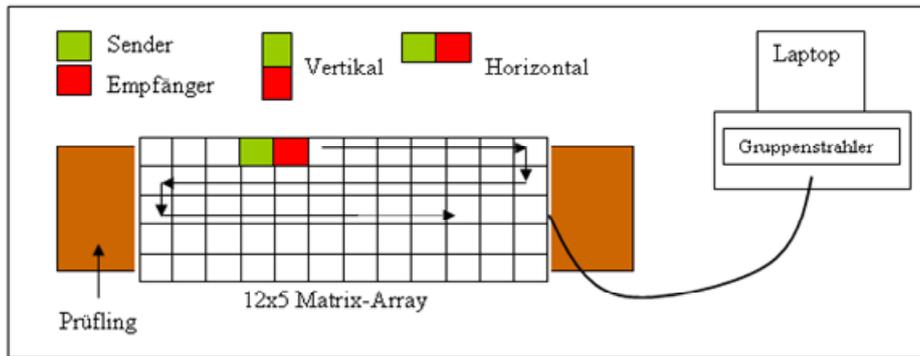


Abbildung 2: Schematische Darstellung der sukzessiven Aneinanderreihung der Schwingerelemente als Sender und Empfänger beim Messvorgang

Bei der *Scan*-Technik erfolgt mit dem Matrix-Array eine manipulatorgesteuerte Abtastbewegung über die gesamte Fläche der Kupferplatte. Hierbei sind alle 60 Schwingerelemente bei der Schallbündelerzeugung aktiv. Das Schallbündel wird elektronisch auf verschiedene Punkte im Prüfvolumen fokussiert.

Die Messung kann hierbei auf einer einzelnen Abtastspur oder aber mäanderförmig auf mehreren Abtastspuren erfolgen, wie die Abbildungen 3 und 4 schematisch zeigen.

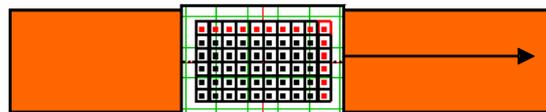


Abbildung 3: Abtastung der Kupferplatte auf einer Einzelspur

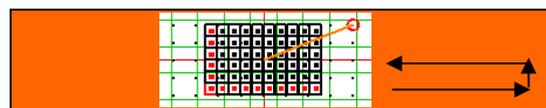


Abbildung 4: Abtastung der Kupferplatte auf mehreren, mäanderförmig angeordneten Abtastspuren

## Messaufbau

Für die *Touch down*-Technik wurde ein 2 MHz Matrix-Array mit 5 x 2 Schwingerelementen eingesetzt. Für die *Scan*-Methode ist ein 2,25 MHz Matrix-Array mit 6 x 10 Schwingerelementen benutzt worden. Die Schwingerelemente haben hierbei Abmessungen von 2,5 mm x 3 mm bzw. 1,2 mm x 1,2 mm. Für die Messdatenaufnahme wurde ein rechnergesteuertes „Compas-XL“-Ultraschallgerät genutzt, welches im Fachbereich 8.4 „Akustische Verfahren“ der BAM entwickelt wurde. Das „Compas-XL“ hat 256 Send- und Empfangskanäle und eine Bandbreite von 0,4 MHz bis 20 MHz. Die rechteckigen Sendepulse können Pulsbreiten zwischen 20 ns und 2500 ns annehmen. Im Send- und im Empfangsfall können Verzögerungszeiten von 0 bis 20  $\mu$ s bei einer Schrittweite von 1 ns eingestellt werden.

## Messungen

### *Touch-down-Technik*

Um die gesamte Länge der Kupferlöt-Testkörper untersuchen zu können, ist bei der *Touch-down*-Technik das Matrix-Array viermal aufgesetzt worden. Jeder Messvorgang dauerte etwa 2 Sekunden, so dass die gesamte Messung in etwa 15 Sekunden durchgeführt werden konnte. Die Datenaufnahme erfolgte mit einer entsprechenden Software, die ebenfalls im Fachbereich 8.4 der BAM entwickelt wurde. Bei der sukzessiven Weiterschaltung der einzelnen Schwingerelemente als Sender und Empfänger werden jeweils die von den einzelnen Elementen aufgenommenen Echoamplituden der A-Bilder entsprechend der räumlichen Elementanordnung im C-Bild farbcodiert abgespeichert.

