

Verfahren zur Modellierung und Simulation in der Ultraschallprüfung – ein Leitfaden des Unterausschusses Modellierung und Bildgebung im DGZfP Fachausschuss U

Martin SPIES¹

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung

DGZfP Fachausschuss Ultraschallprüfung (FA U)

UA Modellierung & Bildgebung im FA U

Simulationsverfahren gewinnen in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eine immer größere Bedeutung. Auf der Basis geeigneter Modelle helfen sie beim Verständnis komplexer Wellenausbreitungsphänomene, bei der Optimierung von Prüfparametern und bei der Interpretation experimenteller Ergebnisse. Oft fällt es schwer, aus der Fülle der Verfahren die für die jeweilige Fragestellung ‚am besten‘ geeignete Methode auszuwählen.

Der Unterausschuss Modellierung und Bildgebung im DGZfP Fachausschuss Ultraschallprüfung hat es sich daher zur Aufgabe gesetzt, den aktuellen Stand der Modellierung übersichtlich und prägnant darzustellen. Der Leitfaden soll potentiellen Anwendern von Simulationsverfahren bei der Auswahl geeigneter Methoden in Abhängigkeit von der jeweiligen Prüfsituation helfen. Es werden Antworten auf die folgenden Fragen gegeben: Was leisten die verschiedenen Verfahren? Welche Randbedingungen sind zu beachten? Wer bietet Modellierungslösungen an?

Dieser Beitrag informiert anhand von Auszügen und Beispielen über Struktur und Inhalte des Leitfadens, der die verschiedenen Verfahren verständlich beschreibt und anhand von Musterlösungen deren Anwendungsgebiete illustriert.



Verfahren zur Modellierung und Simulation in der Ultraschallprüfung – ein Leitfaden des Unterausschusses Modellierung und Bildgebung

DACH-Tagung
Salzburg, 11.-13.Mai 2015

Martin Spies

DGZfP Fachausschuss Ultraschallprüfung (FA U)
UA Modellierung & Bildgebung im FA U

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Saarbrücken

© Fraunhofer



Verfahren zur Modellierung und Simulation in der Ultraschallprüfung – ein Leitfaden des Unterausschusses Modellierung und Bildgebung im DGZfP Fachausschuss U

- Warum Simulation?
- Wozu ein Leitfaden?
- Struktur und Inhalt
 - Auszüge
 - Beispielen
 - Musterlösungen
- Ausblick

© Fraunhofer



Unterausschuss Modellierung und Bildgebung

- Beiträge zu diesem Vortrag von
 - Dr. Klaus Mayer, Universität Kassel, und Dr. Martin Krause, BAM, Berlin
 - Prof. Elfgard Kühnicke, TU Dresden
 - Dr. Thomas Orth, Dr. Till Schmitte, SZMF, Duisburg
 - Dr. Christoph Pientschke, Forschungszentrum Ultraschall, Halle
 - Martin Schickert, MFPA Weimar
 - Dr. Frank Schubert, Fraunhofer IKTS-MD, Dresden
- Weitere Vorträge in dieser Session
 - Dr. Hardy Ernst, QuaNDT, Murten, CH, und Herbert Willems, NDT Global, Stutensee
 - Andreas Gommlich, Dr. Frank Schubert, Fraunhofer IKTS-MD
 - Dr. Hauke Gravenkamp, BAM, Berlin

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Warum Simulation?

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

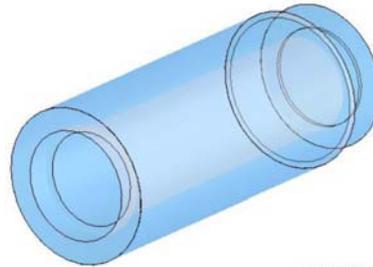
Komplexes Prüfobjekt

Prüfobjekt: CASTOR®-Behälterkörper in einer „Vordrehkontur“, also ohne Kühlrippen und Bohrungen

- ▶ Sphäro-Guss, Behälter mit Boden
- ▶ Länge ~ 6 m
- ▶ Durchmesser ~ 2,5 m
- ▶ Wanddicken ~0,5 m
- ▶ Gewicht > 100 t



