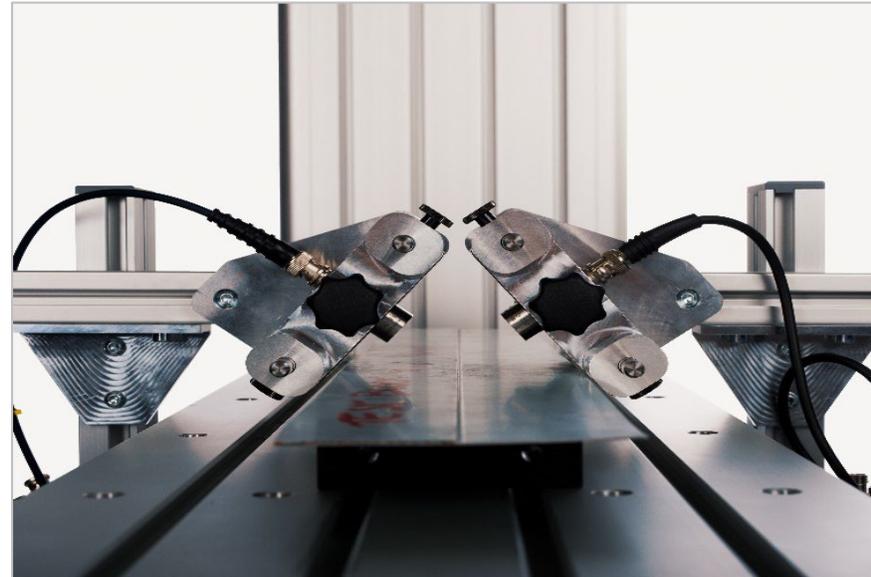


SONOTEC

Ultrasonic Solutions – Made in Germany

Gastvorlesung: Zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall an Faserverbundstrukturen

Tobias Gautzsch, SONOTEC GmbH, Halle (Saale)



Gliederung

1. Vorstellung
2. Grundlagen der Ultraschallprüfung
3. Grundlagen Phased-Array und TFM Technologie
4. Grundlagen Luftultraschall
5. Anwendungsbeispiele
 1. Zerstörungsfreie Prüfung an CFK mit Impaktschaden
 2. Prüfung von komplexen CFK-Bauteilen mit Phased-Array und Time-Reversal
 3. Berührungslose Prüfung von monolytischen FKV und Sandwichverbunden mit luftgekoppelten Ultraschall

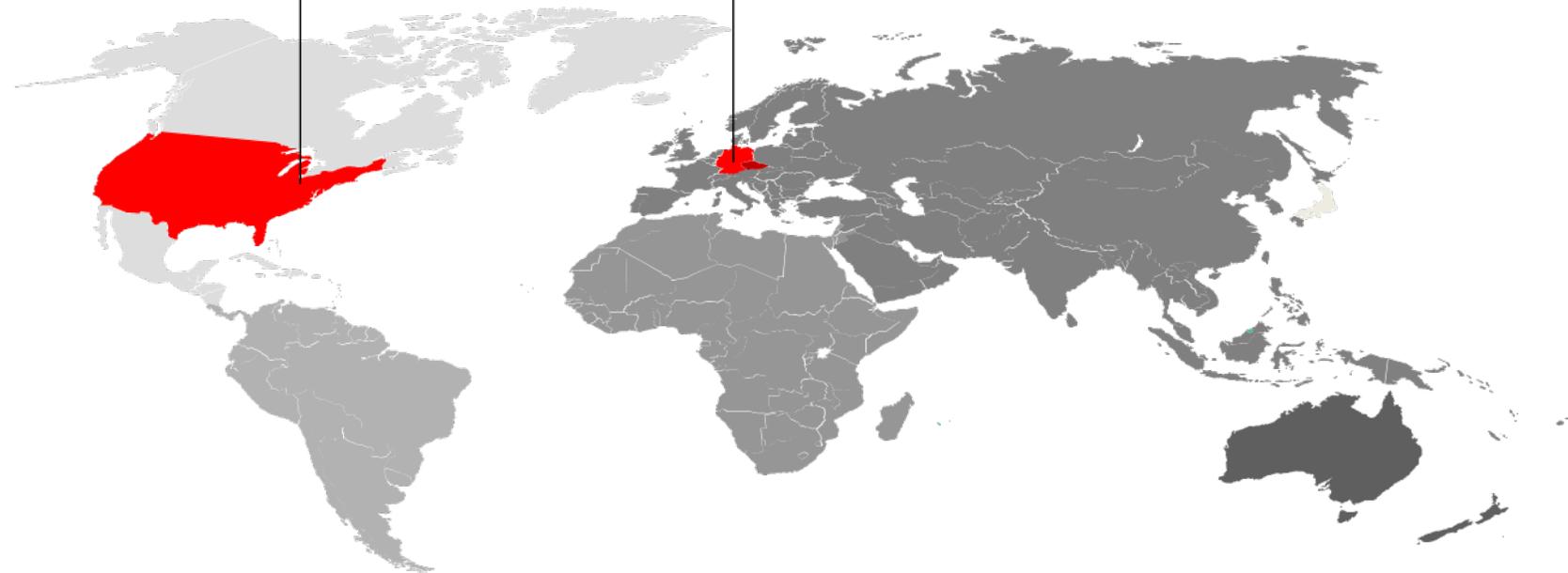


Firmenvorstellung SONOTEC

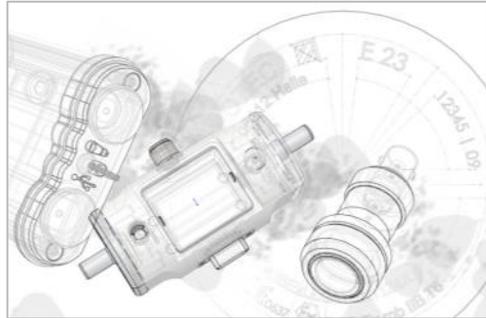
SONOTEC US

SONOTEC Germany

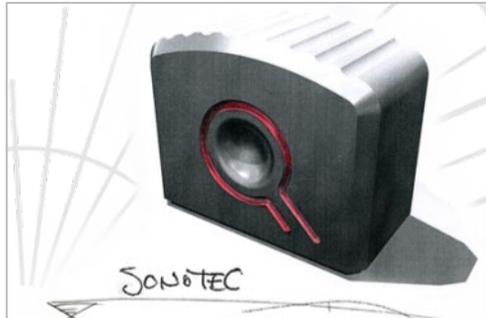
Headquarter (über 130 Mitarbeiter)



Ultraschallspezialist seit 1991



- ▶ Forschung und Entwicklung
- ▶ Optimierte & kundenspezifische Lösungen



- ▶ Produktion in Halle Saale
- ▶ Schnelle Entwicklung von Prototypen



- ▶ Weltweiter Verkauf
- ▶ Weltweite Unterstützung
- ▶ 40 Handelspartner

**made
in
Germany**

Business Units



▀ Vorbeugende Instandhaltung



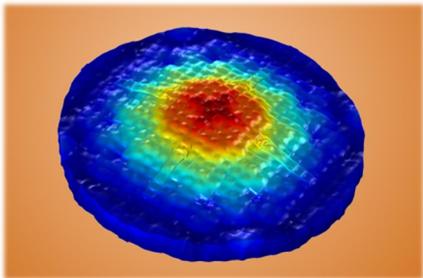
▀ Nicht-invasive Flüssigkeitsüberwachung



▀ Zerstörungsfreie Prüfung

- Gründungsmitglied der Zuse-Gemeinschaft - Zusammenschluss industrienaher Forschungseinrichtungen
- Standort: Halle an der Saale
- Gegründet 2010 aus ZIM-Netzwerk NetUS
- Gesellschafter: 5 KMU aus Sachsen-Anhalt und Thüringen
- Mitglied im Composite United (CU-Ost)

Akustische
Grundlagen und
Technologie



Medizintechnik



Zerstörungsfreie
Materialprüfung



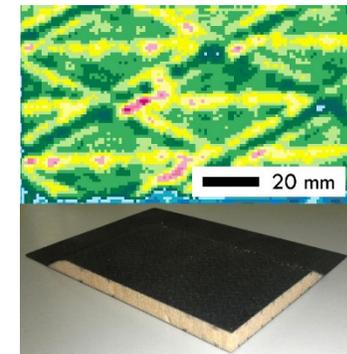
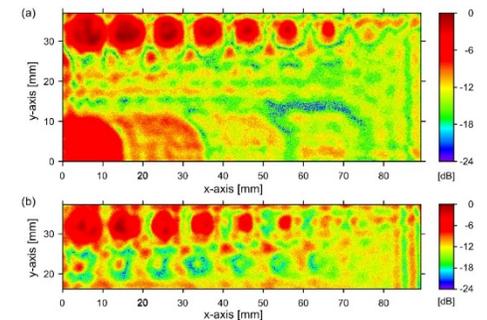
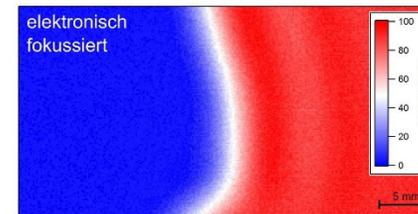
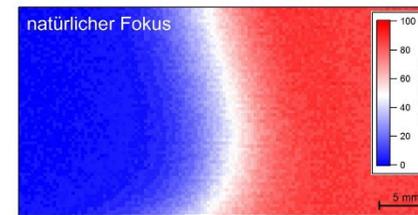
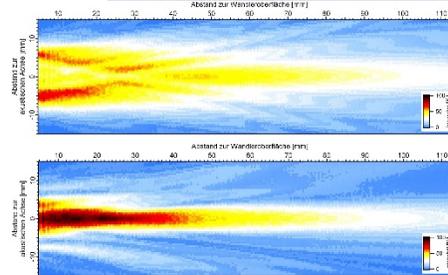
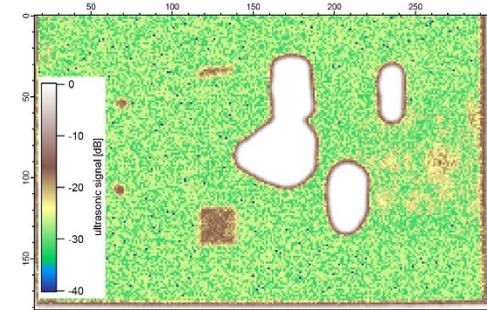
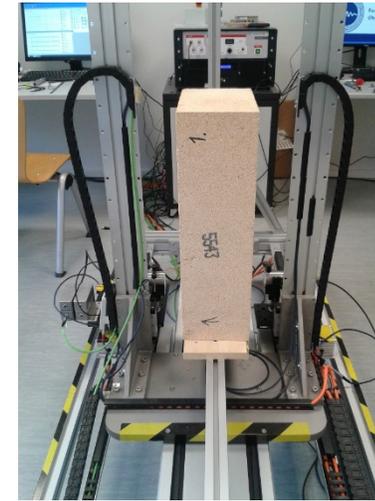
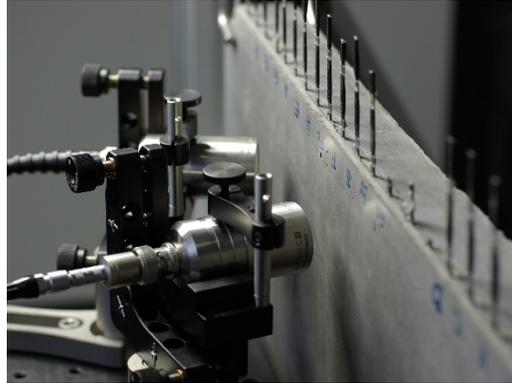
Aus- und
Weiterbildung



Tätigkeitsfelder

Zerstörungsfreie Materialprüfung

- Entwicklung von Ultraschallwandlern, Prüftechnik und Prüfverfahren
- Koppelmittelfreie Prüfung, z.B. von Leichtbaumaterialien (CFK, GFK, Holz, Verbundwerkstoffe)
- Phased Array Technik, TOFD
- Prüfverfahrensauswahl
- Machbarkeitsstudien



TOP△Z¹⁶
TOP△Z³²
TOP△Z⁶⁴

Zetec: The Inspection Advantage



Ultraschall Technologie



Wirbelstrom Technologie

- Globaler ZFP-Technologieführer aus Kanada mit fast 50 Jahren Erfahrung
- Innovation, die Ergebnisse liefert - Leistung, Produktivität, Genauigkeit
- Vollständiges Produktportfolio für Kunden weltweit in: Transport, Energieerzeugung, Fertigung sowie Öl und Gas
- Deutschlandvertrieb durch  SONOTEC®

A division of:



Forschungszentrum
Ultraschall



Ultrasonic Solutions | Made in Germany



Phased Array Portfolio



TOPAZ 16



TOPAZ 32



TOPAZ 64



Dynaray 64/64 to 256/256



Zircon 32/128



Quartz
32/128 & 2x16/128

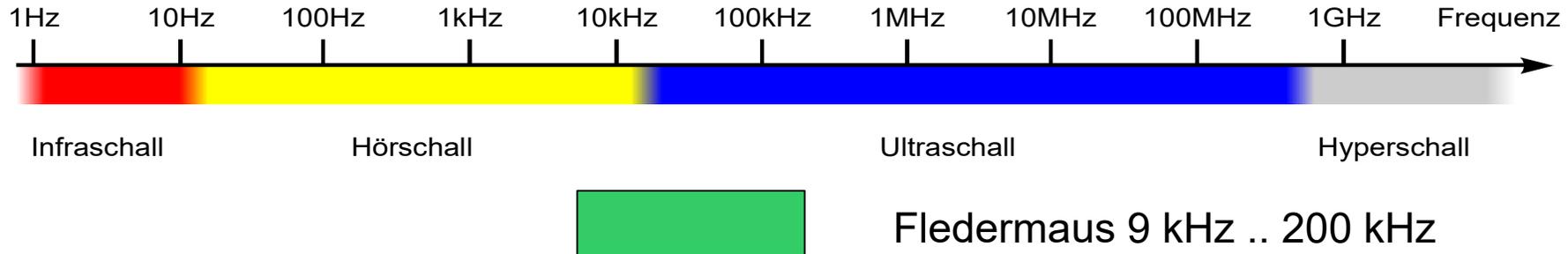
GRUNDLAGEN DER ULTRASCHALLPRÜFUNG



SCHALL, WELLENARTEN UND PRÜFMETHODEN



Spektrum des Ultraschalls



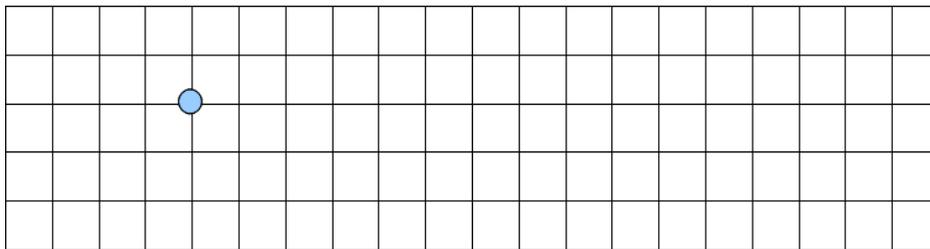
- ▶ Sonar/Unterwasseranwendungen 50 kHz ... 200 kHz
- ▶ Medizinische Diagnostik 1 MHz ... 40 MHz
- ▶ Zerstörungsfreie Prüfung (klassisch) 1 MHz ... 8 MHz ... 50 MHz
- ▶ Leistungsumschall 20 kHz ... 40 kHz

- ▶ Luftgekoppelter Ultraschall 20 kHz ... 1 MHz

Grundlagen

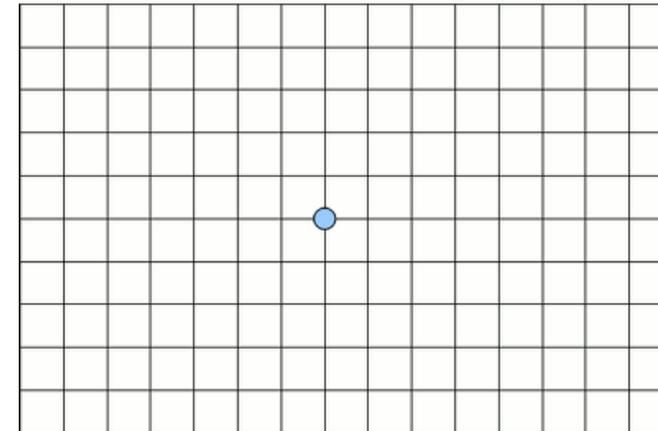
Longitudinalwellen

- ▶ Teilchen schwingen in Ausbreitungsrichtung der Welle
- ▶ In Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern



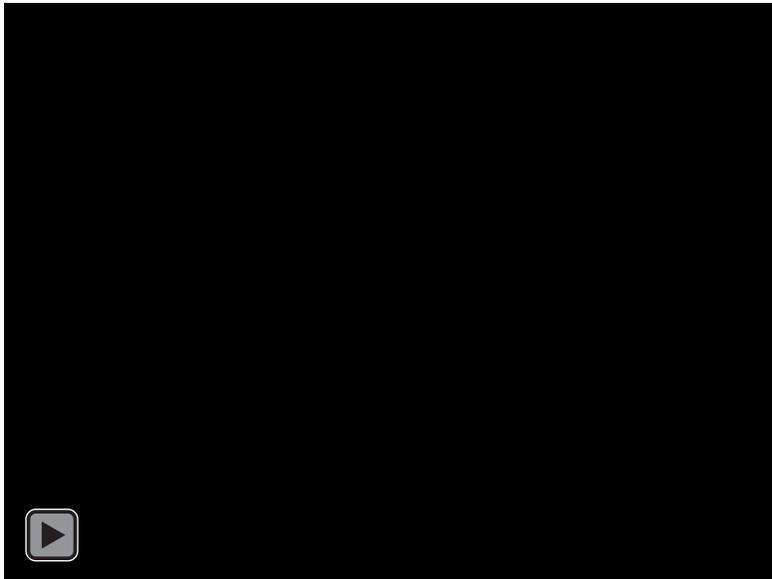
Transversalwellen

- ▶ Teilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle
- ▶ Nur in Festkörpern

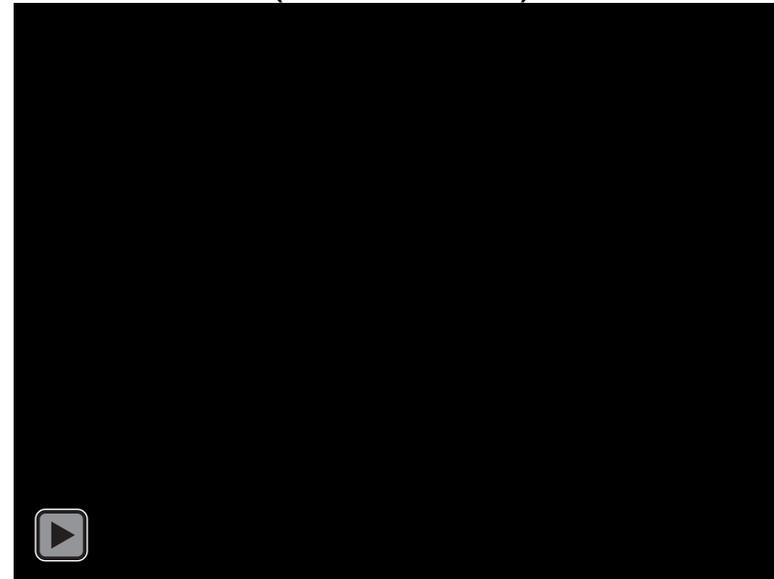


Wellen: L-Wellen & T-Wellen

Longitudinalwellen



Transversalwellen
(Scherwelle)

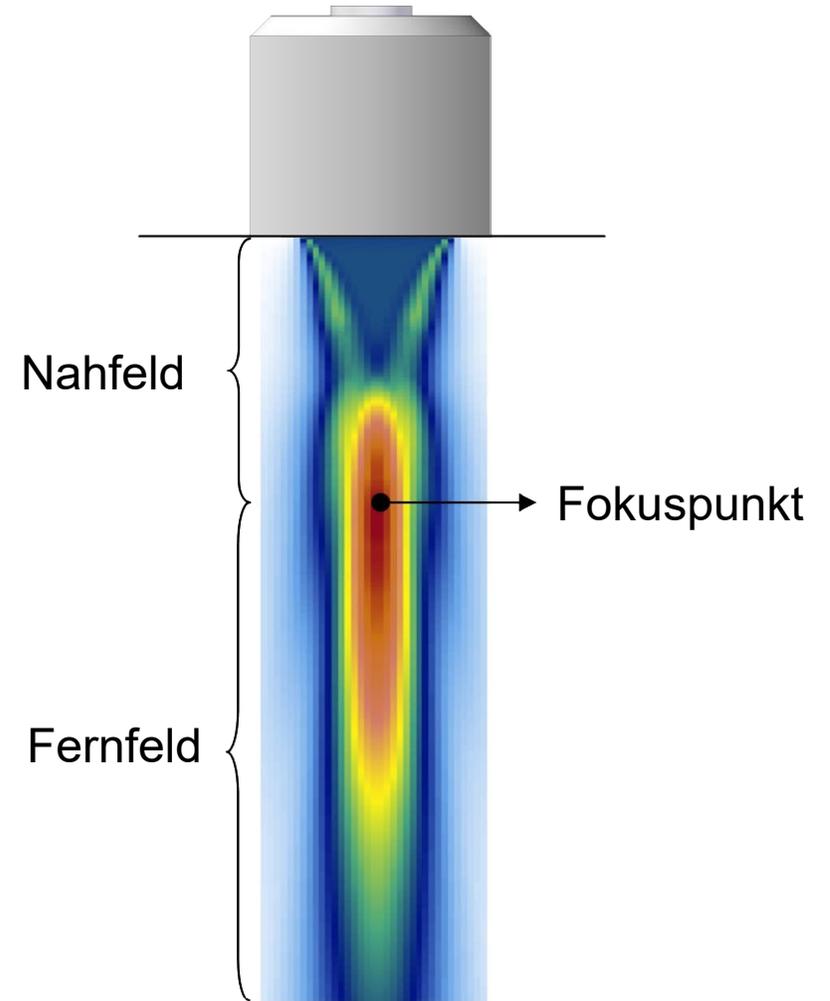
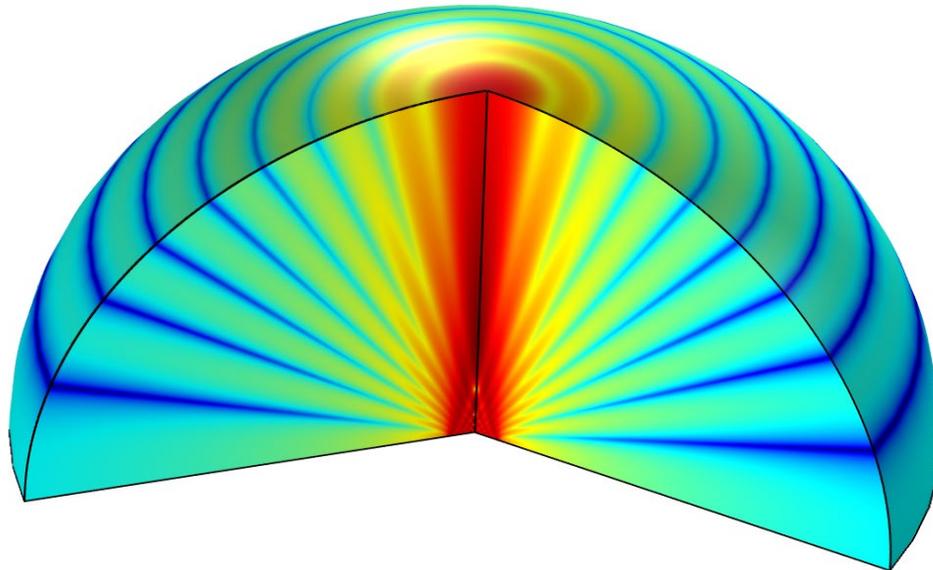


Schallgeschwindigkeit

- Ausbreitungsgeschwindigkeit c
 - $c = \lambda f$
 - c ... Schallgeschwindigkeit
 - λ ... Wellenlänge
 - F ... Frequenz
- Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig vom Medium
- Im Medium ändert sich die Wellenlänge, nicht die Frequenz
- Transversalwellen haben eine andere Schallgeschwindigkeit als Longitudinalwellen
 - Luft: 343 m/s
 - Wasser: 1484 m/s bei 20 °C
 - Stahl: $v_L \approx 5920$ m/s $v_T \approx 3230$ m/s
 - CFK: $v_{L\perp} \approx 3000$ m/s $v_{L\parallel} \approx 10000$ m/s

