

Varianten zur Bilderzeugung aus Phased Array Messdaten – Praktische Beispiele an Kupfer, CFK und anderen Materialien

Rainer BOEHM *, Daniel BRACKROCK *, Gerhard BREKOW *, Jessica KITZE *,
Marc KREUTZBRUCK *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung

Die Rekonstruktionsverfahren wie die Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) oder die Ultraschallechotomographie (ET) nutzen eine synthetische Apertur, die dadurch entsteht, dass Echosignale von räumlich auseinanderliegenden Messpunkten überlagert werden. Dazu braucht es Sensoren mit möglichst großem Öffnungswinkel. Ein einzelner Schwinger müsste dazu vergleichsweise klein sein mit dem Nachteil sehr geringer Empfindlichkeit. Ein Phased Array (PA) realisiert den gesamten Öffnungswinkel in der Art eines Sektorscans im Schwenkwinkelbereich des Prüfkopfes und hat eine mit üblichen Prüfköpfen vergleichbare Empfindlichkeit.

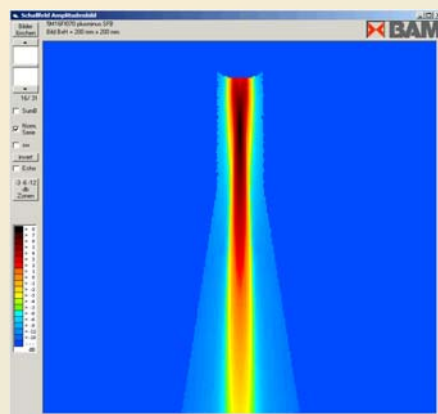
An jedem Messpunkt wird das Schallbündel in Schritten, die nicht größer sind als der Öffnungswinkel des ganzen Arrays, schrittweise durch den ganzen Winkelbereich geschwenkt. Die sich daraus ergebene zusätzliche Richtungsinformation verbessert die erreichte Auflösung vor allem bei einer geringen Anzahl von Messpunkten bzw. bei größeren Messpunktabständen.

Bei der SAFT-Rekonstruktion werden HF-Signale überlagert. Für die Echotomographie wird im Prinzip der gleiche Algorithmus verwendet, jedoch unter Verwendung der gleichgerichteten Signale. Das erste Beispiel zeigt SAFT-Bilder von Testreflektoren in dickwandigen elektronenstrahlgeschweißten Kupferbehältern zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall. Die Echohöhe einer im Schweißnahtbereich liegenden Querbohrung (QB) mit 0.4 mm Durchmesser ist vergleichbar mit den speckleartigen Signalen aus dem Schweißnahtgefüge, wobei die QB im A- und TD-Bild nicht auffindbar ist, wohl aber im SAFT-Bild.

Im zweiten Beispiel wird eine spezielle Variante der ET zur Prüfung von CFK-Platten verwendet, die wir Fokusfeldmethode nennen. Der zweidimensionale Scan mit dem Matrixarray wird dabei an jedem Messpunkt so aufgeführt, dass in einer Ebene in definierter Tiefe ein Feld von Fokuspunkten in Schachbrettform entsteht. Die Überlagerung der Signale aus einer synthetischen Apertur führt zu einer relativen Absenkung der Anzeigen aus der Struktur des Materials gegenüber den Anzeigen von Defekten.

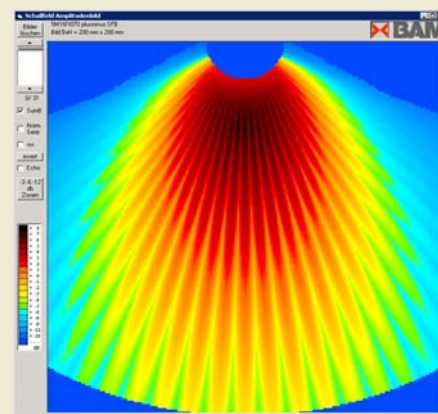
Varianten zur Bilderzeugung aus Phased Array Messdaten Praktische Beispiele an Kupfer und CFK und anderen Materialien

- Klassische Phased Array Technik für die Bildgebung
 - PA-SAFT, Prinzip, Besonderheiten, Ortsfrequenzfilterung
- SAFT und Echotomographie, ein Vergleich
 - Der Unterschied, Prinzip der „Fokussierung“, Auflösung
 - Empfindlichkeit auf Fehler der Schalllaufzeit
- Beispiele
 - SAFT an Kupfer Fehlernachweis und -größenbestimmung, Beispiele
 - Neue Form der Echotomographie an CFK



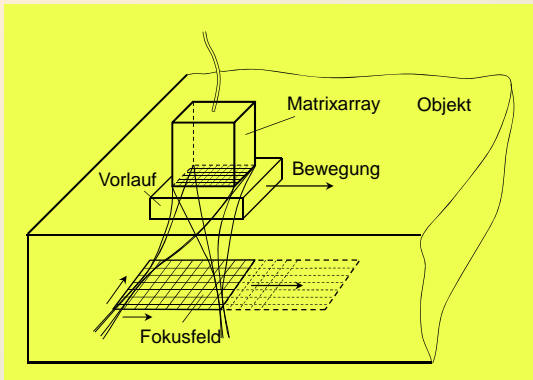
Gruppenstrahlerprüfkopf

„normale“ Divergenz und Empfindlichkeit und
Richtungsinformation
Winkelbereich durch Schwenken des SB



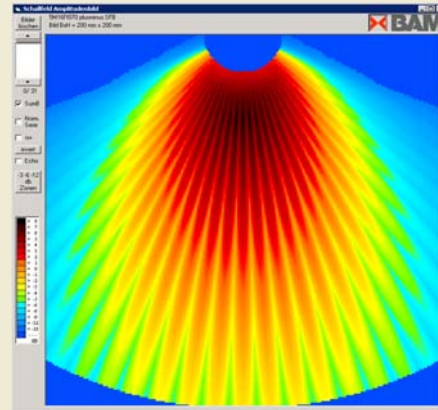
Gruppenstrahlerprüfkopf

Schwenkwinkelbereich ist vergleichbar
mit der Divergenz des Einzelements



Matrixarray

„normale“ Divergenz und Empfindlichkeit
Richtungsinformation
Winkelbereich durch Schwenken des SB

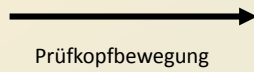


Gruppenstrahlerprüfkopf

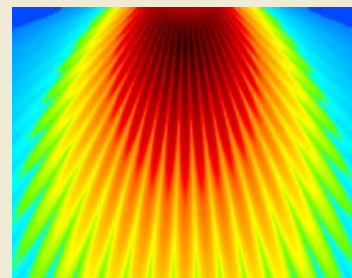
Schwenkwinkelbereich ist vergleichbar
mit der Divergenz des Einzelements

Gruppenstrahlerprüfkopf

an jedem Messpunkt wird das
Schallbündel geschwenkt



Prüfkopfbewegung



modellierte zusammengesetzte Reflektorfläche, Kreise markieren den Ort einzelner Teile

T SAFT SUB

Prüf-Plan: Label1 Bild BxH = 35 x 15 y bis 20 y 42 bis 60 Anzahl x 490 y 262 BBl (1) 5 4 x 2 y Maxwert Berechnung

- Rtg

GRST Ampl
Ausgleich
 Keiner
 Abschl
 Minimal
 beides

V 1.0
M 0

+-
 sw

invert

Netz

Datati laden

$A(s, \alpha) = \text{Amplituden korrekturfunktion (Schallweg, Einschallwinkel)}$

Rekonstruktion der Reflektoroberfläche aus simulierten Echodaten

Fachbereich 8.4 Akustische und elektromagnetische Verfahren Phased Array SAFT 5

Durchmesser 300 mm

$\varphi = \text{Prüfkopfposition}$
 $\gamma = \text{Öffnungswinkel}$

$\varphi = 25^\circ, \gamma = 6^\circ, \text{Bildgröße } 20 \times 20 \text{ mm}^2$

