

# Flexible Schallbündelsteuerung mit Matrixarrays

Daniel BRACKROCK, Mate GAAL, Hans-Joachim MONTAG, Rainer BOEHM,  
Gerhard BREKOW  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**Kurzfassung.** Die Wandleroberflächen der eingesetzten Matrixarrays bestehen aus bis zu 256 Einzelelementen, die schachbrettförmig angeordnet sind und in ausgewählten Elementgruppen als Sende- oder Empfangselemente aktiviert werden können.

Zu diesem Zweck werden die Matrixarrays an das COMPAS-XL Ultraschallgerät angeschlossen und mit einer angepassten Software angesteuert. Daraus resultiert eine hohe Flexibilität der Schallbündelsteuerung, die eine erhöhte Nachweisempfindlichkeit und eine bessere Auflösung bei der bildlichen Ergebnisdarstellung ermöglichen. Ein Matrix Array kann daher in Impuls- Echo-Technik oder aber in SE-Technik eingesetzt werden.

Bei Einsatz der Impuls-Echo-Technik wird eine ausgewählte Anzahl der jeweils gleichzeitig aktivierten Schwingerelemente für die flächenhafte Abtastung mit einem fokussierten Schallbündel benutzt. Bei der SE-Technik mit dem fokussierten Schallbündel ist eine räumliche Trennung zwischen den für Sende- und Empfang aktivierten Elementen aufgrund der Vielzahl der Elemente beim Matrixarray möglich. Der Vergleich der beiden Prüftechniken beim Reflektornachweis in Kontakttechnik dicht unter der Prüfoberfläche zeigt das hohe Nachweispotenzial.

Es sind umfangreiche Untersuchungen an anisotropen Composite-Werkstoffen und an legierten Metallen durchgeführt worden, wobei die Prüfergebnisse die Vielseitigkeit der Matrixarrays im Hinblick auf das Nachweis- und Auflösungsvermögen zeigen.

## 1. Einführung

Aus der großen Elementanzahl der Matrixarrays oder 2D Arrays resultiert eine höhere Flexibilität der Schallbündelsteuerung, die eine erhöhte Nachweisempfindlichkeit und eine bessere Auflösung bei der bildlichen Ergebnisdarstellung ermöglichen. Auf diese Vorteile wird in jüngster Zeit in immer mehr veröffentlichten Beiträgen hingewiesen. Matrixarrays bieten hier innovative Anwendungsmöglichkeiten für eine detaillierte Analyse von kohlefaserverstärkten Kunststoffen, von Klebverbindungen, von anisotropen Werkstoffen und von komplexen Schweißnahtverbindungen. Es wird eine Ultraschall-Prüftechnik mit Matrixarrays vorgestellt, mit der in Impuls-Echo- und in SE-Technik sehr kleine Werkstofffehler dicht unter der Oberfläche und im Volumen nachgewiesen werden können. Impactschäden in CFK und Fehler in Klebverbindungen sind auf diese Weise quantitativ untersucht worden. Auch an der Oberfläche zunächst geringfügig aussehende Beschädigungen können mit dieser Untersuchungsmethode in die Tiefe verfolgt werden. Auf diese Weise kann ein wesentlicher Beitrag zur Qualitätskontrolle geleistet werden.



## 2. Überblick zum Stand der Technik

Aufgrund der hohen Flexibilität der Schallbündelsteuerung können Matrixarrays sehr detailliert an die Prüfaufgabe angepasst werden. Voraussetzung dafür sind allerdings Modellrechnungen, mit der die elektronische Ansteuerung der einzelnen Schwingerelemente exakt vorausberechnet werden kann. Diesen Sachverhalt beschreiben auch aktuelle Fachbeiträge, die den Stand der Technik wiedergeben.