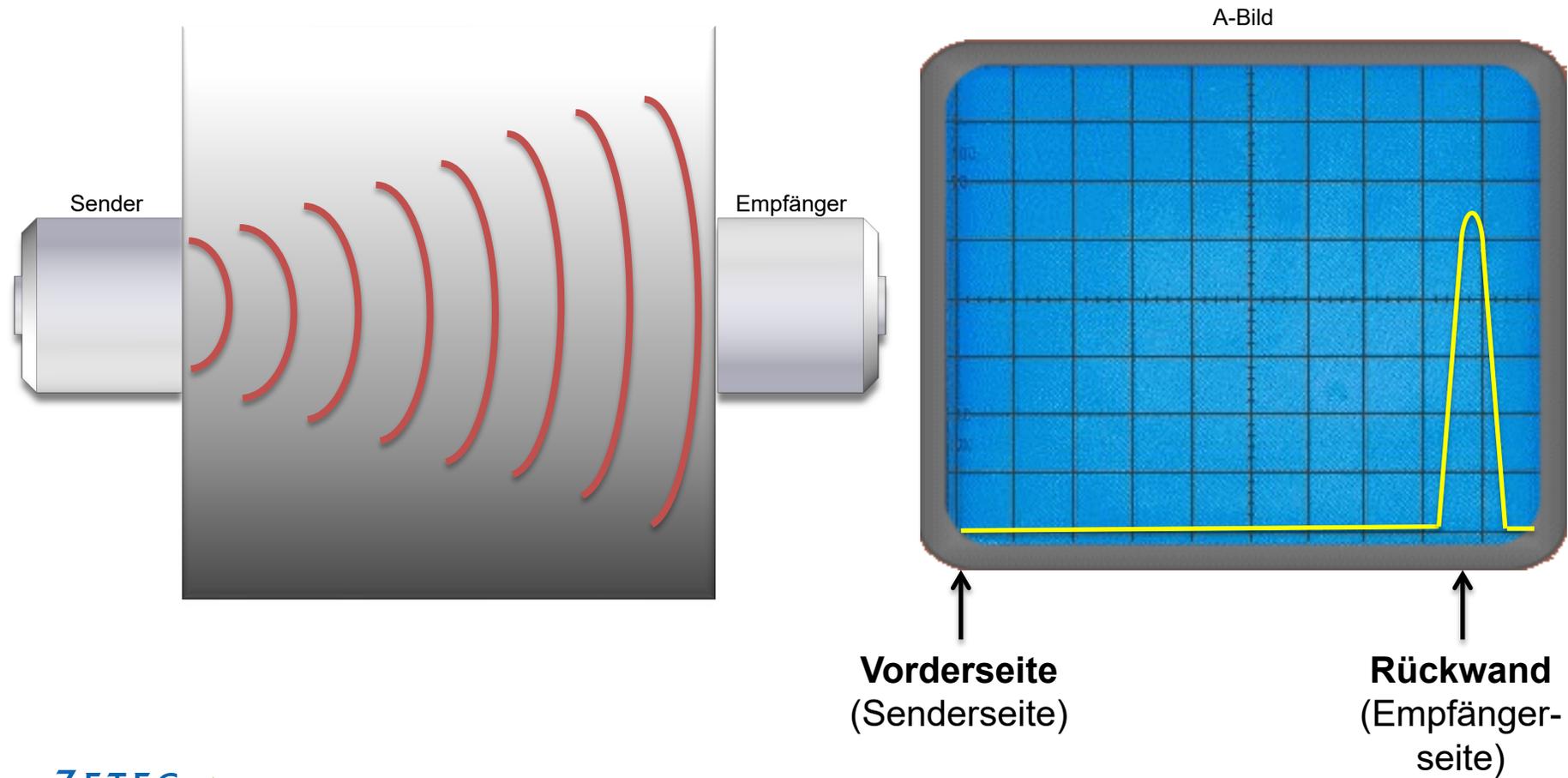
Schallfeld - Begriffe

- ▶ Akustische Achse
- ▶ Öffnungswinkel
- ▶ Nahfeld
- ▶ Fernfeld
- ▶ Fokusbereich
- ▶ Nebenkeulen



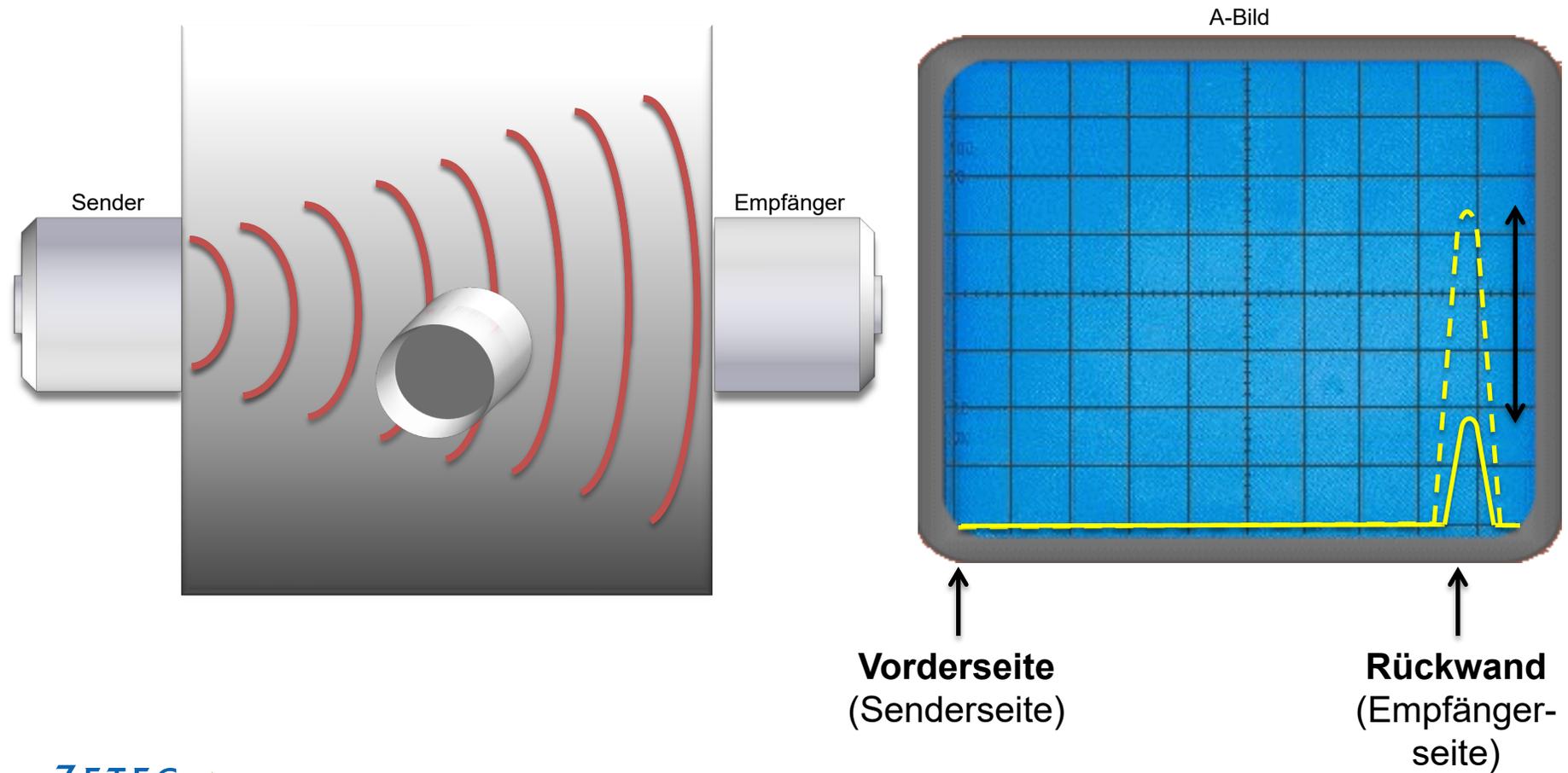
Transmissionsmessung

- Durchschallung



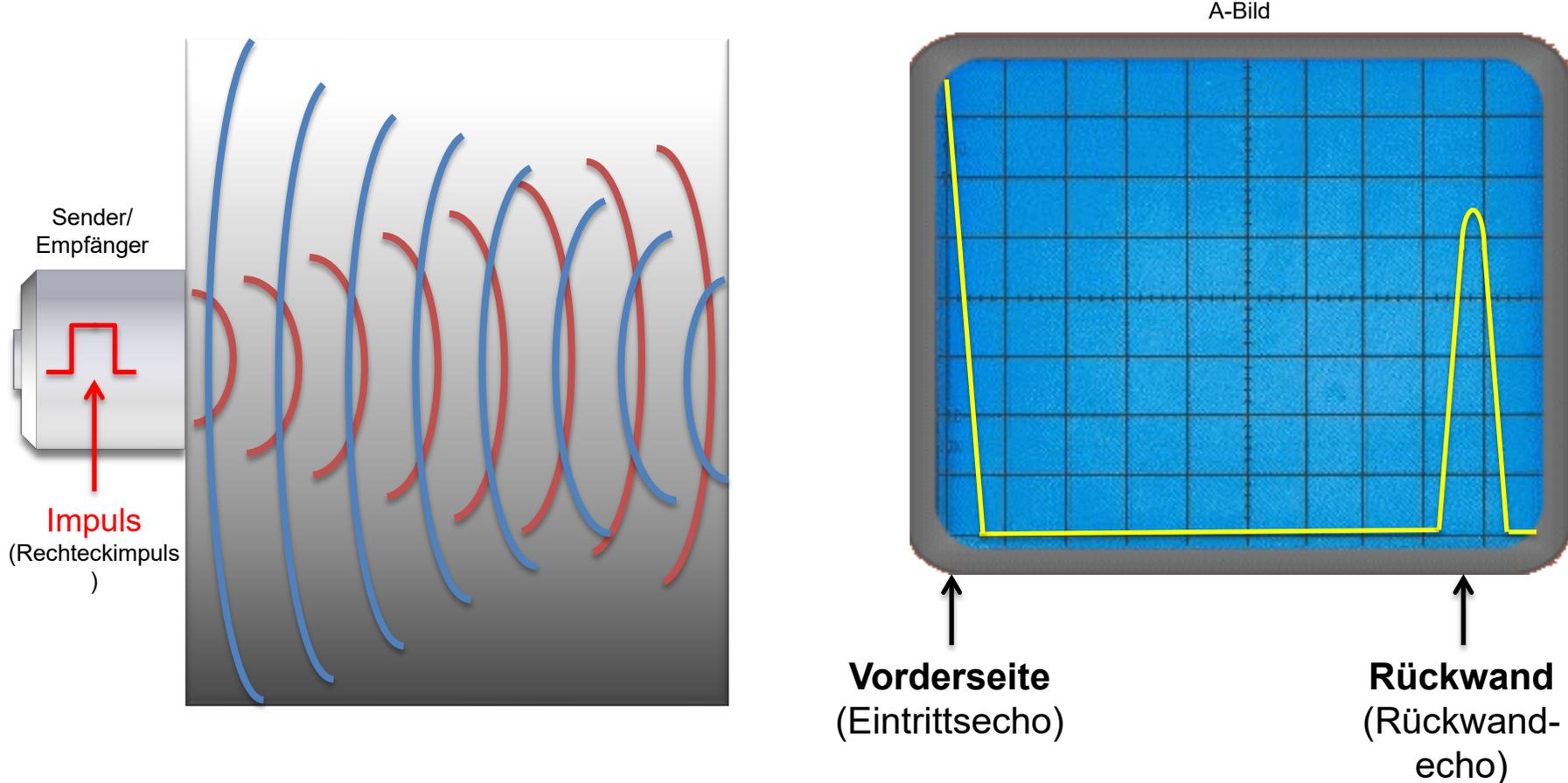
Transmissionsmessung

- Durchschallung



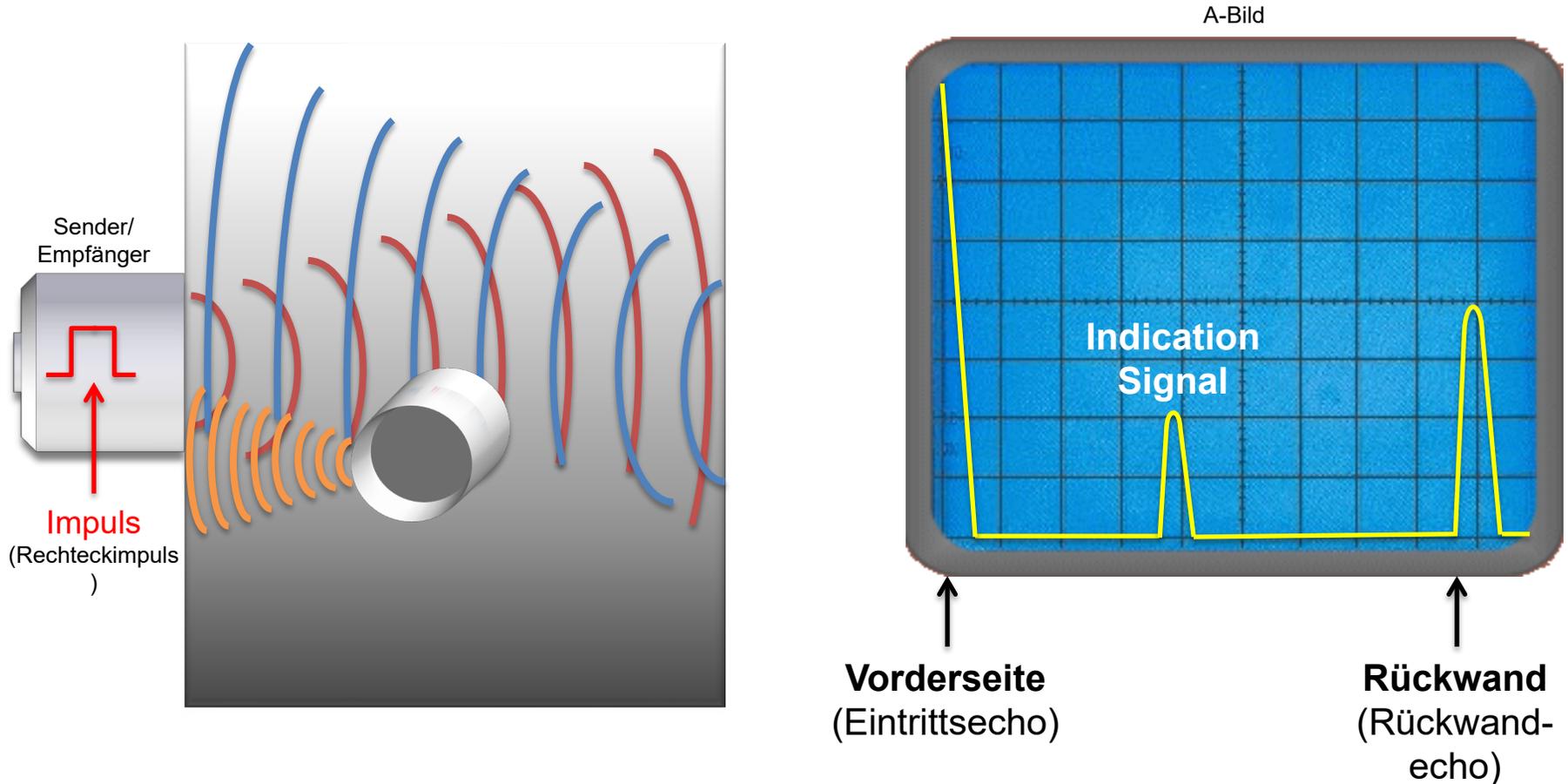
Puls-Echo Messung

- Puls-Echo



Puls-Echo Messung

- Puls-Echo



GRUNDLAGEN DER ULTRASCHALLPRÜFUNG



GRUNDLAGEN PHASED-ARRAY UND TFM TECHNOLOGIE



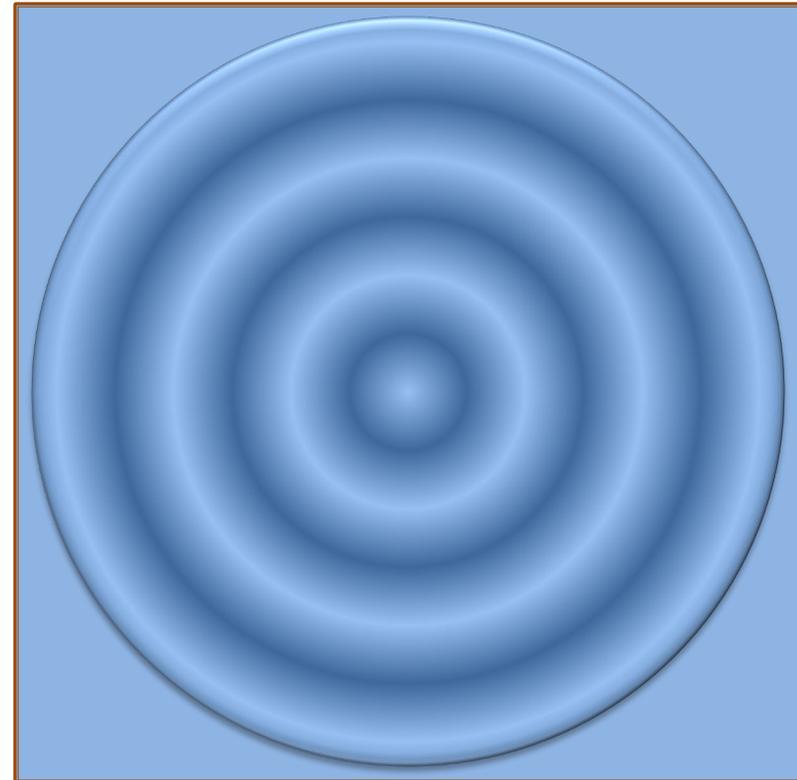
Ultraschallwellen

- Huygens Prinzip

Lassen wir den Ball fallen!

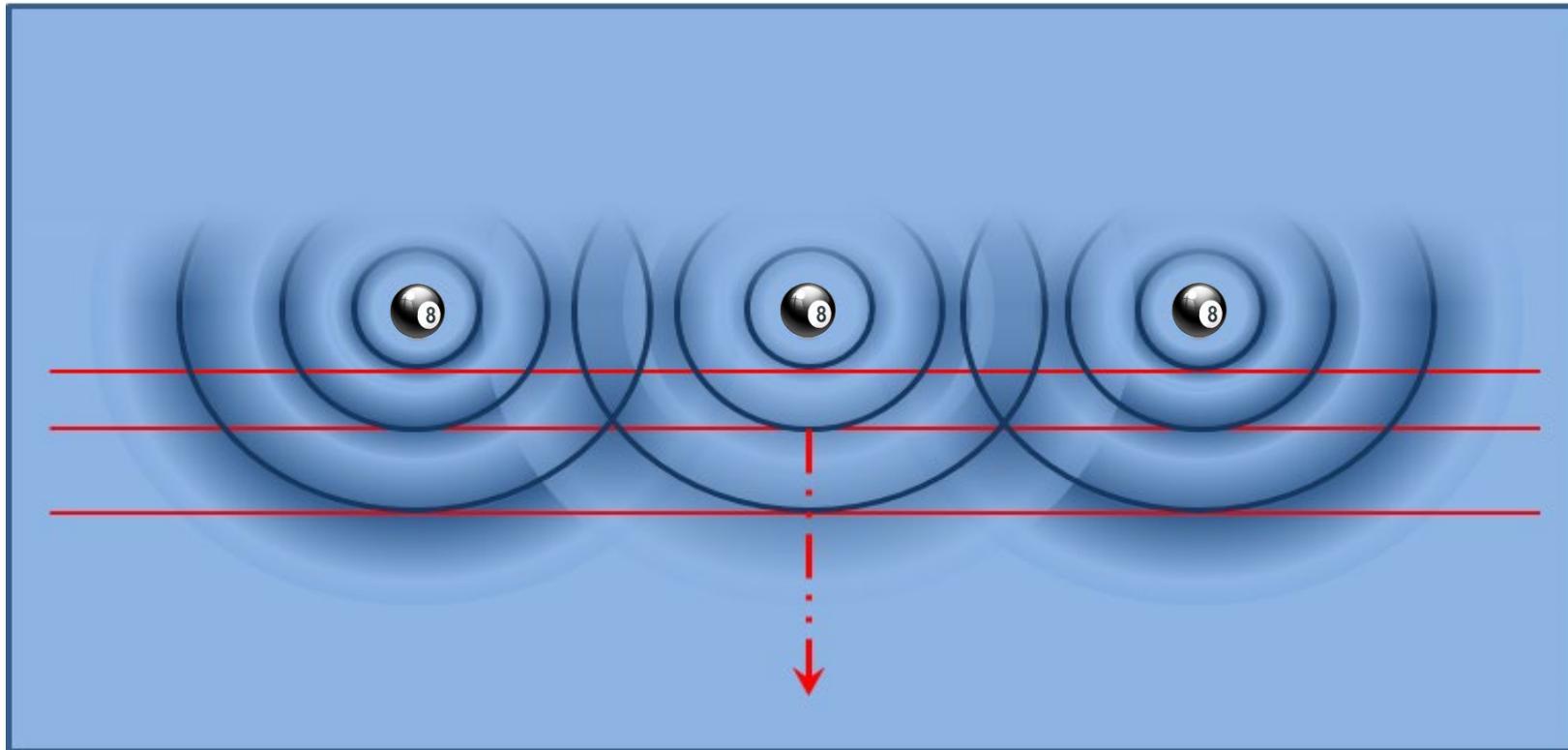


Kreiswellen!



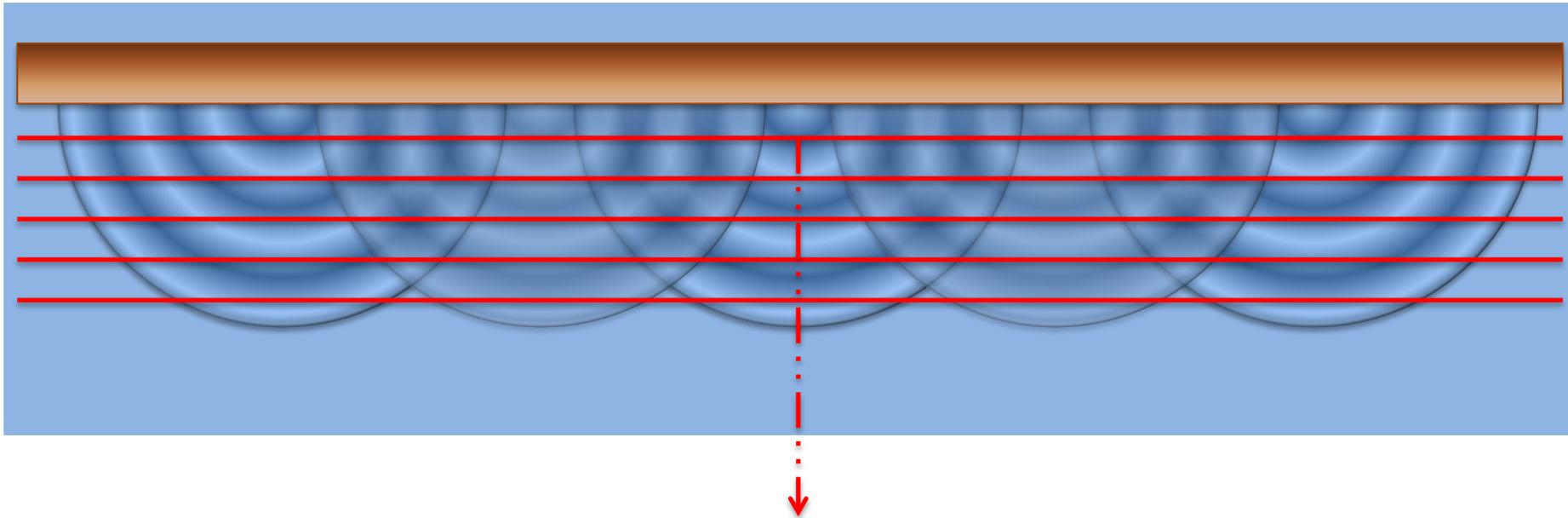
Ultraschallwellen

- Huygens Prinzip – **Mehrere Bälle!**



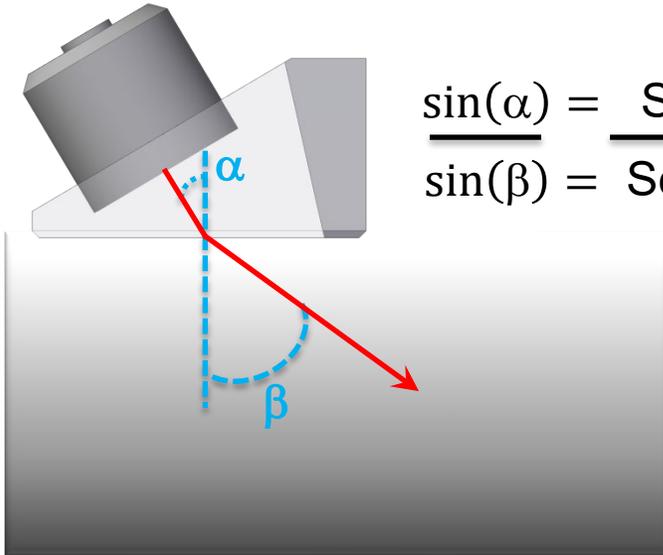
Ultraschallwellen

- Huygens Prinzip – Lassen wir ein großes Stück Holz fallen!



