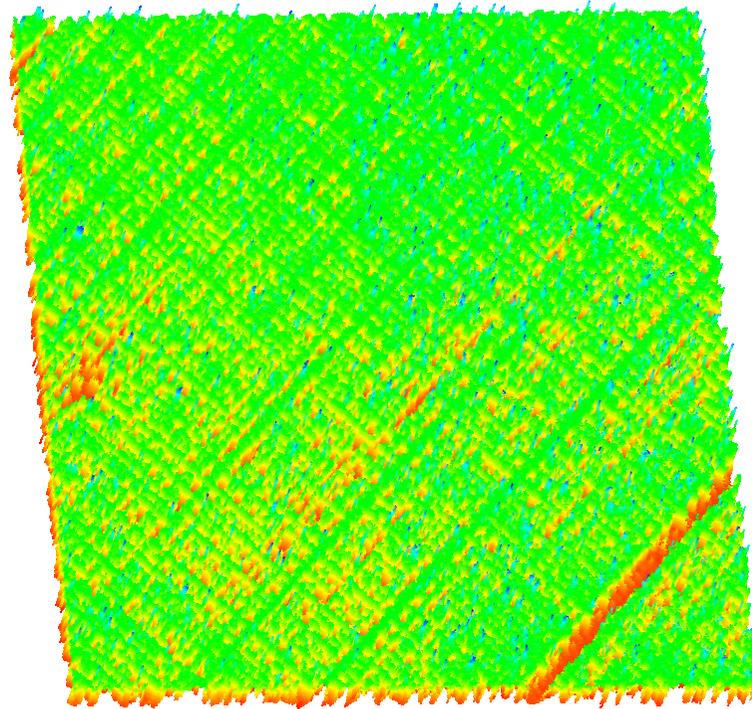

Matrixsensoren für die Prüfung von Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Ultraschall- und Wirbelstromverfahren



Vortragender
Dr. Henning Heuer

1. Prozesskontrolle und Qualitätssicherung für CF-Werkstoffe

Defekte im unverharzten Rohlege berührungsfrei und zerstörungsfrei inline prüfen



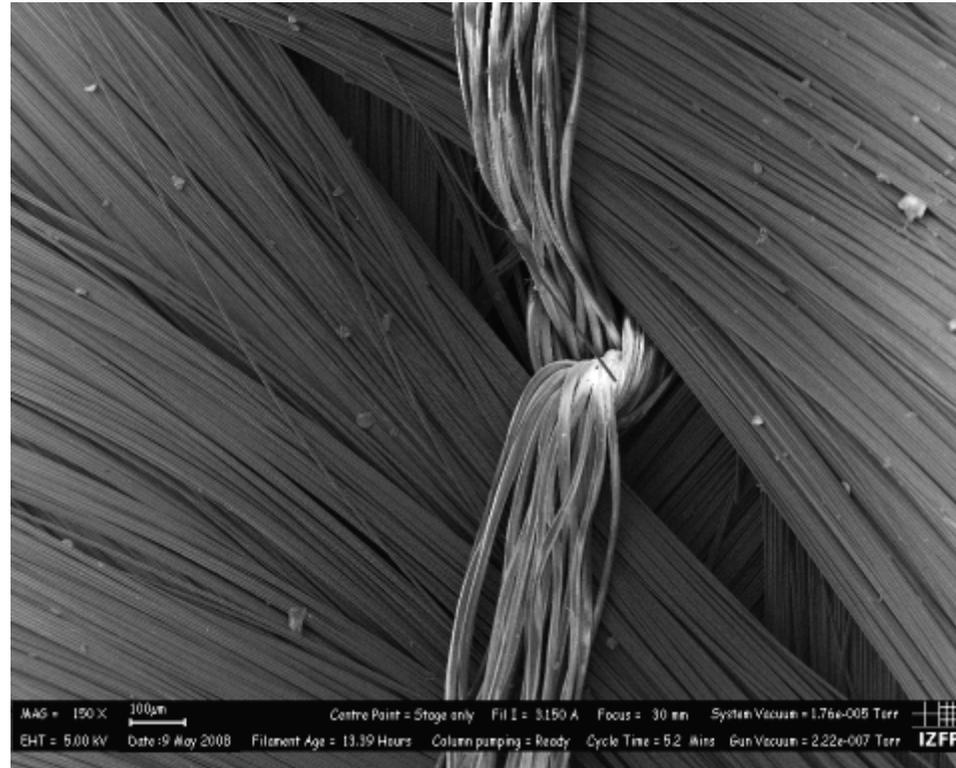
missing bundles



lanes



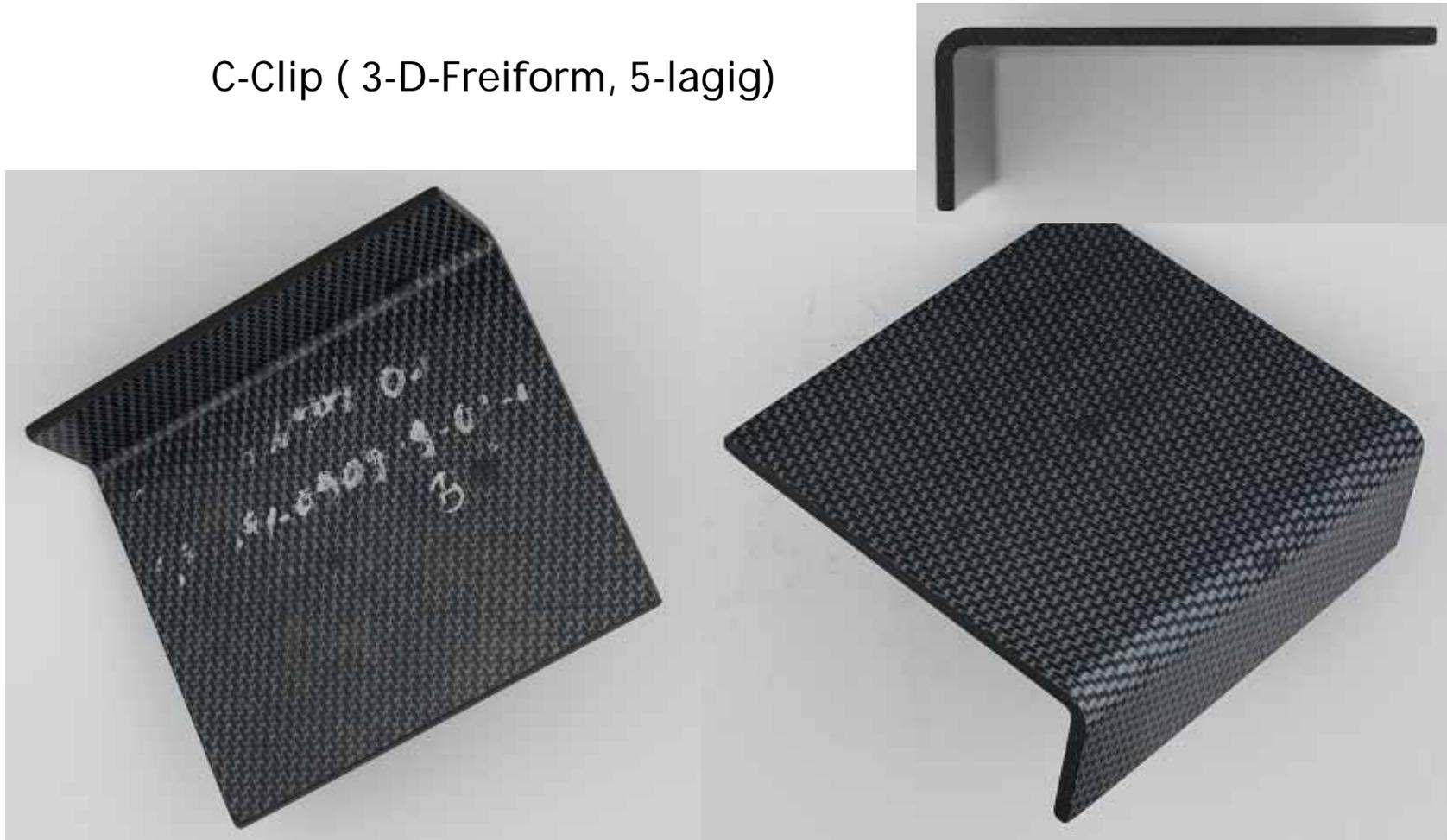
fringes



Im Blickpunkt stehen Defekte in verdeckten Schichten – mögliche Ursache für weitreichende Konsequenzen mit einem hohen Risiko der Materialermüdung des Laminats.