In dem Beitrag von Chatillon et al [1] werden für komplexe Ultraschall-Prüfeinsätze Simulationsrechnungen mit CIVA Software und begleitende experimentelle Untersuchungen vorgestellt, bei denen die Vorteile von Matrixarrays herausgestellt werden. So kann mit CIVA das Muster der aktiven Sende- und Empfangselemente beim Matrixarray in beliebiger Form definiert werden.

Ein Quadrat aus 16 Elementen oder 16 ringförmig angeordnete Elemente können als Sender und Empfänger simulationstechnisch aktiviert werden. Für diese Anordnungen können dann die Verzögerungszeiten (delay law) für die Ansteuerung im Sende- und Empfangsfall berechnet werden.

In dem Beitrag von S. Michau [2] werden mehrere verschiedene innovative Wandlerdesigns vorgestellt. Neben einem 1-3 Piezokompositwandler, der für Temperaturen bis 120°C einsetzbar ist, wird ein Matrixarray bestehend aus 128 Elementen für Frequenzen bis 40 MHz beschrieben. Weiterhin wird ein 2 MHz Matrixarray bestehend aus 128 Elementen und ein 5 MHz Ringarray mit 255 Elementen vorgestellt. Die Modellierung der Arrays erfolgte mit Hilfe der CIVA-Software. Konzipiert ist das Matrixarray mit 128 Elementen für die Ultraschallprüfung von Stutzenschweißnähten.

Weiterhin wird auf die Entwicklung eines segmentierten Ringarrays hingewiesen, das in Kombination mit einer Wirbelstromprüfung oberflächennahe Fehler in Titanstangen für die Luftfahrtindustrie nachweisen kann.

Dieses spezielle 2D Array besteht aus 255 Elementen, die in 12 flächengleichen Ringen um ein Mittenelement gruppiert sind. Der erste Ring besteht aus 2 Elementen, der letzte aus 48 Elementen. Der mit einer konkav gekrümmten Laufsohle ausgerüstete Prüfkopf kann ein fokussiertes Schallbündel mit einem Durchmesser von 2,5 mm in Tiefen von 5 mm bis 139 mm erzeugen.

In dem Beitrag von Berlinger et al [3] werden u.a. 2D Arrays mit einer Frequenz von 1,5 MHz vorgestellt. Die Prüfköpfe sind mit austauschbaren Rexolit-Vorsatzkeilen ausgestattet, um eine Anpassung an unterschiedliche Oberflächenkrümmungen zu realisieren, die beim Nachweis von Umfangsfehlern und axial gerichteten Fehlern in Rohrmischnähten erforderlich ist. Diese Prüfköpfe können an ein verfügbares Ultraschallgerät angeschlossen werden, das bis zu 256 Anschlusskanäle und eine 16bit tiefe Auflösung der Signalamplituden aufweist.

Für die Berücksichtigung der kubischen Anisotropie in Einkristall-Turbinenschaufeln ist ein 2 D Array in Verbindung mit der Total Focussing Method (TFM) und für eine größere Schwenkwinkelvariation der Transversalwelle für eine verbesserte Schweißnahtprüfung ist bereits ein 2,25 MHz SE-Matrixarray mit 2x (9x5) Schwingerelementen eingesetzt worden [4-6].

Eine Ultraschall Untersuchungsmethode für die Überprüfung der Haftung zwischen zwei Metallblechen wird in dem Beitrag von Maev et al [7] beschrieben. Es wird hierbei ein 15 MHz Matrix Array mit 52 Elementen eingesetzt. Die benutzten Probekörper sind zwei Bleche aus dem Automobilbau mit Dicken zwischen 0,7 und 2 mm, die mit einer Klebeschicht von 0,1 bis 1 mm Dicke verbunden sind.

Weitere Beiträge befassen sich mit der Charakterisierung rissartiger Fehler [8] mit der Analyse von impactgeschädigten CFK-Platten [9,10], mit dem Einsatz der Matrixarrays für

die Vorbereitung der Prüftechnik für die Riss- und Korrosionskontrolle von Rohren [11,12] und mit der Integritätsanalyse von dünnen Lötsschichten [13].