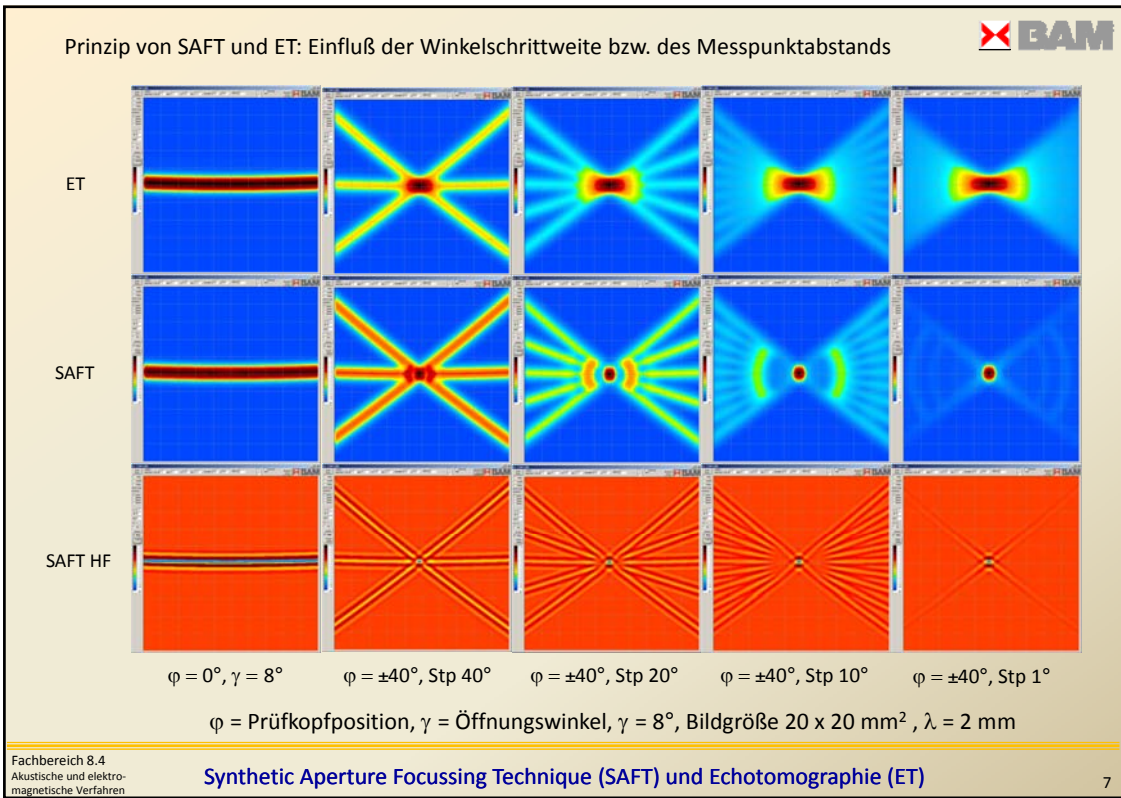
Prinzip von SAFT und ET

1. Antwort auf die Frage: Aus welchem Teil des Bildes kann bei gegebener Prüfkopfposition und gegebenem Öffnungswinkel das Echosignal kommen?
2. Eintragen der Echosignale entsprechend ihrer berechneten Laufzeit in die Bildpunkte
3. Überlagerung (Summation) der Echosignale aus anderen Prüfkopfpositionen

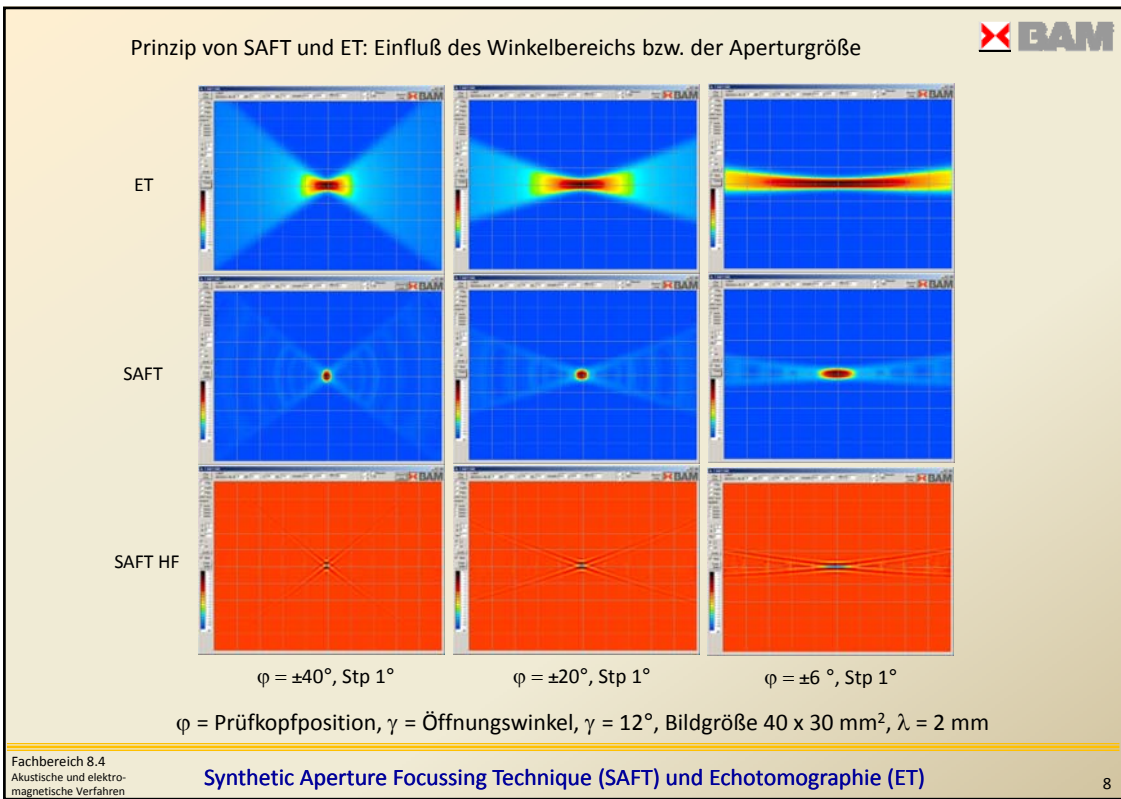
Bei SAFT werden die HF-Signale überlagert und idealerweise kommt es an Echofreien Stellen zur Auslöschung.

Überlagert man die gleichgerichteten Signale, dann wächst zwar die Summe an allen Bildpunkten, jedoch stärker an den Stellen der Echoquellen. Dieses Verfahren ist als Ultraschallechotomographie bekannt.

Fachbereich 8.4 Akustische und elektromagnetische Verfahren Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) und Echotomographie (ET) 6