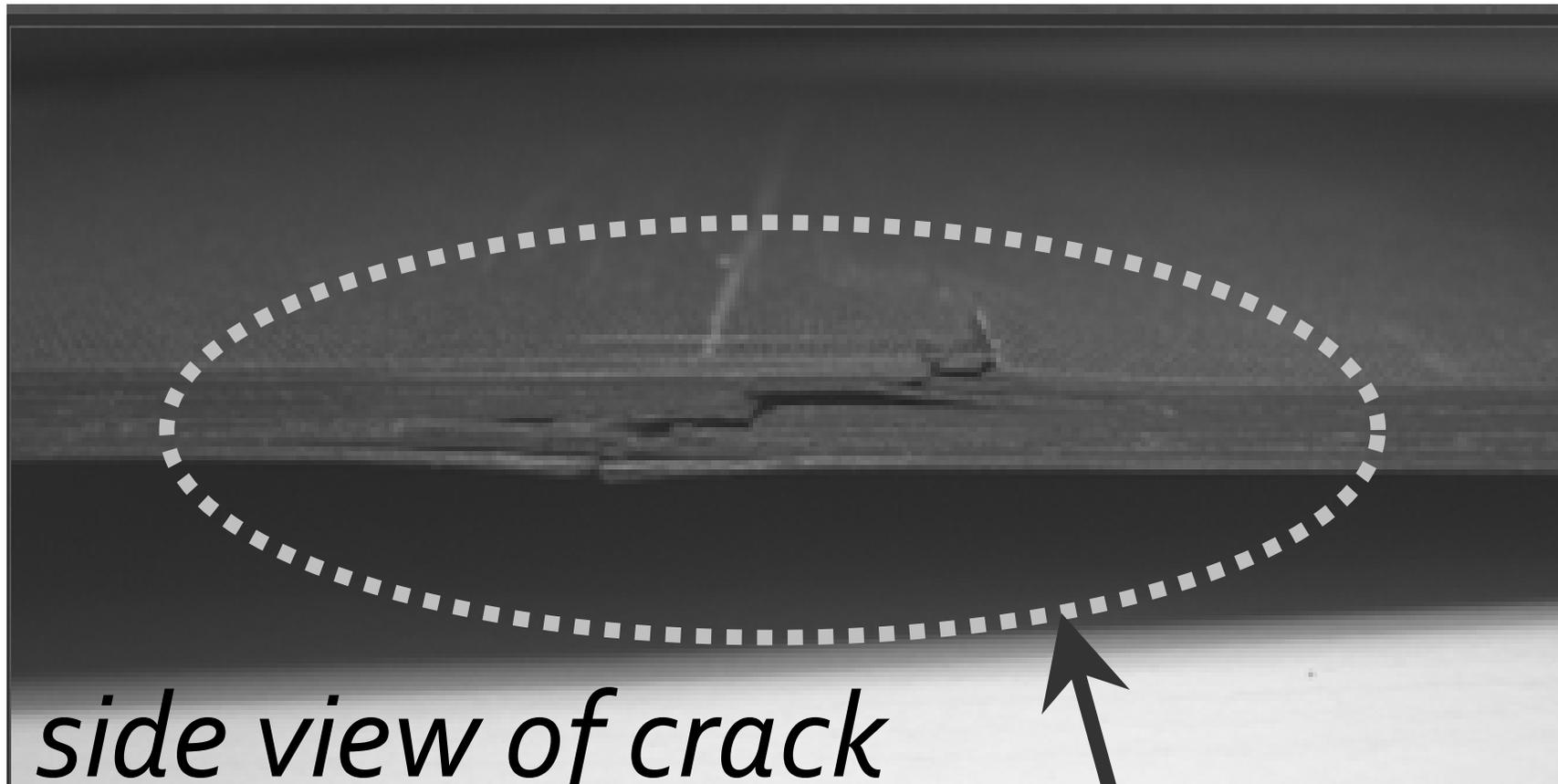
1. Prozesskontrolle und Qualitätssicherung für CF-Werkstoffe

C-Clip (3-D-Freiform, 5-lagig)



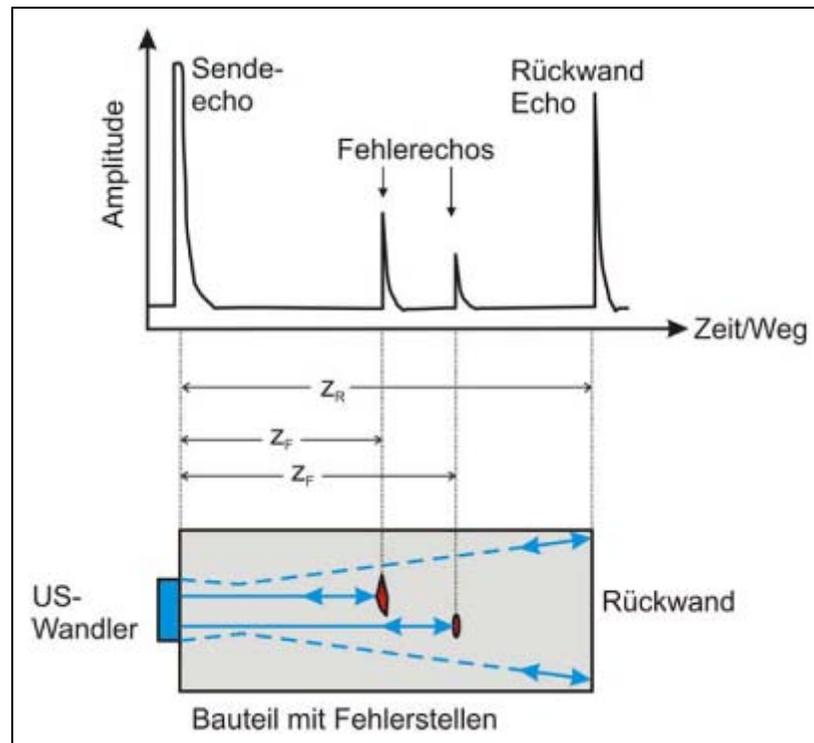
1. Prozesskontrolle und Qualitätssicherung für CF-Werkstoffe

Prüfung von Delamination nach lokaler Krafteinwirkung



2. Eingesetzte Prüfverfahren

Ultraschall – Impuls-Echo-Technik konventionell



Prinzip

- Schallwandler sendet Schallimpuls
- Reflexion an Störstelle
- Fehlerecho wird in elektrisches Signal gewandelt
- Lage der Störstelle aus Laufzeitmessung

$$z_F = v \cdot \frac{t}{2} \quad \text{mit } v = \text{Schallgeschwindigkeit des Materials}$$

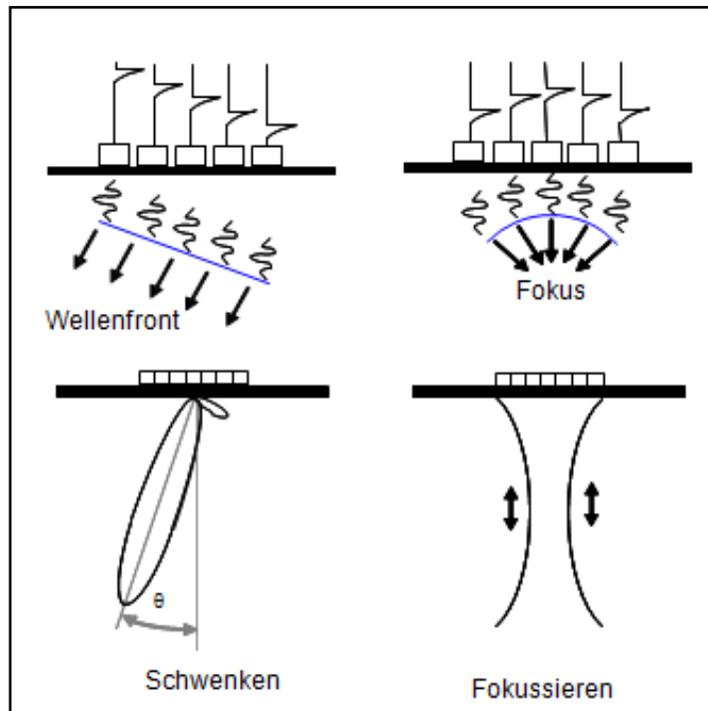
- Nur ein Prüfkopf => Aufwendiges Abtasten des Prüfkörpers