Für die Pipelineprüfung kann mit den Matrixarrays auch eine 3D-Schallfeldsteuerung durchgeführt werden, was in dem Betrag von Schenk et al. beschrieben wird [14]. Die hohe Flexibilität in der Schallbündelsteuerung eines 2D Arrays wird auch in dem Beitrag von Menges et al. [15] beschrieben.

Die Verteilung der Verzögerungszeiten für die Ansteuerung der 121 Schwingerelemente wird hier von den Autoren so gestaltet, dass ein axialkonisches Schallbündel entsteht.

In dem vorliegenden Beitrag wird eine Ultraschall-Prüftechnik vorgestellt, die die Verwendung von Matrixarrays in Impuls-Echo und in SE-Technik an einigen Anwendungsbeispielen wiedergibt. Die Prüftechnik mit den Matrixarrays nutzt hierbei die Fokusfeldtechnik, bei der die Schwingerelemente durch Schwenken des Schallbündels ein Fokuspunktfeld in der Größe von ca. 10 mm x 10 mm erzeugen. Das Matrixarray wird dann um eine Einschallposition weiter geschoben und es wird wieder ein Fokuspunktfeld erzeugt, das sich zum Teil mit dem ersten überlagert. Diese Vorgehensweise wird systematisch mäanderförmig weiter fortgeführt.

Die gemessenen digitalen Echoamplituden werden dann laufzeitbezogen in zuvor bestimmte Voxelelemente abgelegt. Überlagernde Echoamplitudenwerte werden einer Mittelung unterworfen und die flächenhafte Verteilung der resultierenden Werte der Echoamplituden werden dann in einer farbkodierten Darstellung wiedergegeben.

### **3. Messaufbau**

Es wurden Probekörper aus Stahl, CFK und eine Glasklebeverbindung untersucht. Für die Auswertung der Messergebnisse sind Schnittbilder des Prüfkörpervolumens in allen drei Raumrichtungen erstellt worden, also in der x-y und x-z-Ebene (C- und B-Bild) sowie in der y-z-Ebene. Somit wird eine quantitative ortstgetreue Wiedergabe der eingebrachten Fehler ermöglicht.

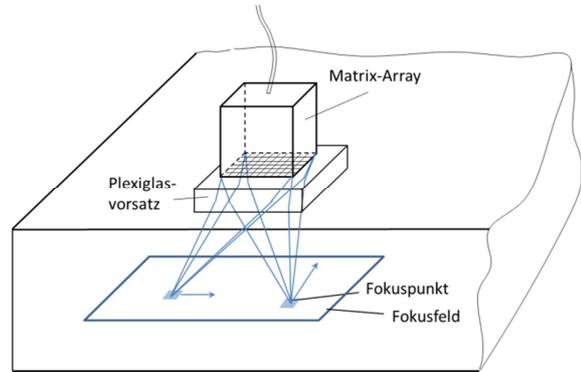
Die verwendeten Matrixarrays wurden in Kontakttechnik mäanderförmig und automatisiert über die Testkörper geführt. Der dazu realisierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 1(a) dargestellt. Mit dem Compas-XL 256 Kanalgerät können Matrixarrays mit bis zu 256 Elementen in Impuls-Echo oder SE-Betrieb angesteuert werden.

In Abbildung 1(b) ist das Prinzip der Fokusfeld Methode beschrieben. Bei der Impuls-Echo-Technik wird in der gewünschten Tiefe ein Fokusfeld erzeugt in dem die einzelnen Elemente des Arrays mit den entsprechenden Verzögerungszeiten belegt werden.