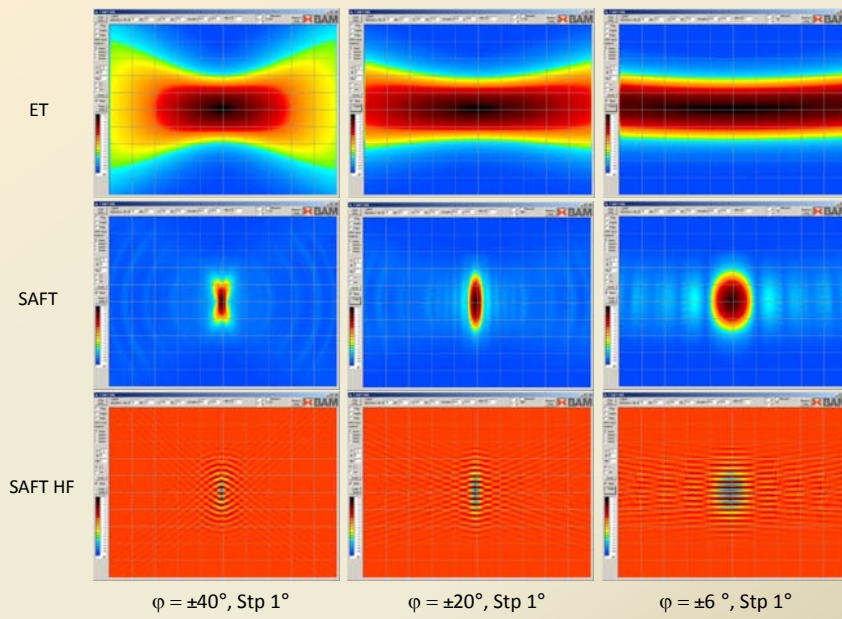


7



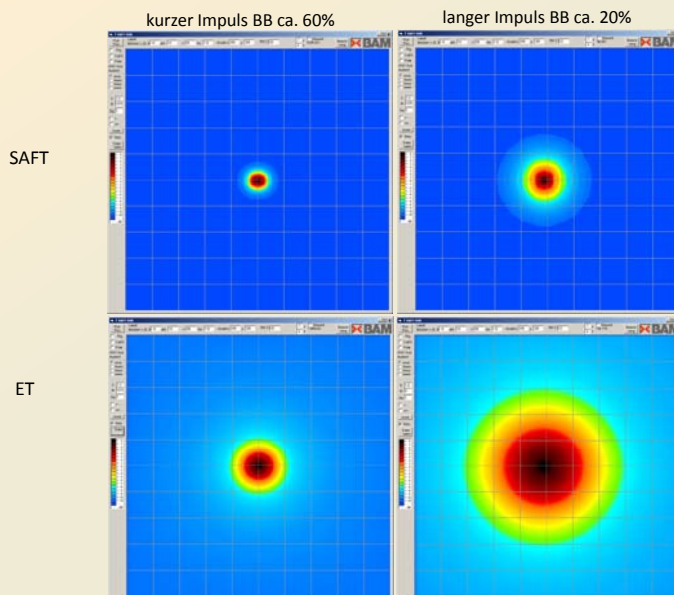
8

Prinzip von SAFT und ET: Einfluß der Aperturgröße, langer Impuls (20 Perioden)

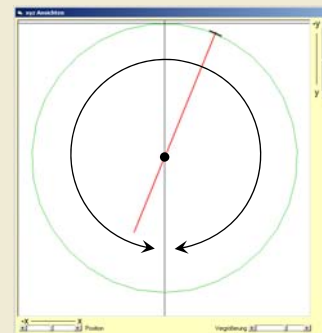


$\varphi = \pm 40^\circ, \text{Stp } 1^\circ$ $\varphi = \pm 20^\circ, \text{Stp } 1^\circ$ $\varphi = \pm 6^\circ, \text{Stp } 1^\circ$
 $\varphi = \text{Prüfkopfposition}, \gamma = \text{Öffnungswinkel}, \gamma = 12^\circ, \text{Bildgröße } 40 \times 30 \text{ mm}^2, \lambda = 2 \text{ mm}$

Bildgröße eines Punktreflectors bei unterschiedlicher Impulslänge



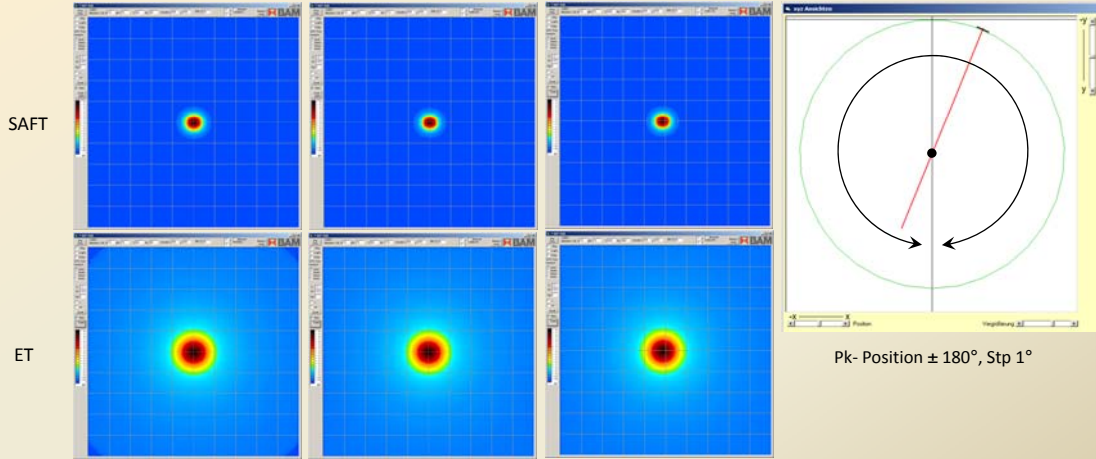
Bildgröße $20 \times 20 \text{ mm}^2, \lambda = 2 \text{ mm}$



Pk- Position $\pm 180^\circ, \text{Stp } 1^\circ$
 Abstand = Radius = 100 mm

Bildgröße eines Punktreflectors bei unterschiedlichem Abstand

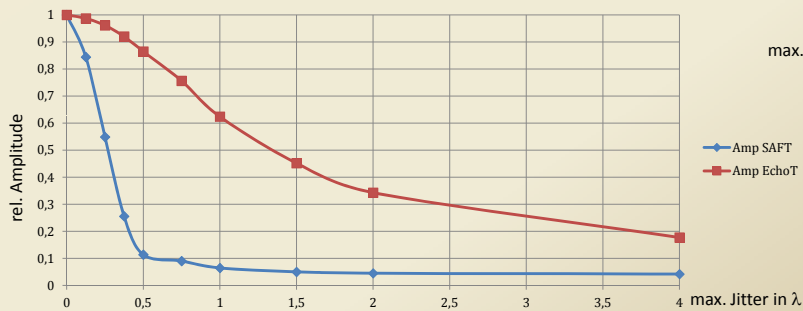
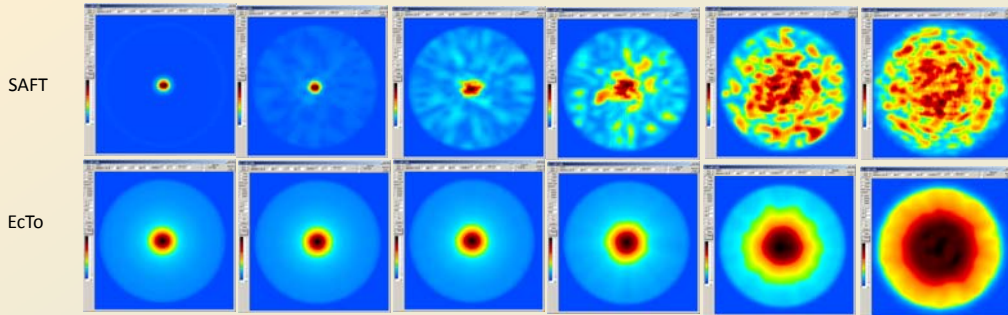
Abstand = Radius = 50 mm Abstand = Radius = 100 mm Abstand = Radius = 450 mm