2. Eingesetzte Prüfverfahren

Ultraschall - »Phased Array« und »Sampling Phased Array«

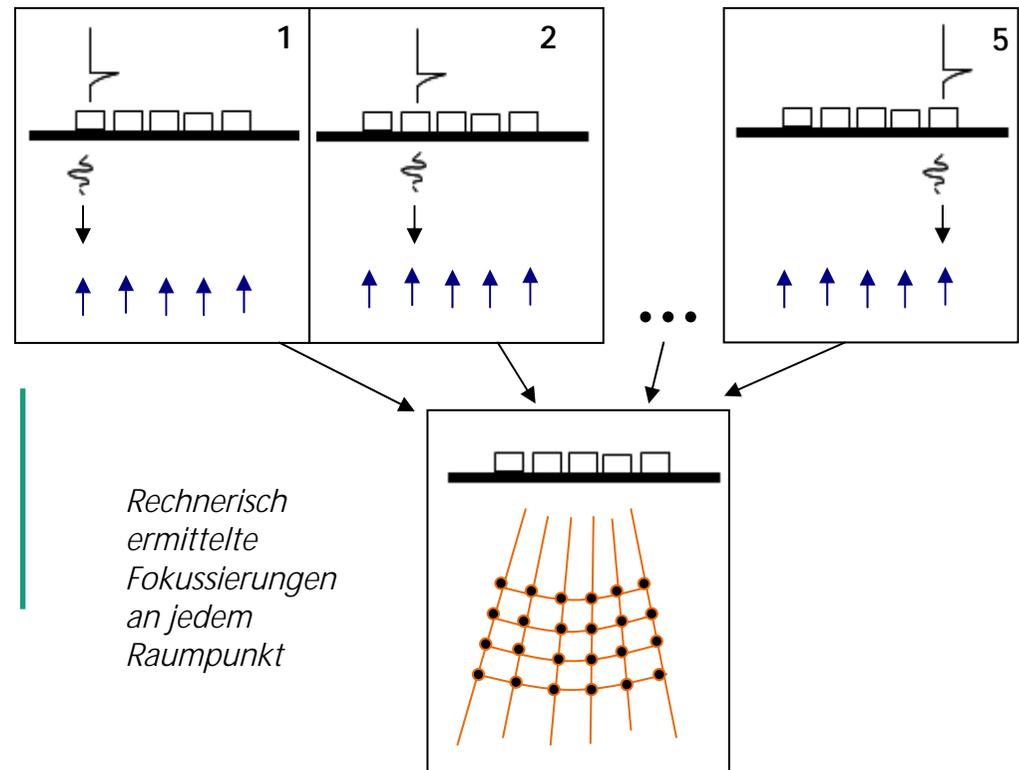
Prinzip »Phased Array«

- Konventionelle Gruppenstrahlentechnik
- Alle Wandler senden und empfangen
- Jeder gewünschte Messpunkt muss physikalisch fokussiert werden



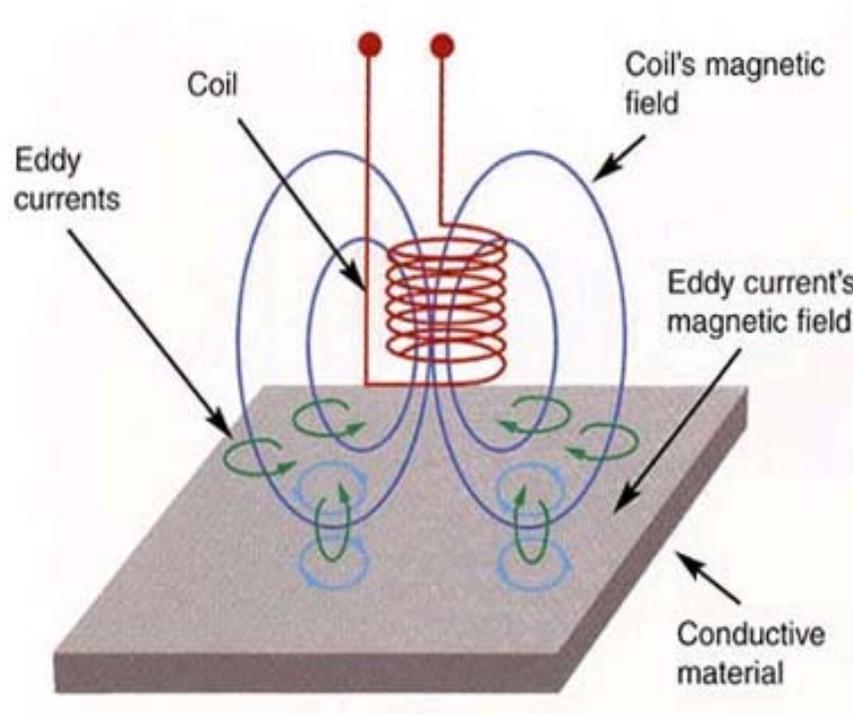
Prinzip »Sampling Phased Array«

- Getaktete Gruppenstrahlen
- Ein Wandler sendet, alle Wandler empfangen
- Synthetische Rekonstruktion der Signale mittels Algorithmus »SAFT«
- Synthetische Fokussierungen