Das gleiche Prinzip gilt auch für die Fokusfeldmethode in SE-Technik nur, dass bei dieser Methode ein Teil des Arrays als Sender und ein anderer Teil des Arrays als Empfänger angesteuert werden.



a)



b)

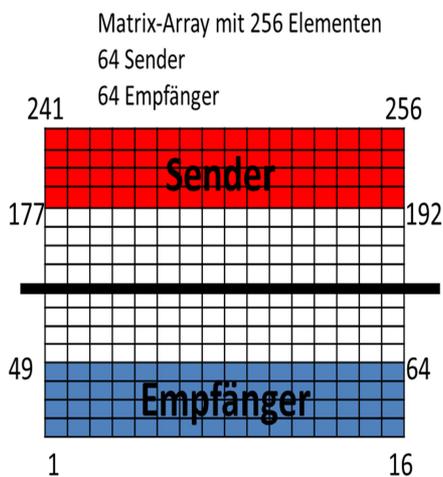
**Abbildung 1:** Compas-XL 256 Phased-Array-Gerät (a), Fokusfeldmethode im Impuls-Echo-Betrieb (b)

In Abbildung 2 (a) ist das Prinzip der Fokusfeldmethode in SE-Technik an einem 256 Elemente Matrixarray näher beschrieben. Von den 256 Elementen werden die Elemente 1-64 als Sender und die Elemente 177-256 als Empfänger geschaltet.

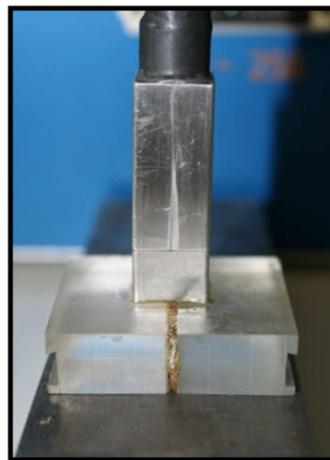
Wie auch bei einem konventionellen SE-Prüfkopf müssen Sender und Empfänger akustisch voneinander getrennt sein (Abbildung 2b).

Die wesentlichen Vorteile bei der Fokusfeldmethode gegenüber der konventionellen Prüftechnik sind folgende:

- Der Überschneidungsbereich der beiden Schallbündel (Fokustiefe) kann mit der SE-Technik mit Matrixarrays elektronisch gesteuert werden. Pro Messposition können z.B. auch mehrere Fokusfelder in verschiedenen Tiefen erzeugt werden.
- Gleichzeitiges Messen in Impuls-Echo-Technik ist durch einfaches elektronisches umschalten möglich.



a)



b)

**Abbildung 2:** 256 Elemente Matrix-Array aufgeteilt in Sender und Empfänger (a), Matrixarray auf akustisch getrenntem Vorlaufkeil

#### 4. Messergebnisse Matrixarrays in Impuls-Echo-Technik

In Abbildung 3 (b) ist das Messergebnis einer CFK-Impact-Probe dargestellt. Wie in Abbildung 3 (a) zu sehen wurde dieser Impact mit einem Fallturm künstlich erzeugt. Auffällig ist der trichterförmige Schadensverlauf in die CFK-Probe hinein. Dieser schon oft in Micro-CT-Bildern gezeigte Effekt ist nicht unbekannt.

Mit konventionellen Ultraschalltechniken könne Impactschädigungen dieser Art zwar detektiert werden, jedoch bleibt die Größe des Schadensverlaufes in die Materialtiefe hinein oft ungewiss. Mit den Matrixarrays in Impuls-Echo-Technik und der Fokussfeldmethode war es möglich den Schadensverlauf näher zu analysieren.