Ultraschallwellen

- Gesetz von Snellius*



$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit Medium 1 (Keil)}}{\text{Schallgeschwindigkeit Medium 2 (Material)}}$$

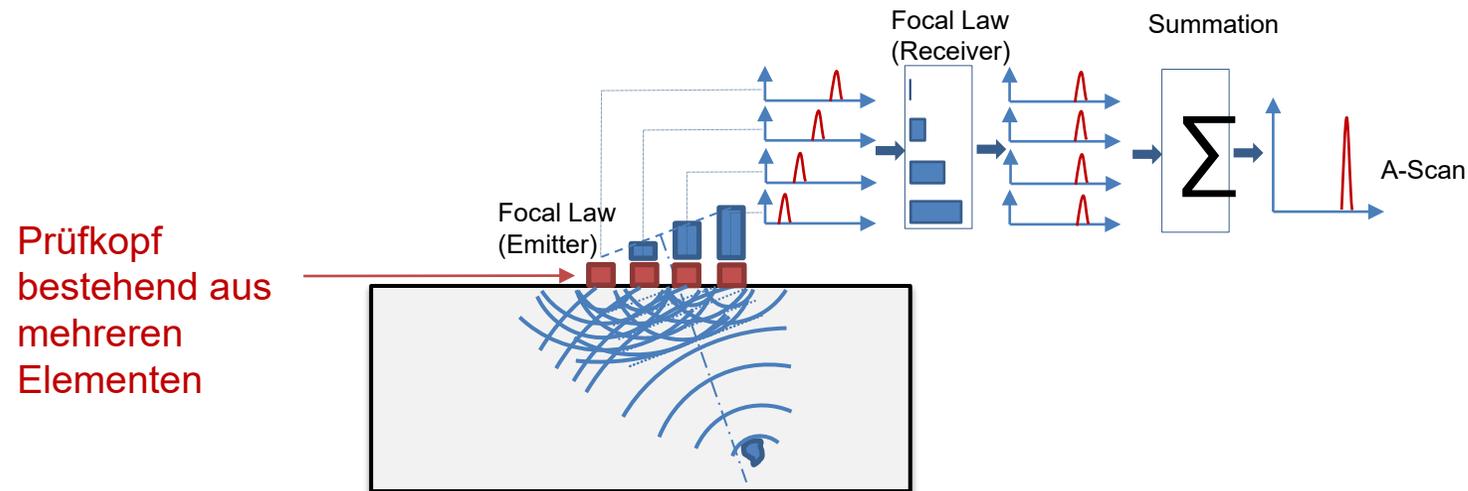
$$\sin(\beta) = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit Medium 1 (Keil)}}{\text{Schallgeschwindigkeit Medium 2 (Material)}}$$



*Willebrord van Roijen Snell (1621)

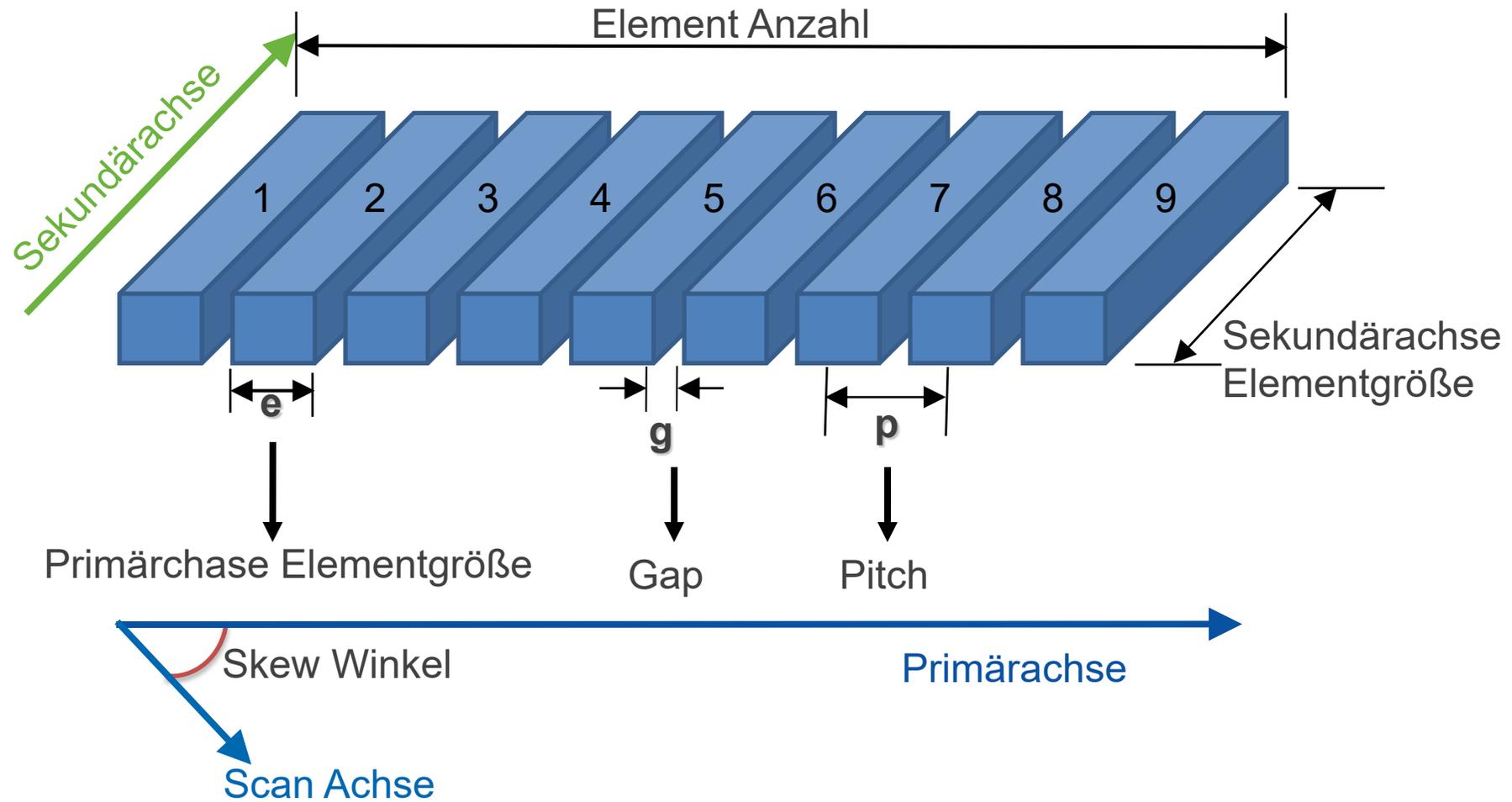
Funktionsweise Standard Phased Array

- Das Gerät steuert jedes einzelne Element zeitversetzt an mit einem definierten focal law
- Die Energie jedes einzelnen Elementes wird in einer Wellenfront aufsummiert



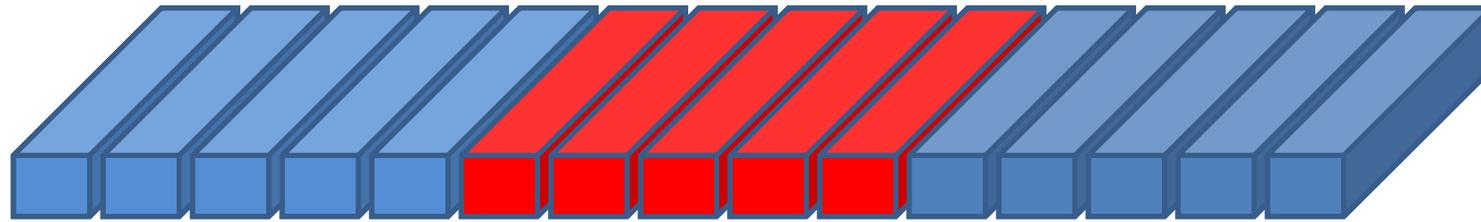
- Das Gerät digitalisiert jedes relevante Signal welches auf den einzelnen Elementen empfangen wird und summiert diese Signale entsprechend der focal laws.
- **Das Ergebnis wird als Summe in einem A-Scan Digitalisiert.**
- **Dieser Prozess wird für jeden Winkel wiederholt um einen Sektor oder Linear Scan zu ermöglichen**

PA-UT Prüfkopf Parameter



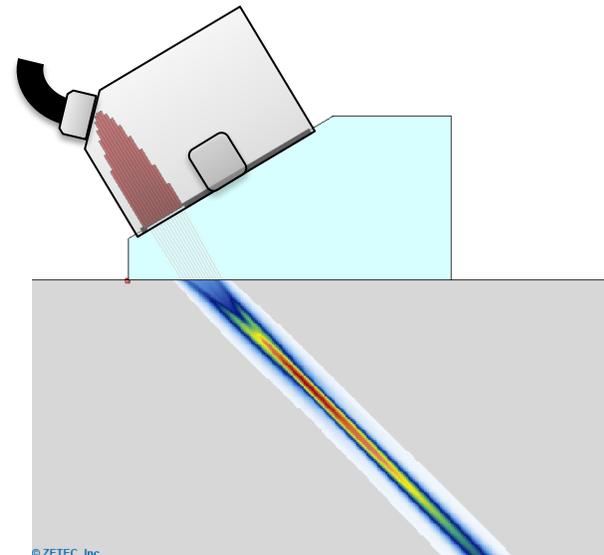
Phased Array Lösungen

- Aperturposition



Auswahl der Aperturposition – Strahlengang optimieren

Elektronisches oder lineares Scannen



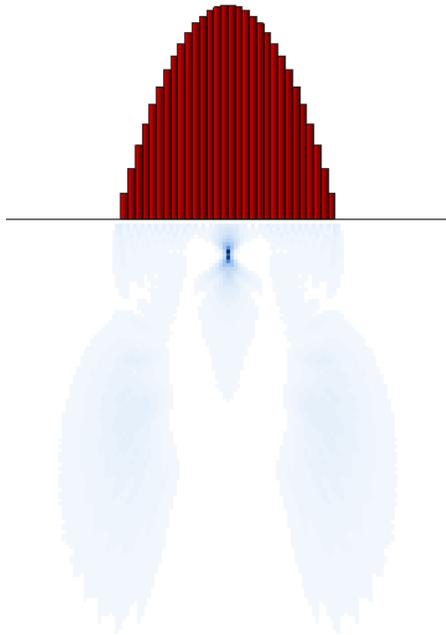
Phased Array Lösungen

- Fokussierung des Schallfeldes
 - Ist die **Möglichkeit die akustische Energie** in einem kleinen Brennpunkt zu fokussieren
 - Erlaubt die **Fokussierung in unterschiedliche Tiefen**, bei Verwendung eines einzelnen Prüfkopfes (Laufzeit vs. Prüfkopfposition)
 - Beschränkt auf das **Nahfeld (als Sender)**
 - Kann nur in der Primärachse mit einem 1D-Linear-Array genutzt werden

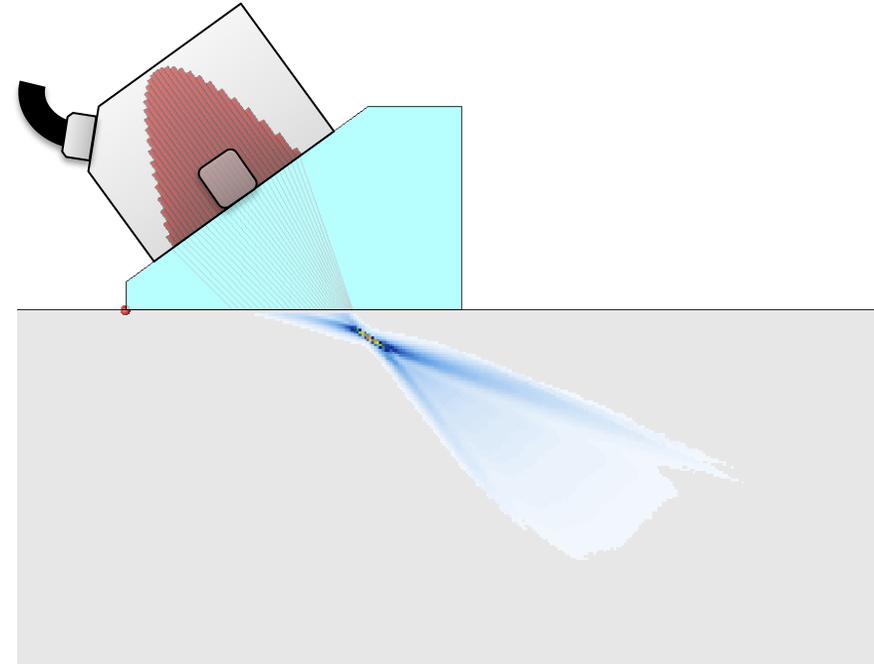


Phased Array Lösungen

- Schallfeld-Fokussierung



oder



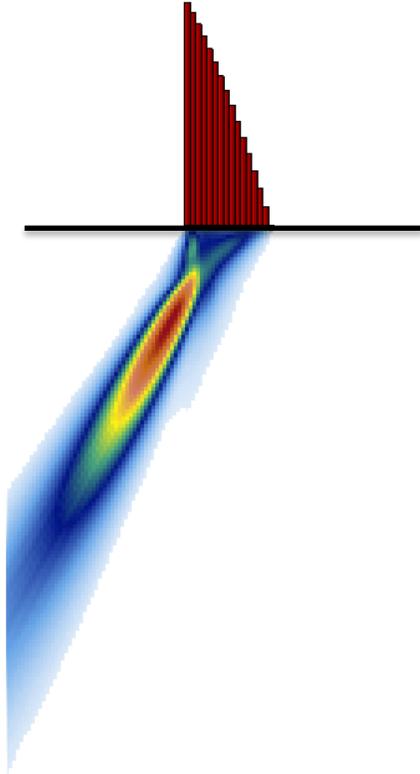
Phased Array Lösungen

- Schallfeldsteuerung
 - Möglichkeit zur Modifikation des Brechungswinkels
 - mehrere Winkelprüfungen mit nur einem Prüfkopf
 - Anwendung asymmetrischer (z.B. linearer) Fokusgesetze
 - Kann nur in der Primärachse mit einem 1D-Linear-Array genutzt werden
 - kann mit nur einem Prüfkopf L-Wellen und T-Wellen erzeugen (Longitudinal – Transversal)

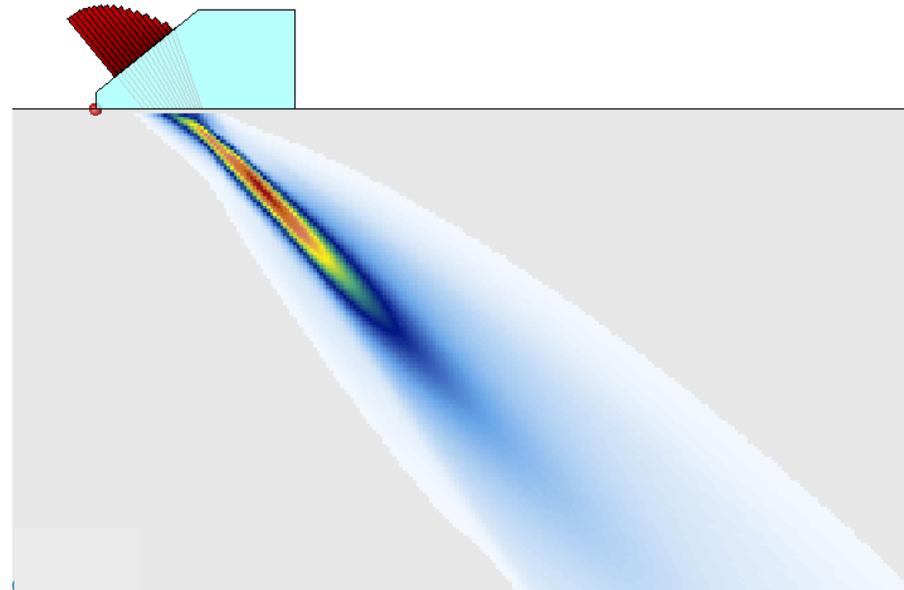


Phased Array Lösungen

- Schallfeldsteuerung



oder



Funktionsweise TFM (Total Focusing Method)

2-Stufiger Prozess

Aufnahme einzelner A-Scans / FMC

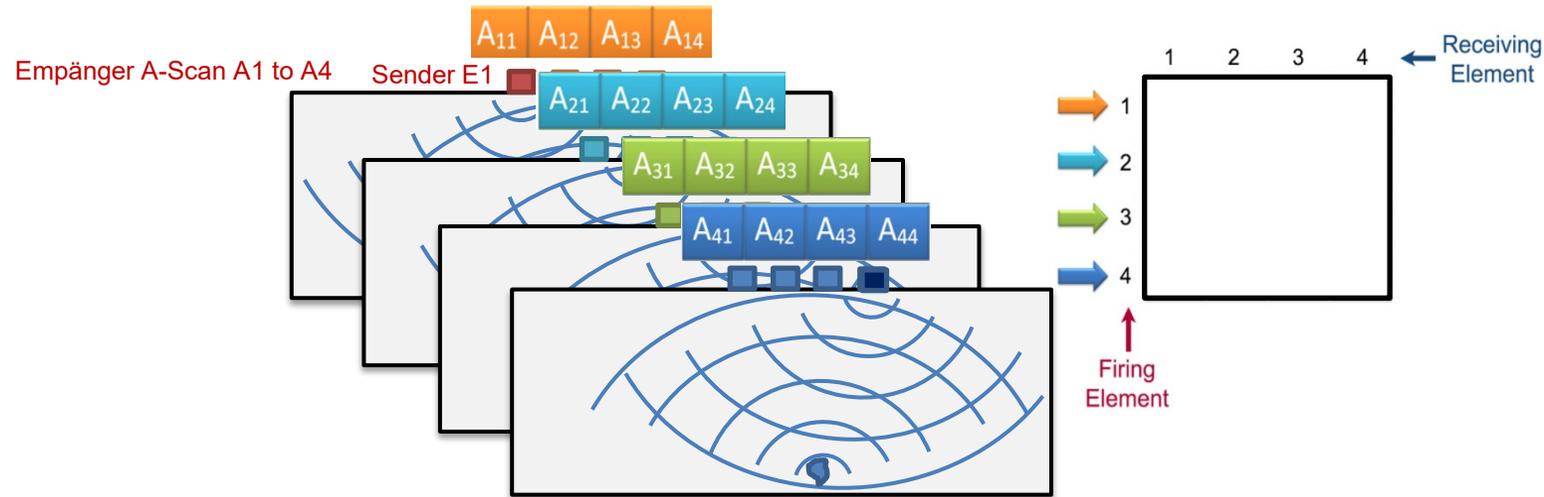


Berechnung eines Bildes / TFM (Methode) & FMC
(Daten)

Die Berechnung kann real-time oder offline durchgeführt werden

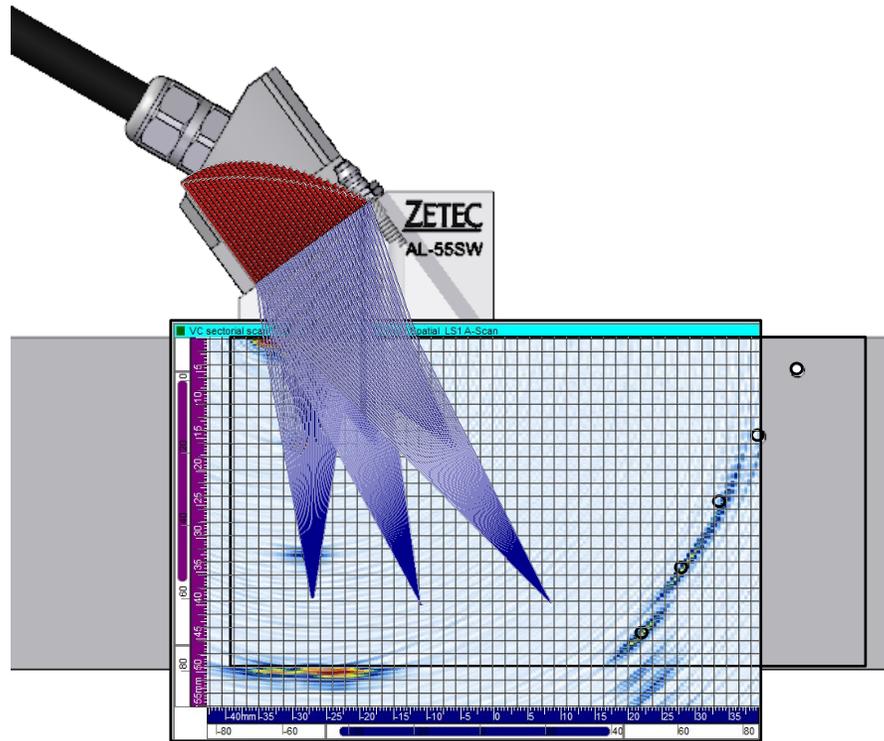
FMC (Full Matrix Capture)

Full Matrix Capture (FMC) bedeutet die Aufnahme des A-Scans jedes einzelnen Sender- und Empfängerpaars im Array

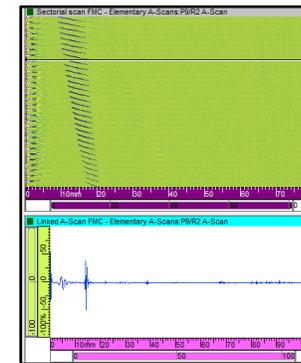


Durch die nachträgliche Anwendung hochkomplexer Algorithmen ist möglich aus den Rohdaten der A-Scans ein Ultraschallbild zu erzeugen für jede möglichen Winkel, Fokus etc.