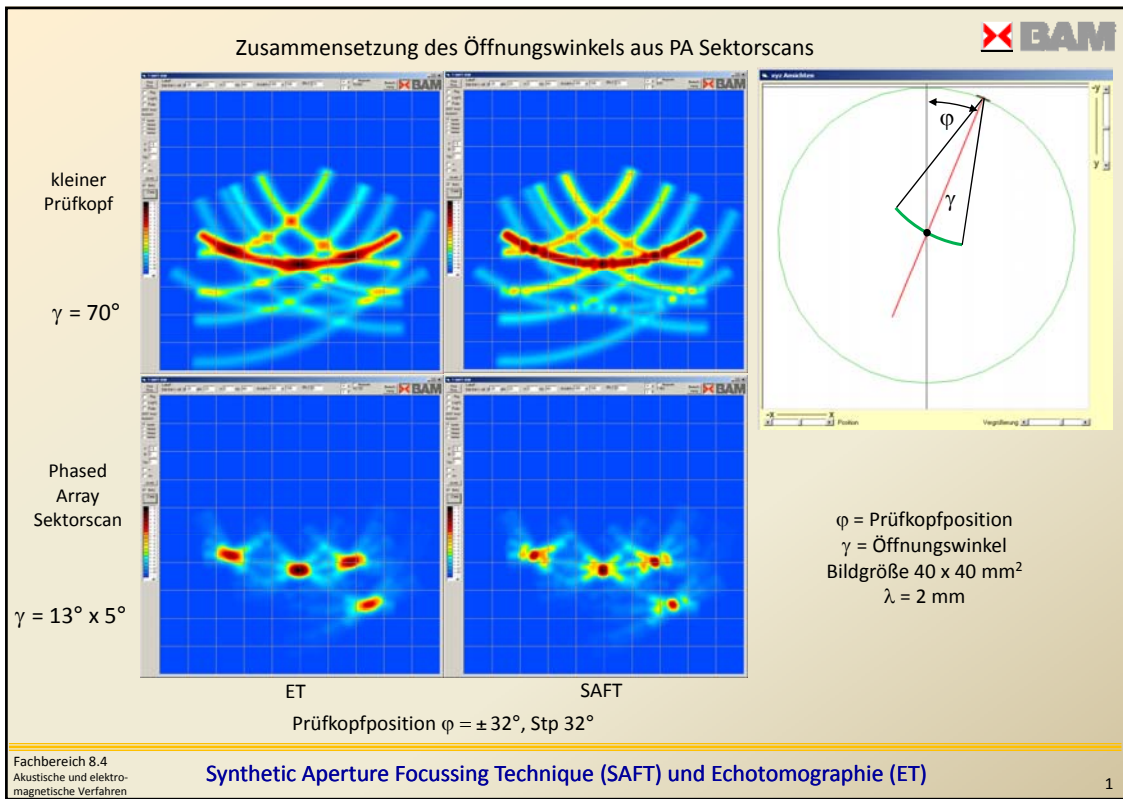
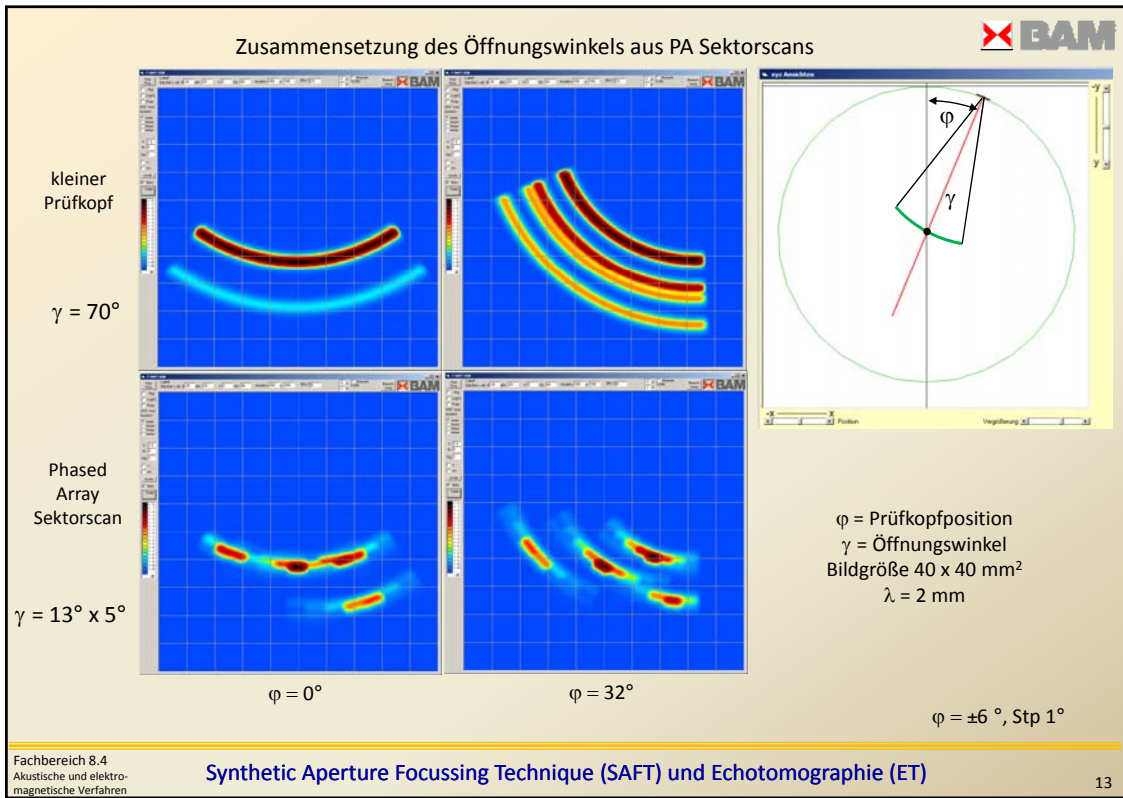


Bildgröße $20 \times 20 \text{ mm}^2$, $\lambda = 2 \text{ mm}$

Bild eines Punktreflectors

ohne Jitter Jitter max. $1/4 \lambda$ Jitter max. $1/2 \lambda$ Jitter max. 1λ Jitter max. 2λ Jitter max. 4λ





BAM
POSIVA

Schweißnahtbereich

Scan in Umfangsrichtung, Lineararray 128 El. der Bauteilkrümmung angepasst, 3.5 MHz, pitch 1 mm, Schwenk bis $\pm 40^\circ$, $c = 4700$ m/s