Vor Beginn der Messungen mit der *Touch down*-Technik wurde eine Empfindlichkeitsjustierung an einem Kupfer-Referenzkörper erstellt, der schematisch in Abbildung 5 dargestellt ist. Das Ergebnis der Empfindlichkeitsjustierung zeigt das C-Bild in Abbildung 6. Daraus geht hervor, dass die 2 mm Flachbodenbohrungen mit Ligamenten zwischen 2 mm und 4 mm mit ausreichendem Signal-Rausch-Abstand zur Anzeige kommen.

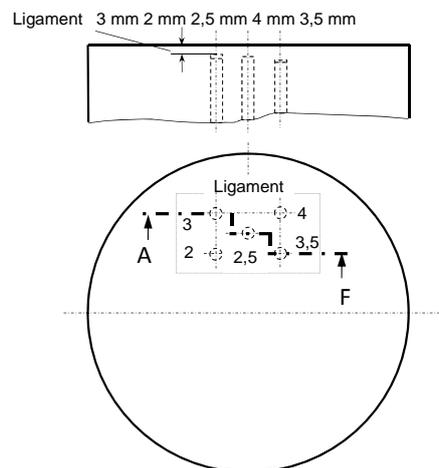


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Cu-Referenzkörpers mit Flachbodenbohrungen in 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 3,5 mm und 4 mm Tiefe

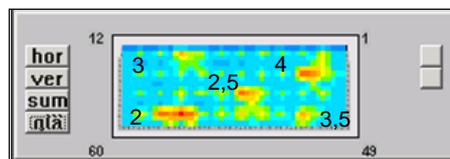
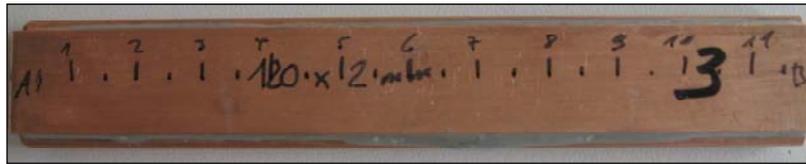
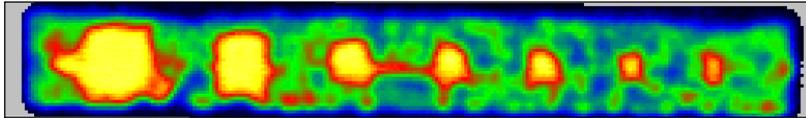


Abbildung 6: C-Bild des Cu-Referenzkörpers

Unter Berücksichtigung einer geeigneten Empfindlichkeitsjustierung wurden die Messungen mit der *Touch down*-Technik an den zwei oben beschriebenen Kupfertestkörpern mit 2 mm und 3 mm dicken Deckblechen durchgeführt. Dabei galt es die Testfehler, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, nachzuweisen. Die Messergebnisse der *Touch down*-Methode sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Den Messungen sind deutlich zeitaufwendigere und oft nicht praktikable hochauflösende Tauchtechnikmessungen gegenübergestellt.

