

Phased Array und Imaging, zwei raumzeitliche Interferenzverfahren

Rainer BOEHM¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: rainer.boehm@bam.de

Kurzfassung

Phased-Array-Technik und Bildgebung mit Ultraschallwellen sind nach langer Entwicklungszeit inzwischen auf dem Weg zu allgemeiner Verbreitung. Daher bietet sich an, die verschiedenen Techniken und deren Begriffe wie z.B. Phased-Array, SAFT, TFM, FMC und Sparse-Array zusammenfassend in Beziehung zu setzen.

All diesen Techniken liegt dieselbe Idee zu Grunde, nämlich durch gezielte Überlagerung von Ultraschallsignalen den gewünschten Effekt zu erreichen. Die verschiedenen Techniken werden kurz charakterisiert und neben den Unterschieden wird beschreiben, auf welche Weise bei all diesen Techniken das Phänomen der konstruktiven Interferenz jeweils genutzt wird.

4. Nov. 2019

PHASED ARRAY UND IMAGING, ZWEI RAUMZEITLICHE INTERFERENZVERFAHREN

Rainer Boehm

Seminar des FA Ultraschallprüfung

www.bam.de

Gliederung

Phased Array

Eingangsbemerkungen	3
Schallfeldformende Strahlergruppe	6
Anordnung der Elemente	
Sparse Array, Gruppenstrahler mit (zu?) wenig Elementen	10
Der Empfangsfall	15

Imaging

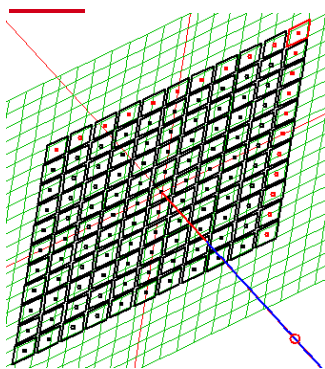
Focus Echo Tomographie FET (Fokusfeldmethode)	16
Synthetic Aperture Focusing Technique SAFT	20
Total Focusing Methode TFM mit Full Matrix Capture FMC	26

Eingangsbemerkungen

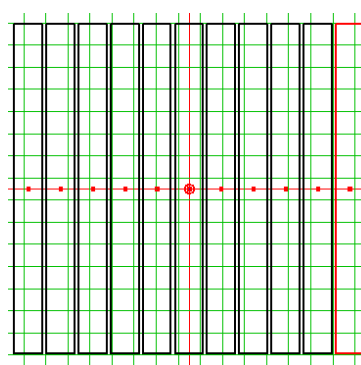
Zum "Phased Array" werden im Raum verteilte akustische Quellen und Empfänger mit gleichen spektralen Eigenschaften dadurch, dass man die Signale der einzelnen Arrayelemente beim Senden und Empfangen jeweils **zeitlich kontrollieren** kann.

www.bam.de

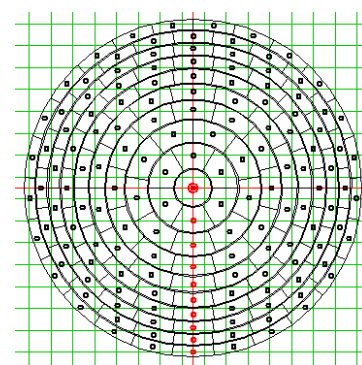
Eingangsbemerkungen



Matrixarray



Lineararray



Ringsegmentarray

Die räumliche Verteilung der Elemente darf (fast) beliebig sein. Sendeamplitude und Empfindlichkeit lassen sich meist für jedes Element anpassen.

Senden

Durch Steuerung der relativen Sendezeitpunkte lässt sich bestimmen wo die Impulse zeitgleich eintreffen. Die konstruktive Interferenz an diesem Punkt, dem **geometrischen Fokus**, erzeugt **jeweils** den **höchsten Schalldruck**, der dort mit dem Array erzeugt werden kann.

Empfangen

Die Kompensation der Schalllaufzeiten bei der Addition der **Empfangssignale** kann **jeden Raumpunkt zum Fokus** werden lassen. An allen anderen Orten entsteht ein "determiniertes Chaos", im besten Fall Auslöschung. Aus den Ergebnisdaten lassen sich **Bilder** erzeugen.