Deckel Zylinder Spurversatz

Fachbereich 8.4
Akustische und elektromagnetische Verfahren

Behälter und Testkörper

1

BAM
POSIVA

A ↓ Querbohrungen Fahrt in Umfangsrichtung B ↓

Deckel Zylinder Spurversatz

Linear Array
 -40° $+40^\circ$

Fahrweg (Bogenmaß) 480 – 820 mm

Spurhöhe 10 – 60 mm, Radius 455 – 525 mm

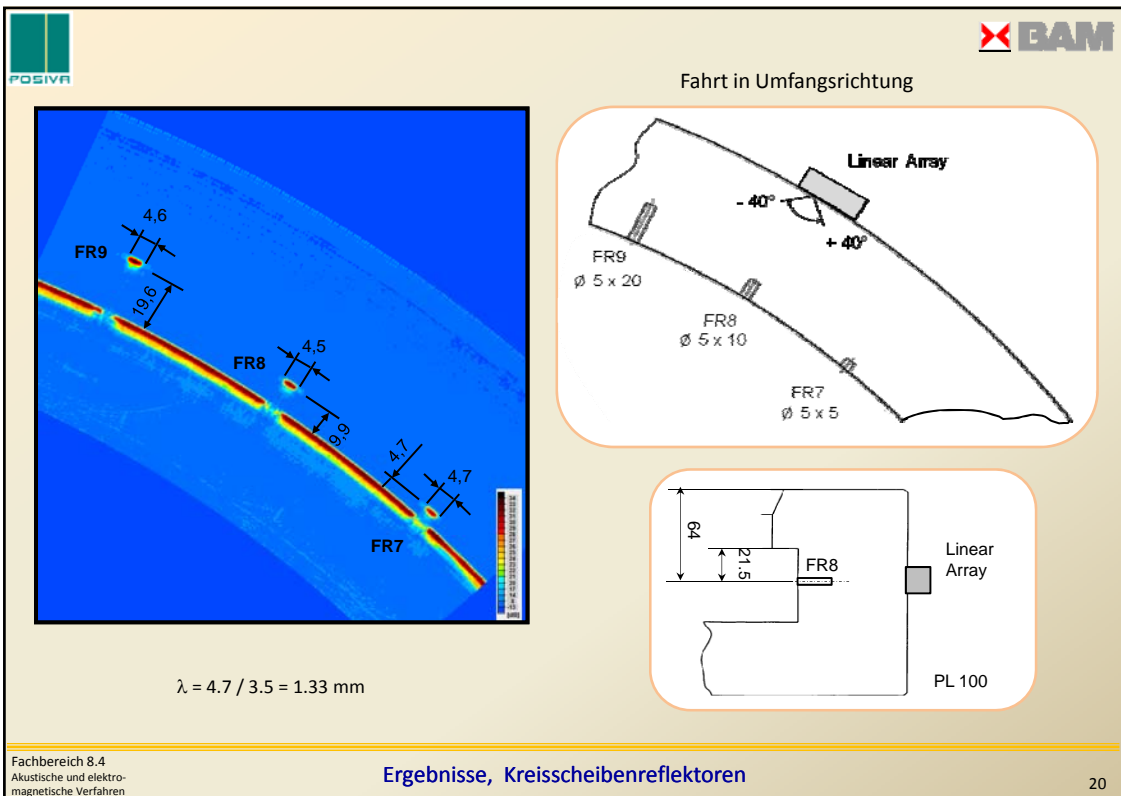
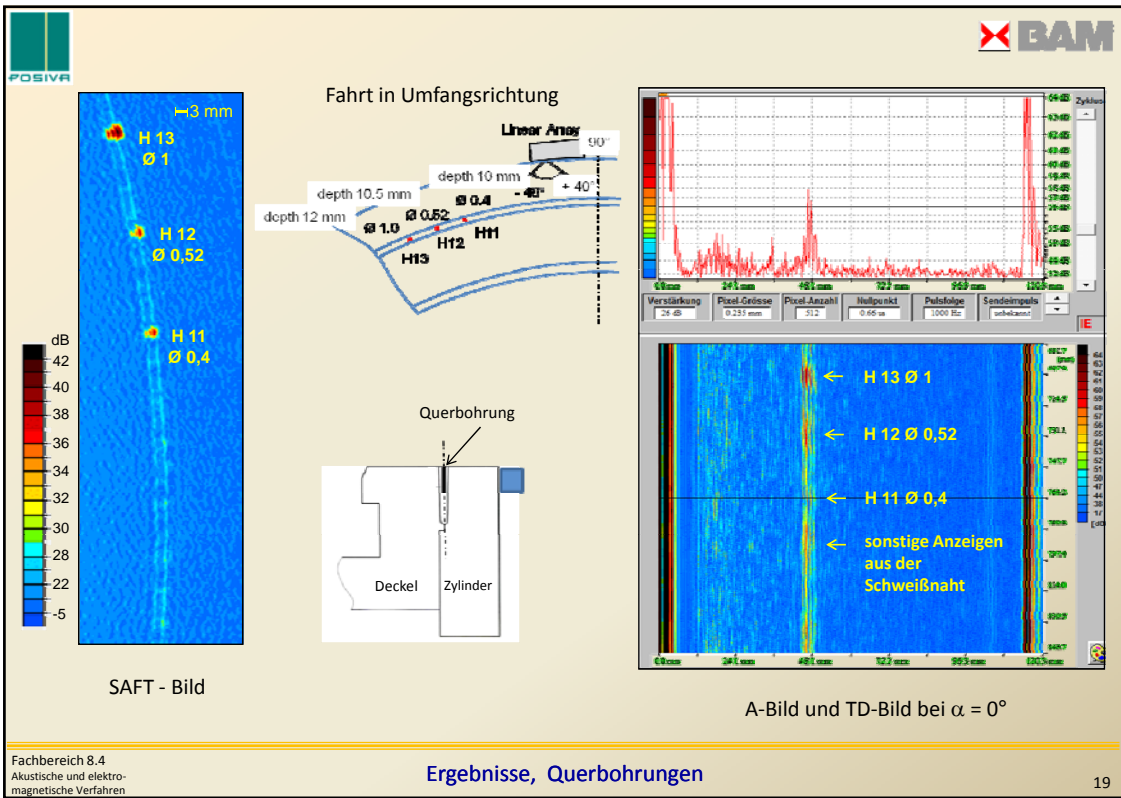
SAFT - Bild: Abwicklung, Position $52^\circ - 90^\circ$

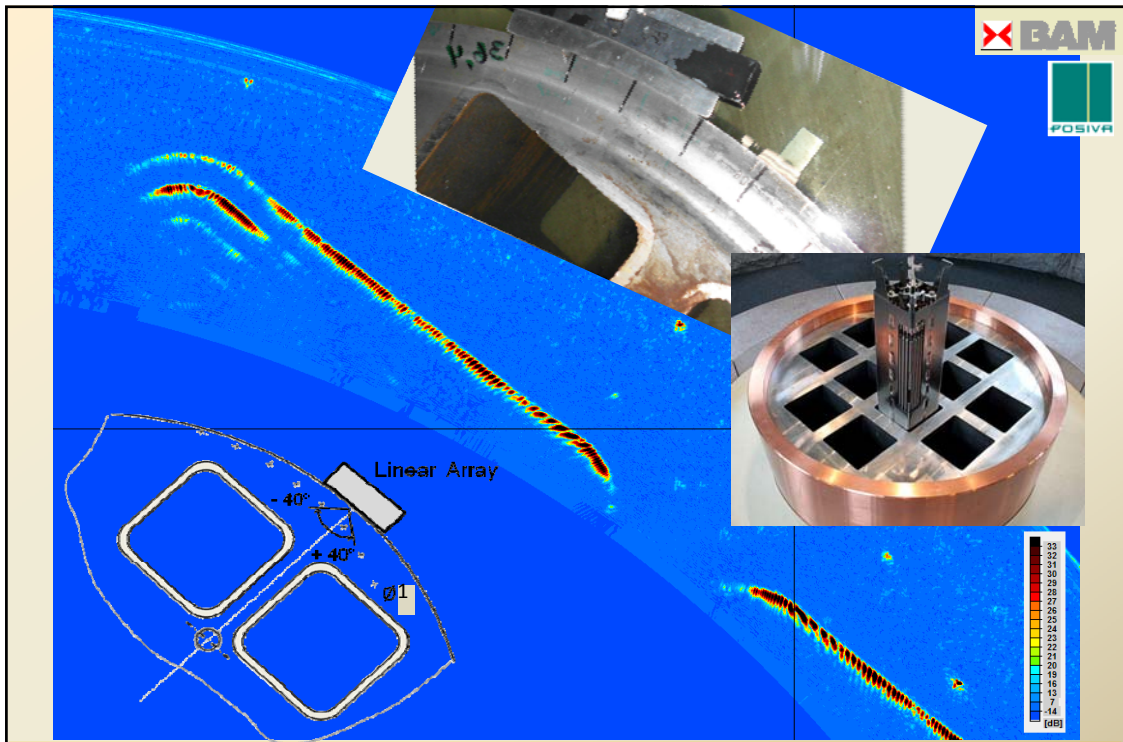
Fahrweg [°]

Fachbereich 8.4
Akustische und elektromagnetische Verfahren

Ergebnisse, Querbohrungen

18





Fachbereich 8.4
Akustische und elektro-
magnetische Verfahren

Ergebnisse, Einsatz aus Stahlguß mit QB – Reihe d = 1 mm

21

BAM

Matrixarray auf CFK - Platte, Manipulator und COMPAS-XL Phased Array Gerät

Matrixarray 10 x 6 El., (1.2 + .1) * (1.2 + .1) mm²,
2.25 MHz, $\lambda = 1.34$ mm bei 3000 m/s