CASTOR® V/19



Vordrehkontur V/19

T. Schmitte et al.; DACH-Tagung 2015, Vortrag Di.2.B.3

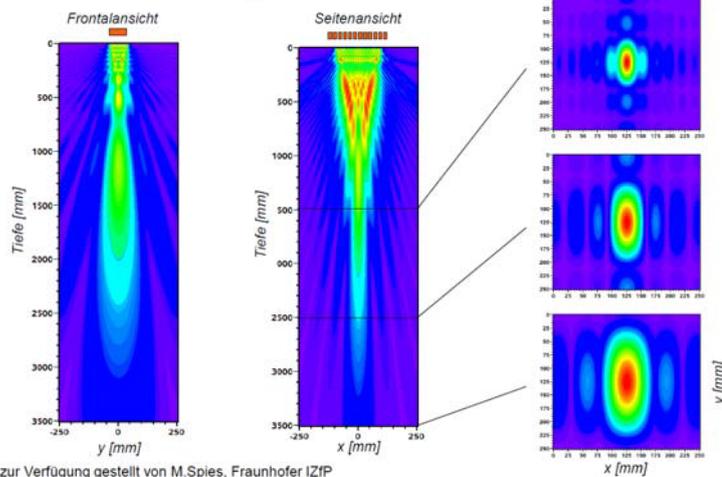
© Fraunhofer



Prüfkopfdesign mittels Simulation

T. Schmitte et al.; DACH-Tagung 2015, Vortrag Di.2.B.3

Schallfeld inkl. Schallschwächung, Fokus: 2500 mm



Simulationen zur Verfügung gestellt von M.Spies, Fraunhofer IZFP

© Fraunhofer

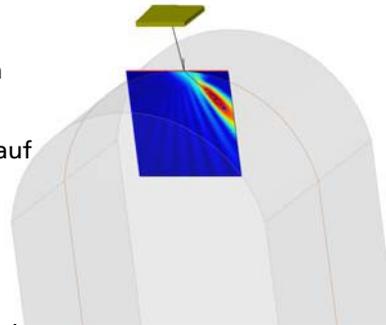


Simulierte Prüfkonfiguration

- 2D Matrix Phased Array
 - 16 x 16 Elemente, Frequenz 5 MHz
 - Elementbreite 0.5 mm, Pitch 0.6 mm
 - aktiver Bereich 9.5 x 9.5 mm
- Immersionstechnik, 10 mm Wasservorlauf
- Fokustiefe 5 mm
- Longitudinalwellen @ 90° und 45°
- Transversalwellen @ 45°

- Bauteil aus ferritischem Stahl - Oberfläche
 - planar
 - konvex/konkav 1" (25.4 mm) Krümmungsradius

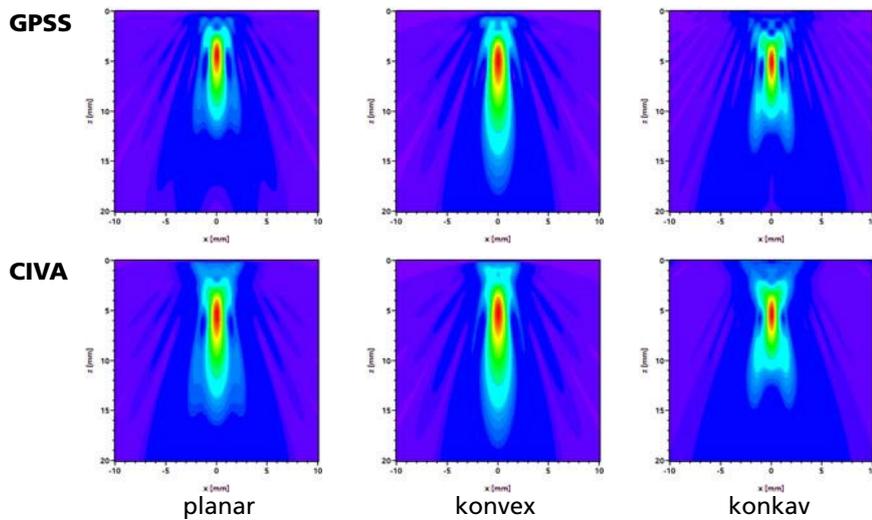
- M. Spies, Th. Orth; Berichtsband BB 127-CD DGZfP-Jahrestagung (2011), DGZfP, Berlin, P76