Advanced Focusing Techniques - TFM

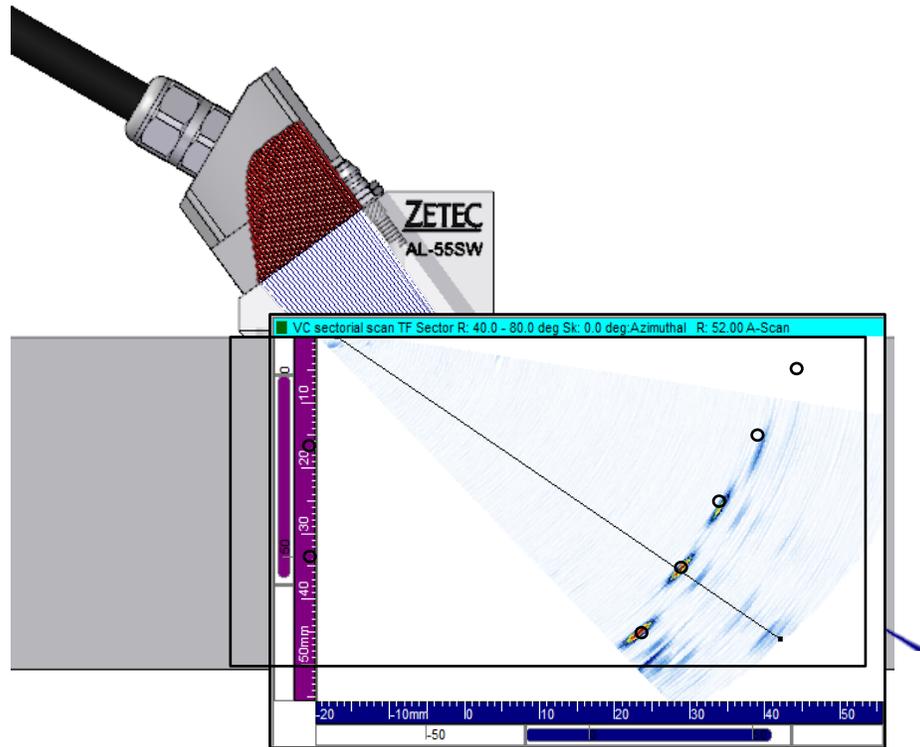


TFM – Frame LW

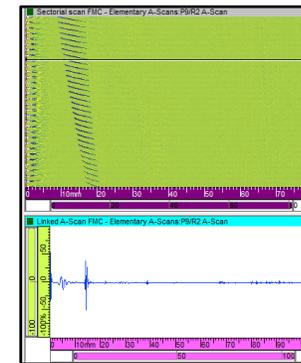


FMC Raw Data

Advanced Focusing Techniques - STF



Sectorial Totally Focused



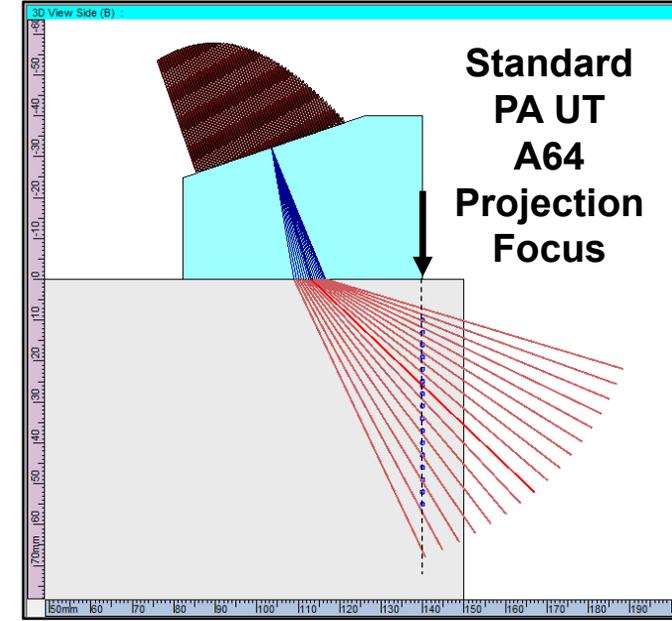
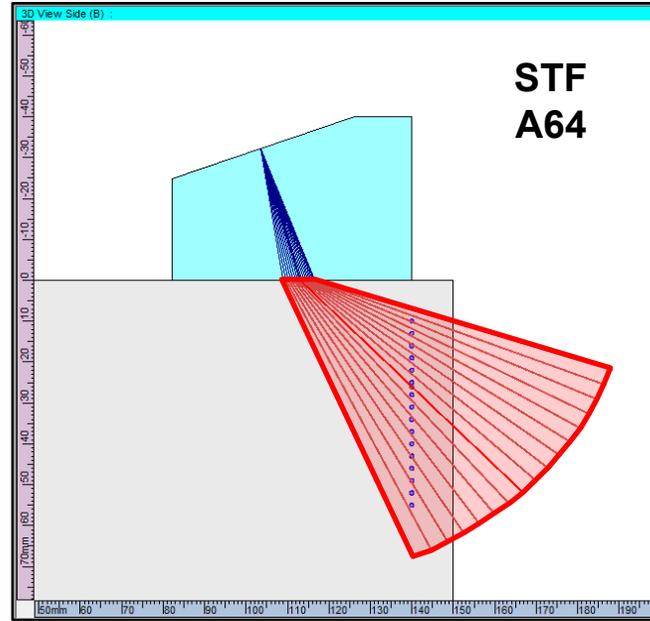
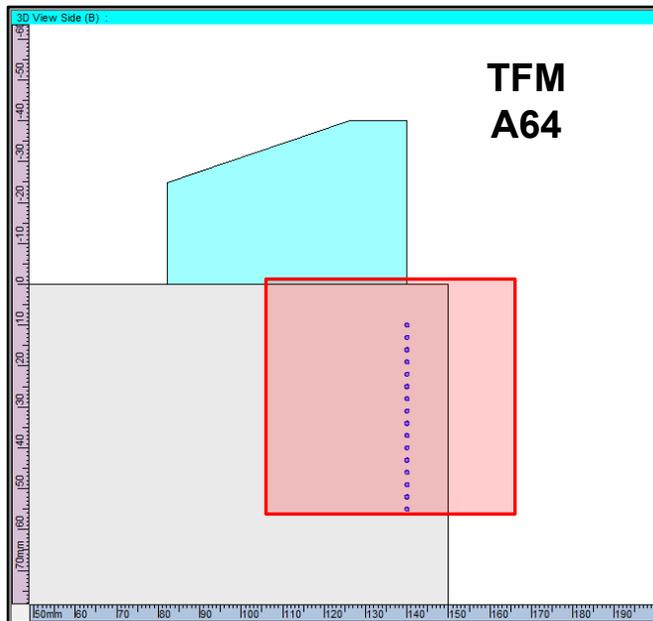
FMC Raw Data



Vorteile von Advanced Focusing Techniques

5 MHz linear array, 64 Elemente, LW Vorlauf auf $\varnothing 1$ mm SDH

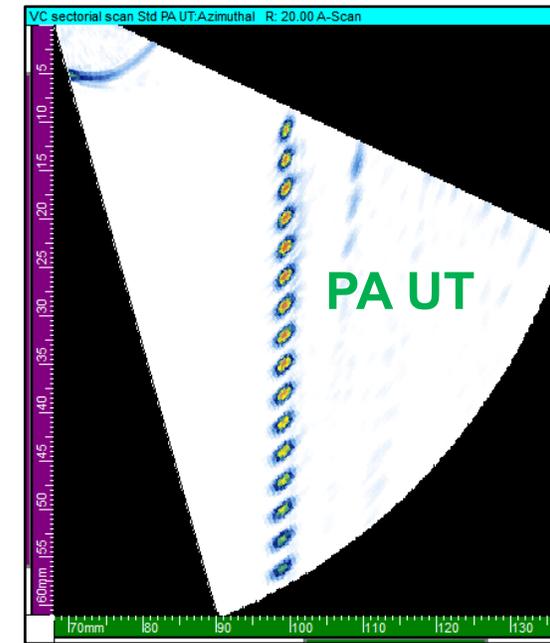
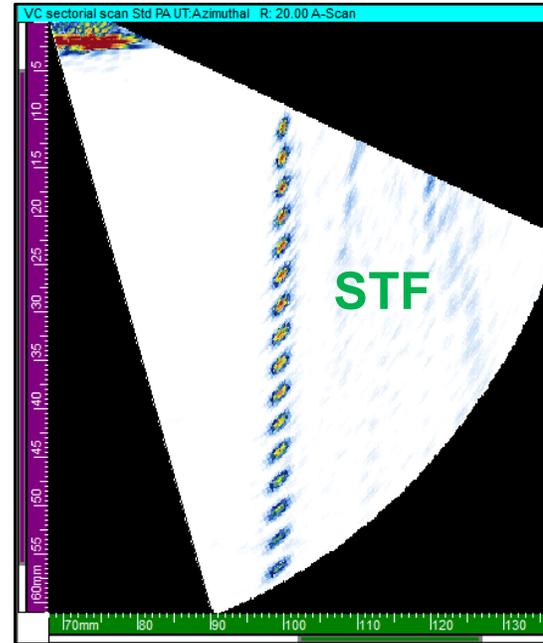
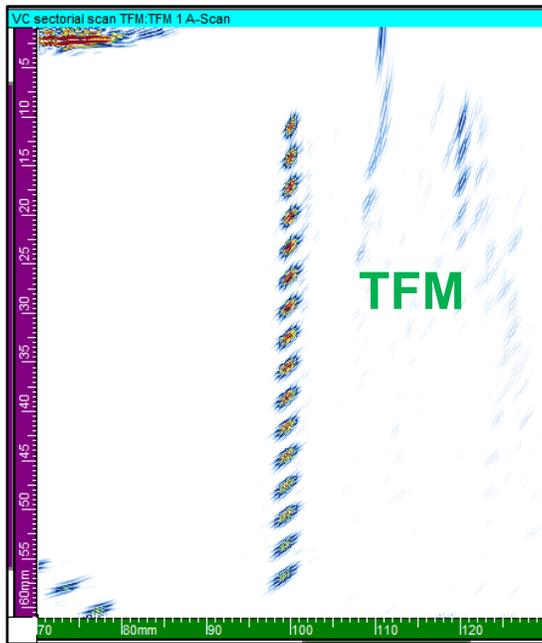
Vergleich der Fokussierungsmöglichkeiten *TFM*, *STF* versus *standard PA UT*



Vorteile von Advanced Focusing Techniques

5 MHz linear array, 64 Elemente, LW Vorlauf auf \varnothing 1 mm SDH

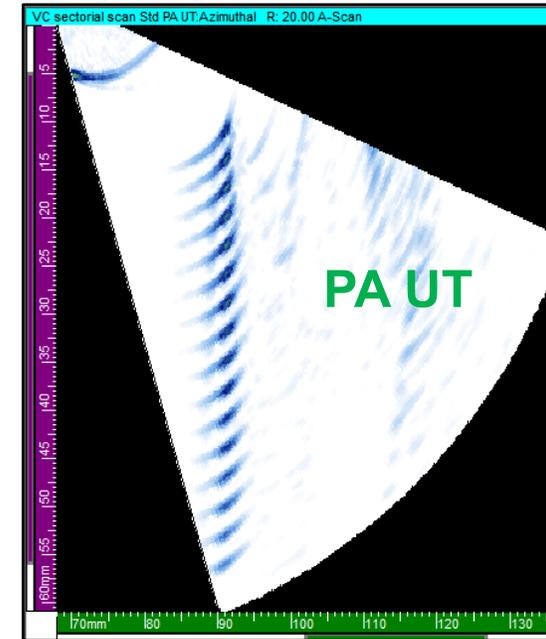
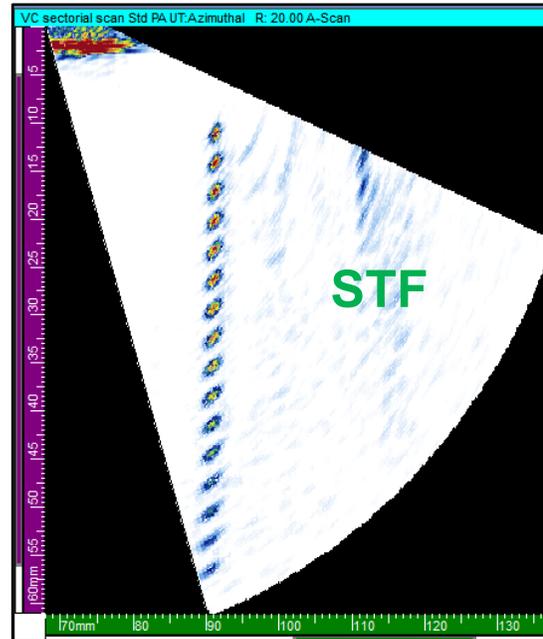
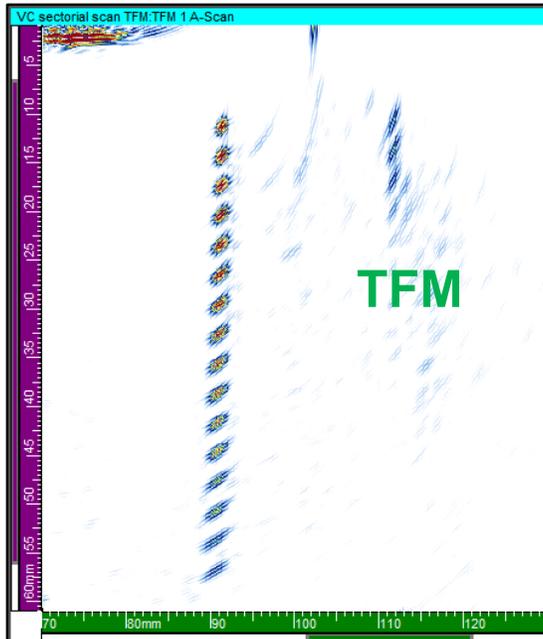
Vergleich der Fokussierungsmöglichkeiten *TFM*, *STF* versus *standard PA UT*



Vorteile von Advanced Focusing Techniques

5 MHz linear array, 64 Elemente, LW Vorlauf auf \varnothing 1 mm SDH

Vergleich der Fokussierungsmöglichkeiten *TFM*, *STF* versus *standard PA UT*

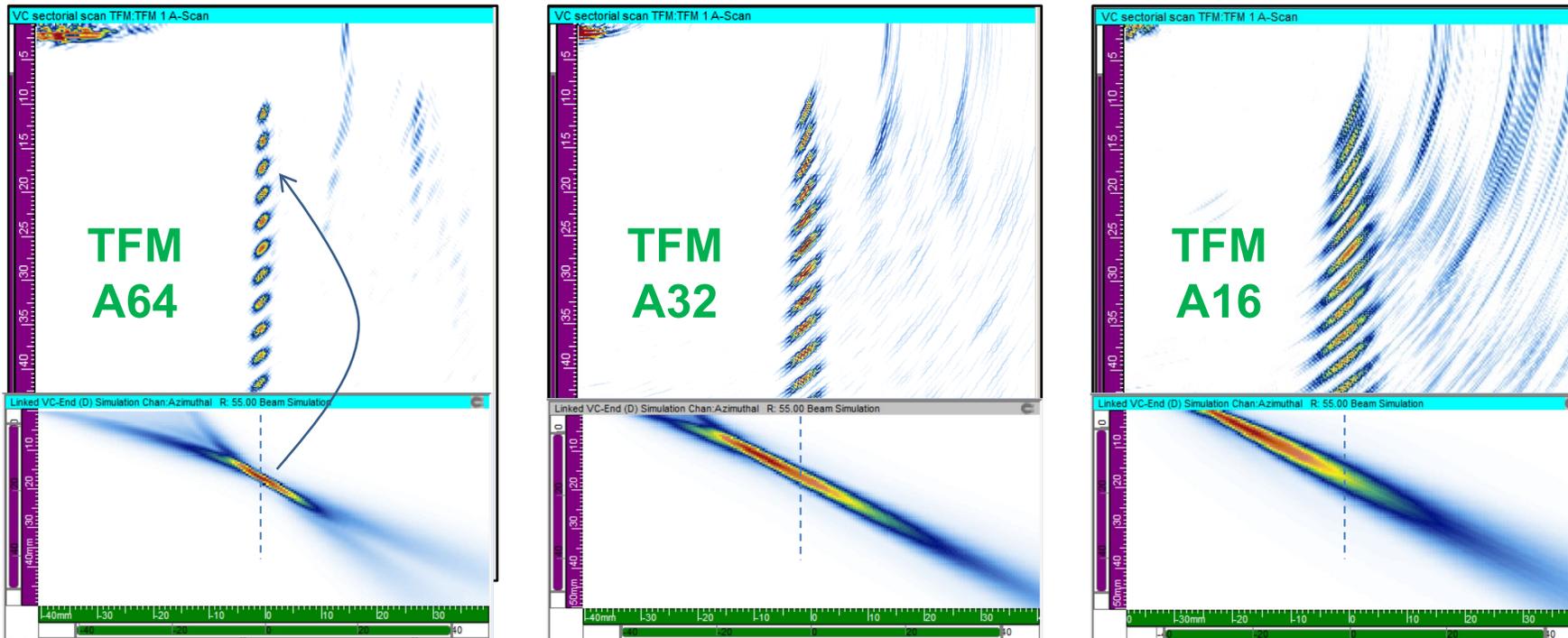


Vorteil von Advanced Focusing Techniques

5 MHz linear array, 64 Elemente, LW Vorlauf auf \varnothing 1 mm SDH

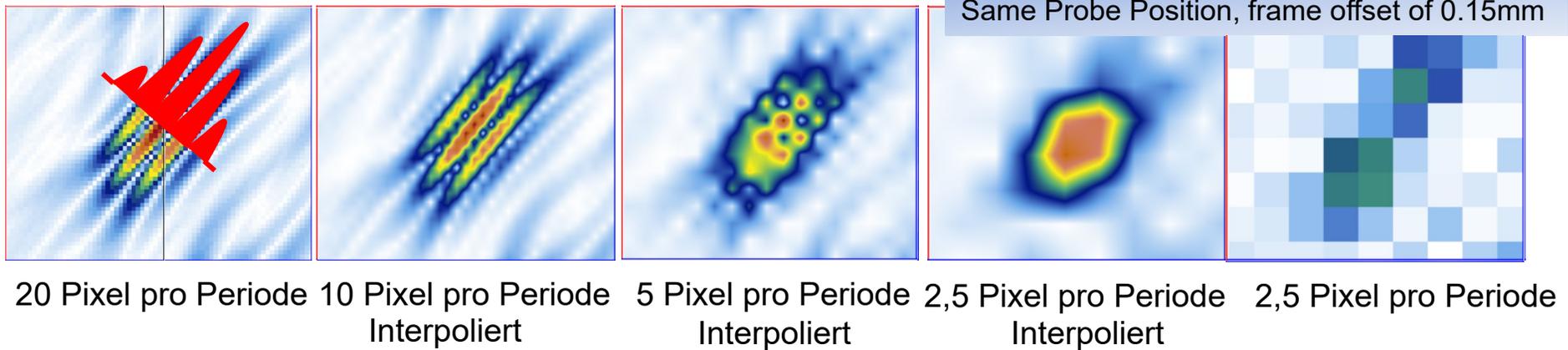
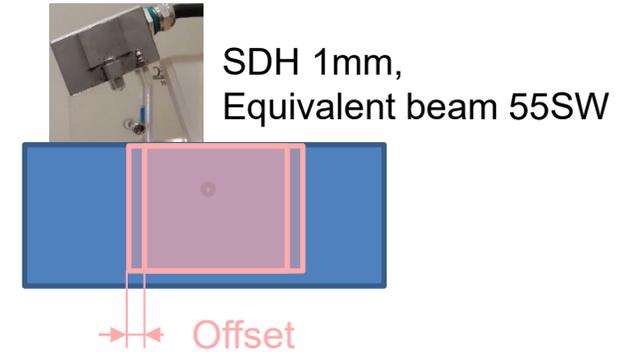
Vergleich der Fokussierungsmöglichkeiten *TFM*, *STF* versus *standard PA UT*

Einfluss der aktiven Elemente auf TFM



Amplitudentreue bei TFM

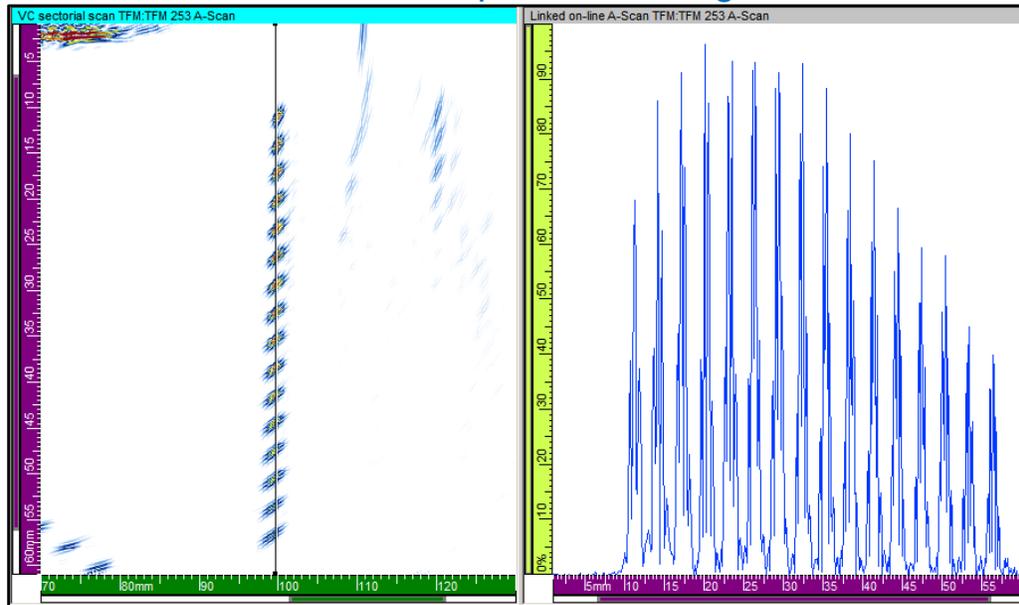
- TFM-Bild benötigt mindestens 5 Pixel pro Wellenlänge ($\lambda / 5$) (in Übereinstimmung mit dem Abtasttheorem)
- ▶ In der kommenden Norm wird eine Amplitudentreue von „2 dB“ gefordert
- ▶ Beispiel: Bilder einer seitlichen Bohrung, 1 mm, (Probe LM5, LW55, äquivalenter Winkel LW5)



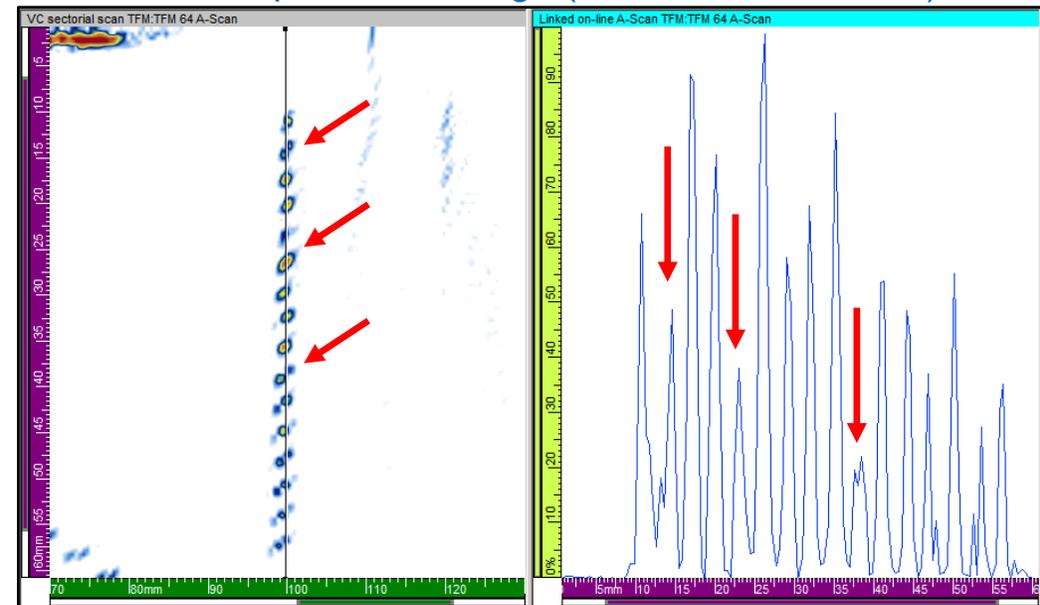
Amplitudentreue – Einfluss auf die Detektierbarkeit

5 MHz Lineararray, 64 Elemente, LW Wedge an \varnothing 1 mm seitlicher Bohrung
Einfluss der TFM-Frame-Auflösung auf die Detektion (Amplitudentreue)

10 Pixel pro Wellenlänge



2,5 Pixel pro Wellenlänge (Bis zu 10 dB Verlust)



GRUNDLAGEN DER ULTRASCHALLPRÜFUNG

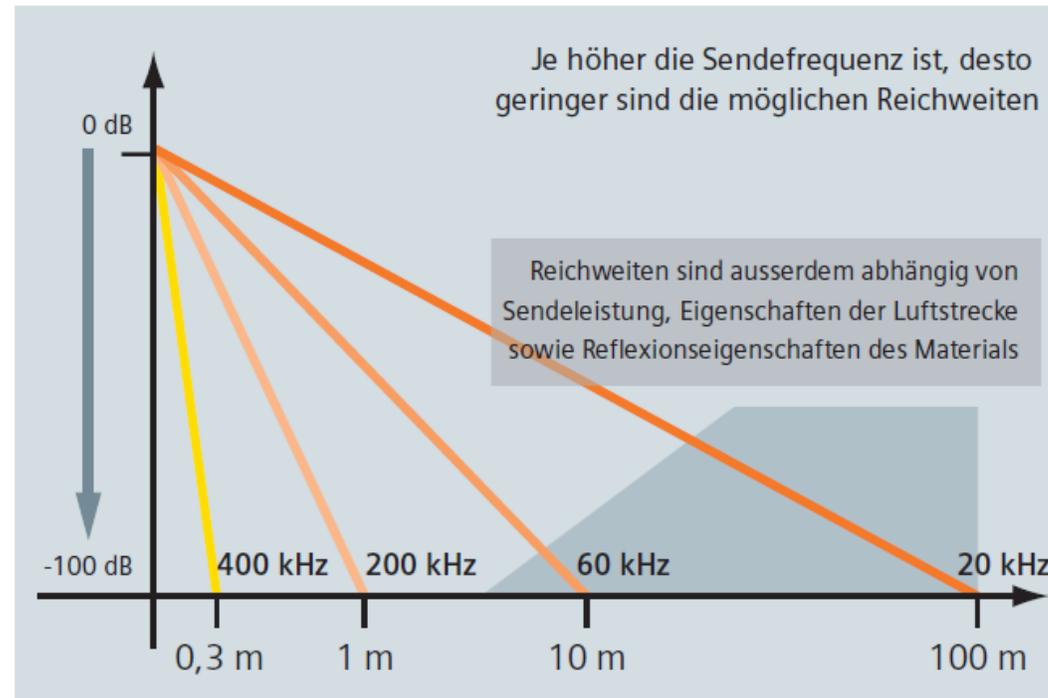


GRUNDLAGEN LUFTGEKOPPELTE ULTRASCHALLPRÜFUNG



Reichweiten von Ultraschall in Luft

- ▶ Frequenzbereich: 20 kHz ... 500 kHz
- ▶ Frequenzabhängige Schallschwächung in Luft
- ▶ Analog auch Frequenzabhängigkeit der Eindringtiefen