Scanbewegung des Arrays

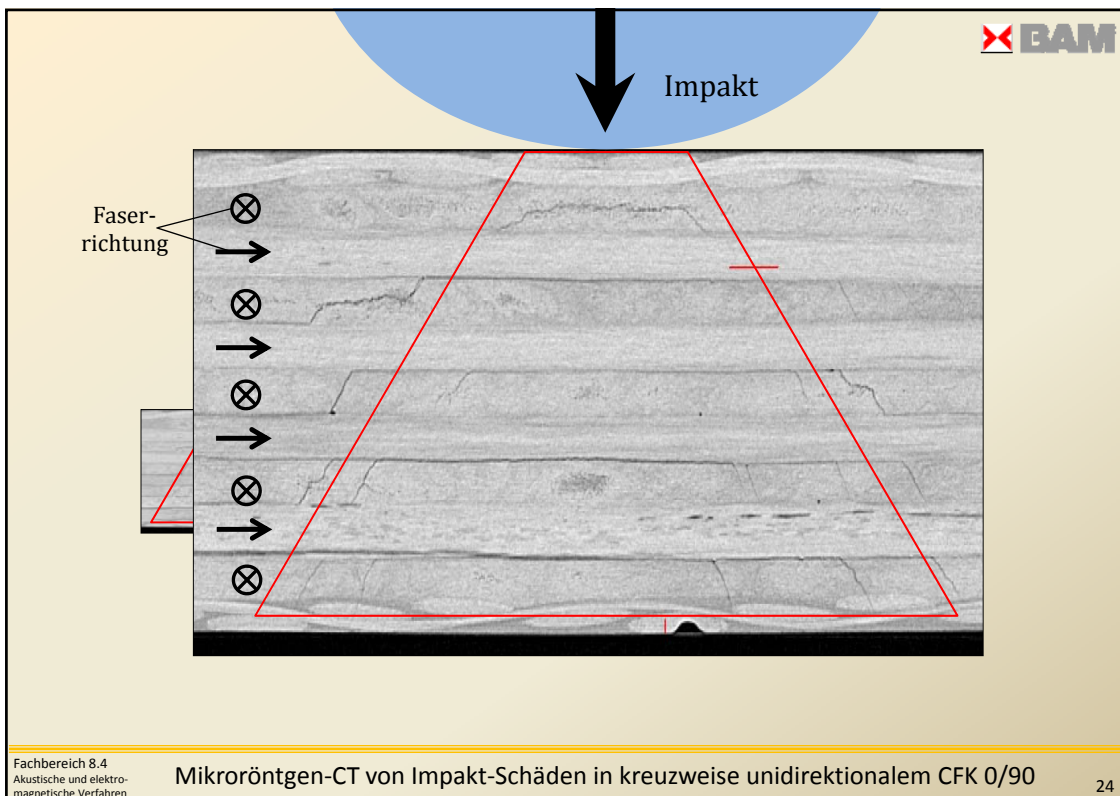
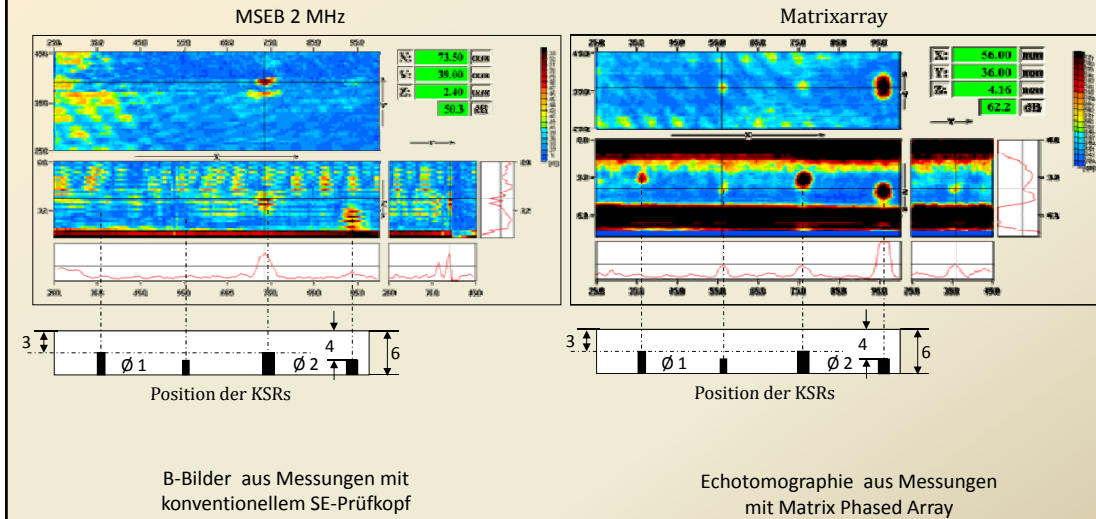
Ablauf:
Berechnung der Arraysteuerung(Prüfbereich, Einschallwinkelbereich, Anisotropie, ..),
Scannen des Prüfbereichs , Berechnung der Volumendaten, Bilddarstellung in Schnitten oder im Volumen

Fachbereich 8.4
Akustische und elektro-
magnetische Verfahren

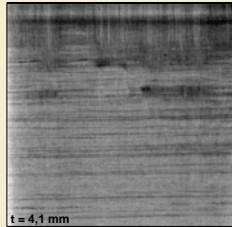
Messungen mit Matrix Phased Array an CFK

2

CFK 0 / 90 mit Kreisscheibenreflektoren

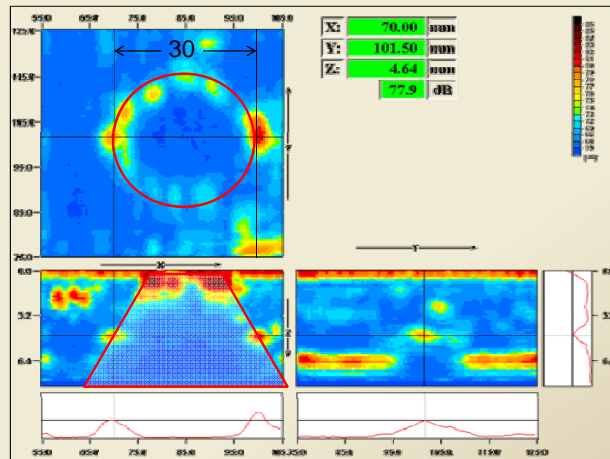


CT in verschiedenen Tiefen
Schichtdicke ca. 25µm



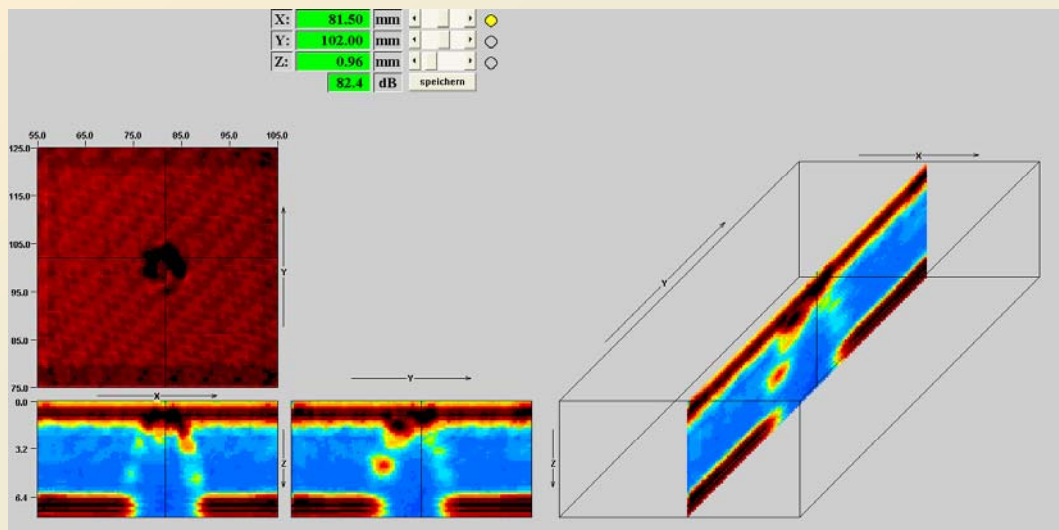
CT Seitenansicht

Mikro-CT, Illerhaus, BAM 8.5



UT in 4.7 mm Tiefe, Schichtdicke im C - Bild 0.2 mm

Ultraschallechotomographie in verschiedenen Tiefen

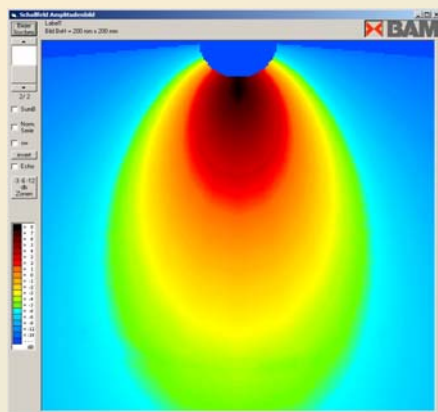


Film der Schnittbilder der Ultraschall-ET eines Teilvolumens der CFK - Platte mit Impaktschaden

Varianten zur Bilderzeugung aus Phased Array Messdaten – Praktische Beispiele an Kupfer und CFK