© Fraunhofer



Schallfeldvergleich – 90° L-Welle

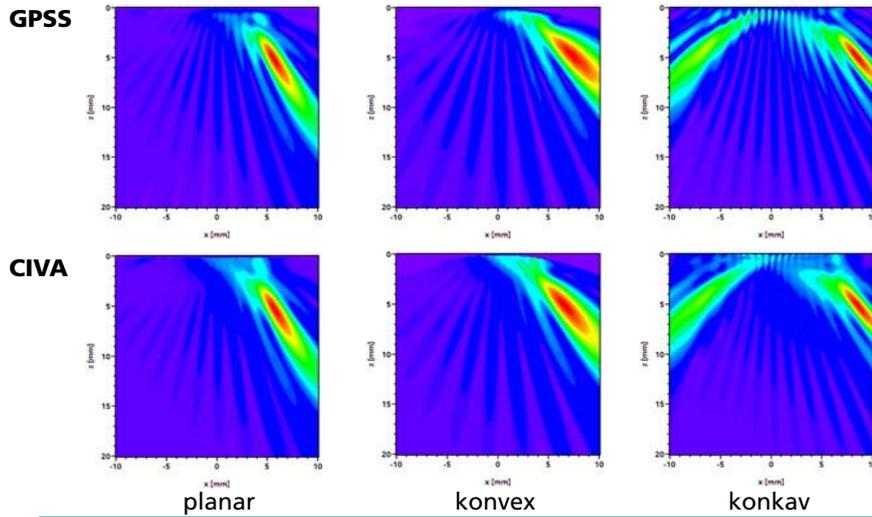


- M. Spies, Th. Orth; Berichtsband BB 127-CD DGZfP-Jahrestagung (2011), DGZfP, Berlin, P76

© Fraunhofer



Schallfeldvergleich – 45° L-Welle



■ M. Spies, Th. Orth; Berichtsband BB 127-CD DGZfP-Jahrestagung (2011), DGZfP, Berlin, P76

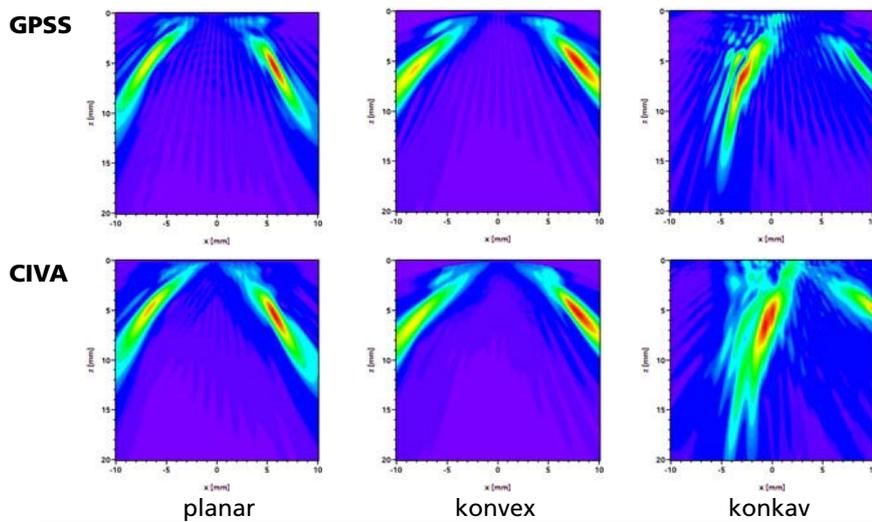
© Fraunhofer

SALZGITTER
MANNEMANN
FORSCHUNG
Ein Unternehmen der Salzgitter Gruppe

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IZP

Schallfeldvergleich – 45° T-Welle



■ M. Spies, Th. Orth; Berichtsband BB 127-CD DGZfP-Jahrestagung (2011), DGZfP, Berlin, P76

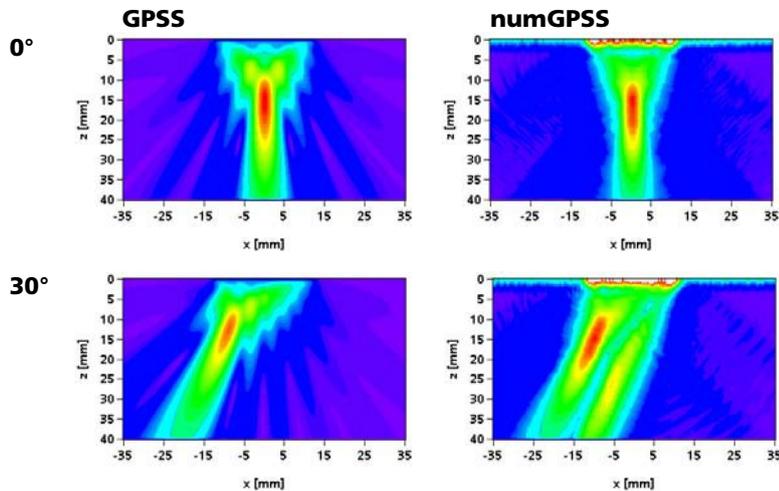
© Fraunhofer

SALZGITTER
MANNEMANN
FORSCHUNG
Ein Unternehmen der Salzgitter Gruppe

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IZP

Vergleich mit GPSS-Berechnungen – Schallfelder Linear Array (16 El., 1 MHz, 26 x 12 mm²)