Transmission von Ultraschall

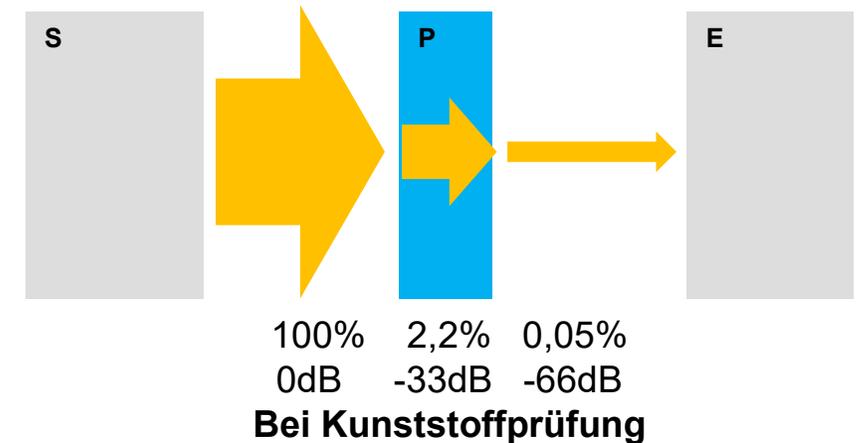
- ▶ Reflexionskoeffizient
- ▶ Akustische Impedanz = Dichte * Schallgeschwindigkeit
- ▶ Schallintensität: $I = p^2 / Z$, wobei p – Schalldruck (akustische Feldgröße)

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

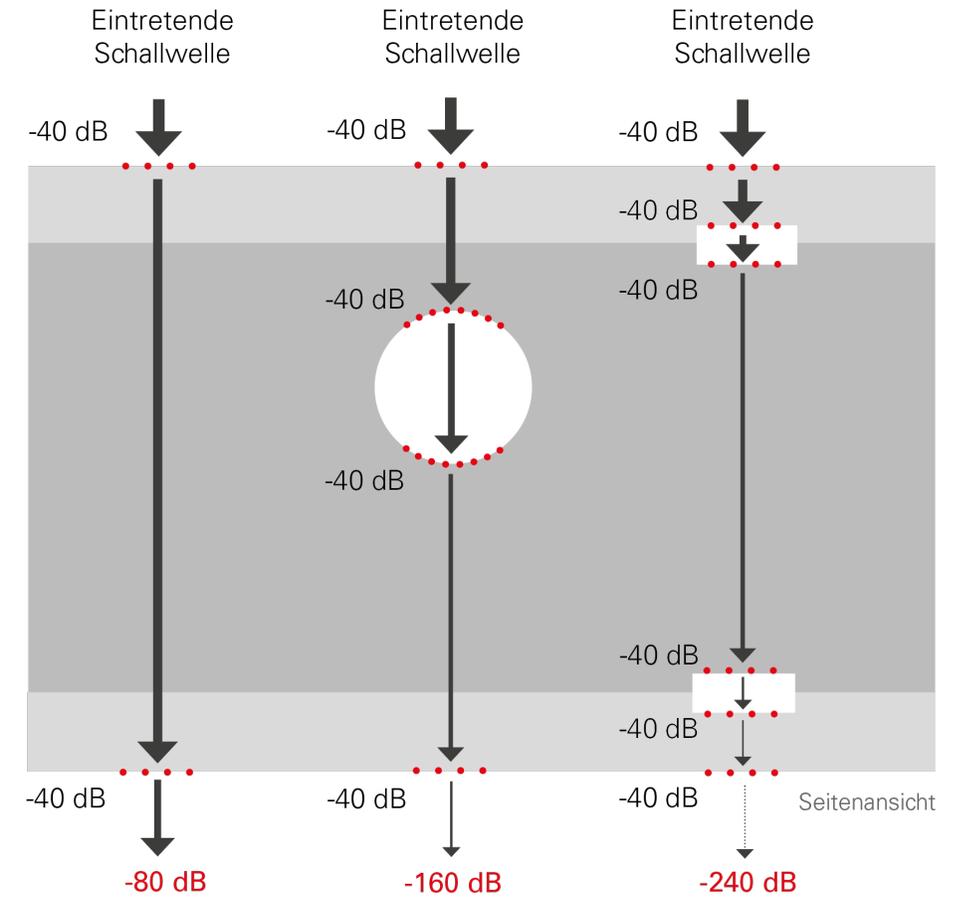
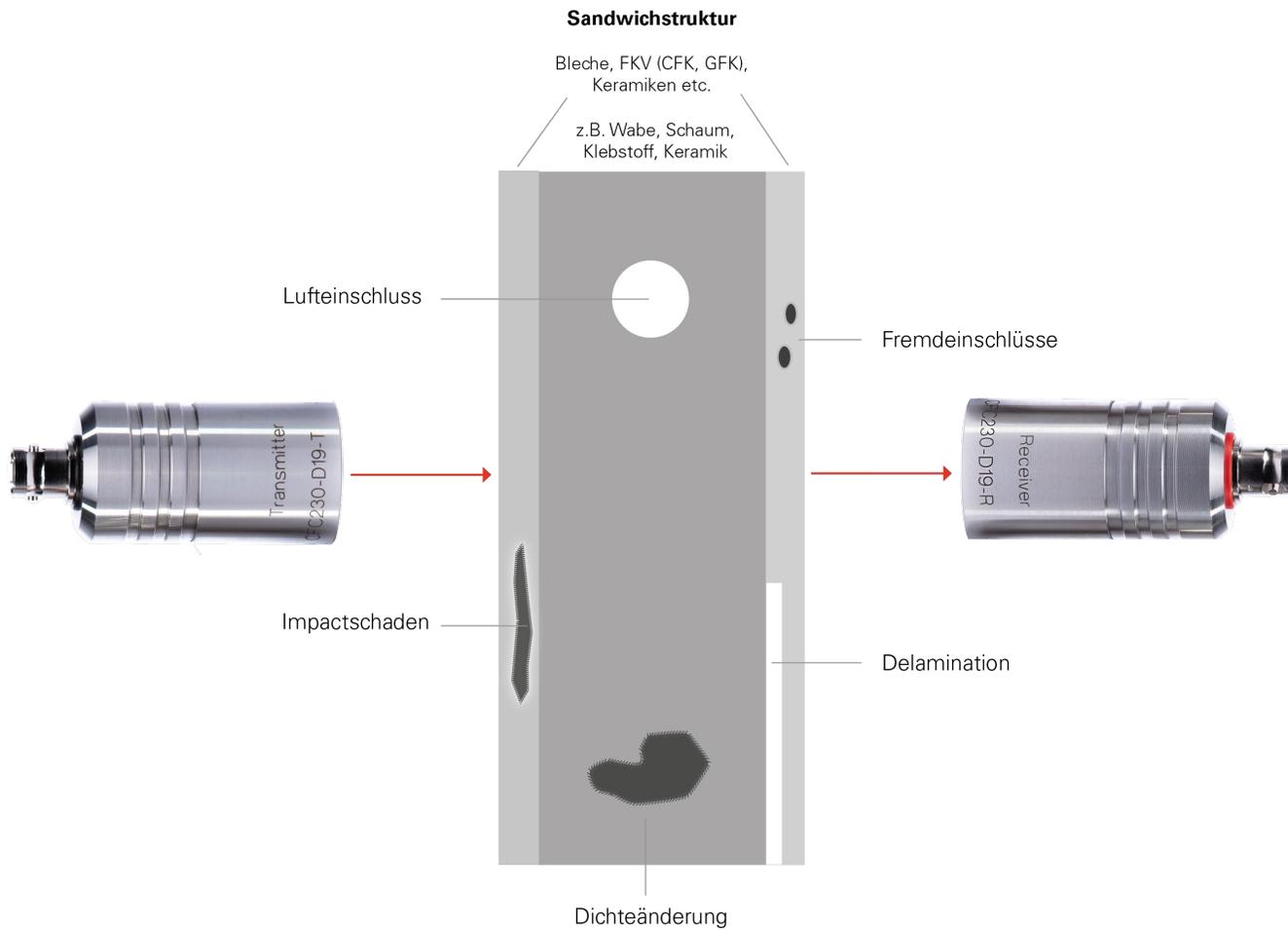
$$Z = \rho * c$$

▶ Beispiel: Übertragung von Luft zu Kunststoff

- ▶ $Z_{\text{air}} = 400 \text{ Rayl}$
- ▶ $Z_{\text{plastic}} = 3 \text{ MRayl}$ } Großer Impedanz-Unterschied
- ▶ Reflexion + Transmission = 1
 - $R + T = 1$
 - $T = 1 - R$
 - $T_{\text{Luft zu Kunststoff}} = 2,2\% = -33\text{dB}$
 - $T_{\text{Luft durch Kunststoff zu Luft}} = 0,05\% = -66\text{dB}$