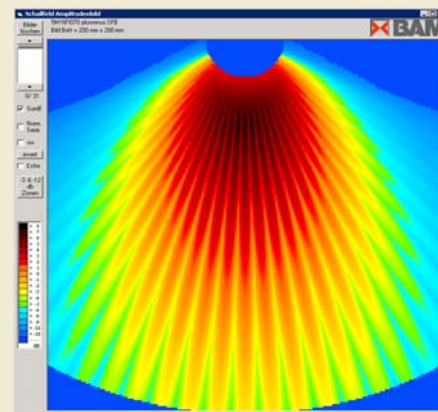
Zusammenfassung

- Durch den Winkelschwenk des Phased Array wird der große Öffnungswinkel realisiert, der für die mit synthetischer Apertur arbeitenden bildgebenden Verfahren SAFT und Echotomographie (ET) nötig ist. Dabei bleibt die Empfindlichkeit so hoch wie bei üblich großen Prüfköpfen und sie Echos sind klassisch bewertbar.
- Bei der SAFT-Rekonstruktion werden HF-Signale aus einer synthetischen Apertur überlagert. Für die ET wird im Prinzip der gleiche Algorithmus verwendet, jedoch unter Verwendung der gleichgerichteten Signale. Die ET ist unempfindlicher gegenüber Fehlern bei der Laufzeitbestimmung und bei größerem Messpunktabstand. Bei ausreichender Datenbasis liefert SAFT die schärferen Bilder.
- Das erste Beispiel zeigt SAFT-Bilder von Testreflektoren in dickwandigen elektronenstrahlgeschweißten Kupferbehältern. Herauszuheben ist neben der genauen Größenbestimmung der Testreflektoren die klare Erkennbarkeit einer 0.4 mm QB, die ohne SAFT im Gefügerauschen untergeht.
- Im zweiten Beispiel wurde eine spezielle Variante der ET zur Prüfung von CFK-Platten verwendet, die Fokusfeldmethode. Die Überlagerung der Signale aus einer synthetischen Apertur führt zu einer relativen Absenkung der Anzeigen aus der Struktur des Materials gegenüber den Anzeigen von KSRs oder Rissen, wie sie an Impaktschäden zu beobachten sind.




kleiner Prüfkopf bzw. Einzelement

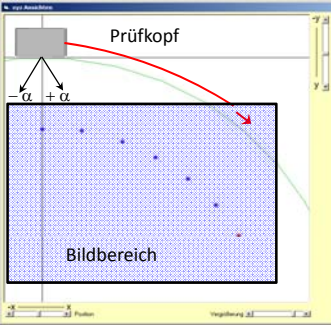
große Divergenz des Schallbündels geringe
Empfindlichkeit und SNR
(fast) keine Richtungsinformation



Gruppenstrahlerprüfkopf

Schwenkwinkelbereich ist vergleichbar
mit der Divergenz des Einzelements



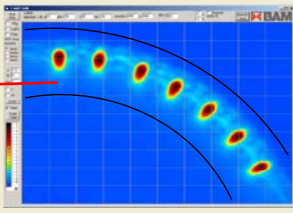


Prüfkopf

Bildbereich

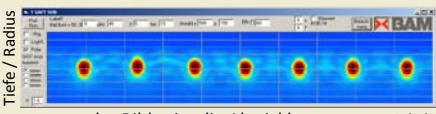
7 Punktrefektoren auf einem Radius

Fahrt in Umfangsrichtung



ROI

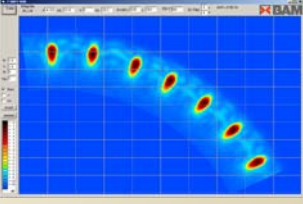
SAFT Rekonstruktion in kartesischen Koordinaten



Tiefe / Radius

das Bild zeigt die Abwicklung Winkel

Rücktransformation in kartesische Koordinaten




Darstellung in kartesischen Koordinaten

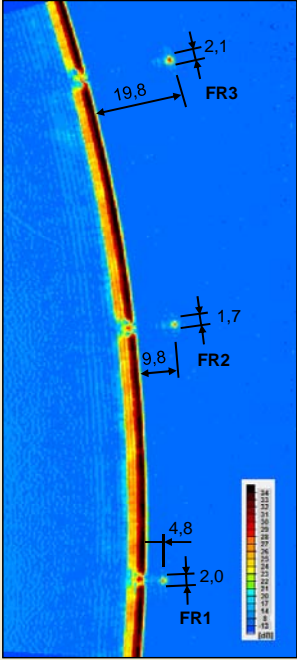
Für die Zylindergeometrie ist die SAFT-Rekonstruktion in Polarkoordinaten um vielfaches schneller

Fachbereich 8.4
Akustische und elektromagnetische Verfahren

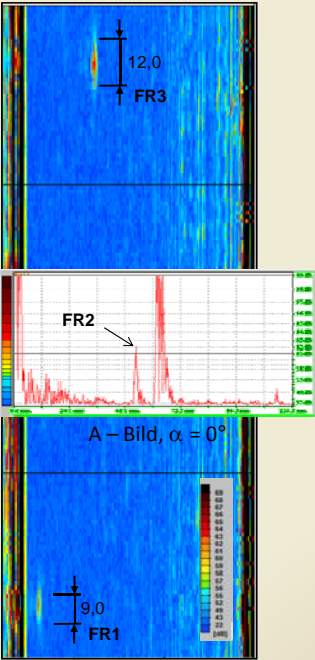
Rekonstruktionsalgorithmus und Darstellung, Simulation

29



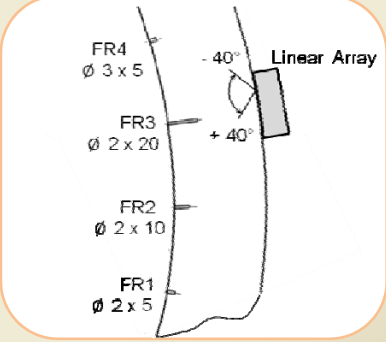


SAFT - Bild



TD - Bild, $\alpha = 0^\circ$

Fahrt in Umfangsrichtung

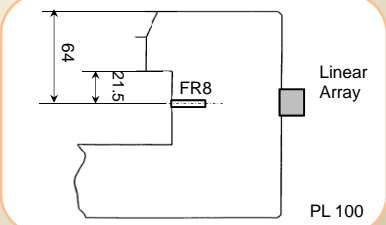


FR4 ø 3 x 5 -40° Linear Array

FR3 ø 2 x 20 +40°

FR2 ø 2 x 10

FR1 ø 2 x 5



Linear Array

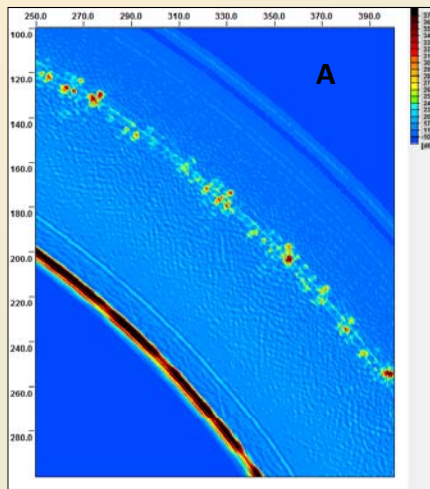
PL 100

Fachbereich 8.4
Akustische und elektromagnetische Verfahren

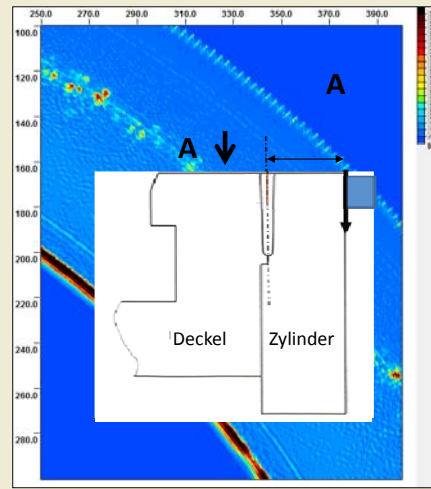
Ergebnisse, Kreisscheibenreflektoren

30

SAFT – Bild „realer“ Fehler
Schwenkwinkel -40° bis +40°, Stp 2°



Messpunkteabstand 0.2 mm



Messpunkteabstand 2.0 mm

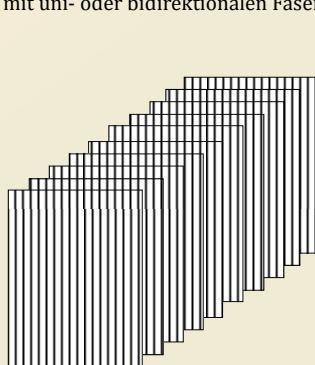
$$\lambda = 4.7 / 3.5 = 1.3 \text{ mm}$$