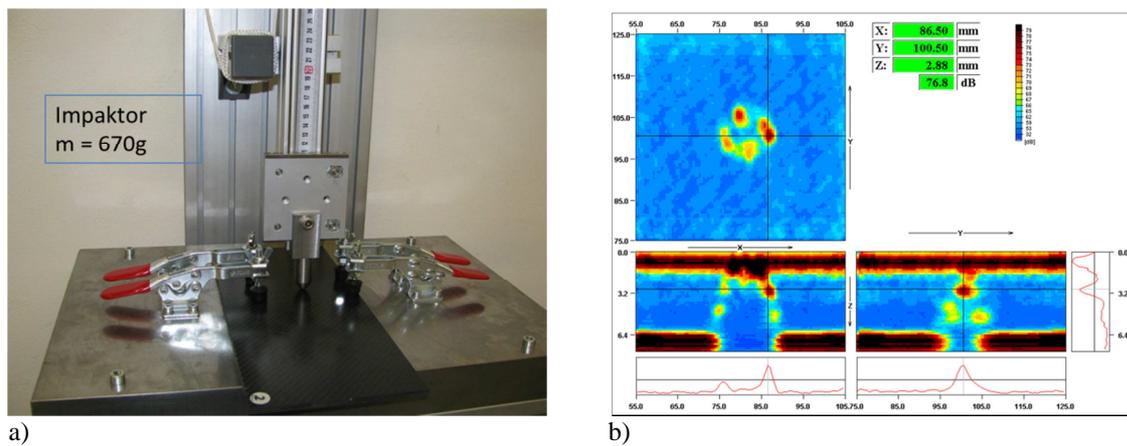


Abbildung 3: Fallturm zum Erzeugen von Impactschäden (a), Ultraschallergebnis mit Matrixarray (b)

Kleberverbindungen im modernen Hochbau können helfen, innovative ästhetische Bedürfnisse im Fassadenbau umzusetzen, technologische Verbesserungen zu erreichen, aber auch die Wechselwirkung von Gebäuden mit der Umwelt unter energetischen Aspekten zu optimieren. Aufgrund der hohen sicherheitstechnischen Bedeutung gibt es hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit und die Gütesicherheit.

In Abbildung 4 (b) ist eine Probe einer Glasklebeverbindung mit künstlich eingebrachten und natürlichen Fehlern abgebildet. Mit dem Matrixarray und der vorgestellten Fokussfeldmethode in Impuls-Echo-Technik (Abbildung 4 a) konnten auch hier die Fehlstellen in der Klebeverbindung detektiert werden (Abbildung 5a, 5b)

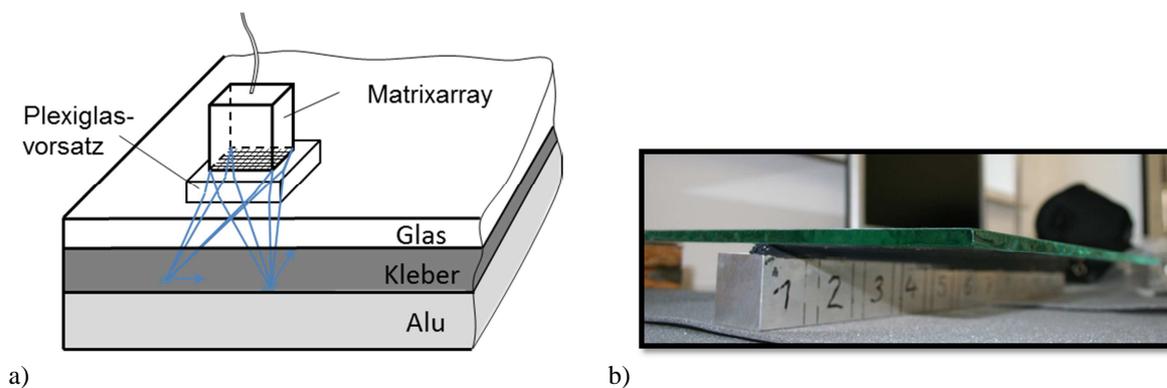
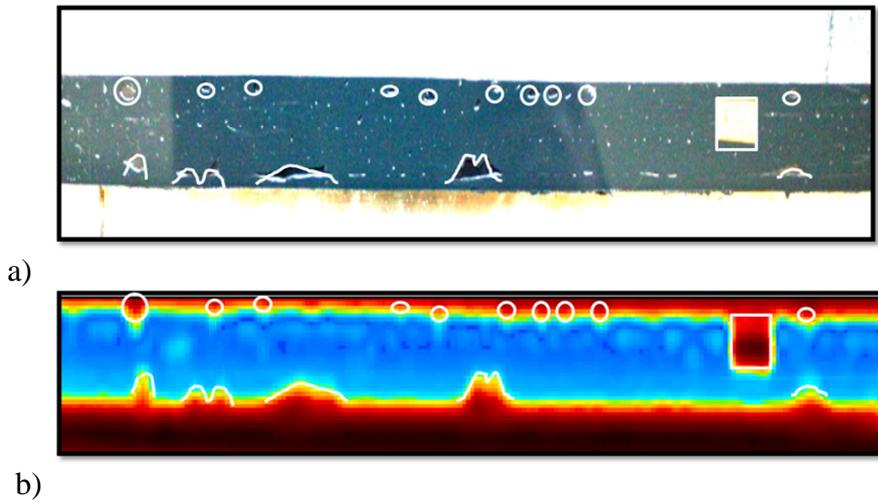