2. Eingesetzte Prüfverfahren

Wirbelstrombasierte Prüfverfahren

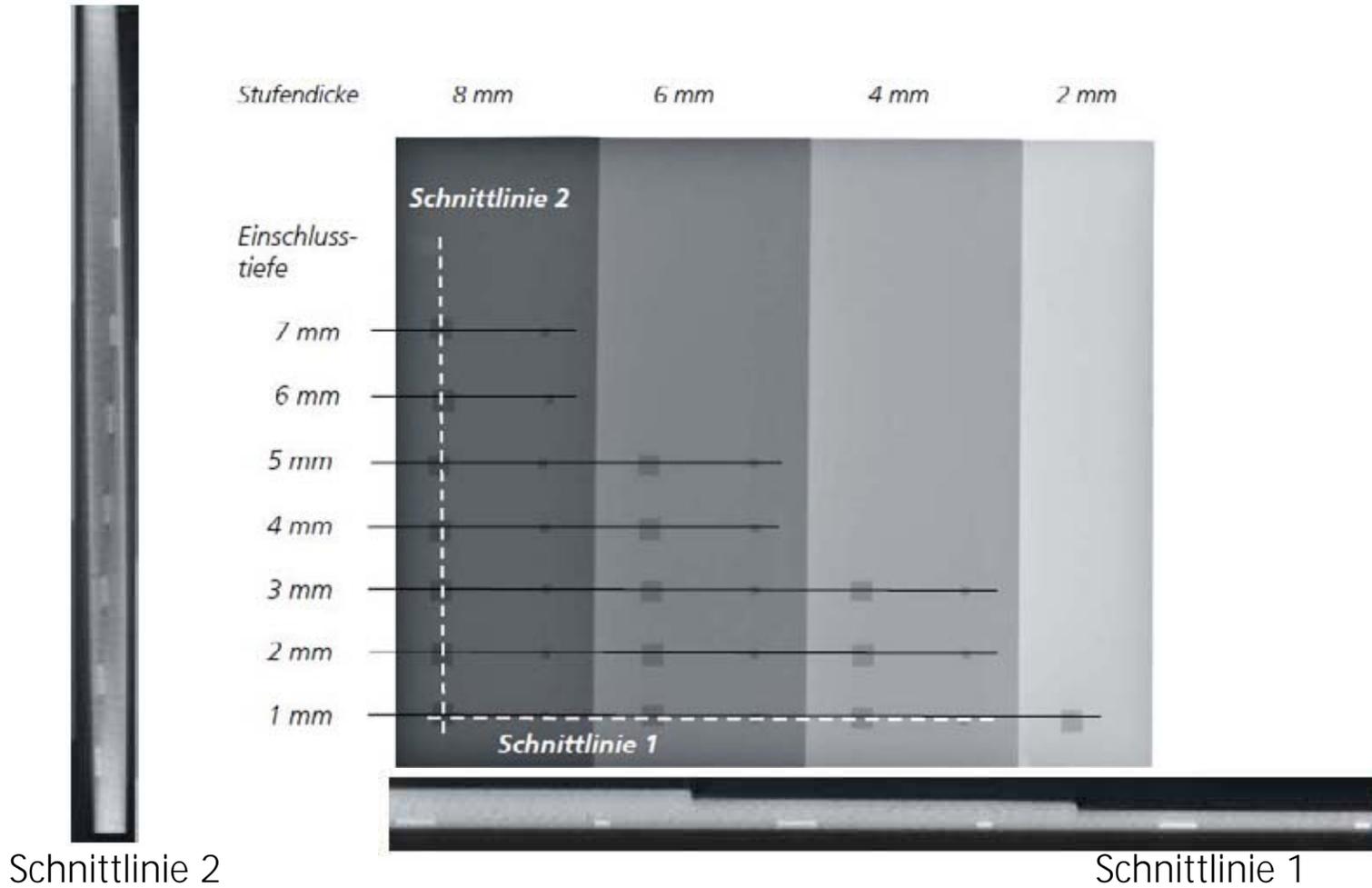


Prinzip

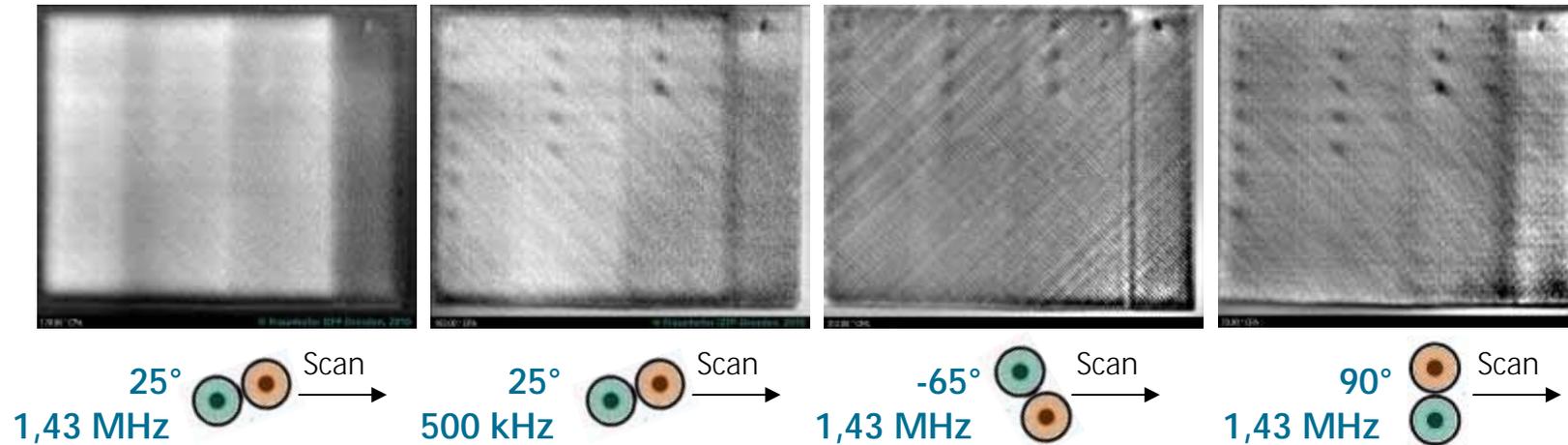
- Die Faserstruktur in CFK ist elektrisch leitfähig.
- Mittels Induktion wird im CFK ein Wirbelstromfluss angeregt und das Gegenfeld gemessen.
- Aus der lokalen Änderung elektrischer Parameter können Informationen über den Werkstoff abgeleitet werden.
- Gute Prozesskompatibilität, geringe Kosten

3. Beispiel Testkörper vierstufiger Keil

Röntgen, CT



3. Beispiel Testkörper vierstufiger Keil: Wirbelstrom



- Prüfung durch die Rückseite erkennt alle Fehler
- Textur und Faserorientierung erkennbar

Digitale
Bildverarbeitung

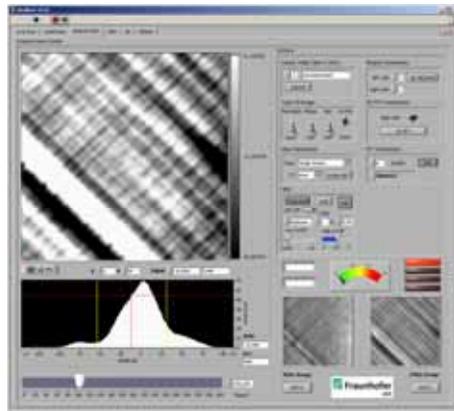
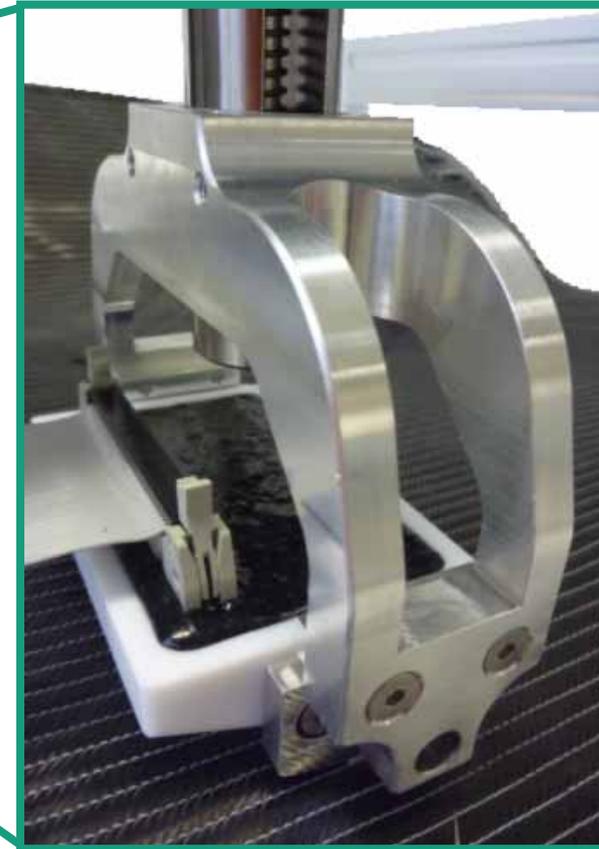
Optimiertes Bild

4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme

TableTop
Cartesian
Roboter



Array probe for NCF
or woven fabrics



Acquisition and Analysis Software



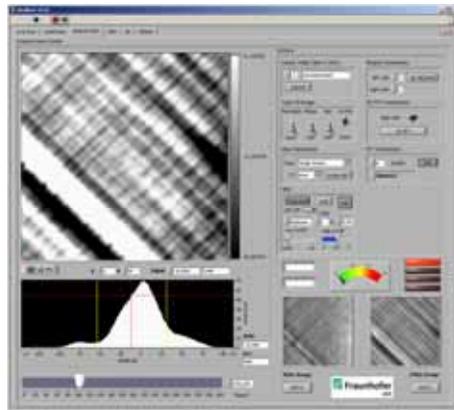
Modular Eddy Current Device

4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme

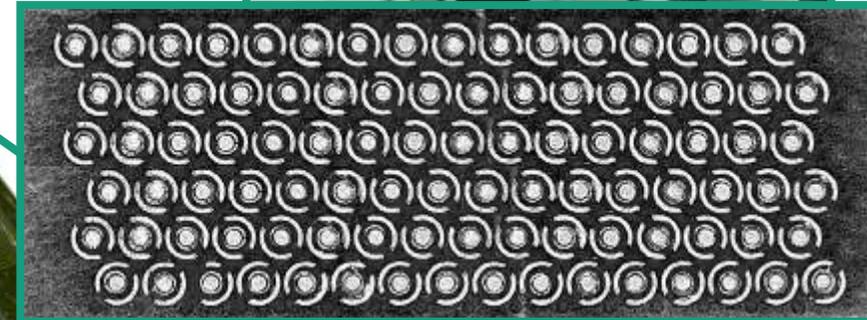
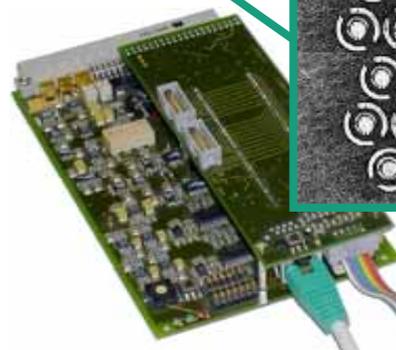
TableTop
Cartesian
Roboter