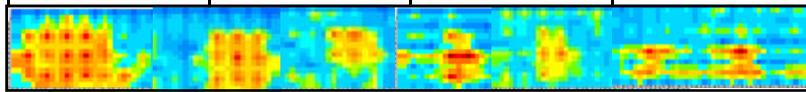


Kupferlötverbindung, oberes Deckblech 2 mm dick

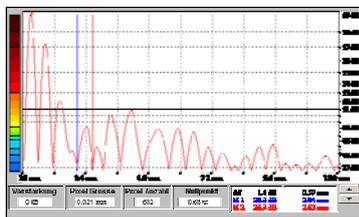


C-Bild: Ultraschallmessung in Tauchtechnik

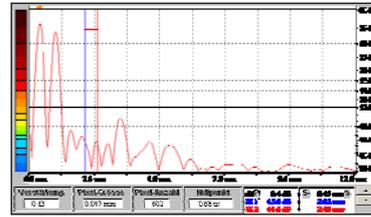
0 30 60 90 120



C-Bild: farbcodierte Signalamplituden markieren Lötfehlstellen

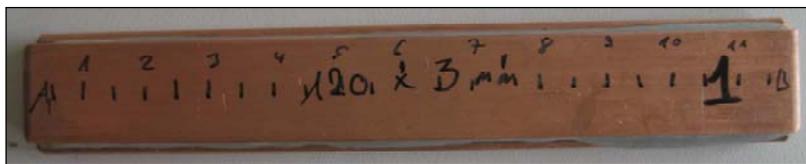


A-Bild: Reflektor

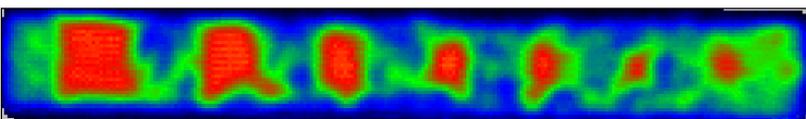


A-Bild: Fehlerfreier Bereich

Abbildung 7: A-Bilder der *Touch down*-Methode und Gegenüberstellung der C-Bilder, die mit der *Touch down*-Methode und mit der Tauchtechnikmessung an einem 2 mm dicken Deckblech ermittelt wurden

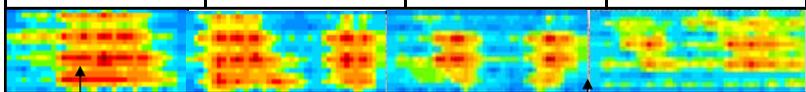


Kupferlötverbindung, oberes Kupferblech 3 mm dick

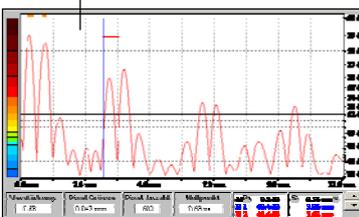


C-Bild: Ultraschallmessung in Tauchtechnik

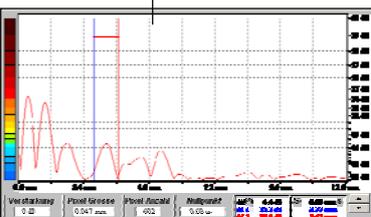
0 30 60 90 120



C-Bild: farbcodierte Signalamplituden markieren Lötfehlstellen



A-Bild: Reflektor



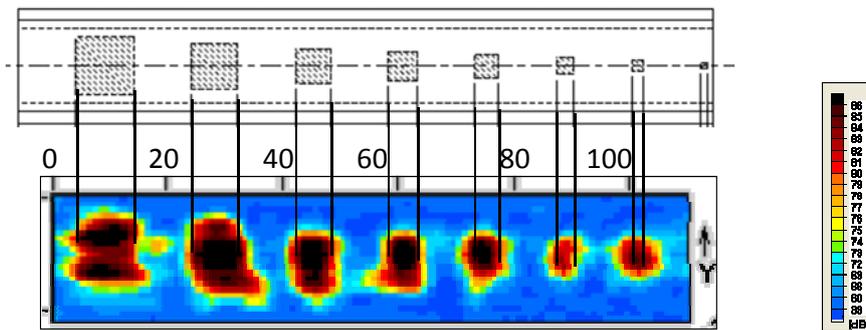
A-Bild: Fehlerfreier Bereich

Abbildung 8: A-Bilder der *Touch down*-Methode und Gegenüberstellung der C-Bilder, die mit der *Touch down*-Methode und mit der Tauchtechnikmessung an einem 3 mm dicken Deckblech ermittelt wurden

Wie die Messergebnisse in Abbildung 7 und 8 zeigen, können mit der *Touch down*-Technik die Lötfehlstellen nachgewiesen werden. In den A-Bildern der einzelnen Elemente werden Laufzeitblenden entsprechend der Tiefenlage der Lötsschicht ausgewählt und relevante Echsignale ausgewertet. Eine Größenbestimmung der Defekte ist nur näherungsweise möglich. Die Auflösung liegt im Bereich der jeweiligen Elementabmessung.