Abbildung 4: Matrixarray auf Glasklebeverbindung, Fokussfeld in Kleberebene (a), Foto Klebeprobe (b)



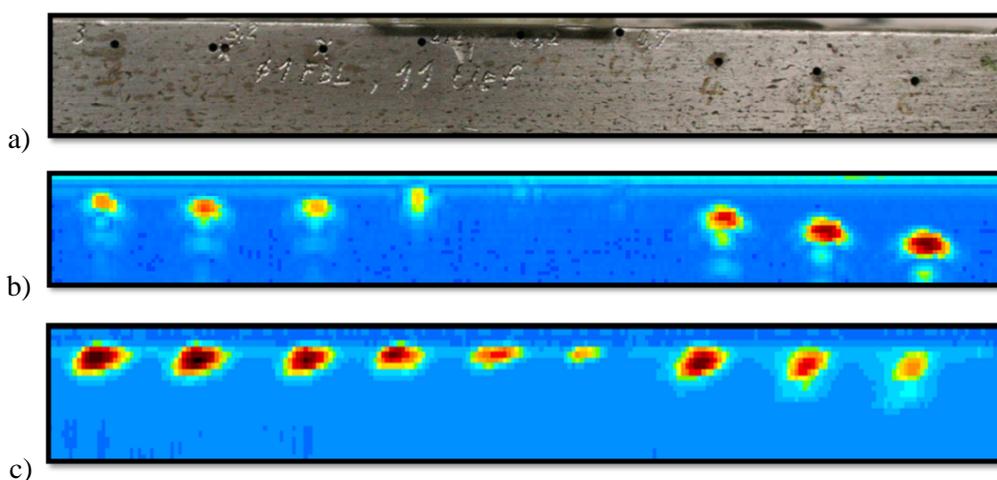
**Abbildung 5:** Foto Fehlstellen in der Glasklebeverbindung (a), Ultraschallergebnis Matrixarray in Impuls-Echo-Technik

## 5. Messergebnisse Matrixarrays in SE-Technik

Um sehr dicht unter der Bauteiloberfläche prüfen zu können kommt es oft zum Einsatz der Sende-Empfangs-Technik. Konventionelle SE-Prüfköpfe sind so konstruiert, dass sich ihre Schallbündel in einer festgelegten Tiefe überschneiden. Außerhalb dieses Überschneidungsbereiches nimmt die Empfindlichkeit ab.

Beim Einsatz der Matrixarray SE-Technik kann das Fokusfeld, durch elektronisches anpassen der Verzögerungszeitbelegung der Einzelelemente, in der gewünschten Materialtiefe erzeugt werden.