www.bam.de

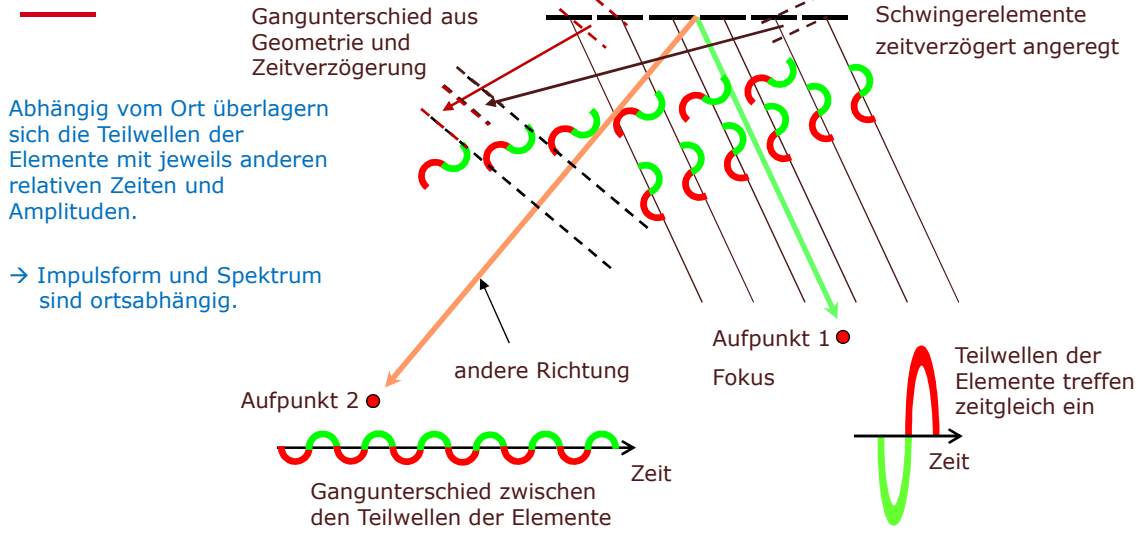
Phased Array

Schallfeldformender Gruppenstrahler

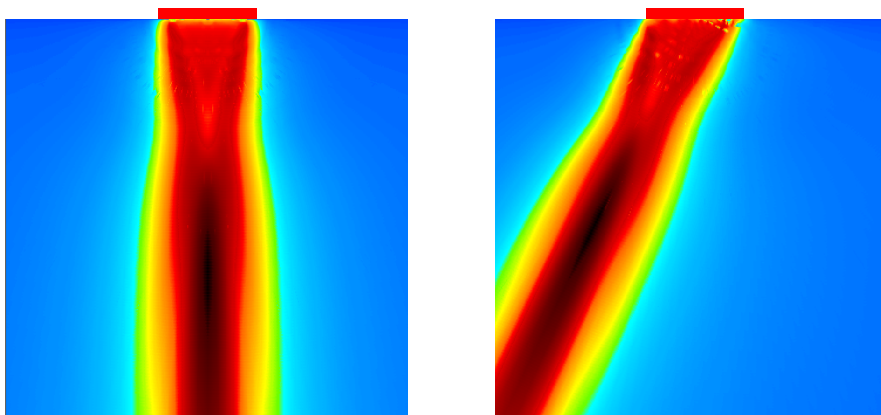
Sparse Array, Gruppenstrahler mit wenigen Elementen

www.bam.de

Der schallfeldformende Gruppenstrahler

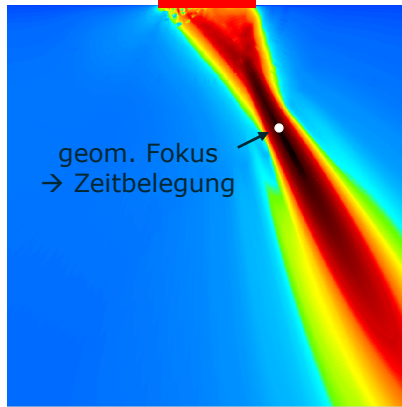


Der schallfeldformende Gruppenstrahler



Schallfeldbilder (max. Schalldruck)

Der schallfeldformende Gruppenstrahler



Schallfeldbild (max. Schalldruck)