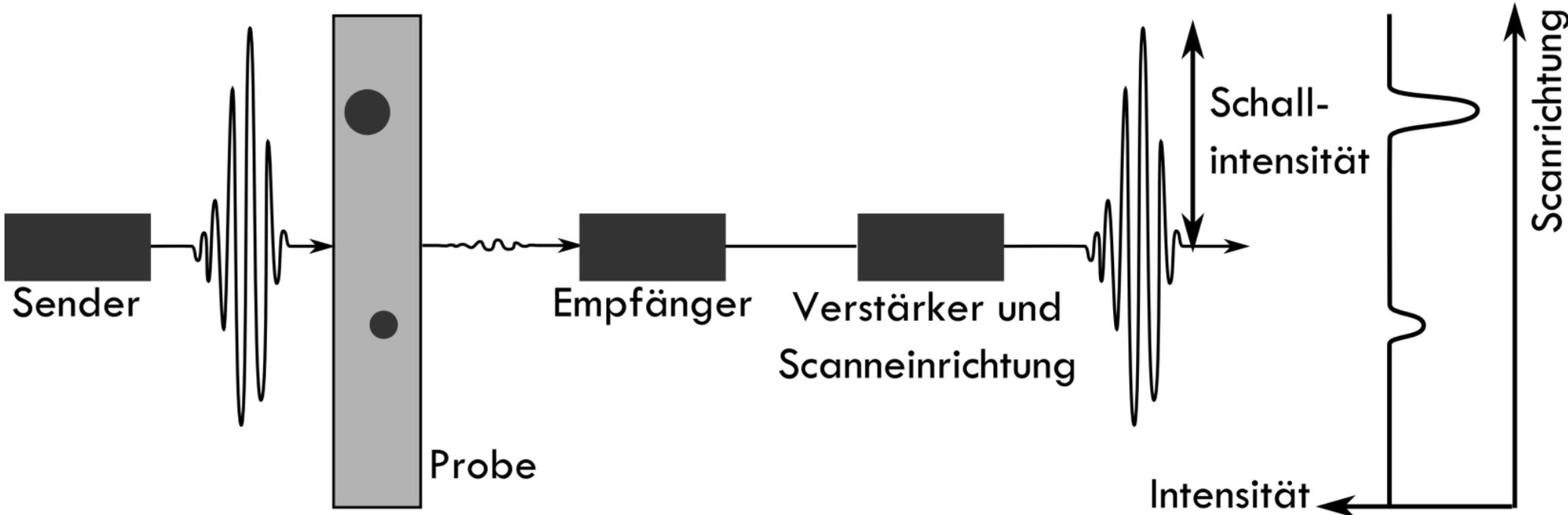


Luftgekoppelte Ultraschallprüfung an Sandwichstrukturen

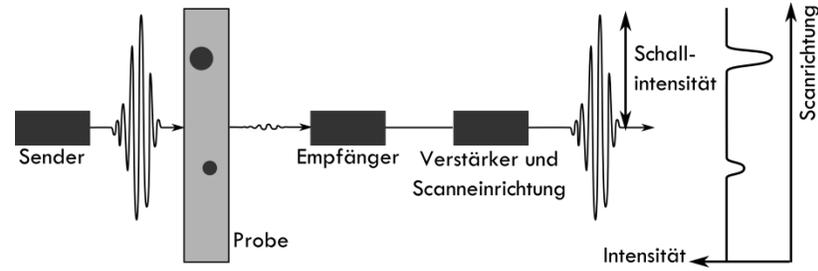


.....
Verlust von -40 dB an jeder Grenze zu Luft

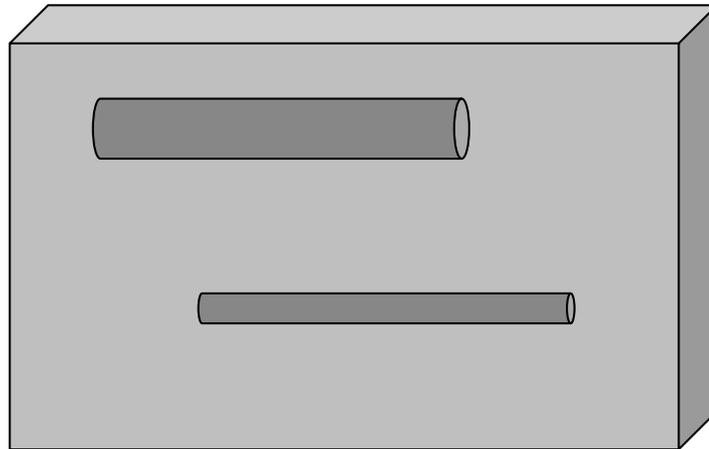
Signalauswertung



C-Scan Darstellung

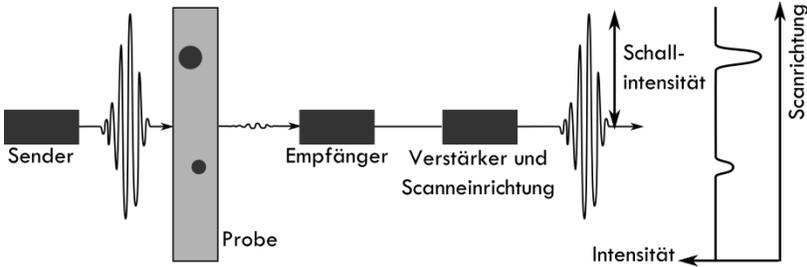


Seitenansicht

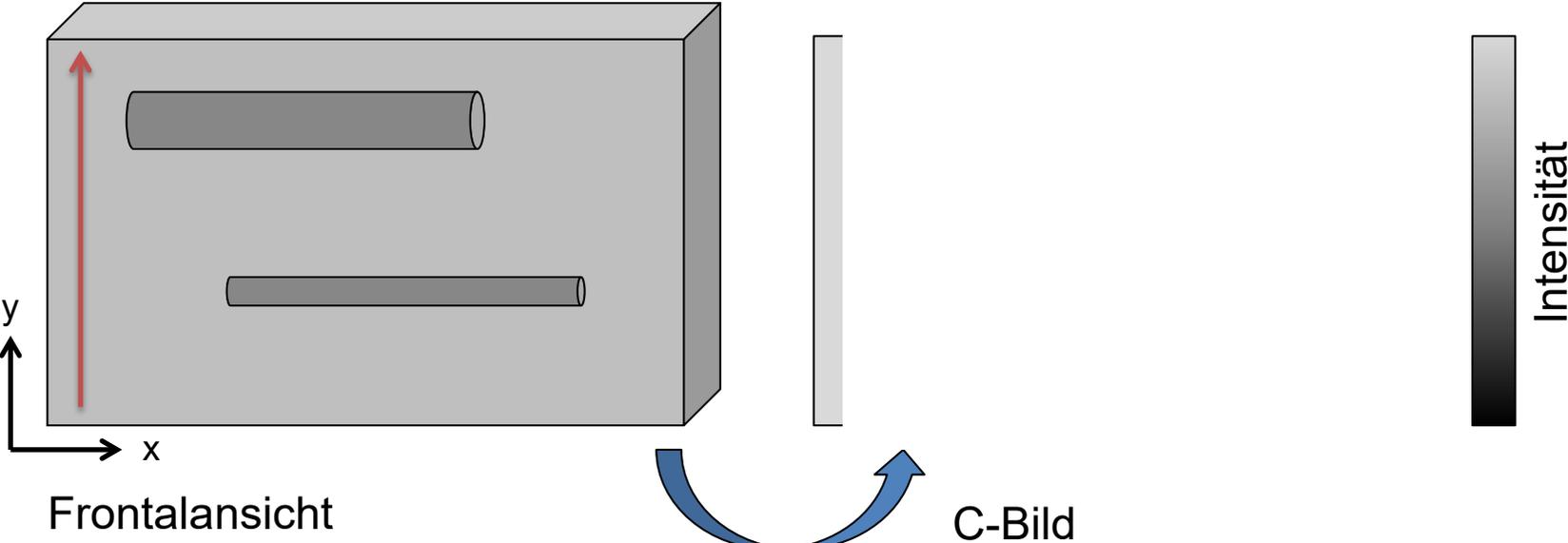


Frontalansicht

C-Scan Darstellung



Seitenansicht

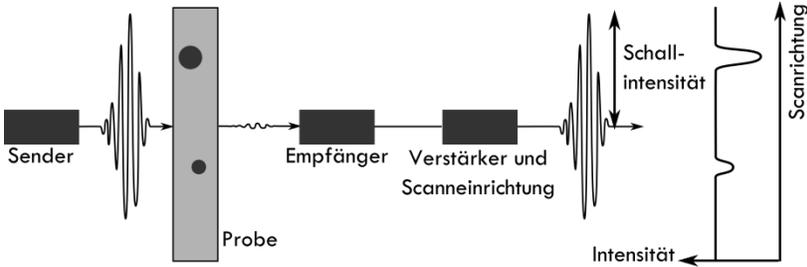


Frontalansicht

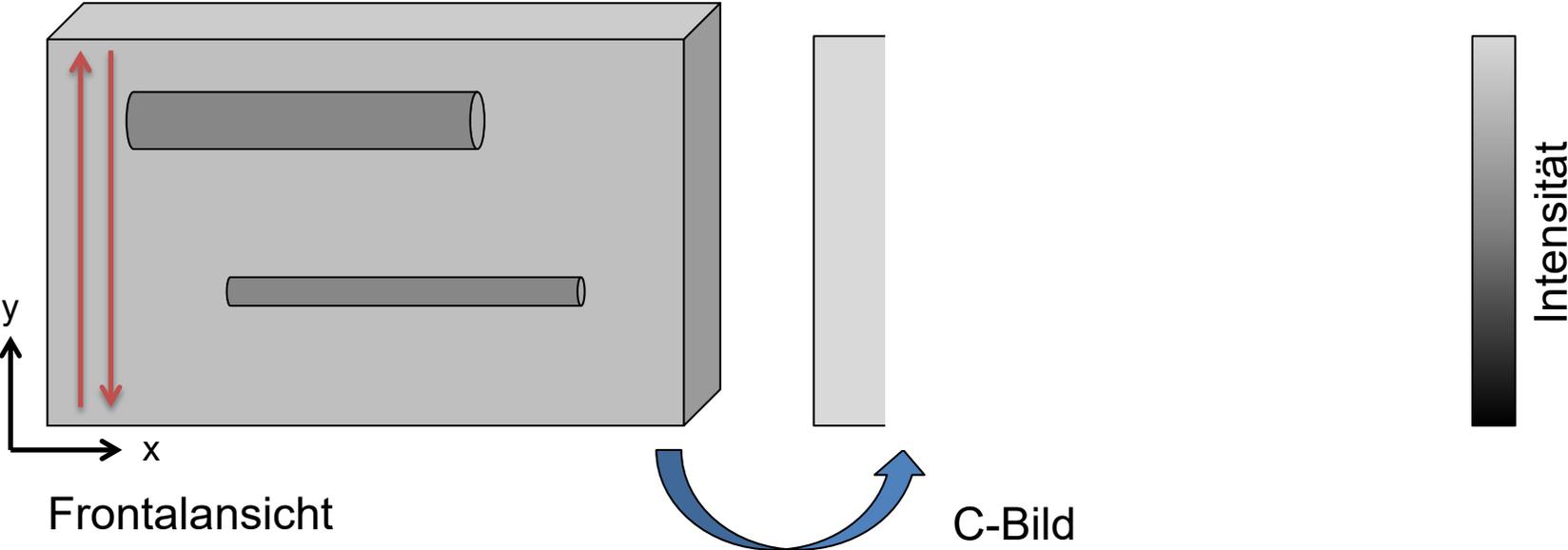
C-Bild



C-Scan Darstellung



Seitenansicht

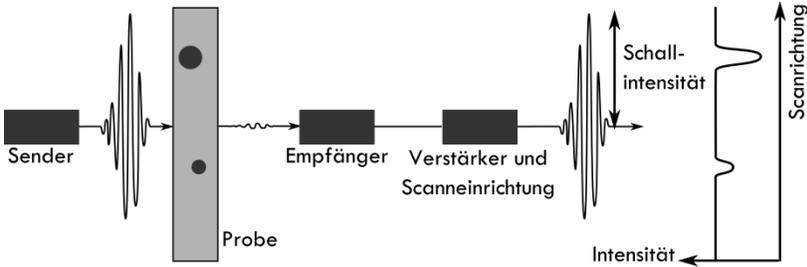


Frontalansicht

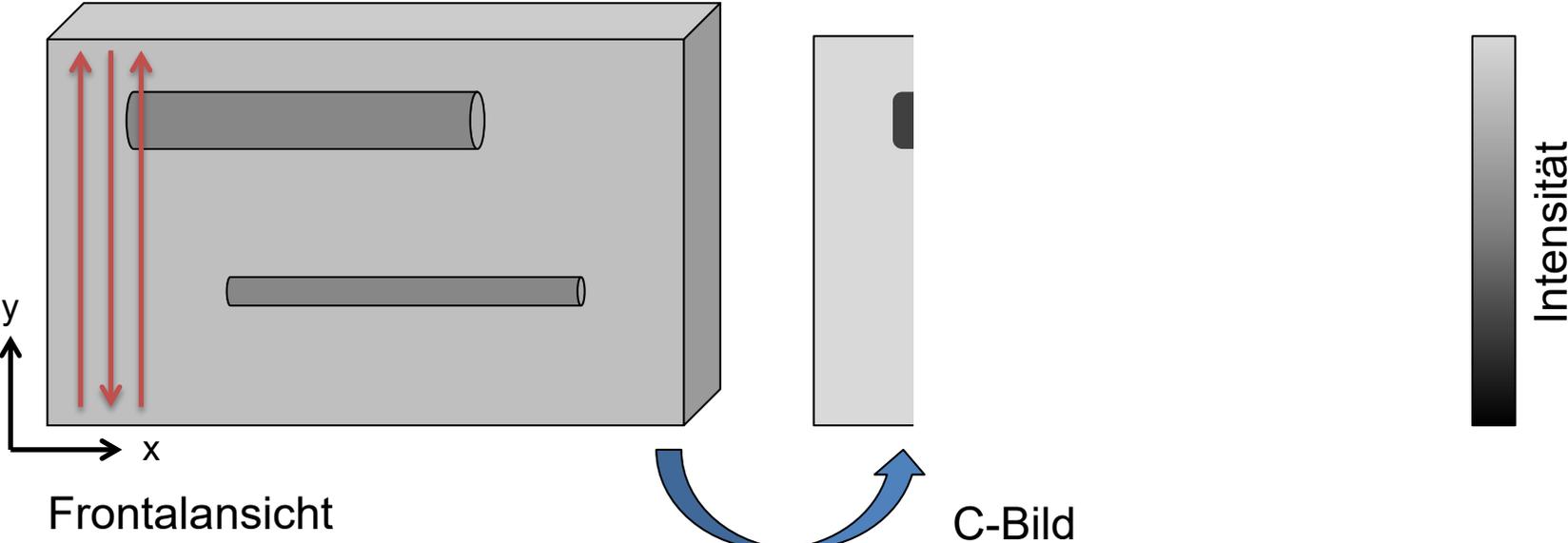
C-Bild



C-Scan Darstellung



Seitenansicht

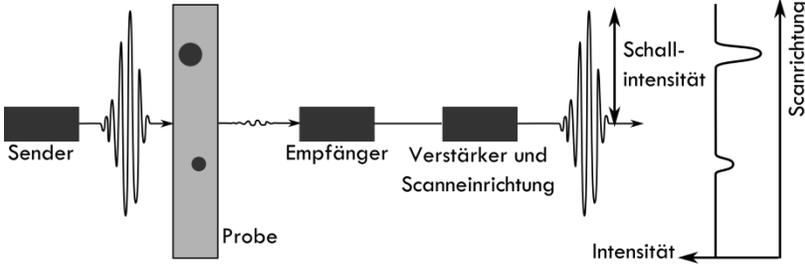


Frontalansicht

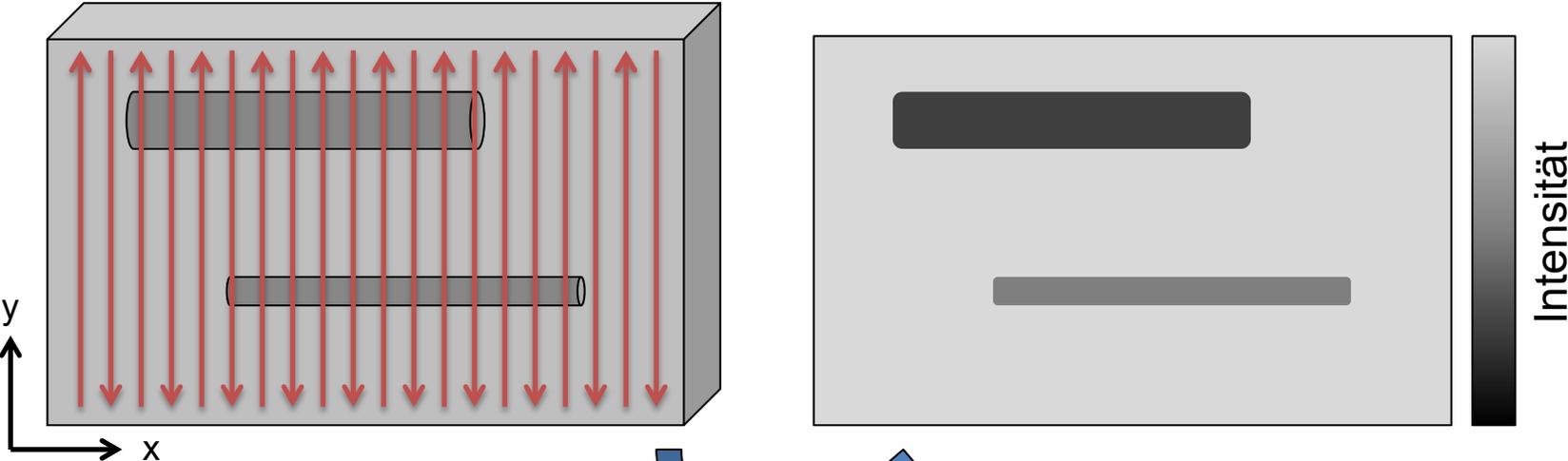
C-Bild



C-Scan Darstellung



Seitenansicht



Frontalansicht

C-Bild



ANWENDUNGSBEISPIELE



Zerstörungsfreie Prüfung
an CFK mit Impaktschaden

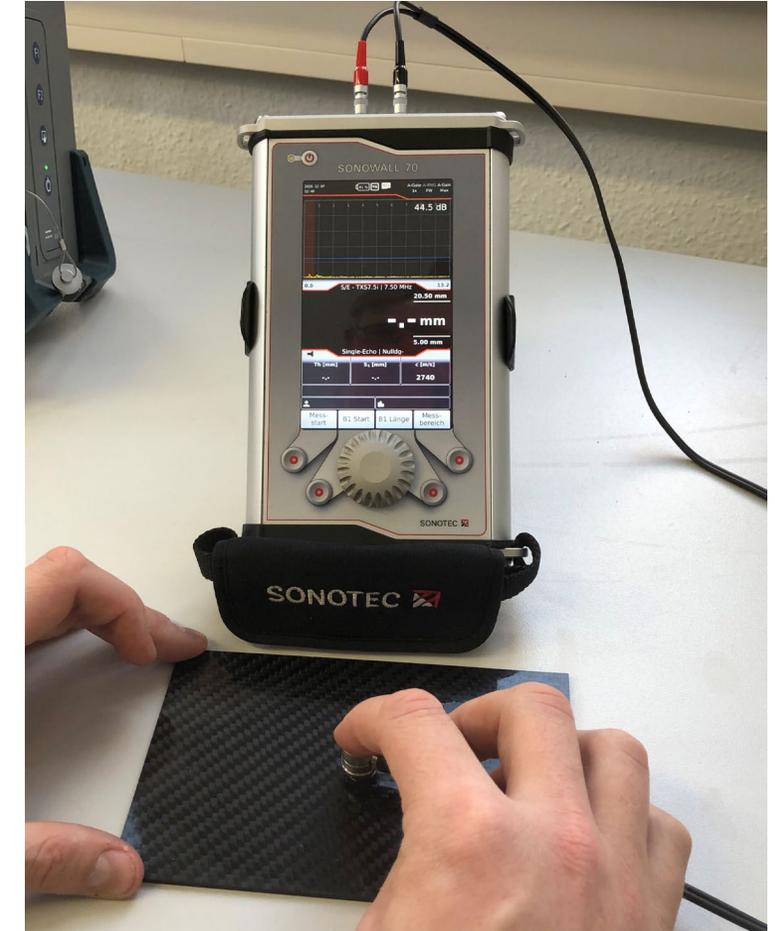


Messung mit einem A-Scan Gerät

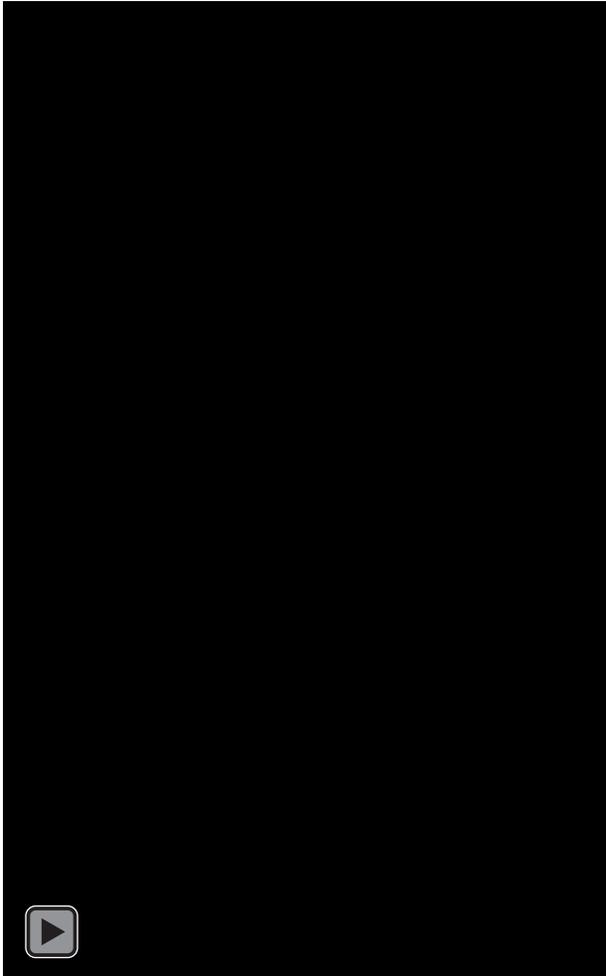


- ←
- Einfache Bestimmung der Laminatdicke
- Kaum Vorbereitung
- Koppelmittel Notwendig

Im Impactschaden kein Rückwandecho detektierbar
→ Streuung durch zerstörte Fasern
→ Fehlmessungen möglich

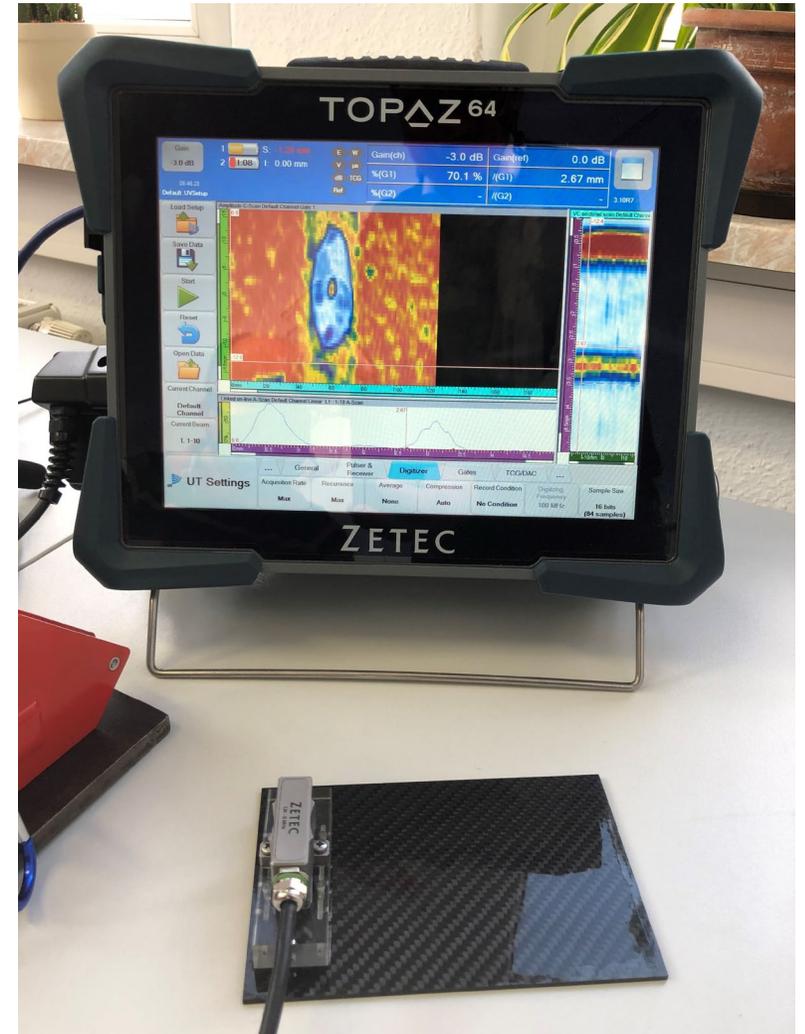


Messung mit einem Phased-Array Gerät

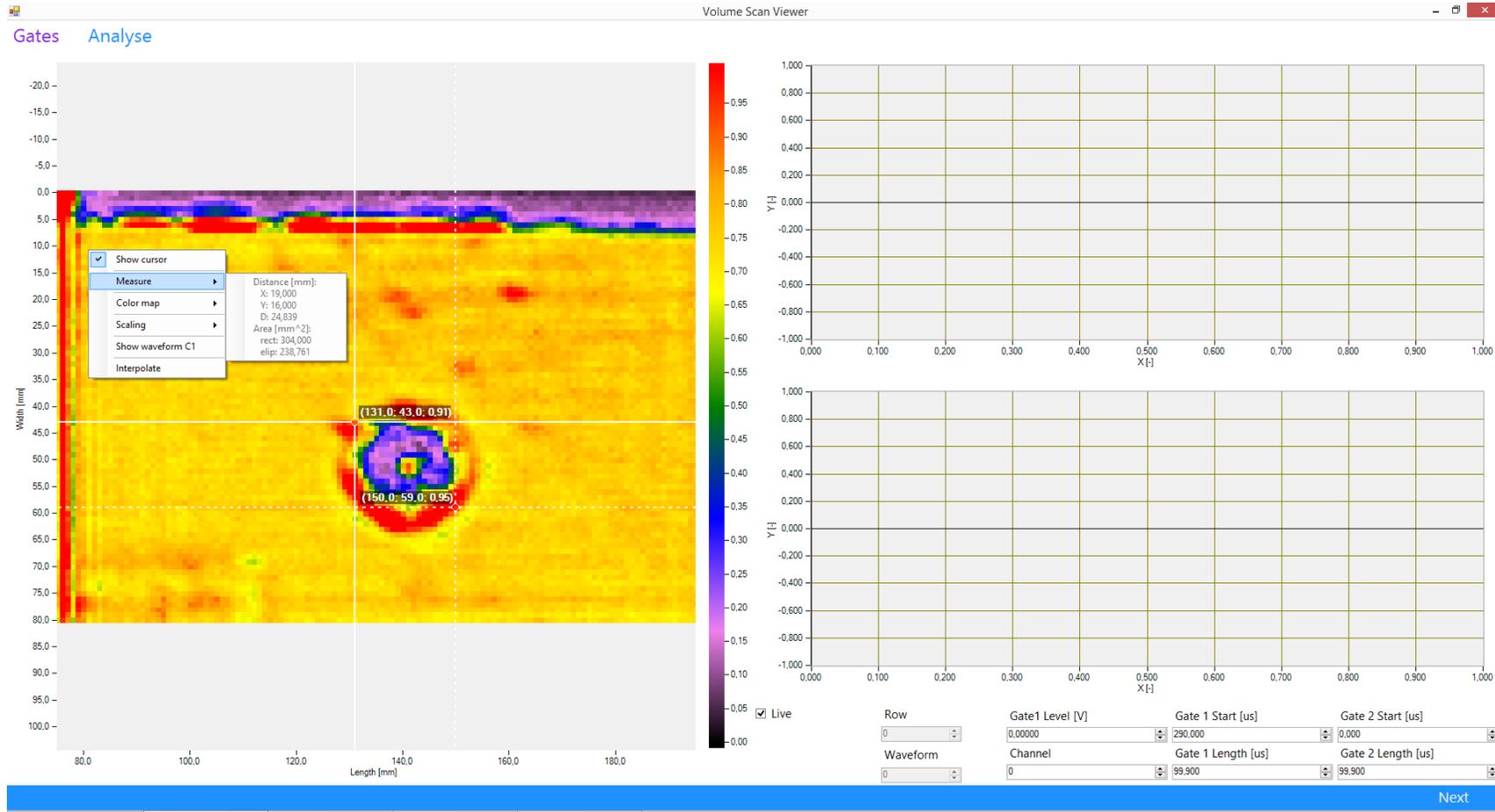


- Messung mit bis zu 128 Kanälen gleichzeitig
- Erstellung eines C-Scans durch Verwendung von Encodern
- Koppelmittel Notwendig

Nachträgliches Auswerten der Messung
→ Ausmessen von Fehlstellen
→ Bewertung der Messqualität



CFK-Impact mit Luftgekoppelter Ultraschallprüfung



- Berührungslose Messung
- Automatisiert
- C-Scandarstellung mit verfügbaren Rohdaten (A-Scans)

- Vermessung im C-Scan möglich
- Anwendung von Filtern auf Rohdaten
- Automatische Clusteranalyse



ANWENDUNGSBEISPIELE



Prüfung von komplexen CFK-Bauteilen
mit Phased-Array und Time-Reversal

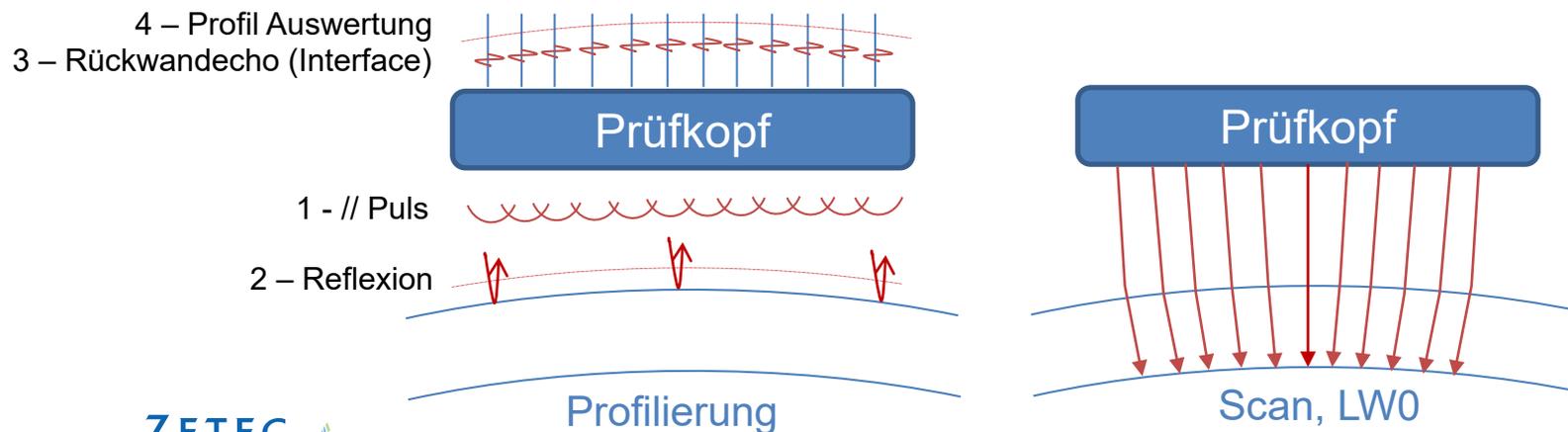


Definition Time Reversal

TIME REVERSAL ist eine Technologie/Prozess, die eine Echtzeitanpassung der Fokusgesetze entsprechend dem Komponentenprofil ermöglicht, um eine Inspektion bei LW0 trotz Geometrieänderungen zu ermöglichen.

- Step 1 : Profilierung der Bauteiloberfläche mit // UT-Pulsen,
- Step 2 : Berechnung der Fokusgesetze in abh. der Bauteiloberfläche
- Step 3 : Prüfung,

Auswirkung auf die Scangeschwindigkeit: 0% bis maximal 8% (probe 64E, aperture 6E).

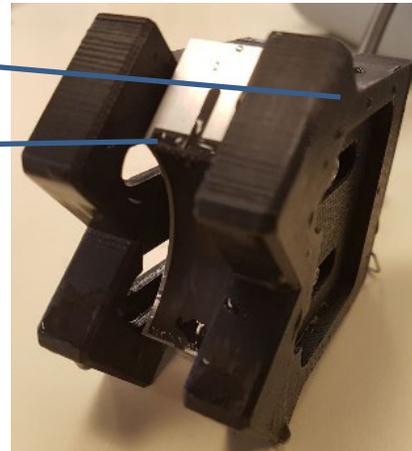


Benutzte Hardware

- Topaz 32 mit Time Reversal Option
- Gebogenes Lineararray
 - 3.5 MHz,
 - 64 Elemente
 - Mit 3D-gedrucktem Prüfkopfhalter



Prüfkopf
Prüfkopfhalterung mit
Führung

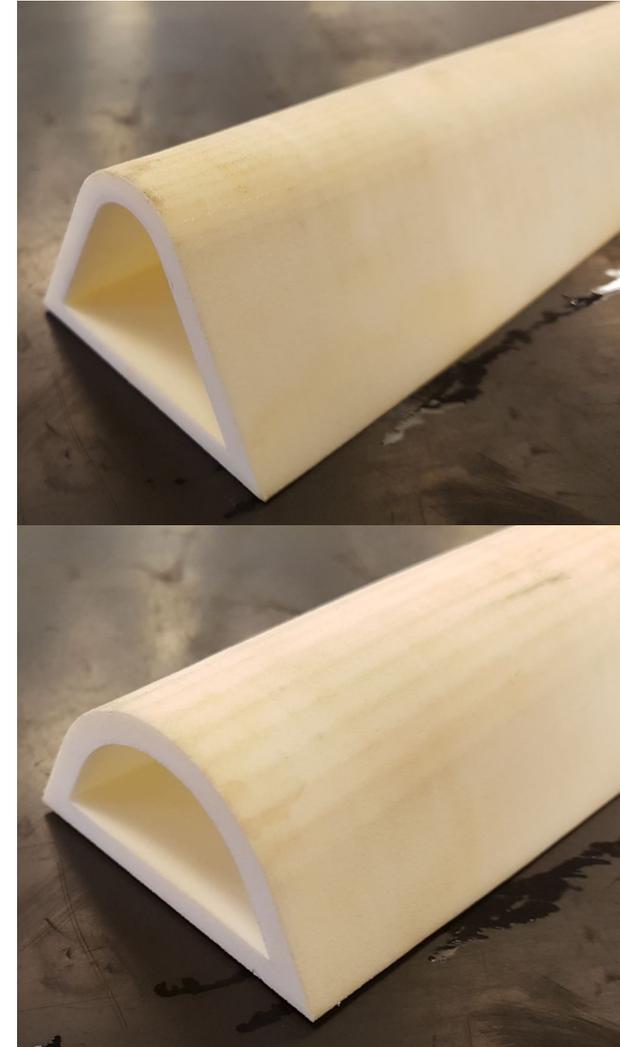


Prüfung eines variablen Radius von 14 mm bis 28 mm

- 3D-Druck Bauteil
- Radius variiert von 14 mm bis 28 mm,
- Gedruckt für kostengünstige Produktion,

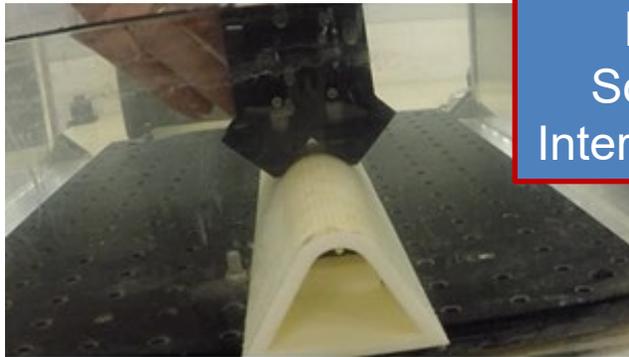
Ziel des Tests ist es, die Amplitudenvariationen der Grenzflächenechos zu überprüfen

Das Rückwandecho kann aufgrund des Materials nicht erkannt werden.

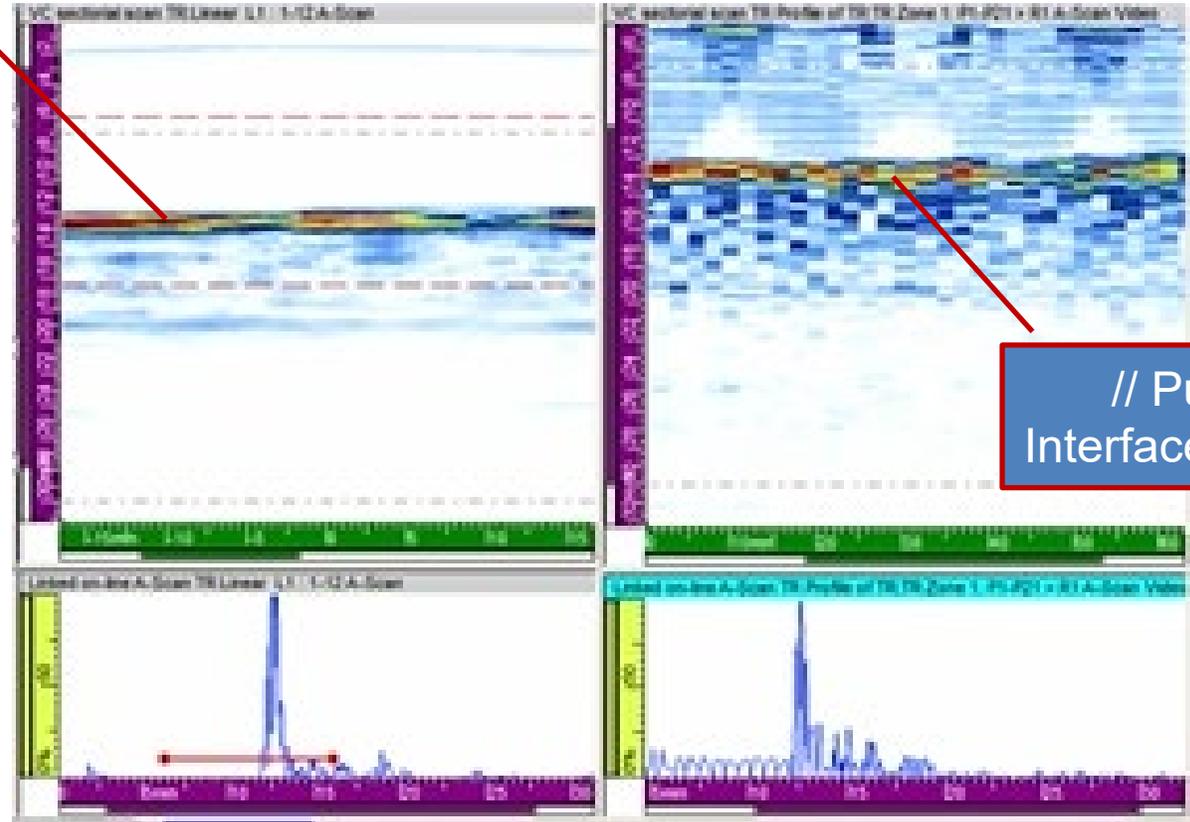


Profilierung - Werkzeuge - Einstellung des Prüfkopfes

- ▶ Prüfkopf in der Mitte des Blocks positioniert,
- ▶ Anpassung des Prüfkopfabstandes bis ein flaches Profil zu sehen ist.
- ▶ Dies zeigt an, dass der Prüfkopf zum Radius passt.