Array probe for NCF
or woven fabrics



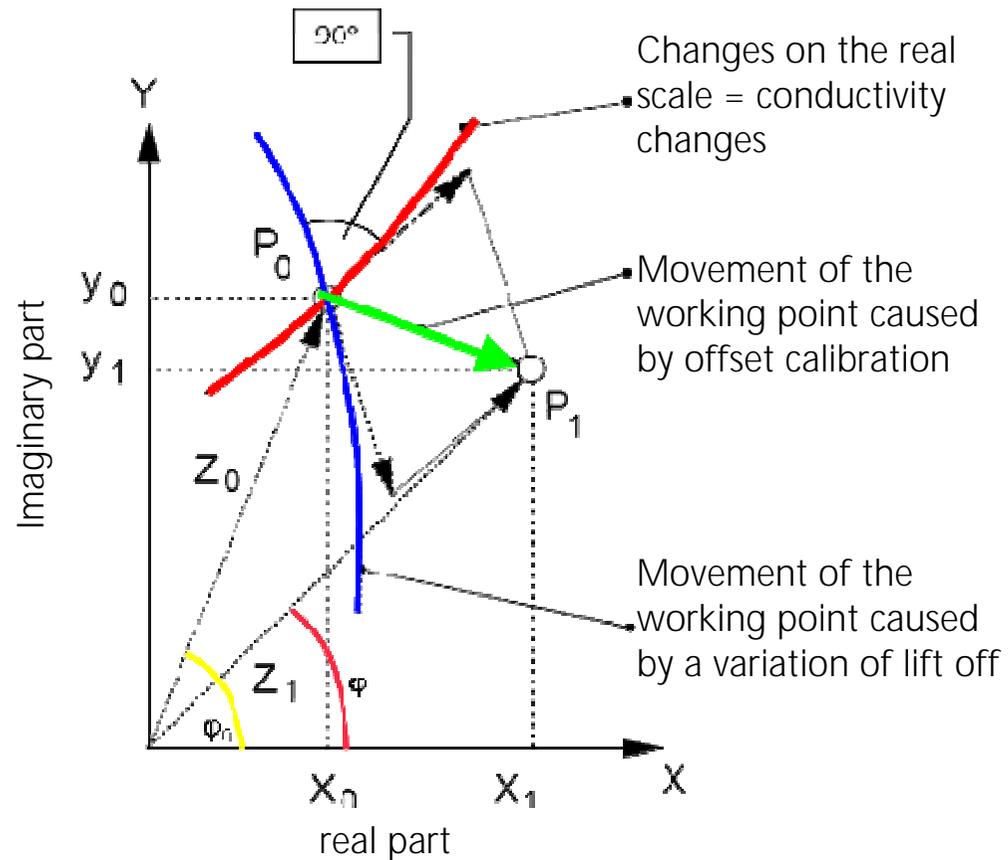
Acquisition and Analysis Software



Modular Eddy Current Device

4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme

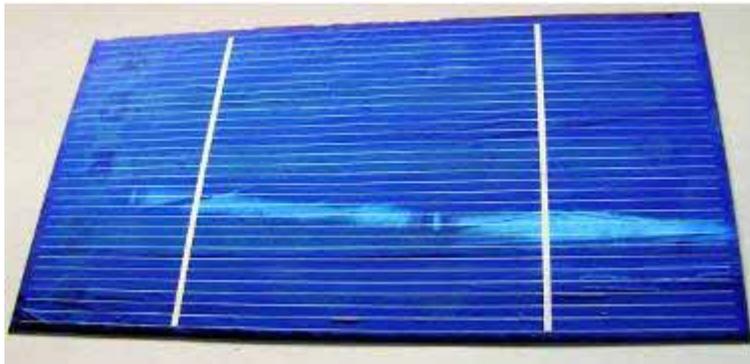
- based on phase selection for monofrequent excitation
- characteristic point in the complex impedance diagram (imaginary part, real part)
- phase angles φ_0 and φ_1 will be rotated for lift off compensation
- separation of Ohmic, capacitance or inductivity parameters possible



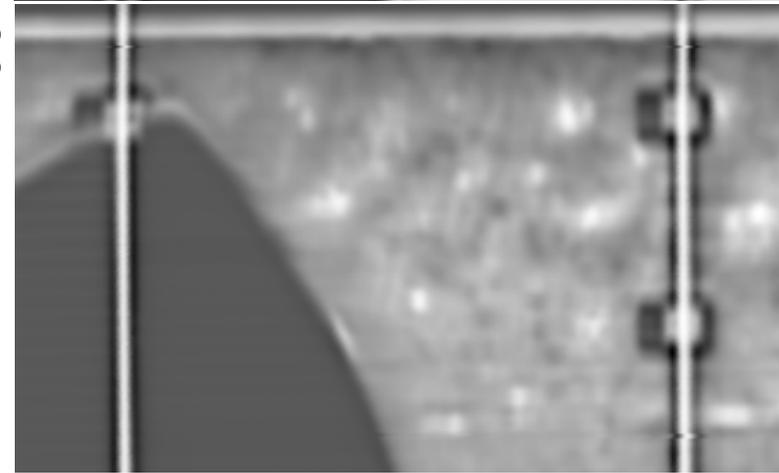
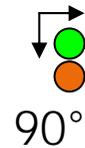
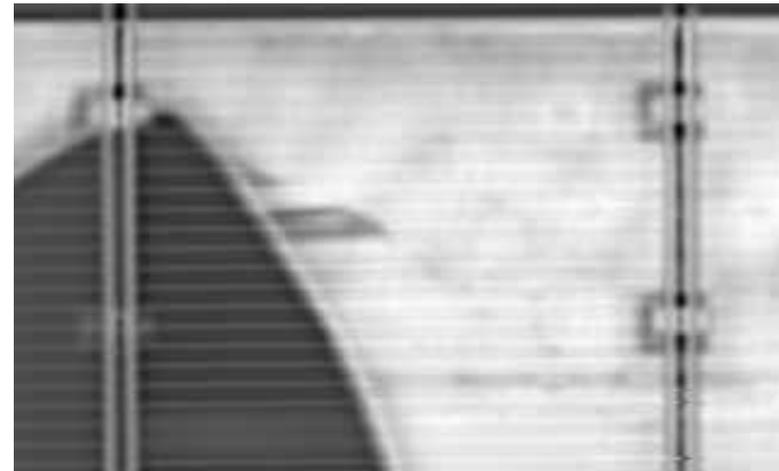
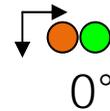
4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme