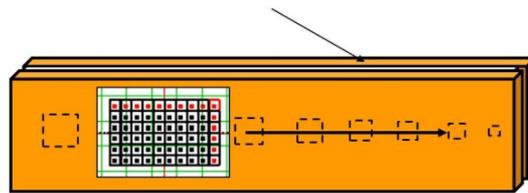
### Scan-Methode

Eine genauere Größenbestimmung der Lötfehlstellen ermöglichen die Messungen mit einem Matrix-Array längs einer Fahrspur oder längs mehrerer mäanderförmig angeordneter Fahrspuren. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 9 und 10 für ein Matrix-Array mit einer Prüffrequenz von 2,25 MHz und den Abbildungen 11 und 12 für ein Matrix-Array mit einer Prüffrequenz von 5 MHz dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl ein Nachweis, als auch eine Größenabschätzung der Defekte möglich ist. Es können zudem einzelne Details der Lötfehlstellen erkannt werden, wie sie in den hochau aufgelösten Tauchtechnikmessungen zu sehen sind. Erwartungsgemäß ist die Auflösung und damit die Detailerkennbarkeit mit einer Prüffrequenz von 5 MHz größer als mit 2,25 MHz. Durch die Erhöhung der Abtastspuren in Längsrichtung kann die Auflösung und damit die Detailerkennbarkeit ebenfalls deutlich erhöht werden.



C-Bild aus einer Spur mit einem 60 Elemente Matrix Array

Kupferlötver-  
bindung



**Einspurige** Messung  
mit Matrix Array

Abbildung 9: Mit einem 2,25 MHz Matrix-Array längs einer Fahrspur aufgenommenes C-Bild

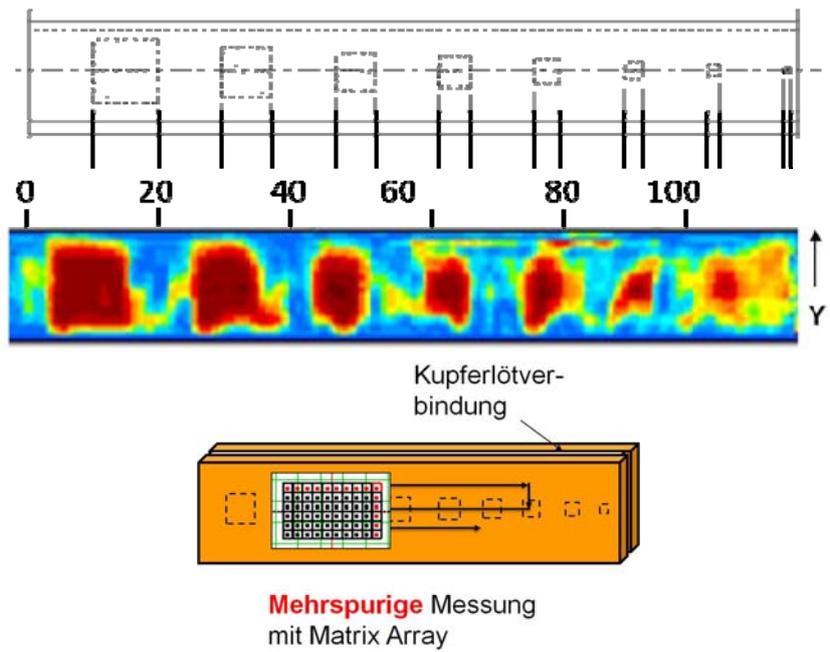


Abbildung 10: Mit einem 2,25 MHz Matrix-Array längs mehrerer mäanderförmig angeordneter Fahrspuren aufgenommenes C-Bild