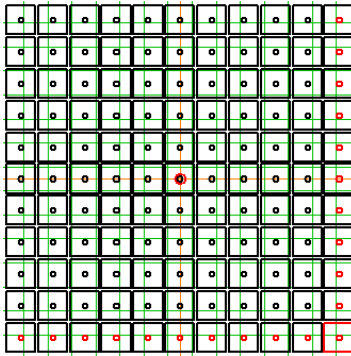
Wellenfeld

Phased Array

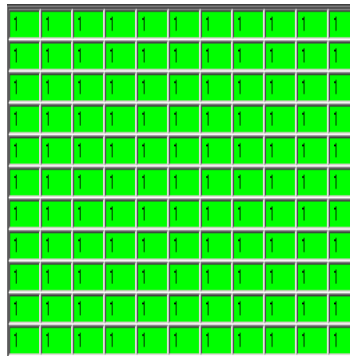
Schallfeldformender Gruppenstrahler

Sparse Array, Gruppenstrahler mit wenigen Elementen

Der schallfeldformende Gruppenstrahler mit wenigen Elementen, Sparse Array



11 x 11 El. Matrixarray

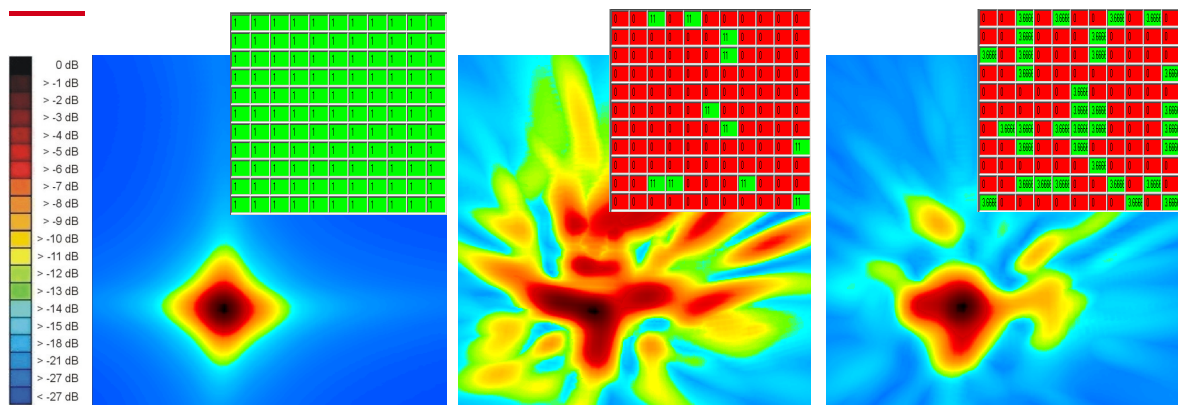


alle 121 Elemente aktiv



z.B. 1/6 der Elemente aktiv

Der schallfeldformende Gruppenstrahler mit wenigen Elementen, Sparse Array



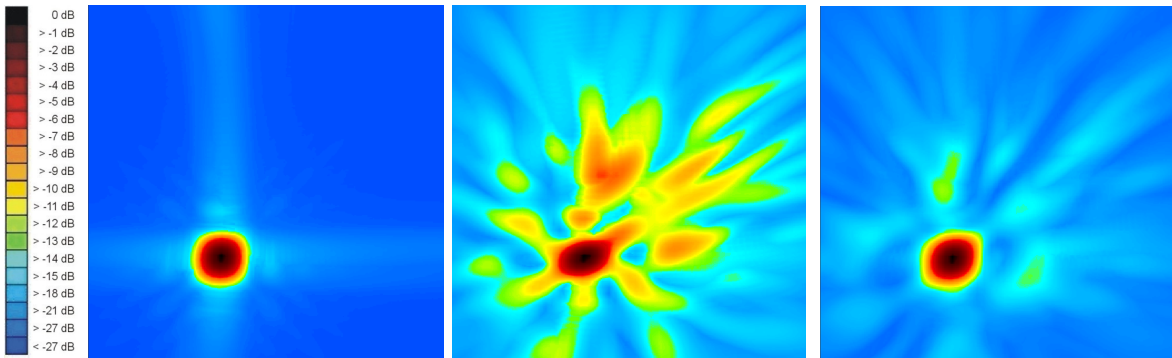
Unfokussiert, alle El. aktiv

11/121 El. aktiv

32/121 El. aktiv

2-dim. Richtcharakteristik, 11 x 11 Matrixarray, Pitch 2.3 mm, $\lambda = 3$ mm, $s = 80$ mm, $N_0 = 73$ mm
Bildgröße $\pm 40^\circ$ in jeder Richtung

Der schallfeldformende Gruppenstrahler mit wenigen Elementen, Sparse Array



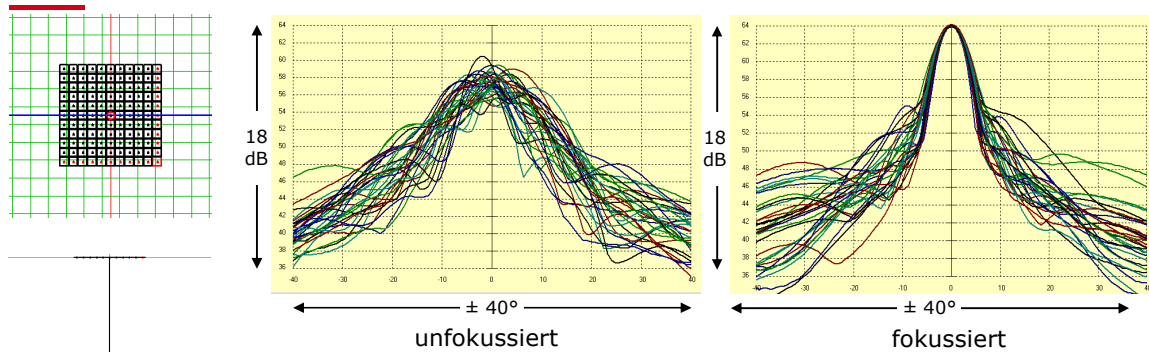
Fokussiert, alle El. aktiv

11/121 El. aktiv

32/121 El. aktiv

2-dim. Richtcharakteristik, 11 x 11 Matrixarray, Pitch 2.3 mm, $\lambda = 3$ mm, $s = 80$ mm, $N_0 = 73$ mm
Bildgröße $\pm 40^\circ$ in jeder Richtung