In Abbildung 6 ist das Ergebnis einer Untersuchung an einem Stahltestkörper mit kleinen Querbohrungen ( $\varnothing=0,8\text{mm}$ ) dicht unter der Oberfläche (0,3 mm) dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Reflektoren dicht unter der Oberfläche (0,3 und 0,8mm) mit der konventionellen SE-Technik (b) nicht detektiert werden konnten.



**Abbildung 6:** Foto Stahltestkörper mit Querbohrungen  $\varnothing 0,8\text{mm}$  (a), Ultraschall B-Bild konventioneller SE-Prüfkopf (b), Ultraschall B-Bild Matrixarray in SE-Technik (c)

In Abbildung 8 ist das Ergebnis der Ultraschallmessung am CFK-Testkörper dargestellt. Durchgeführt wurden die Messungen mit Matrixarrays in Impuls-Echo und in SE-Technik.

In dem in Abbildung 7 dargestellten 6 mm dicken CFK-Testkörper wurden Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von 1 mm, 2 mm und 3 mm in verschiedenen Tiefen eingebracht.

Der Vergleich Matrixarray in Impuls-Echo-Technik (a) und Matrixarray in SE-Technik (b) zeigt, dass die störenden Anzeigen, verursacht durch das Eintrittsecho, mit der Matrixarray SE-Technik minimiert werden konnten. Bei der Matrixarray Impuls-Echo-Technik und auch bei der Matrixarray SE-Technik konnten alle Testreflektoren im CFK-Probekörper detektiert werden.