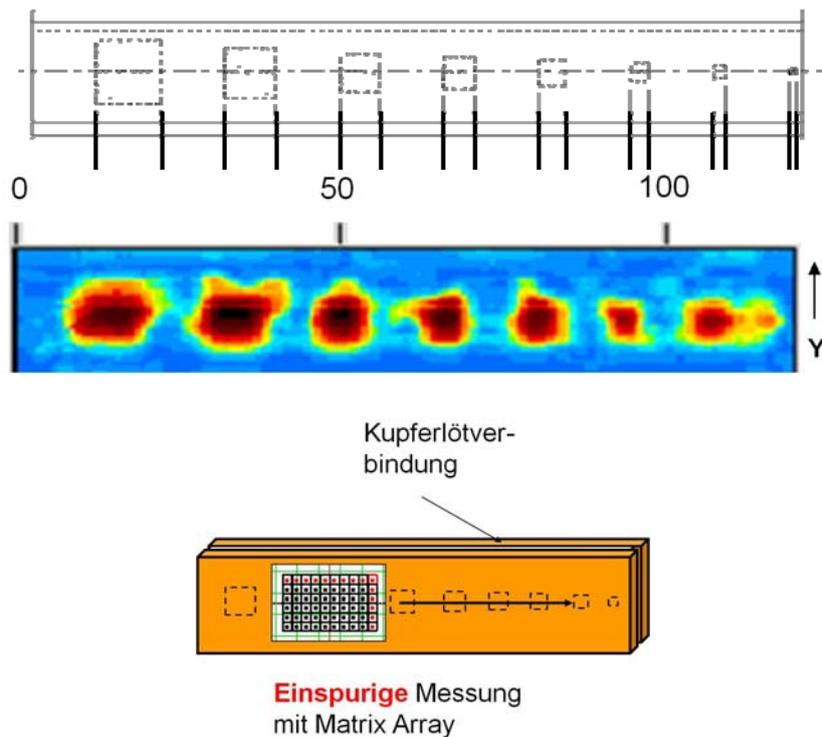


Abbildung 11: Mit einem 5 MHz Matrix-Array längs einer Fahrspur aufgenommenes C-Bild

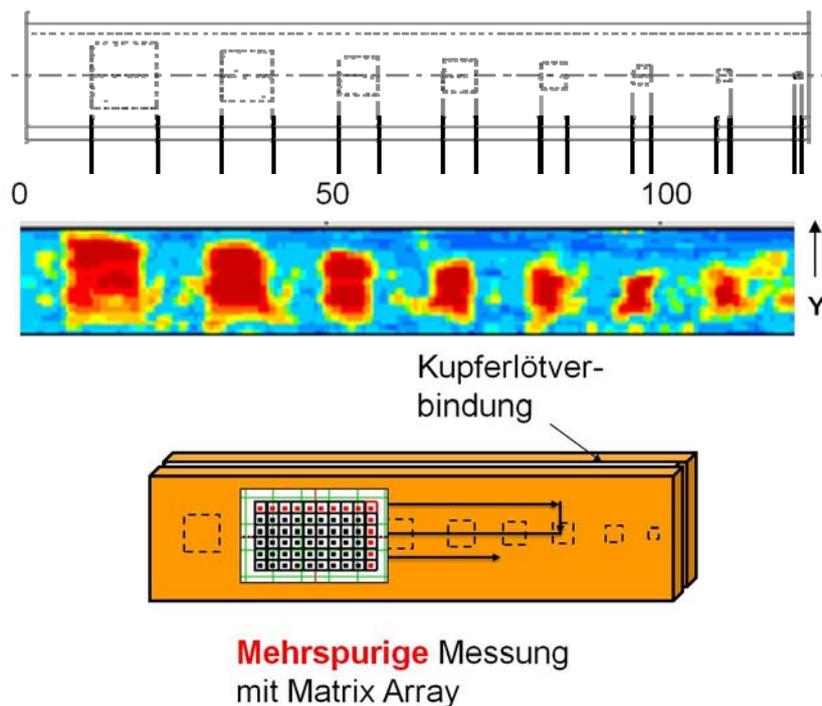


Abbildung 12: Mit einem 5 MHz-Matrix-Array längs mehrerer mäanderförmig angeordneter Fahrspuren aufgenommenes C-Bild

## Zusammenfassung

Es sind zwei Ultraschall-Prüftechniken mit Matrix-Arrays zum Nachweis von Lötfehlstellen zwischen zwei Kupferblechen vorgestellt worden: die *Touch down*-Technik und die *Scan*-Technik.