Der schallfeldformende Gruppenstrahler mit wenigen Elementen, Sparse Array



zufällige Auswahl von 32/121 aktiven El., 30 mal

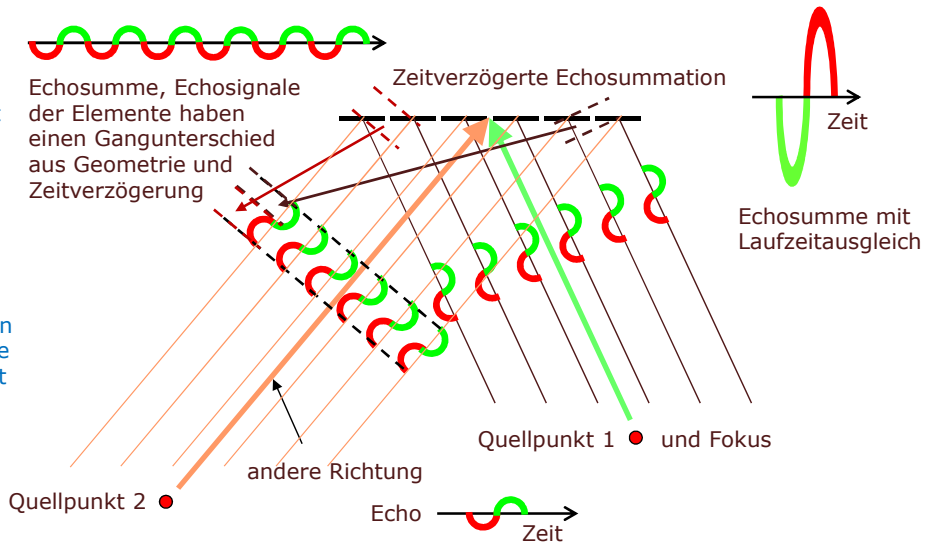
Richtcharakteristik, 11 x 11 Matrixarray, Pitch 2.3 mm, $\lambda = 3$ mm, $s = 80$ mm, $N_0 = 73$ mm

Das empfindlichkeitsfeldformende Phased Array Der Empfangsfall

Der Quellpunkt, für den die Laufzeitunterschiede der Teilechos bei der Summation kompensiert werden, wird zum **Empfangsfokus**.

Sequenzielle Fokussierung auf Bildpunkte → Imaging?!

Die Echosumme hat dann die größte Amplitude, die an diesem Punkt erreicht werden kann und die Signalform, kommt der am nächsten, die vom Quellpunkt ausging!



IMAGING

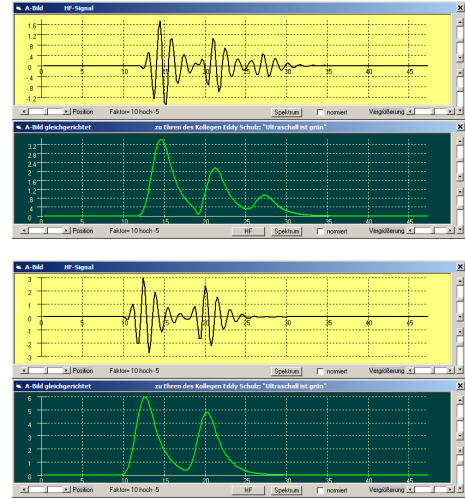
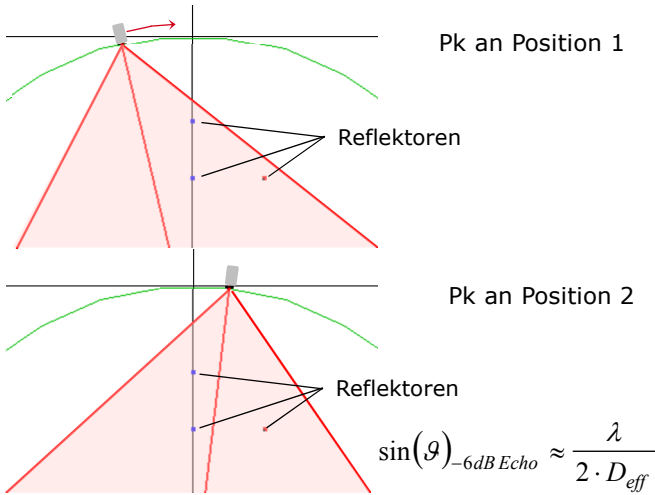
Focus Echo Tomographie **FET**

Synthetic Aperture Focusing Technique **SAFT**

Full Matrix Capture **FMC**, Alldatensammler

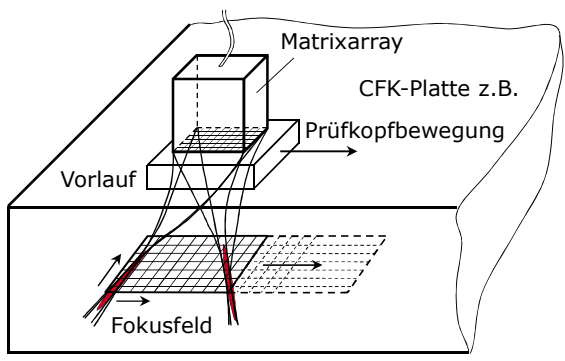
Imaging

immer eine Fokussierung und Frage des Blickwinkels



IMAGING

Focus Echo Tomographie FET, Fokusfeldmethode



Fokusfeld: Pixelierte Fläche in der Fokusebene in gewählter Tiefe.
 Lateralinformation aus Fokusposition
 Tiefeninformation aus Laufzeit, Fokusschlauchlänge