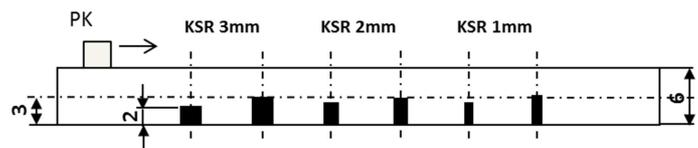


Abbildung 7: Skizze CFK-Testkörper mit Flachbodenbohrungen

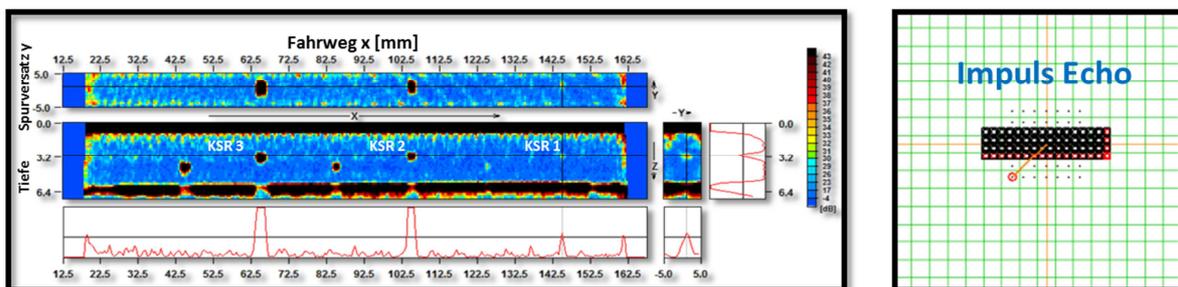


Abbildung 8: C-B-Bild, Matrixarray in Impuls-Echo-Technik und Fokusfeldmethode

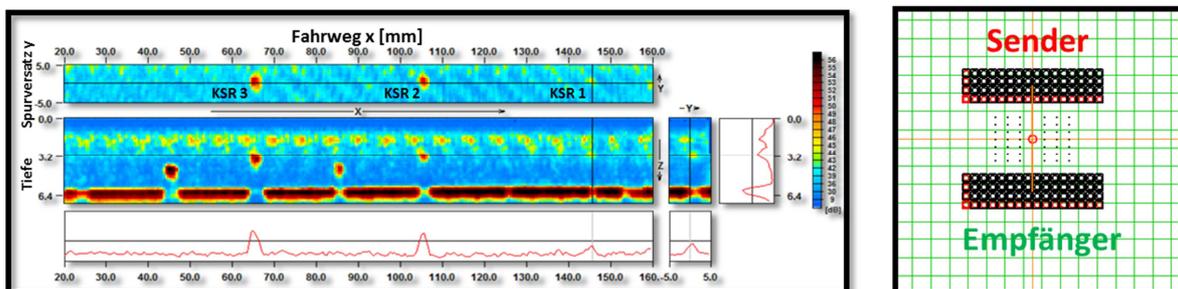


Abbildung 9: C-B-Bild, Matrixarray in SE-Technik und Fokusfeldmethode

## Referenzen

[1] 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

- [2] Development of innovative transducer designs for NDT applications : From 1-3 piezocomposite definition to 2D array probe manufacture; S. Michau; 18<sup>th</sup> WCNDT, 16-20 April 2012, Durban, South Africa
- [3] Improved Solution for Encoded Phased Array UT Examination of Dissimilar Metal Piping Welds; J. Berlinger, D. Marois, L. B. Charbonneau, G. Maes; 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 22-24, 2012 - Seattle, Washington, USA
- [4] Inspection of Single Crystal Aerospace Components with Ultrasonic Arrays; C.J.L. Lane, A. Dunhill, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox; Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 1211(2009) S. 2060-2067
- [5] 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
- [6] On the Use of Advanced UT Phased Array Methodology and Equipment; G. Maes, D. Richard; 17th World Conf. on Nondestructive Testing, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China
- [7] Evaluation of adhesively bonded joints in automotive industry with ultrasonic matrix array transducer; R.Gr. Maev, S. Titov, A. Bogachenkov, B.Ghaffari, K. Lazarz; 5th Pan American Conference for NDT, 2-6 October 2011, Cancun, Mexico
- [8] The Use of Ultrasonic Arrays to Characterize Crack-Like Defects; J. Zhang, B.W.Drinkwater, P.D. Wilcox; Journal of Nondestructive Evaluation 29(2010) pp.222-232
- [9] Matrixarrays zur bildgebenden Ultraschallprüfung am Beispiel 6 mm dicker CFK-Platten; R. Boehm, D. Brackrock, H.-J. Montag, G. Brekow; ; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, 2012, DGZfP-Berichtsband \* Band BB 136-CD (2012)
- [10] Matrix Phased Arrays for the Inspection of CFRP-Components; M. Kreuzbruck, D. Brackrock, G. Brekow, H.-J. Montag, R. Boehm, B. Illerhaus;
- [11] Schallfeldsteuerung mit Matrixarrays – Vergleichsmessungen an Rohrtestkörpern; G.Schenk, D. Brackrock, R. Boehm, O.A. Barbian, H. Willems; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, 2012, DGZfP-Berichtsband \* Band BB 136-CD (2012)
- [12] Application of 2D Arrays for Ultrasonic Tube Inspection; A. Noel, B. Bisiaux, N. Nourrit, S. Nitsche; 10<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, RU, 7-11 June, 2010, The Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics, Band 10(2010) pp 1-7
- [13 ] Ultraschallprüfung mit Matrixarrays zur schnellen Fehlerdetektion von Kupferlötsschichten; J. Kitze, G. Brekow, H.-J. Montag, R. Boehm, D. Brackrock, M. Kreuzbruck; DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, 2012
- [14] 3D-Schallfeldsteuerung mit Matrixarrays für die Pipelineprüfung; G. Schenk; D. Brackrock, R. Boehm, H. Willems; MP Materials Testing, Band 55 (2013) Heft 5, Seite 379-385
- [15] Forming non-diffracting beams using a 2D matrix phased array probe; J. Menges, J. Bamberg; QNDE 2012, 39<sup>th</sup> Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Denver, Co, US, 15-20 July, 2012, AIP Conference Proceedings, Band 1511(2012) Heft 32A, Seite 872- 878