Die Untersuchungen mit der *Touch down*-Technik wurden mit Matrix-Arrays mit Prüffrequenzen von 2 MHz und 2,25 MHz durchgeführt. Für die *Scan*-Technik wurden Matrixarrays mit 2,25 und 5 MHz eingesetzt. Für beide Untersuchungen wurde ein „Compas-XL“-Ultraschallgerät genutzt, dessen Hard- und Software im Fachbereich 8.4 der BAM entwickelt worden sind.

Beide Techniken gestatten einen Fehlernachweis in Kontakttechnik im oberflächennahen Bereich. Die *Touch down*-Technik ist dafür geeignet, in wenigen Sekunden ein C-Bild zu erzeugen. Die einzelnen Elemente des Matrix Arrays werden sukzessive als Sender und Empfänger angesteuert und die Positionierung der Signalanzeigen für die C-Bild-Erstellung beruht lediglich auf der räumlichen Anordnung der Schwingerelemente.

Der Vergleich der einspurigen und mehrspurigen *Scan*-Technik mit einem Matrix-Array zeigt, dass hier die große Flexibilität der Schallbündelsteuerung schon mit einer einzigen Abtastspur eine C-Bild-Erzeugung gestattet. Mit dem Einsatz eines Matrix-Arrays kann eine größere Prüfgeschwindigkeit erreicht werden, da der Spurabstand bei der mäanderförmigen Abtastung größerer Bauteile erhöht werden kann.

## Referenzen

[1] On the Use of Advanced UT Phased Array Methodology and Equipment; G. Maes, D. Richard; 17<sup>th</sup> World Conf. on Nondestructive Testing, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China

[2] Simulation of Advanced UT Phased Array Techniques with Matrix Probes and Dynamic Settings for Complex Component Inspections; S. Chatillon, S. Mahaut, P. Dubois; Rev. of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 28, 2009, pp. 864-871

[3] The Ultrasonic Measurement of Crystallographic Orientation for Imaging Anisotropic Components with 2D Arrays; C.J.L.Lane, A.K. Dunhill, B.W. Drinkwater, and P.D. Wilcox; Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 30 (2011) 1335, pp. 803-810

[4] 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging; O. Martinez-Graullera, J.C. Martin, G. Godoy, L.G. Ullate; ICU, 2009, International Congress on Ultrasonics, Santiago, CL, 11.01. - 17.01. 2009; Ultrasonics \* Band 50 (2010) Heft 2, pp. 280-289

[5] Defect characterization using two-dimensional arrays; Velichko, P.D. Wilcox; QNDE, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 37<sup>th</sup>, San Diego, CA,US, 18.07.- 23.07.2010 , in: AIP Conference Proceedings \* Band 1335 (2011), pp. 835-842

[6] Recent progress in phased array UT inspection through complex and wavy surfaces; P. Tremblay, S. Turgeon, D. Reilly, M. Guy; ECNDT, European Conference on Non-Destructive Testing, 10th, Moscow, RU, 07.06. – 11.06.2010, pp. 1-10

[7] Inspecting with volume focusing and 2D arrays (Part 2); D. Braconnier, J. Murai; International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 7th, Yokohama, JP, 2009-05-12 - 2009-05-14, pp.5-11

[8] Application of 2D arrays for ultrasonic tube inspection; A. Noel, B. Bisiaux, N. Nourrit, S. Nitsche; ECNDT, European Conference on Non-Destructive Testing, 10th, Moscow, RU, 07.06.- 11.06. 2010, pp. 1-7

[9] Echtzeit-3D-Bildgebung mittels der getakteten Gruppenstrahlertechnik für Ultraschall-prüfanwendungen; A. Bulavinov, M. Kröning, R. Pinchuk, K.M. Reddy; DGZfP-Jahrestagung Münster, 18. – 20.Mai 2009, DGZfP-Berichtsband BB 115-CD (2009), pp. 1-12

**Poster49** Ultraschallprüfung mit Matrix-Arrays zur schnellen Fehlerdetektion in Kupferlötsschichten  
<http://papers.dgzfp.de/de-de/meinevotr%C3%A4ge.aspx?id={9794C472-2D00-42D6-BE13-DBC591B2595B}&sh=B77E6E56C26FFE8825811724F744A503>