2D-Sektorscan mit fokussierten Schallbündeln →

3D-Datensatz an jedem Messpunkt

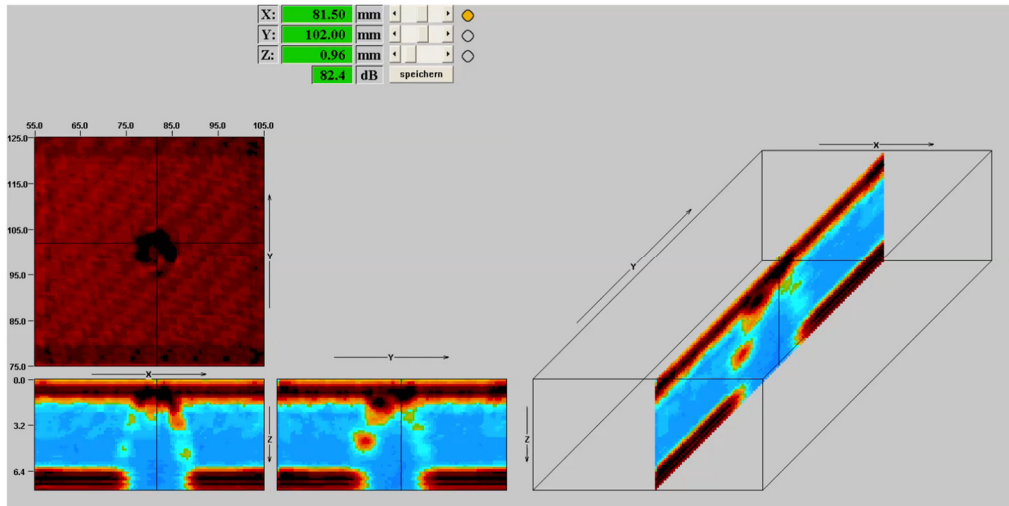
Echotomographie ortsrichtige Überlagerung der gleichgerichteten Echosignale von verschiedenen Pk-Positionen

→ größeres SNR, größerer Blickwinkelbereich

FET Echotomographie aus 2D-Sektorscandaten fokussierter Schallbündel.