Linear
Scanning
Interface Echo



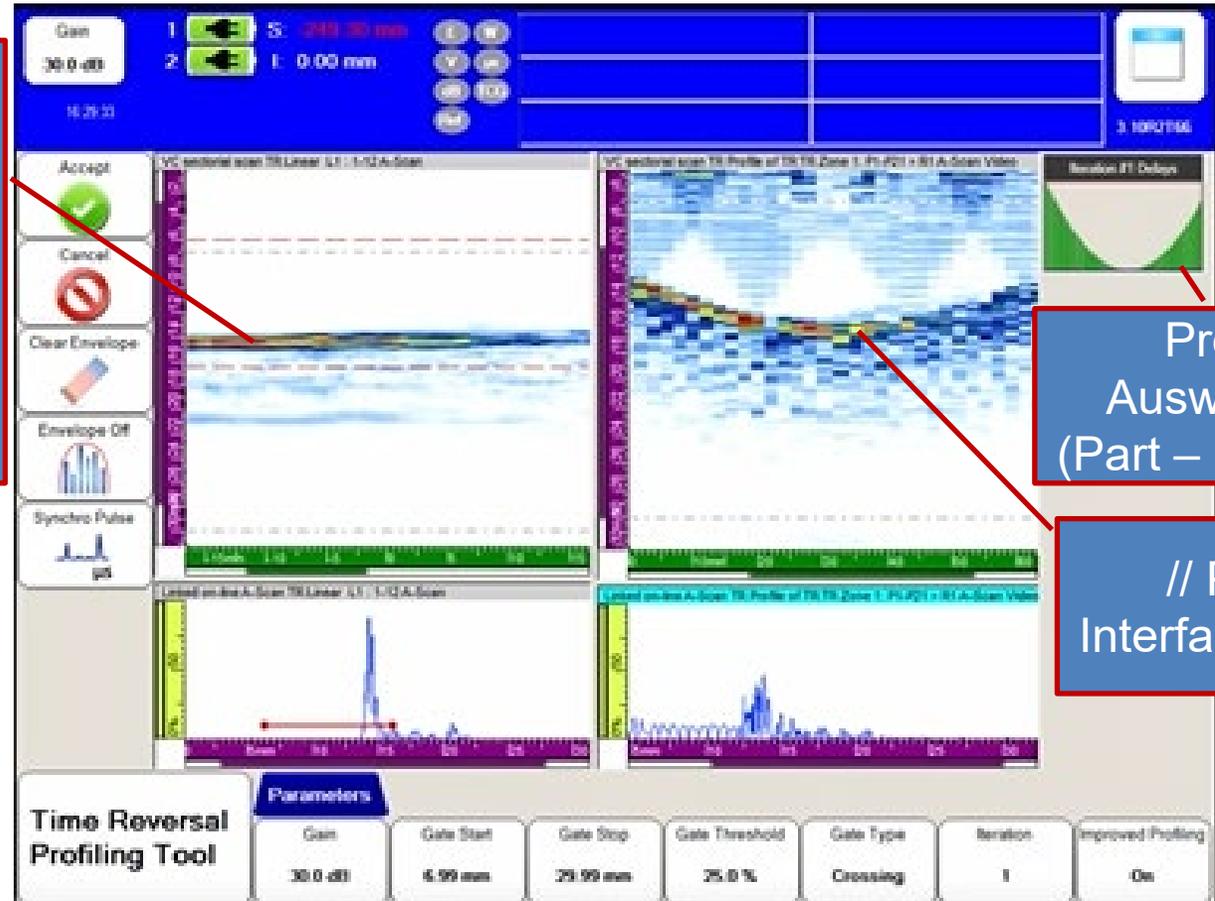
// Puls
Interface Echo

Profilierung - Werkzeuge - Einstellung des Prüfkopfes

Prüfkopf auf dem 28 mm Radius



Linear Scanning Interface Echo
Nach wie vor grade durch den TR Prozess

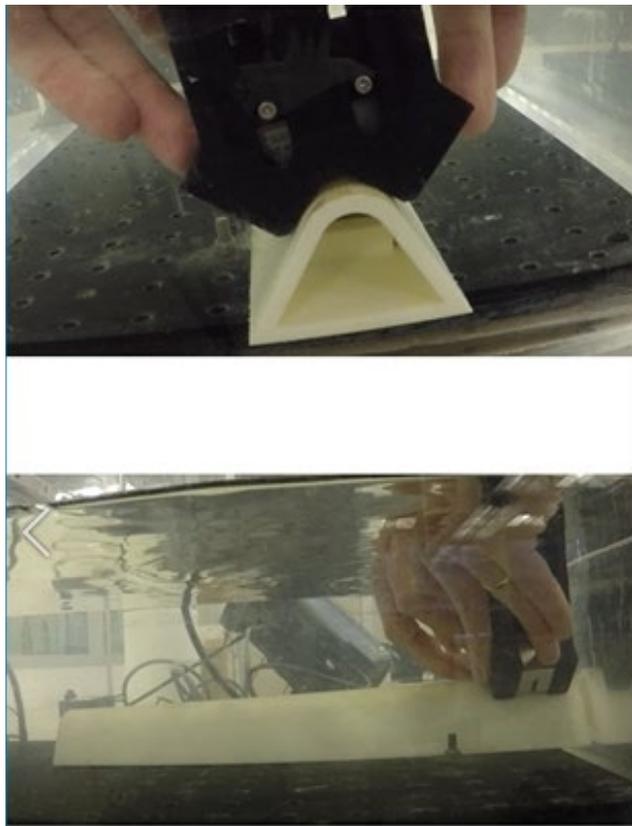


Profile Auswertung (Part – Prüfkopf)

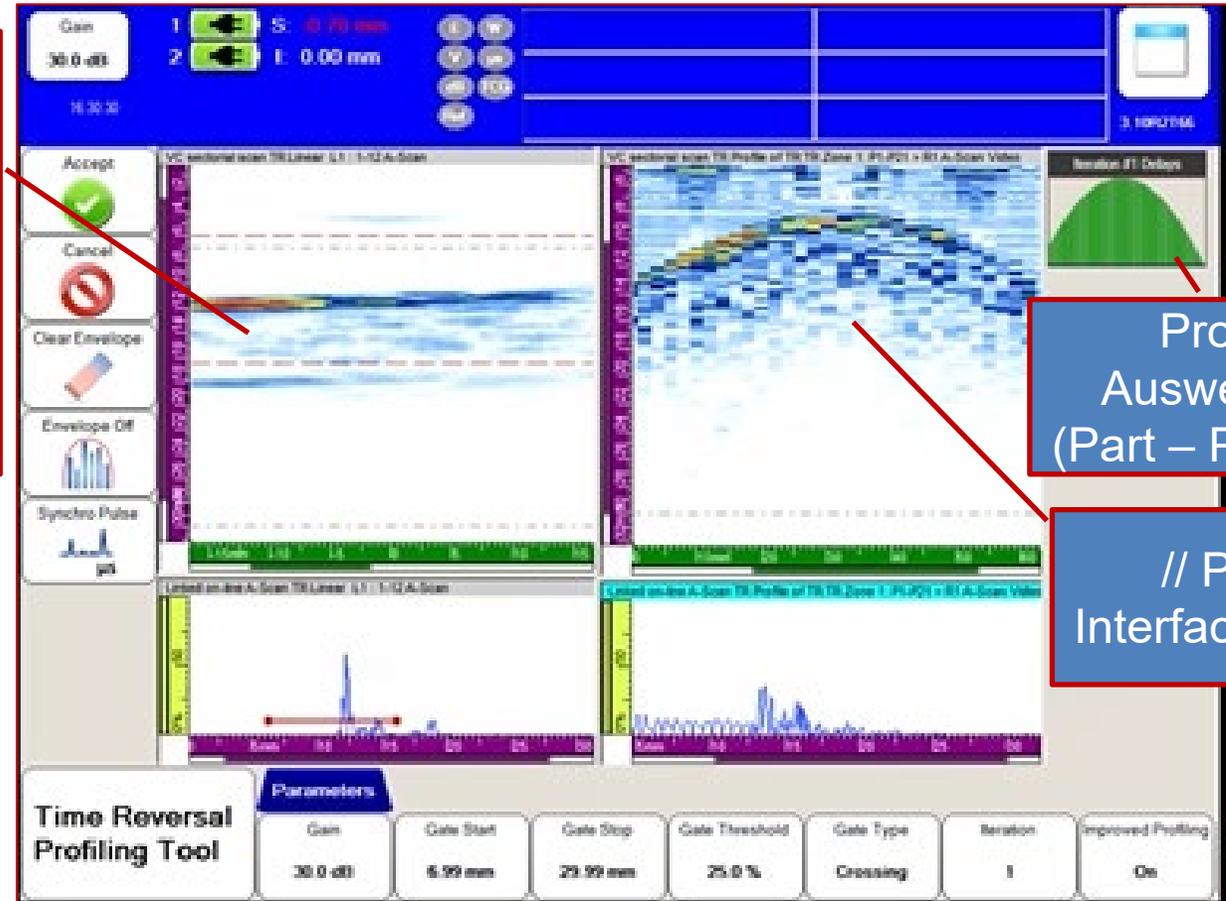
// Puls Interface Echo

Profilierung - Werkzeuge - Einstellung des Prüfkopfes

Prüfkopf auf dem 14 mm Radius



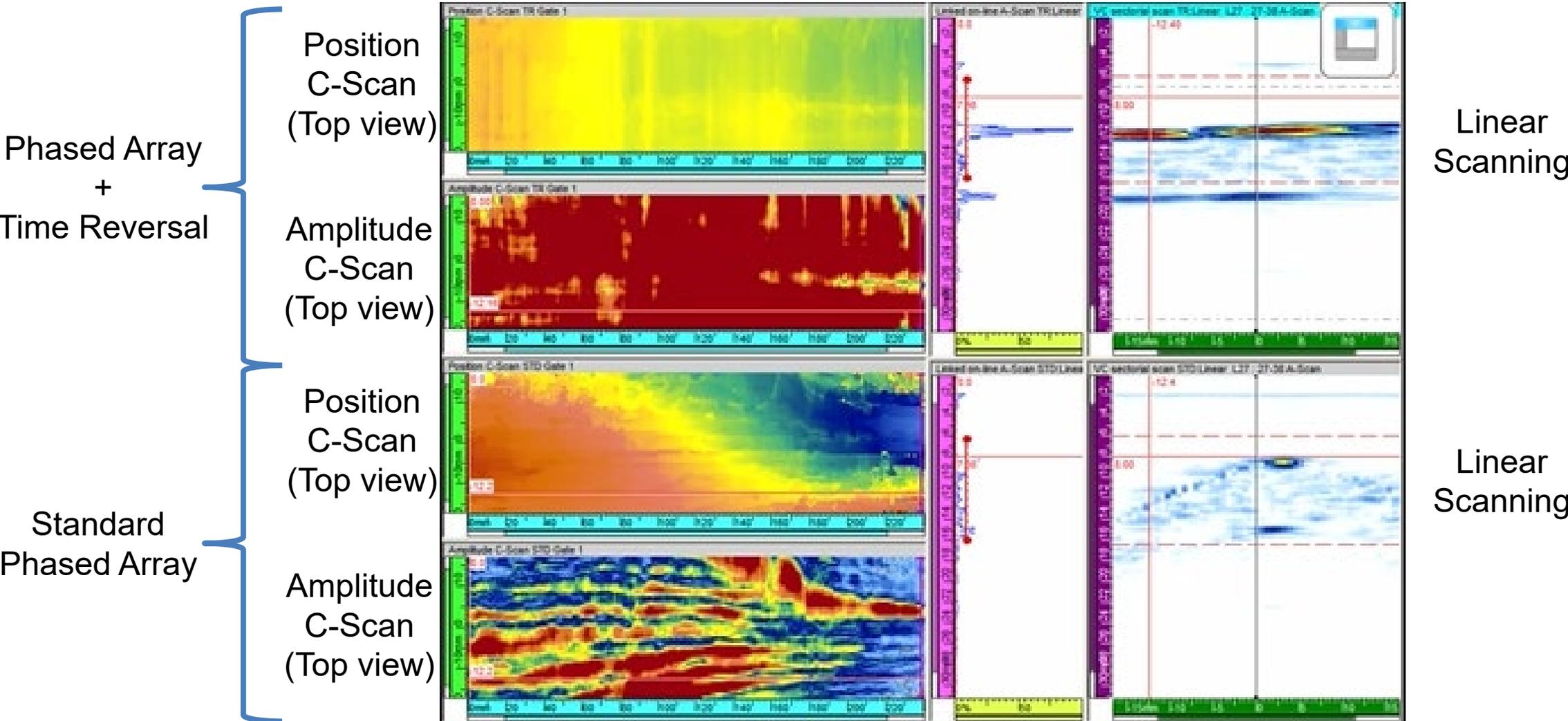
Linear Scanning Interface Echo
Nach wie vor grade durch den TR Prozess



Profile Auswertung (Part – Prüfkopf)

// Puls Interface Echo

Prüfung eines variablen Radius von 14 mm bis 28 mm



Prüfung eines variablen Radius von 14 mm bis 28 mm



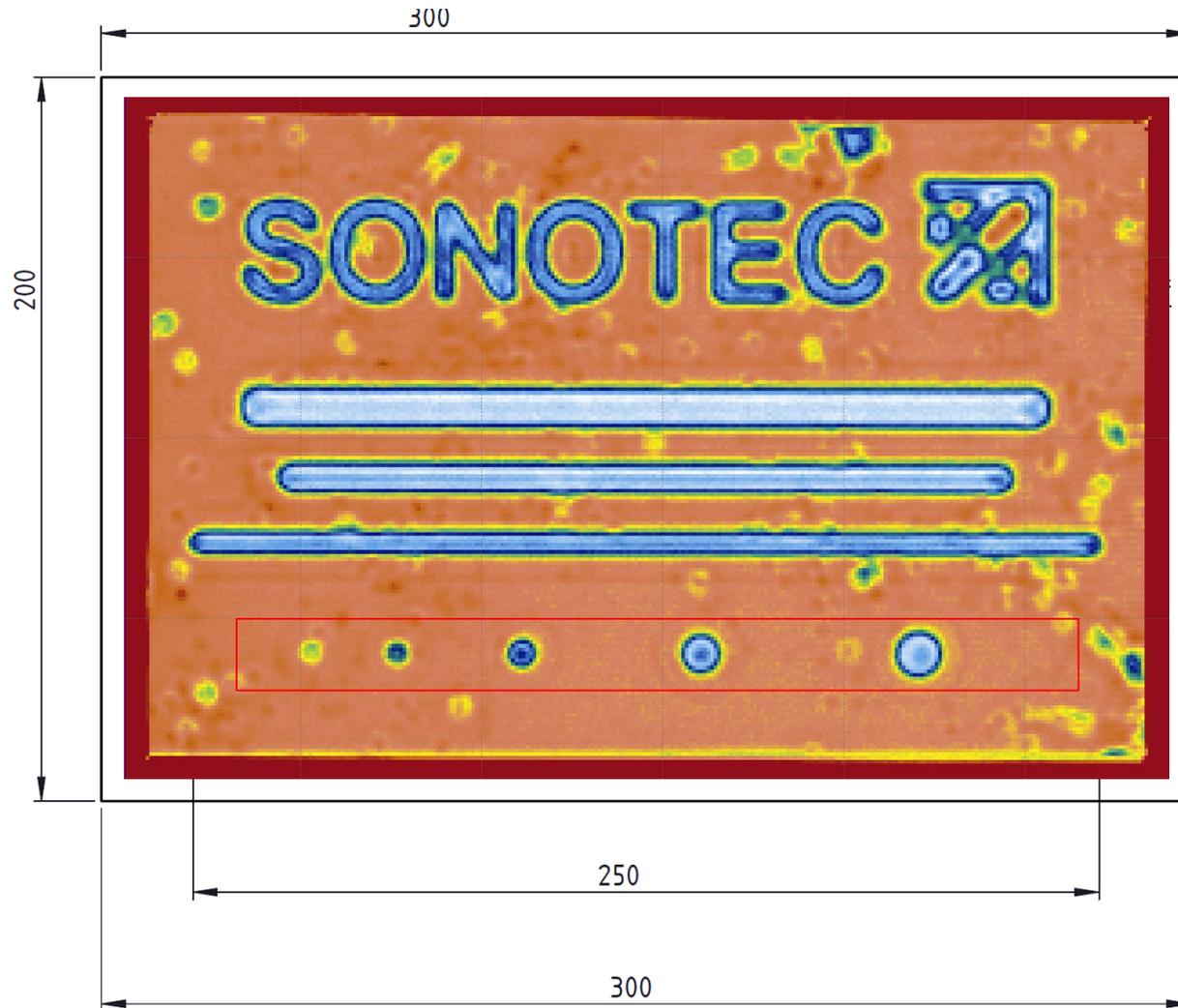
ANWENDUNGSBEISPIELE



BERÜHRUNGSLOSE PRÜFUNG
VON MONOLYTISCHEN FKV UND
SANDWICHVERBUNDEN MIT
LUFTGEKOPPELTEN ULTRASCHALL



Verklebte PMMA-Platten mit Lufteinschlüssen

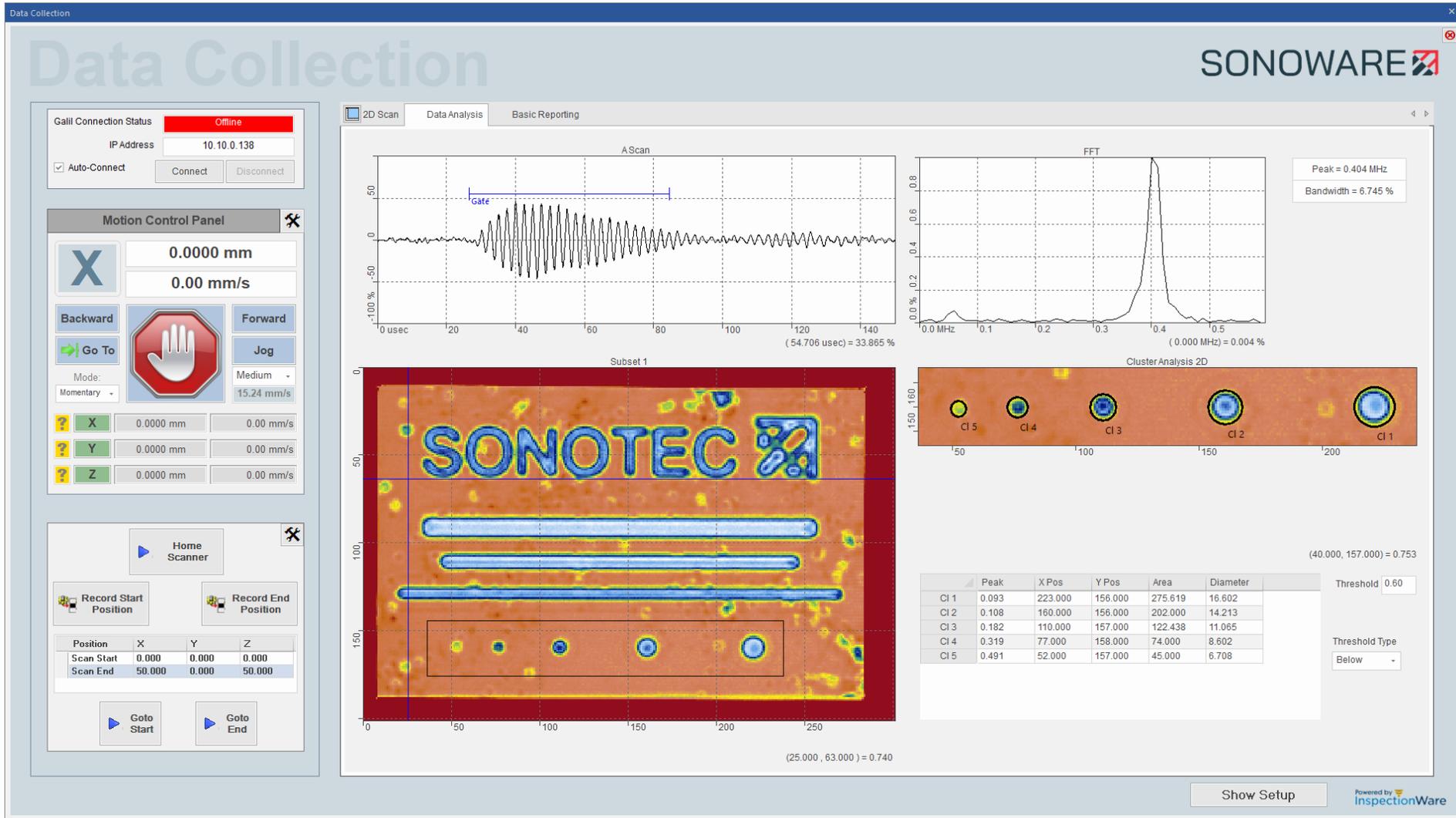


- ▶ Fokussierte 400 kHz Prüfköpfe
- ▶ 1 x 1 mm Messraster

- ▶ Ø2 mm eindeutig detektierbar
- ▶ Fehler in der Verklebung sind deutlich erkennbar

- ▶ Keine Tiefeninformation über die Tiefe der Nuten und Bohrungen
- ▶ Die kleinen Bohrungen (Ø2 mm) werden deutlich zu groß dargestellt

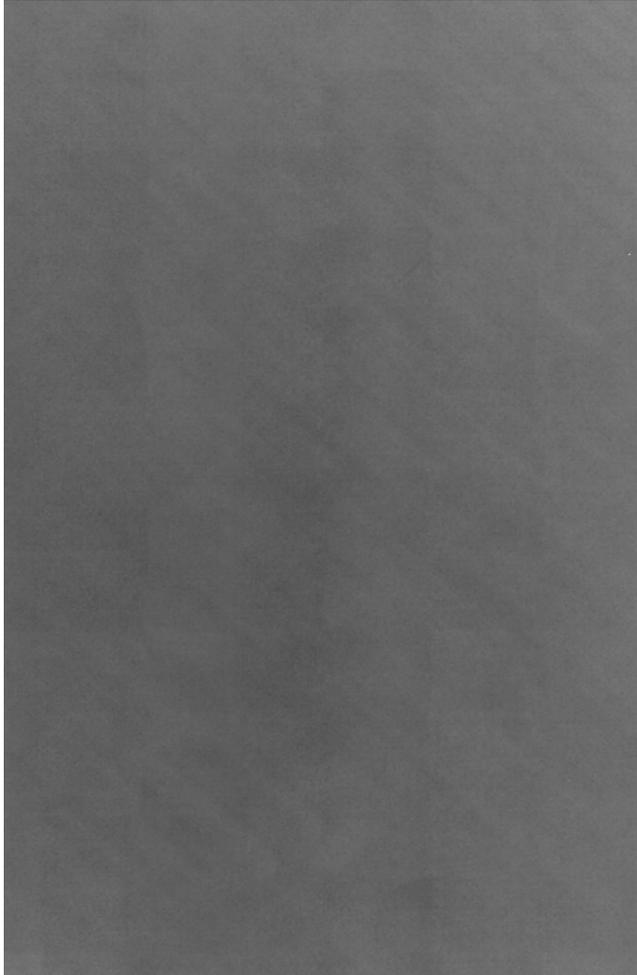
Analyse von Luftultraschallmessungen



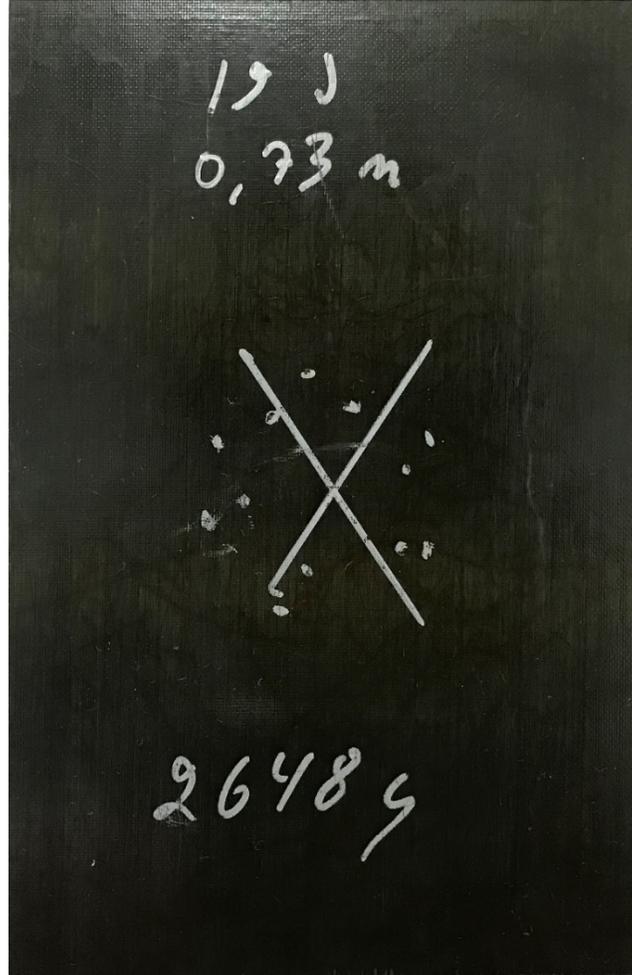
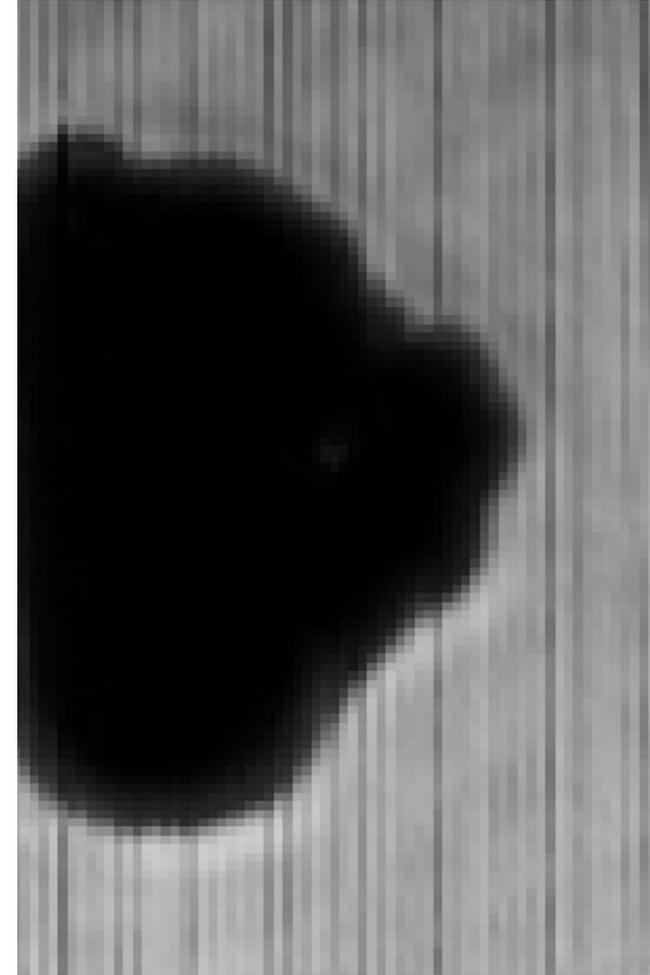
- Aufnahme der vollständigen Wellenformen
- Auswertung der Schallinformationen
- Nutzung von Filter- Algorithmen in 1D und 2D Information
- Automatische Bewertung durch Clusteranalyse
- Datenspeicherung im offenen Binärdatenformat