Hochauflösende
Wirbelstromprüfung an
Solarzellen

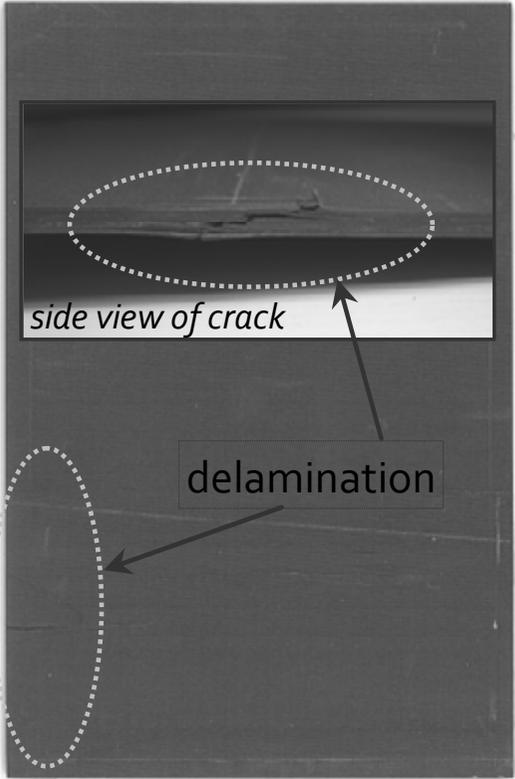
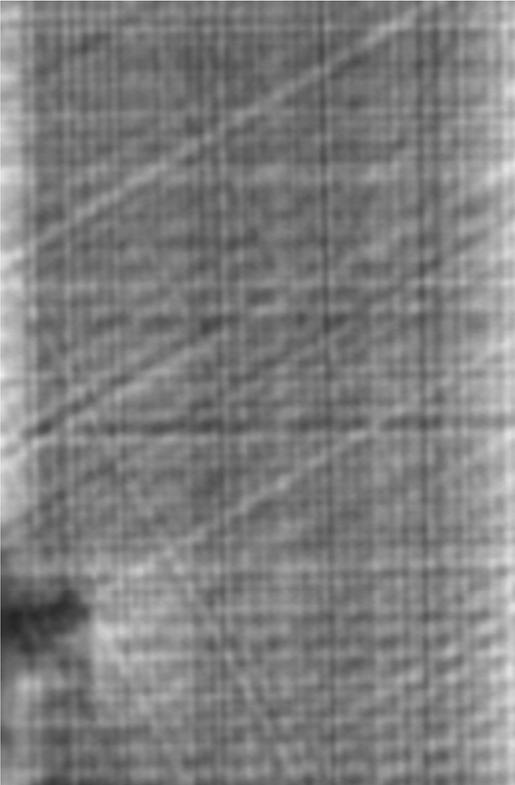
(Polycrystalline Si-Cell)



- Bestimmung von lokalen Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit
- Änderungen in der dielektrischen Eigenschaften



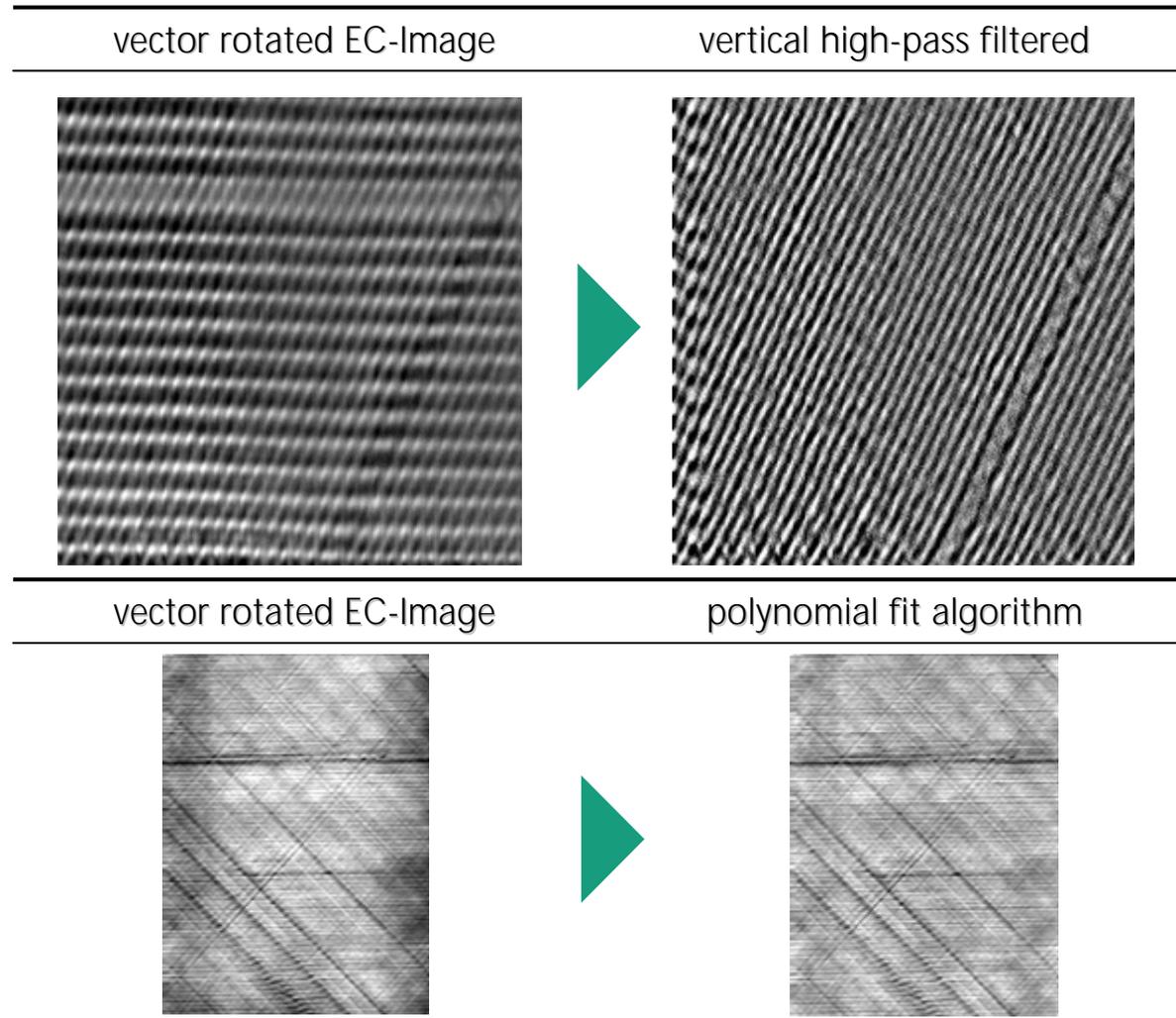
4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme

Sample	Picture of Delamination	EC-Image (front)
#8		

Delamination in
einem 12-lagigen
Bauteil

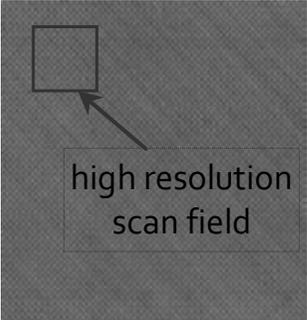
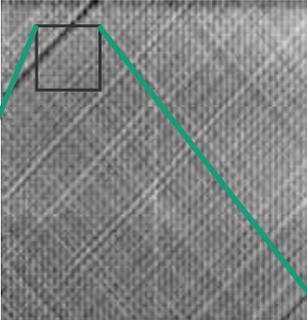
Sample Size (l*w*h)
[mm]: 100*150*3

4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme – Filteralgorithmik

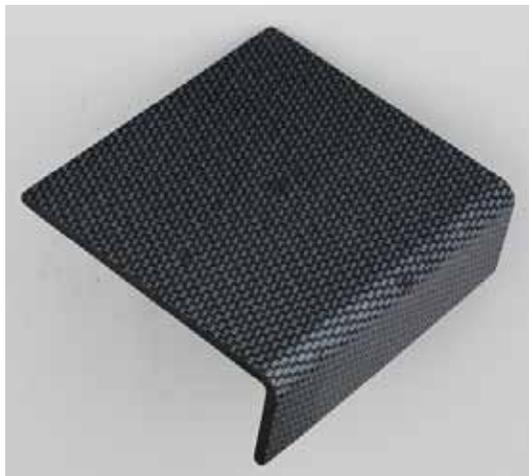


Sequenced horizontal and vertical high-pass filtering has a conformable effect on the resulting image like polynomial fitting.