IMAGING

Impaktschaden in 6 mm CFK-Platte, FET



4.11.2019

Phased Array und Imaging, zwei raumzeitliche Interferenzverfahren

19



IMAGING

Focus Echo Tomographie **FET**

Synthetic Aperture Focusing Technique **SAFT**

Full Matrix Capture **FMC**, Alldatensammler

www.bam.de

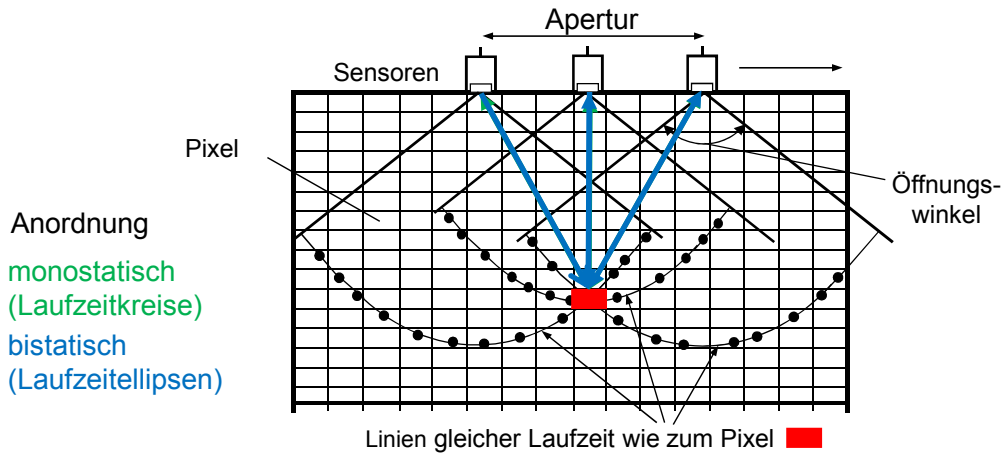
4.11.2019

Phased Array und Imaging, zwei raumzeitliche Interferenzverfahren

20

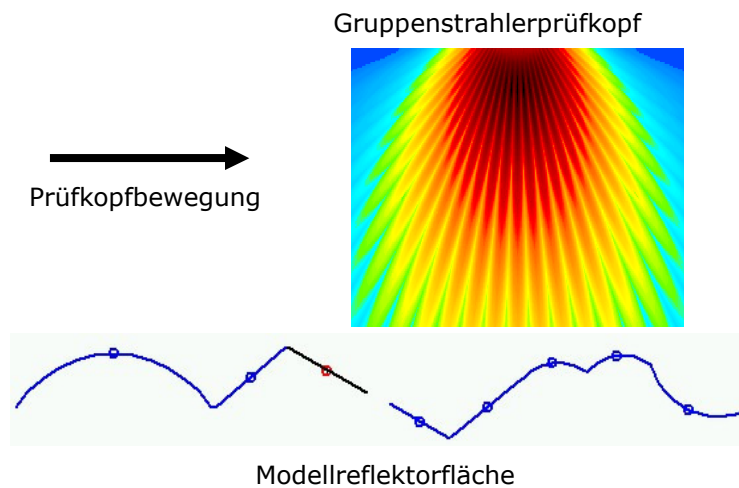
IMAGING

Synthetic Aperture Focusing Technique SAFT



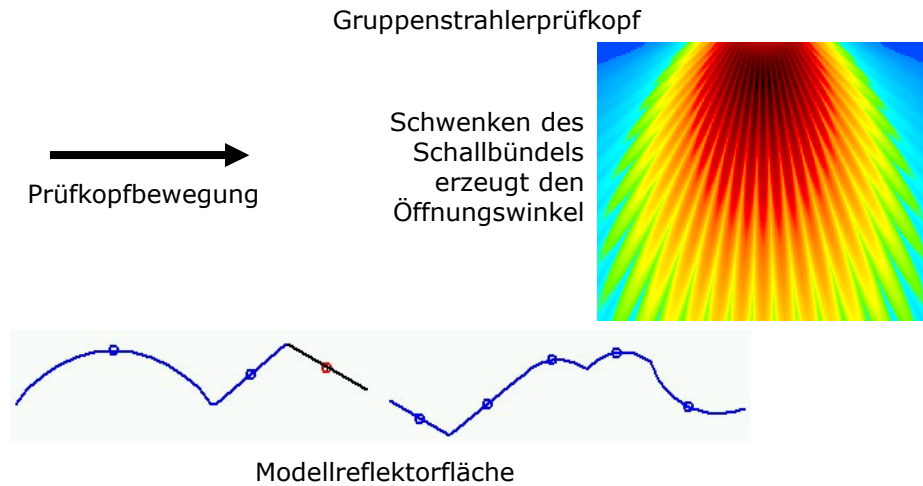
IMAGING

Synthetic Aperture Focusing Technique



IMAGING

Synthetic Aperture Focusing Technique



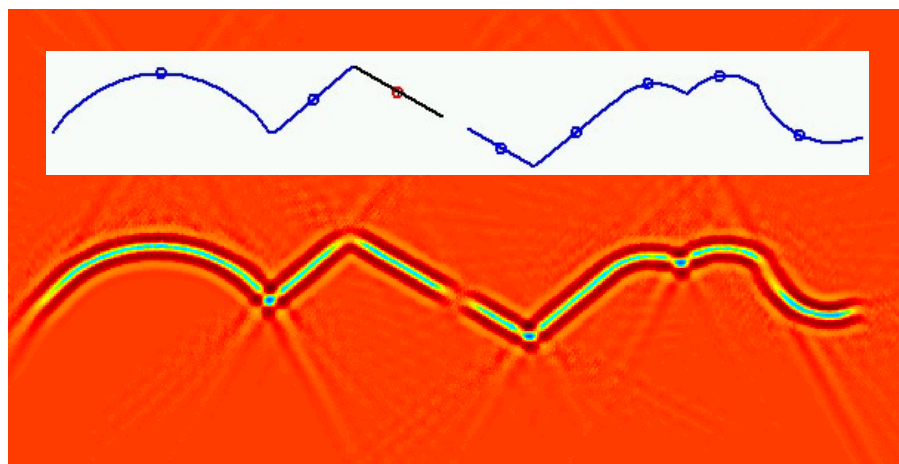
IMAGING

Synthetic Aperture Focusing Technique, TFM?



SAFT
Rekonstruktion
HF-Signal

GRST 16 Elm,
-60° bis +60°
in 4° Schritten



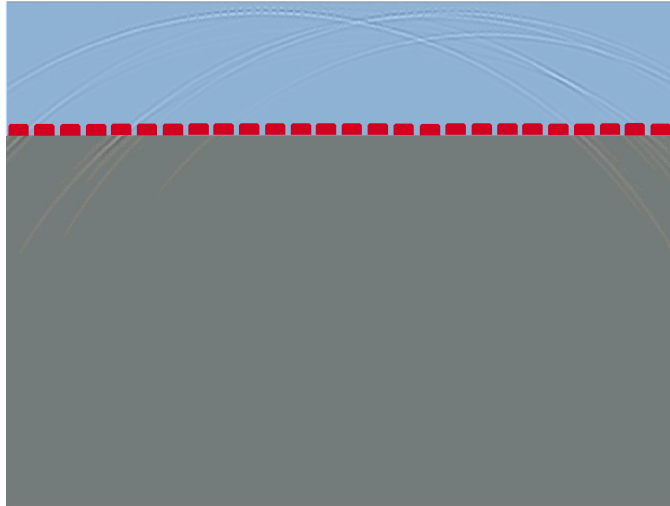
IMAGING

Synthetic Aperture Focusing Technique, TFM



Darstellung der "back-propagation" vom Ort der Empfängerpositionen zurück bis zum Ort der „Quellen“, der Reflexionsstellen, an denen die Welle zum Zeitpunkt "Null" gestartet sind.

Die „Rückausbreitung“ auch in der Vergangenheit vor dem Zeitpunkt Null ist möglich.