CFK mit Impactschaden

Röntgen

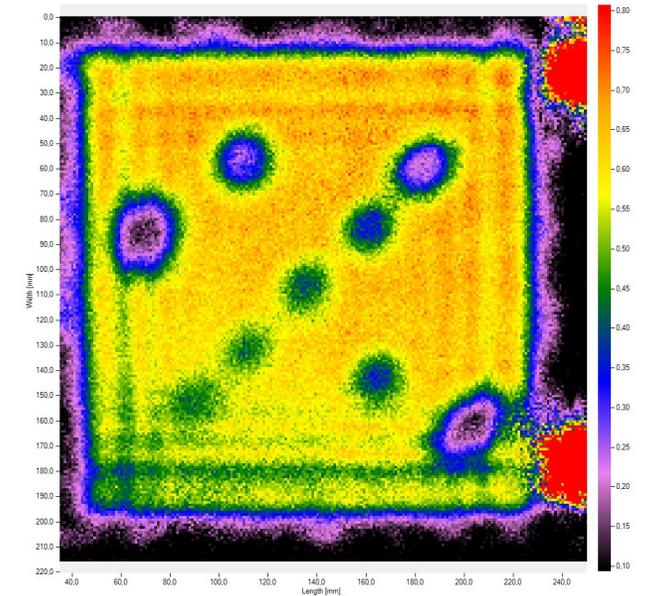
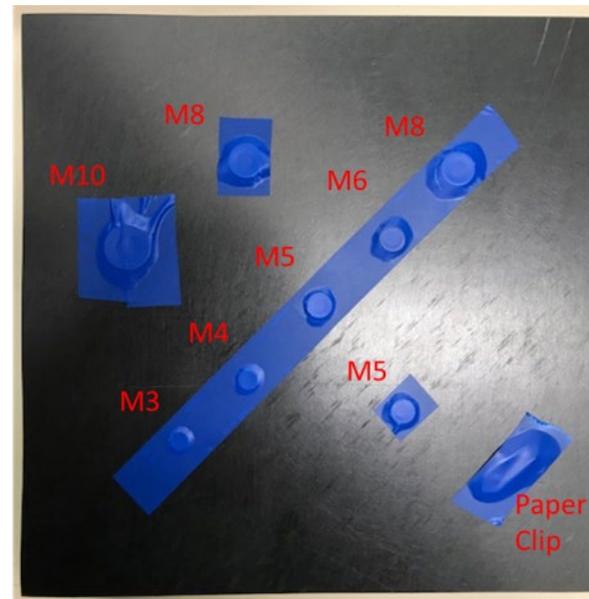
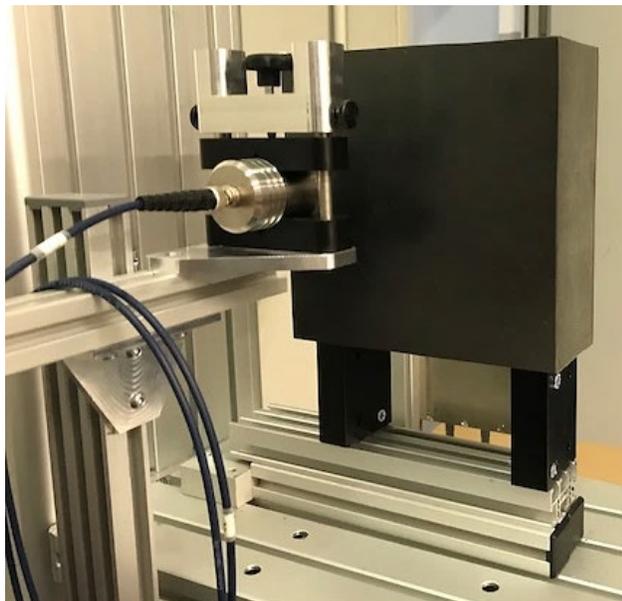
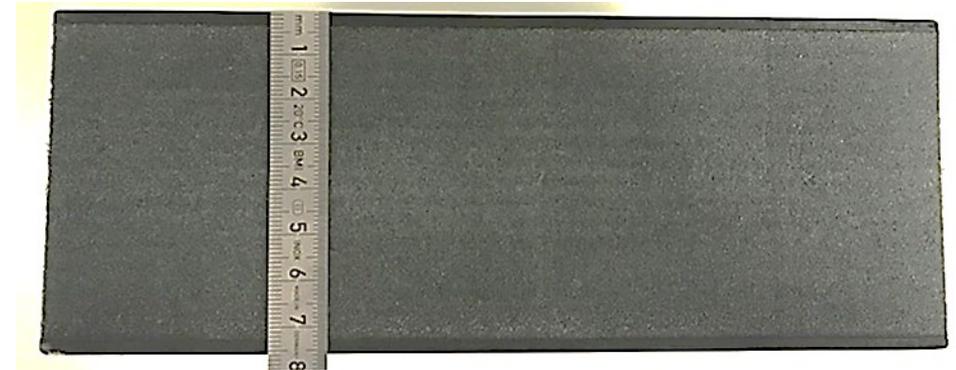


Luftultraschall



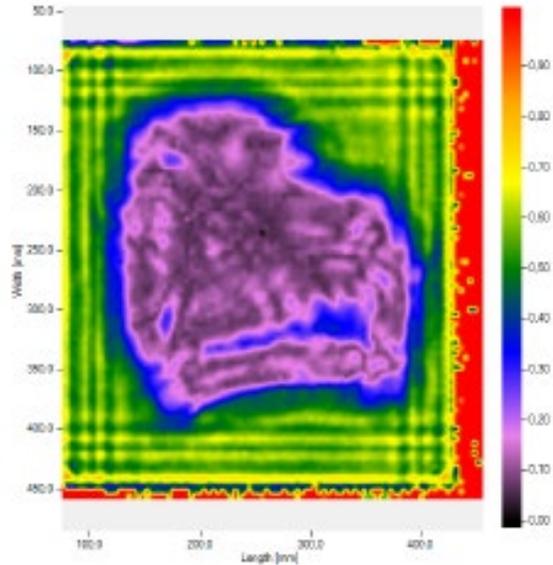
CFK Sandwich mit Schaumkern

Prüfgerät: SONOTEC SONOAIR
Prüfkopf: SONOTEC CF075
Prüfobjekt: CFK mit 70 mm Schaumkern
Fehler: Unterlegscheiben als künstliche Fehler

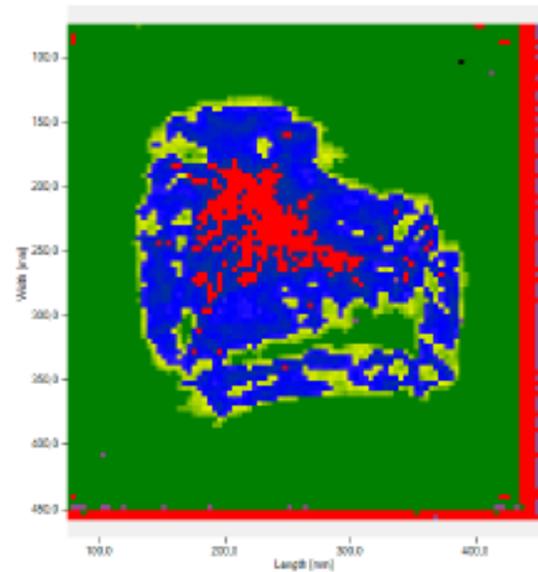


GFK SMC bis zu 130 mm Dicke

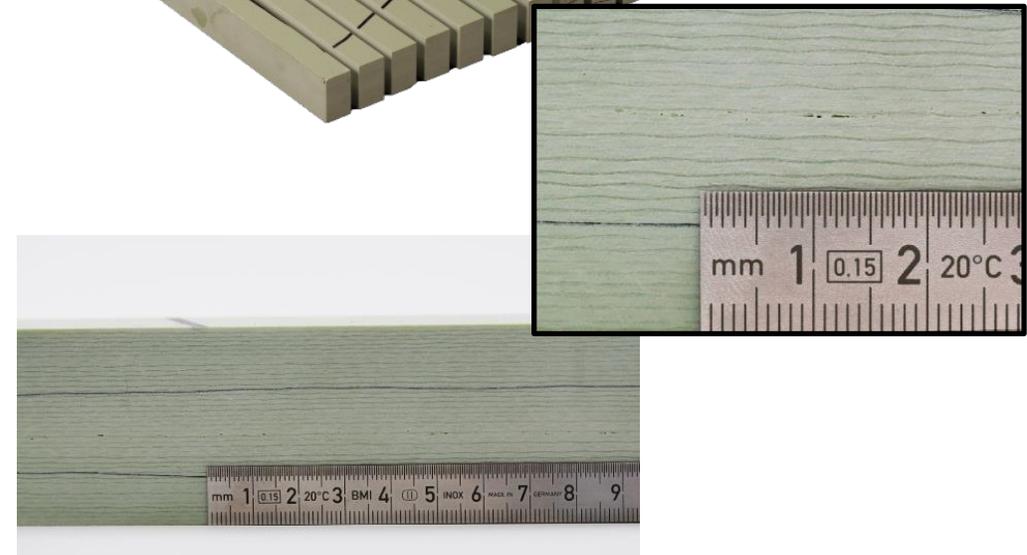
Intensity



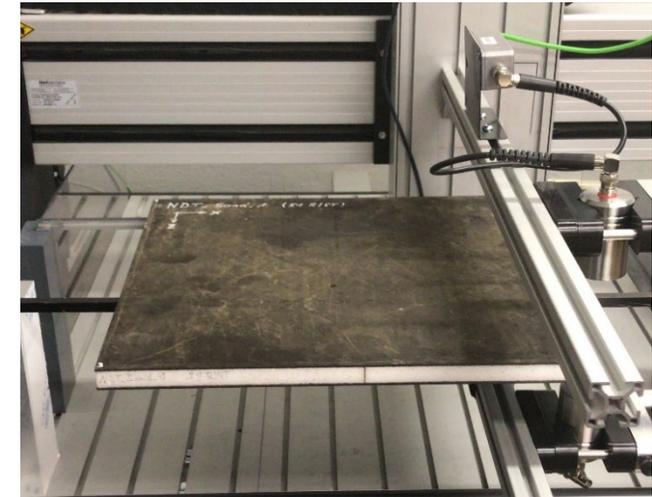
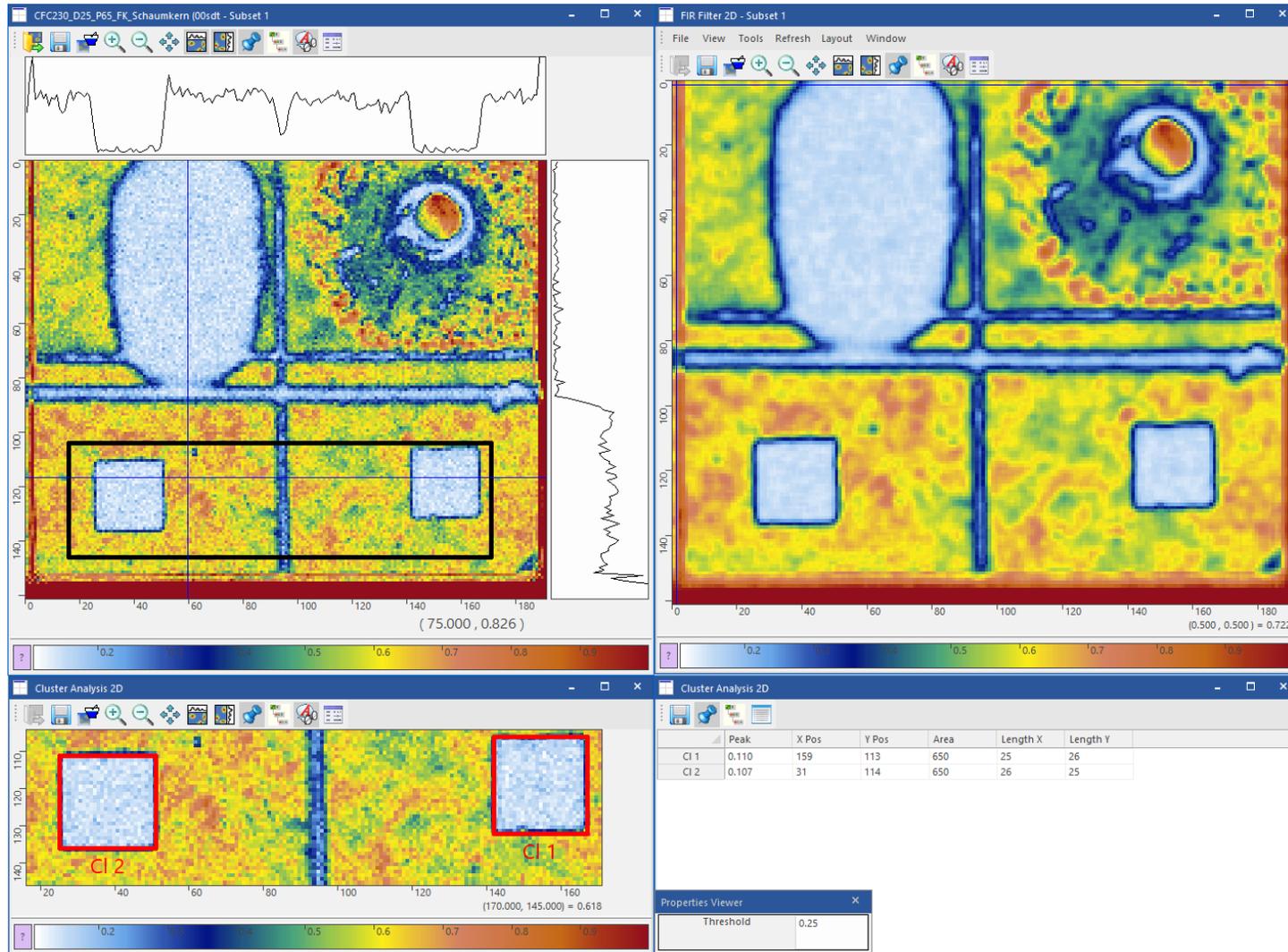
Intensity



- ▶ Bis zu 130 mm Plattendicke
- ▶ Fehlergröße im Verbund < 1 mm
- ▶ SPS Verbindung für automatisches Ausschleusen



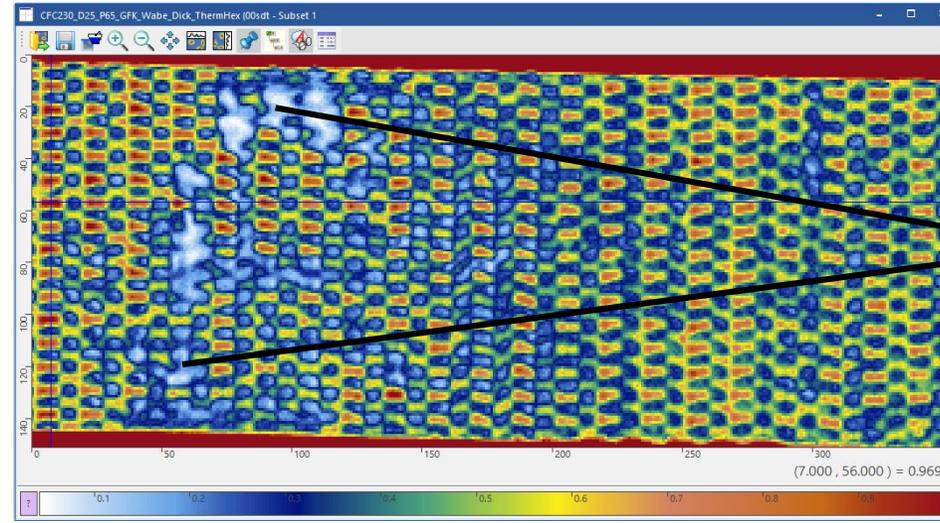
CFK-Sandwichverbund mit Schaumkern und Testfehlern



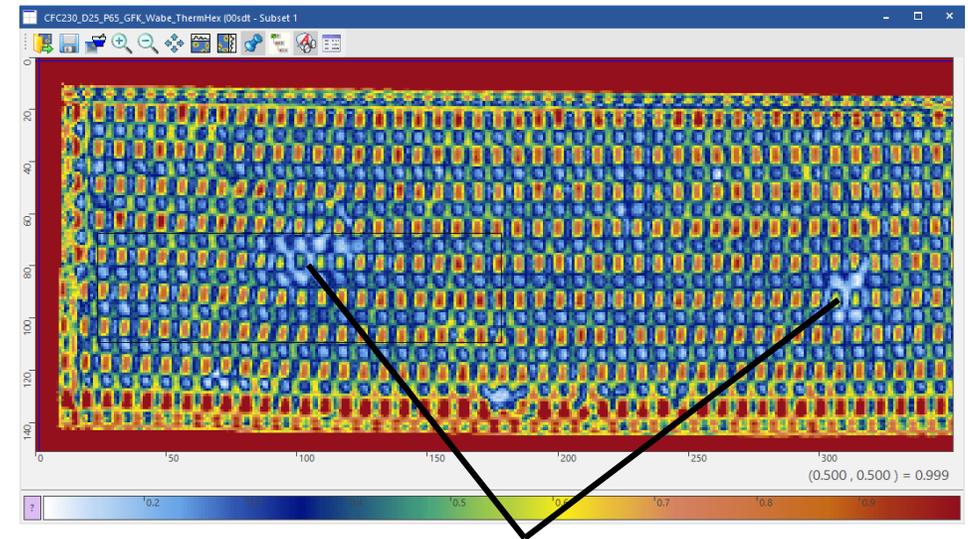
- ▶ 25 mm Schaumkern
- ▶ 3 mm CFK Deckschichten
- ▶ Transmissionsmessung
- ▶ 230 kHz Prüfkopf mit Punktfokus

- ▶ FIR Filter
- ▶ Linienauswertung
- ▶ Grenzwertbasierende Cluster Analyse

GFK Organobleche mit ThermHex-Thermoplastwabenkern



Delamination



Impaktschaden

Zwei-Kanal Messung

- CFC230_D25_P65 Prüfköpfe
- Messung von mehreren Prüfobjekten gleichzeitig zur Reduktion der Gesamtprüfdauer



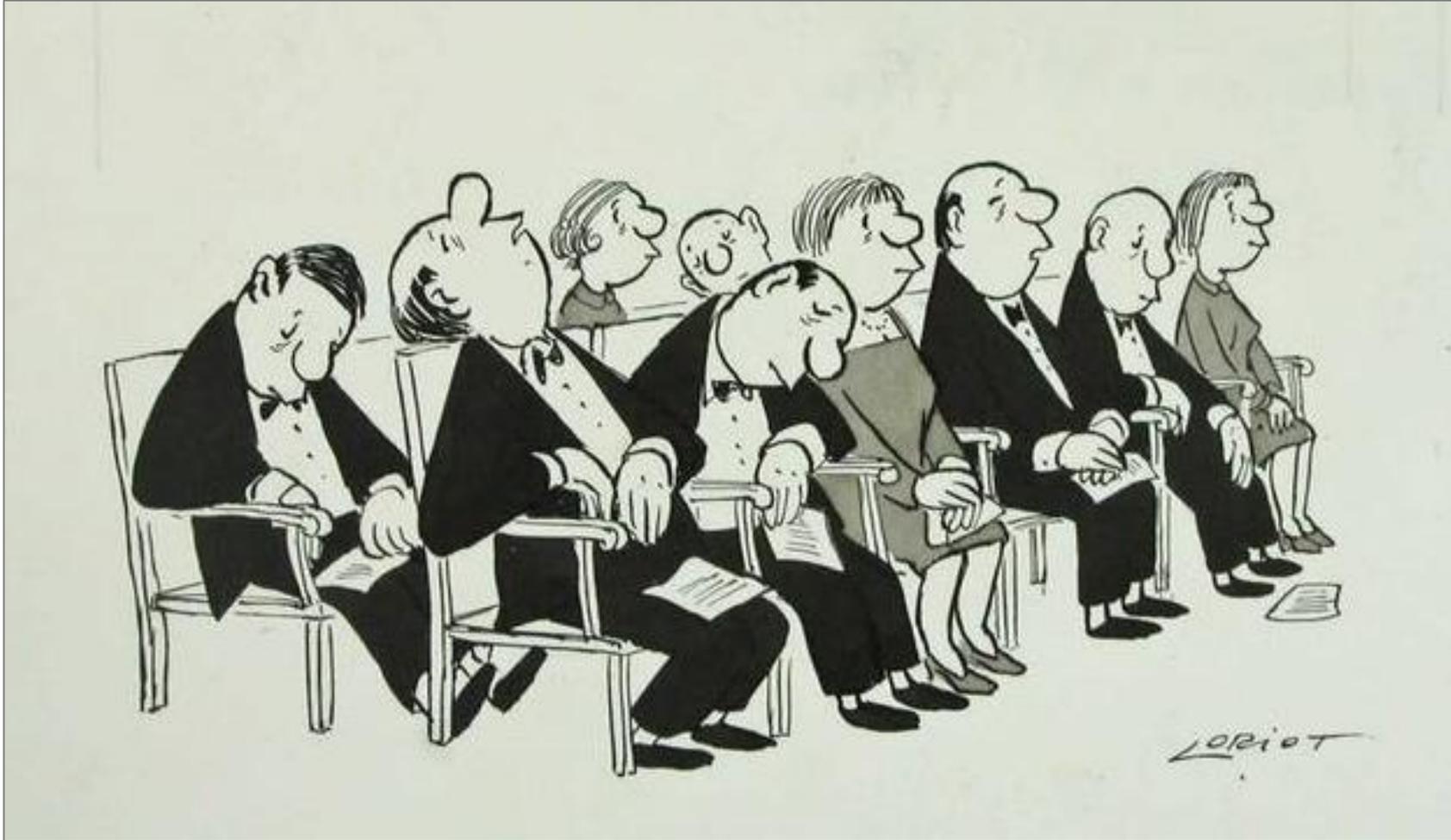
Forschungszentrum
Ultraschall



Ultrasonic Solutions | Made in Germany



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Ultraschall ist unsere Stärke.

Adresse

SONOTEC GmbH
Nauendorfer Str. 2
06112 Halle (Saale)

Geschäftsführer

Hans-Joachim Münch
Manuela Münch
Michael Münch

Telefon

+49 (0)345 133 17 - 0

Fax

+49 (0)345 133 17 - 99

E-Mail

sonotec@sonotec.de

Internet

www.sonotec.de