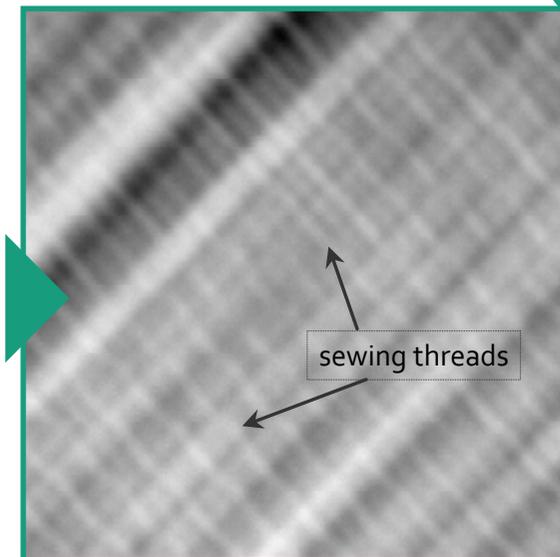
4. Wirbelstrombasierte Prüfsysteme – Prüfung von PrePacks

Sample	Picture (1 st layer)	Picture (3 rd layer)	EC-Image (front)	EC-Image (rear)
#4	 missing bundle	 high resolution scan field	EC-Image of 1 st layer not aquired	

3 layer RCF with missing bundles in the 2nd invisible layer - Sample Size [mm]: 265*275

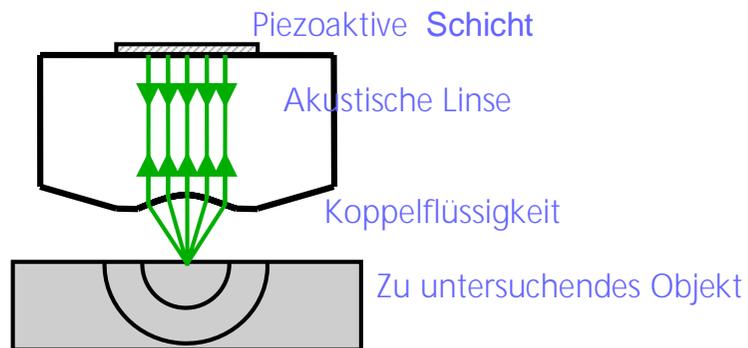


High resolution EC-Image.
Even sewing threads are visible.
Sample size [mm]: 50*50; 75 μ m resolution



5. Ultraschall – Hochauflösende Sensoren

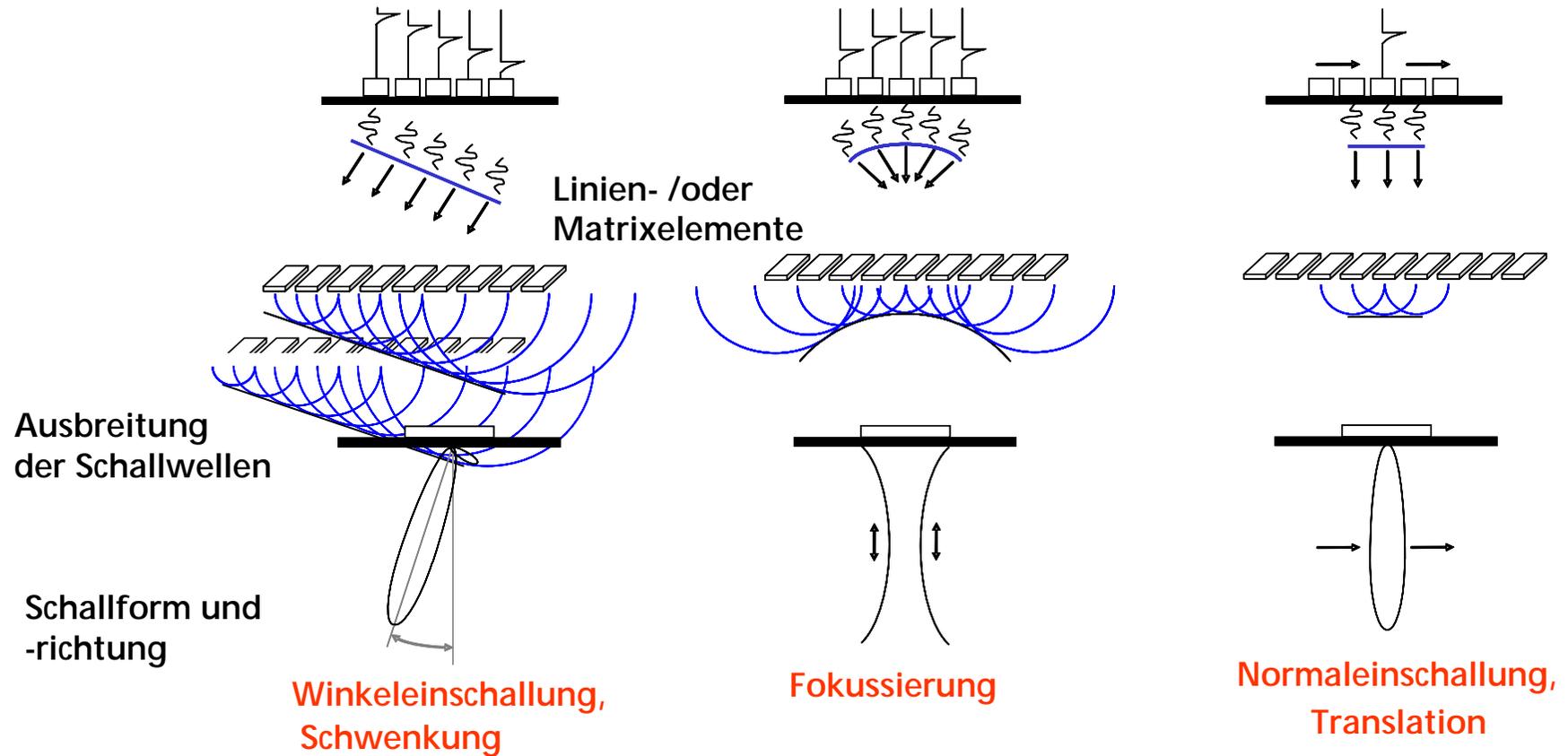
- Scanning Acoustic Microscopy (SAM)
- Prüffrequenzen 10-400 MHz (1-2 GHz)
- 2-dimensionale Darstellung im B- oder C-Bild
- Neuer Ansatz 3-D-SAFT Rekonstruktion



Prüfkopf Frequenz (Hz)	100 M	200 M	400 M	1,0 G	2,0 G
Auflösung (μm)	8	4	2	0.8	0.4
Eindringtiefe (bei Metallen) (μm)	60~100	40~80	30~60	15~25	2~4