IMAGING

Focus Echo Tomographie **FET**

Synthetic Aperture Focusing Technique **SAFT**

Full Matrix Capture **FMC**, Alldatensammler



IMAGING

SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC



Schallweg s , Zeit $t = 2 \frac{s}{c}$

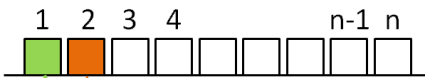
Matrix der HF-A-Bilder

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S 1	1,1								
2		2,2							
3			3,3						
4				4,4					
5					5,5				
6						6,6			
7							7,7		
8								8,8	
9									9,9

monostatische Daten → Diagonale der Matrix, (IE - Technik)

IMAGING

SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC



Schallweg s , Zeit $t = \frac{s_1 + s_2}{c}$

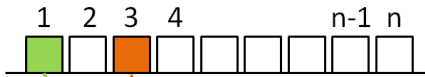
Matrix der HF-A-Bilder

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S 1	1,1	1,2							
2		2,2	2,3						
3			3,3	3,4					
4				4,4	4,5				
5					5,5	5,6			
6						6,6	6,7		
7							7,7	7,8	
8								8,8	8,9
9									9,9

Bistatische Daten → nahe der Diagonalen

IMAGING

SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC



Schallweg s , Zeit $t = \frac{s_1 + s_2}{c}$

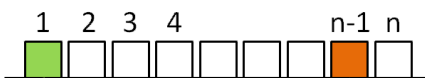
Matrix der HF-A-Bilder

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S 1	1,1	1,2	1,3						
2		2,2	2,3	2,4					
3			3,3	3,4	3,5				
4				4,4	4,5	4,6			
5					5,5	5,6	5,7		
6						6,6	6,7	6,8	
7							7,7	7,8	7,9
8								8,8	8,9
9									9,9

Bistatische Daten → nahe der Diagonalen

IMAGING

SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC



Schallweg s , Zeit $t = \frac{s_1 + s_2}{c}$

Matrix der HF-A-Bilder

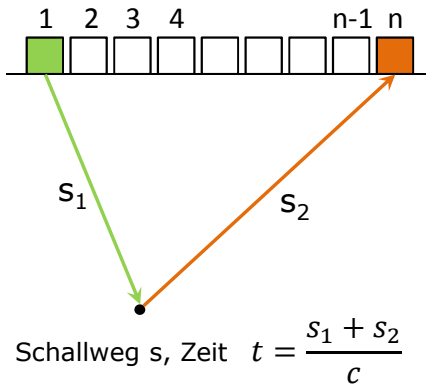
E	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S 1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
2		2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
3			3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
4				4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
5					5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
6						6,6	6,7	6,8	6,9
7							7,7	7,8	7,9
8								8,8	8,9
9									9,9

Bistatische Daten → fern der Diagonalen

IMAGING



SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC



Volle Matrix der HF-A-Bilder

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
2		2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
3			3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
4				4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
5					5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
6						6,6	6,7	6,8	6,9
7							7,7	7,8	7,9
8								8,8	8,9
9									9,9

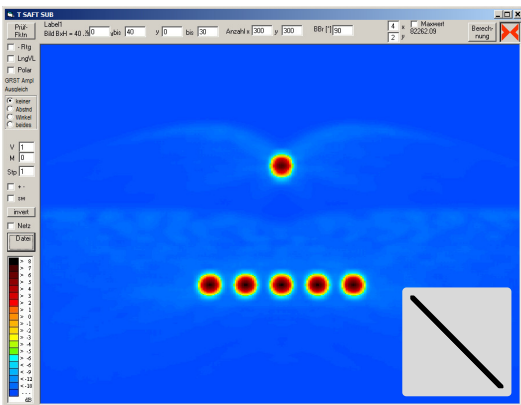
Bistatische Daten → fern der Diagonalen

Die Matrix ist symmetrisch:
 $(n,m) = (m,n)$ beim Tausch von S und E

IMAGING

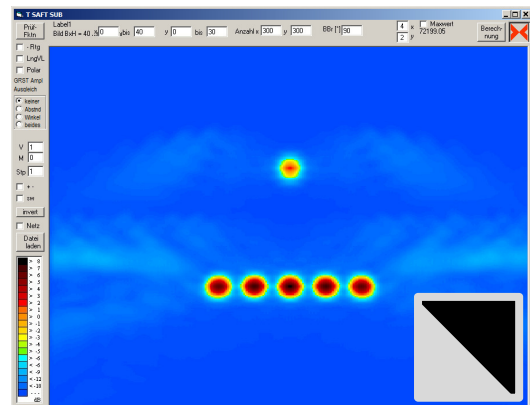


SAFT ↔ TFM mit Full Matrix Capture FMC, 21 El.