Akustische Besonderheiten

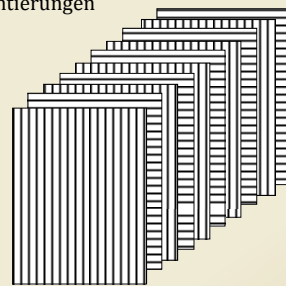
CFK - Verbundwerkstoff:

Faser elastisch, E - Modul der Faser ist sehr viel größer als der
E - Modul der Matrix, daher ist der Werkstoff stark anisotrop
Matrix viskoelastisch → hohe Dämpfung ca. 1 – 2 dB / mm, 2 MHz (Msg. Mc Hugh 2008)

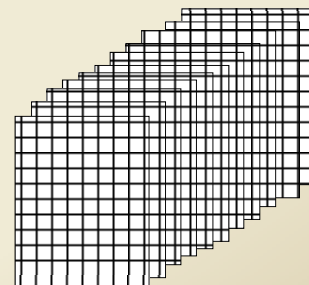
CFK Aufbau z.B. aus
Schichten harzgetränkter Fasermatten (Prepregs)
mit uni- oder bidirektionalen Faserorientierungen



unidirektional

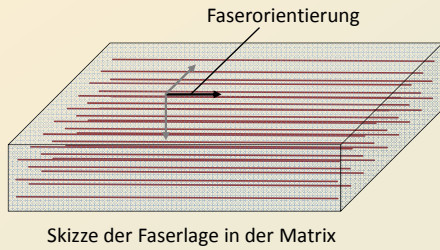


0° / 90° Aufbau aus
unidirektionalen Schichten

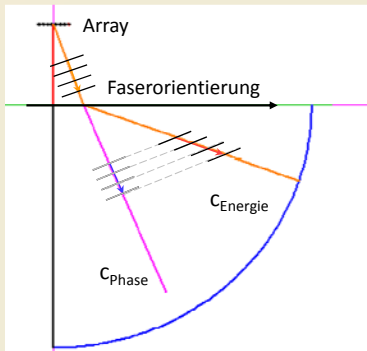


Schichten aus Geweben mit
0° / 90° Faserorientierung

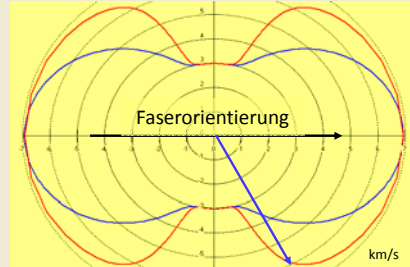
Akustische Anisotropie



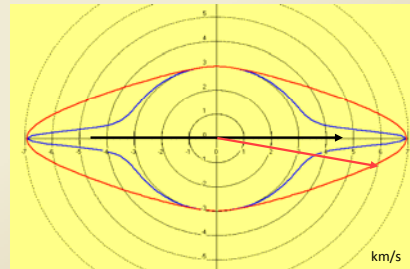
Skizze der Faserlage in der Matrix



Phasen (blau)- und Energiegeschwindigkeit (rot)

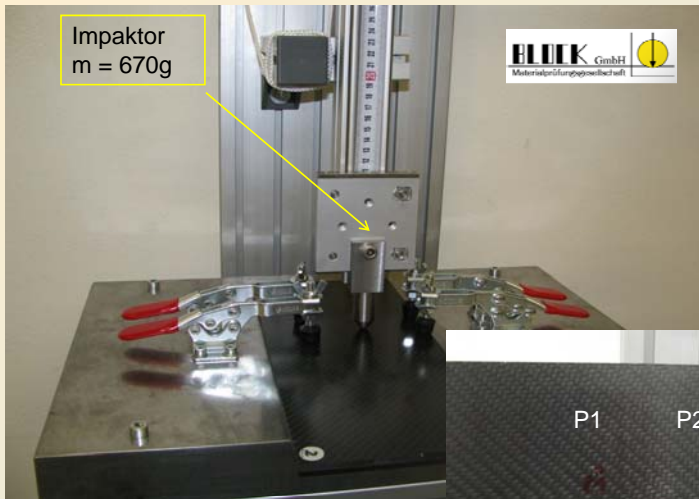


$C_{Ph}(\cdot), C_e(\text{Richtung des Wellenvektors})$

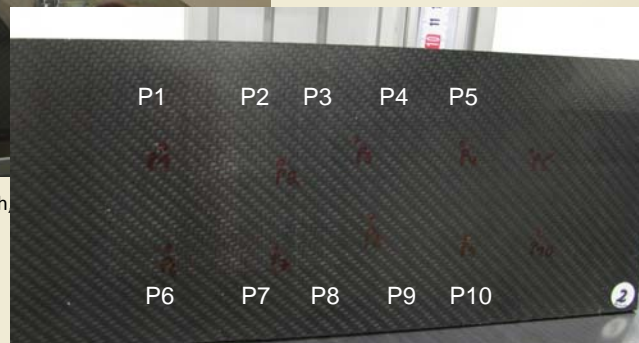


$C_{Ph}(\cdot), C_e(\text{Richtung der Energieausbreitung})$

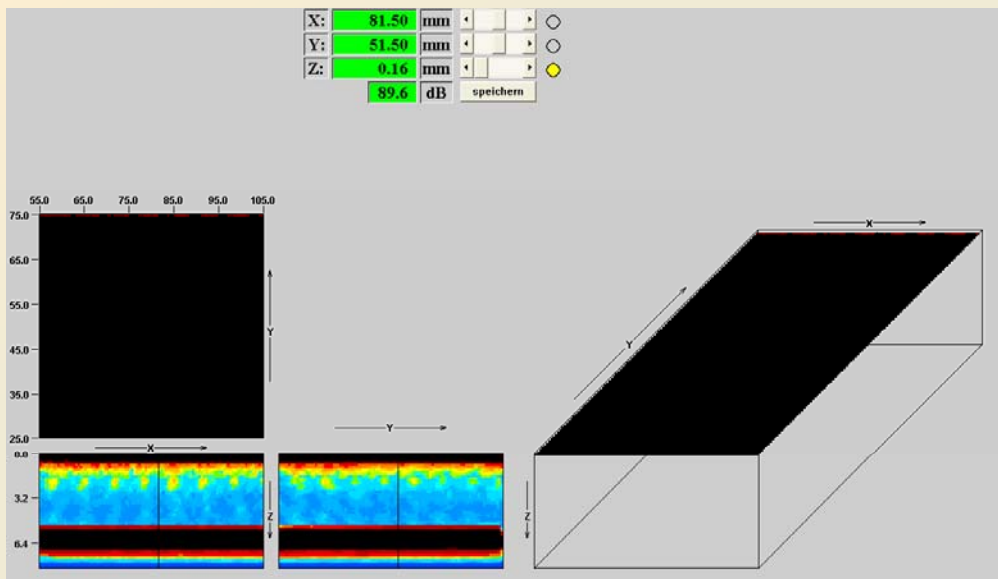
Impaktor
 $m = 670g$



Impakt Fallmaschine, Fallenergie $E = m \cdot g \cdot h$



Fallhöhen 0.2 - 1.1 m entsprechen Fallenergien von 1.3 - 7.2 Nm



Ultraschallbild eines Teilvolumens der CFK - Platte vor der Schädigung