5. Ultraschall – Phased Array

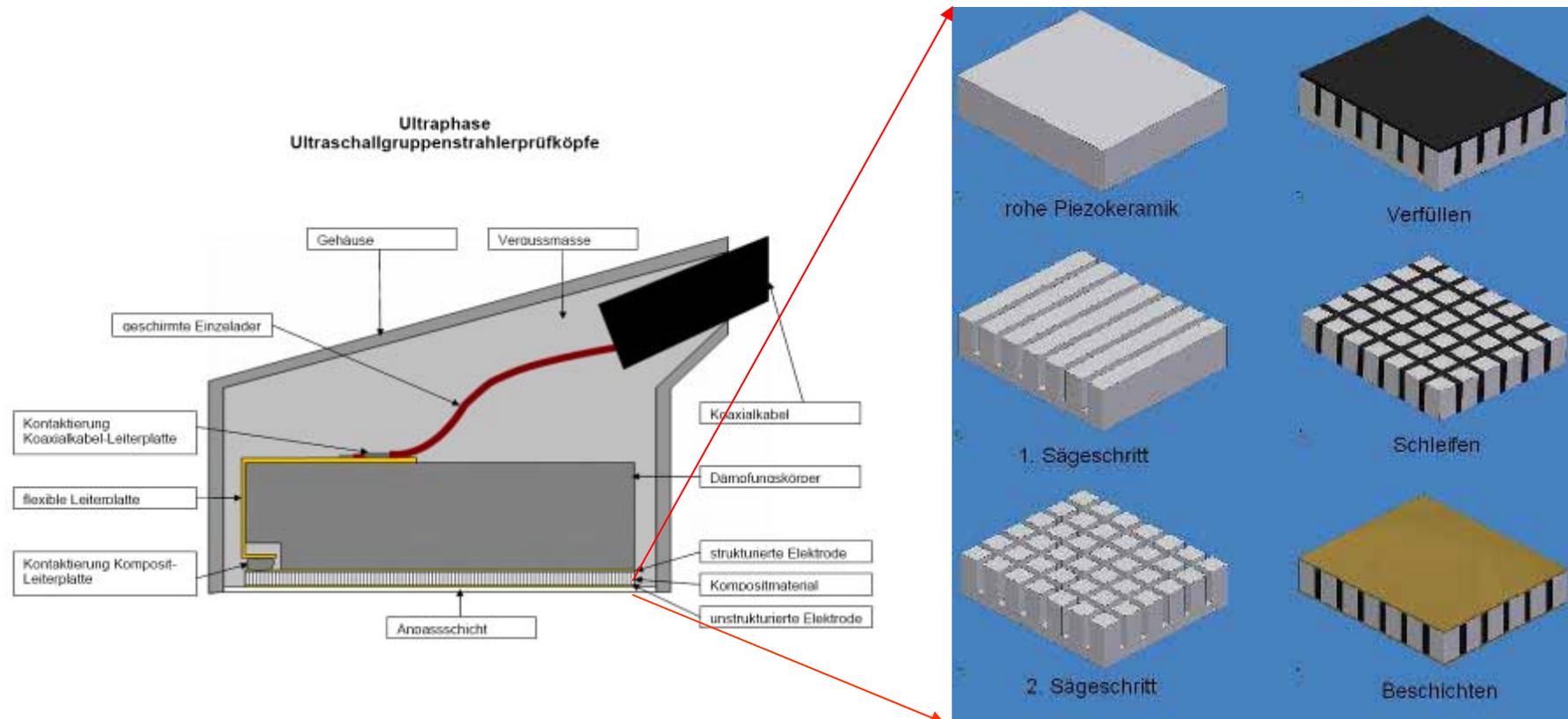
Zeitverzögerte
elektr. Ansteuerung



5. Ultraschall – Phased Array

Entwicklung von Kompositschwingern

Technologische Grenze ~20 MHz



5. Ultraschall – Prüfanwendungen in der Elektronik

Transducerdesign – neue Herausforderungen

f	In MHz	5	10	200	500	1000
p	in mm	0,62	0,4	0,05	0,02	0,01
d	in μm	400	200	28,5	11,4	5,7
b	in mm	9,92	6,4	0,8	0,32	0,16
l	in mm	10	6,4	0,8	0,32	0,16

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad p_{\max} = \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_{S,\max})} \quad p_{\max} = \frac{\lambda}{2}$$

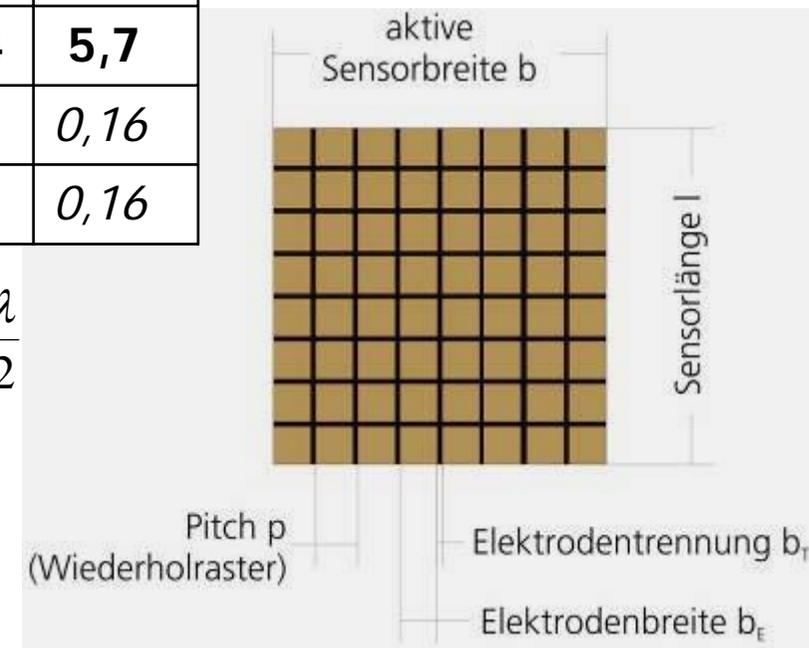
λ – Wellenlänge bei Frequenz f

d – Schwingerdicke

c – Schallgeschwindigkeit

$\theta_{S,\max}$ – maximal möglicher Schwenkwinkel

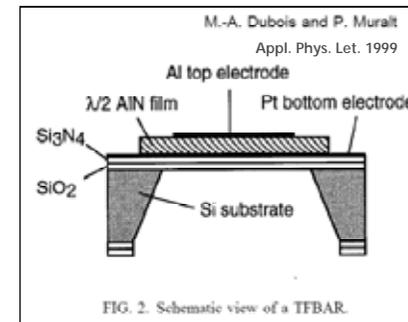
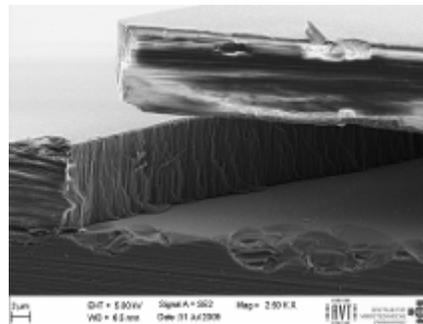
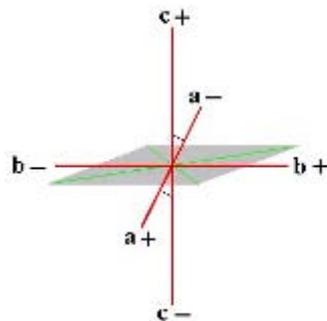
p – Wiederholraster



5. Ultraschall – Hochfrequenzarrays mit piezoelektrischen Dünnschichten

Neuer Lösungsansatz

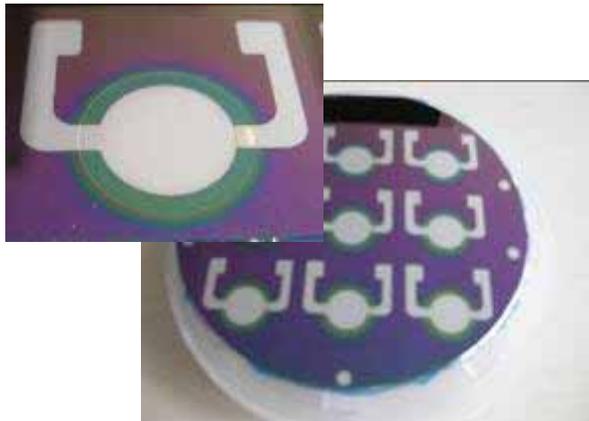
- Auftrag von dünnen Schichten mit piezoelektrischen Eigenschaften, aus Literatur bei Resonatoren seit 1990er Jahren bekannt
- Schichtmaterialien: AlN, ZnO
- Trägermaterial Si-Wafer, Glas, Saphir, o.ä.



- Bei c-Achsen-Orientierung der Kristallstruktur besteht eine akustische Vorzugsrichtung, ähnlich wie bei strukturierten PZT-Kompositmaterialien.
- AlN-Dünnschichten besonders gut geeignet:
 - hoher spez. elektrischer Widerstand, hohe Durchbruchspannung
 - geringe dielektrische Verluste

5. Ultraschall – Konzeption und Präparation einer Teststruktur

- Einzelement-Sensoren
- Substrat: Si-Wafer (1 0 0)
- Schichtdicke AlN: 10 μm
- \varnothing AlN-Schicht: 13 mm
- \varnothing Elektroden: 10 mm



- Optimierung Abscheidungsparameter
- Maximal mögliche Schichtdicke
- Haftfestigkeit
- Innere Spannungen
- Untersuchte Substratmaterialien (Si, Glas, Al_2O_3 , Quarzglas, Al)
- Charakterisierung des elektrischen und elektromech. Verhaltens der Sensoren