IE-Methode, 1 El., Stp. = 0.174 mm

231 A-Bilder, 231 MPkte



TFM, Full Matrix Rekonstruktion

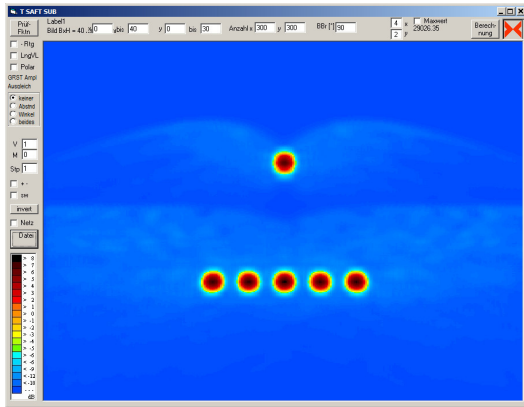
231 A-Bilder, 21 MPkte

A = 40 mmc

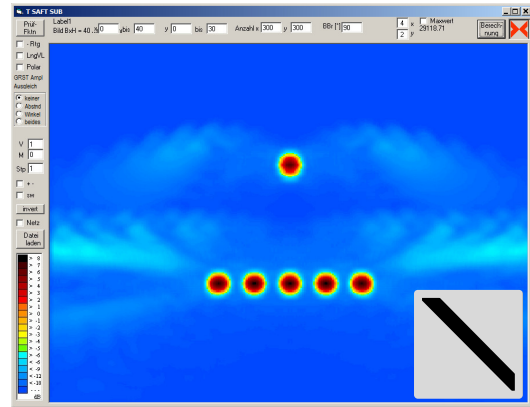
IMAGING



SAFT \leftrightarrow TFM mit Full Matrix Capture FMC



IE-Methode, 1 El., **Stp. = 0.52 mm**
78 A-Bilder, 78 MPkte



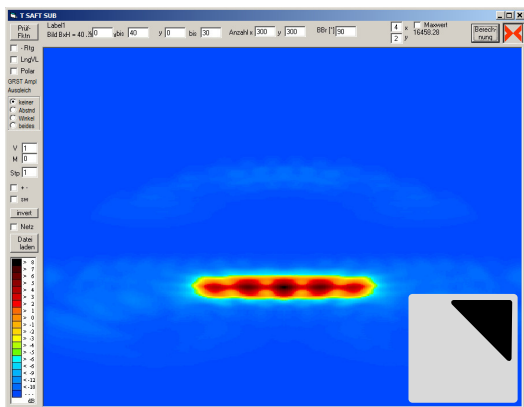
TFM, (n,n) bis (n,n+3)
78 A-Bilder, 21 MPkte

A = 40 mm

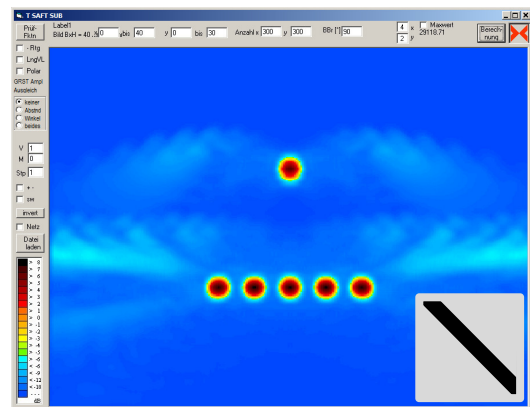
IMAGING



SAFT \leftrightarrow TFM mit Full Matrix Capture FMC



TFM, (n,n) bis (n,n+3)
78 A-Bilder, 21 MPkte
fern von der der Diagonalen

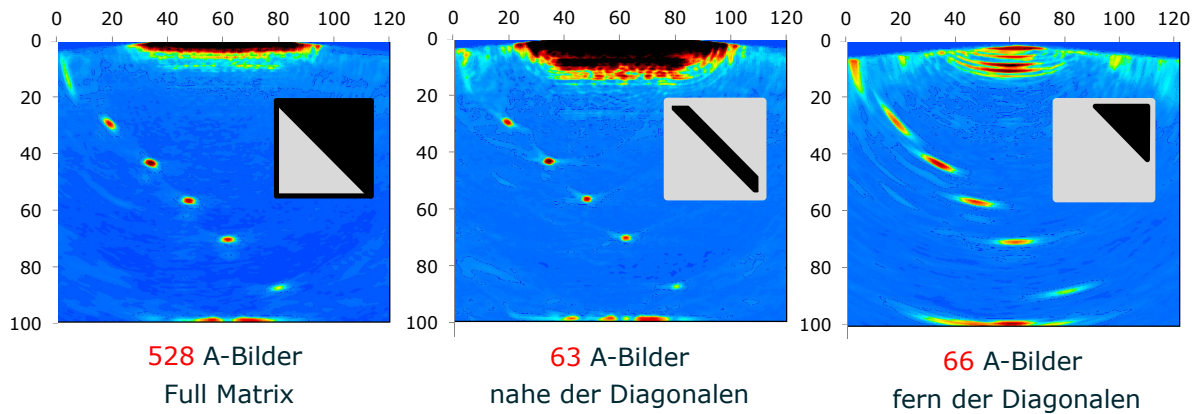


TFM, (n,n) bis (n,n+3)
78 A-Bilder, 21 MPkte
nahe der Diagonalen

A = 40 mm

IMAGING

SAFT \leftrightarrow TFM mit Full Matrix Capture FMC



Messung an Testkörper mit QB \varnothing 4 mm, $\lambda = 2.6$ mm

TFM, PA-Prüfkopf 32 el., 2.25 MHz, pitch 1.5 mm, Apertur = 48 mm

Phased Array und Imaging, zwei raumzeitliche Interferenzverfahren



Schallfeldformende Strahlergruppe
Sparse Array

Focus Echo Tomographie FET
Synthetic Aperture Focusing Technique SAFT
Total Focusing Methode TFM
Full Matrix Capture FMC