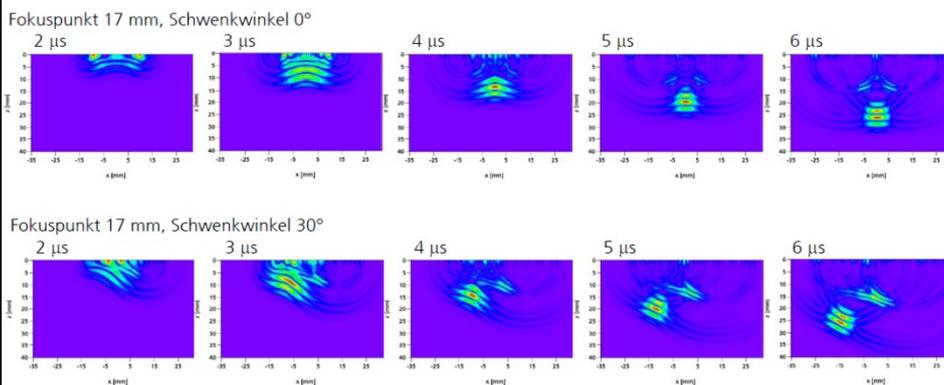


© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IZP

Simulation der Wellenausbreitung – Linear Array (16 Elemente, 1 MHz, 26 x 12 mm²)



■ Vortrag Di.1.B.4 zu ähnlichem Verfahren

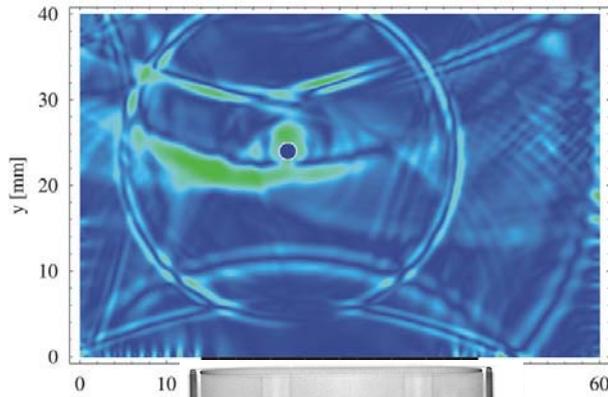
© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IZP

Phased Array – EFIT-Simulation

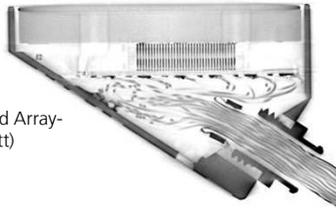
F. Schubert, Fraunhofer IKTS-MD, Dresden



Direkte sendeseitige
Fokussierung der
elastischen Wellen!

 **Fraunhofer**
IKTS

16-kanaliger Phased Array-
Wandler (CT-Schnitt)



© Fraunhofer

 **TUV**
Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IKTS

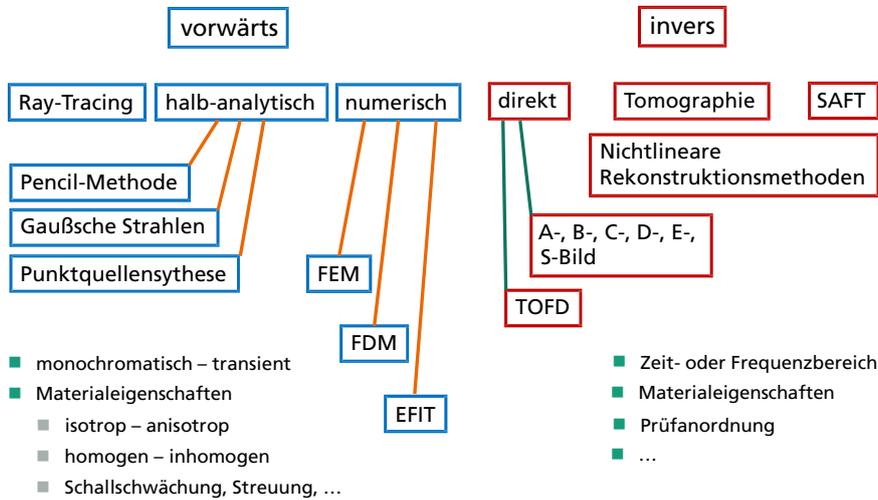
Wozu ein Leitfaden?

© Fraunhofer

 **TUV**
Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IKTS

Übersicht – Vielfalt der Verfahren

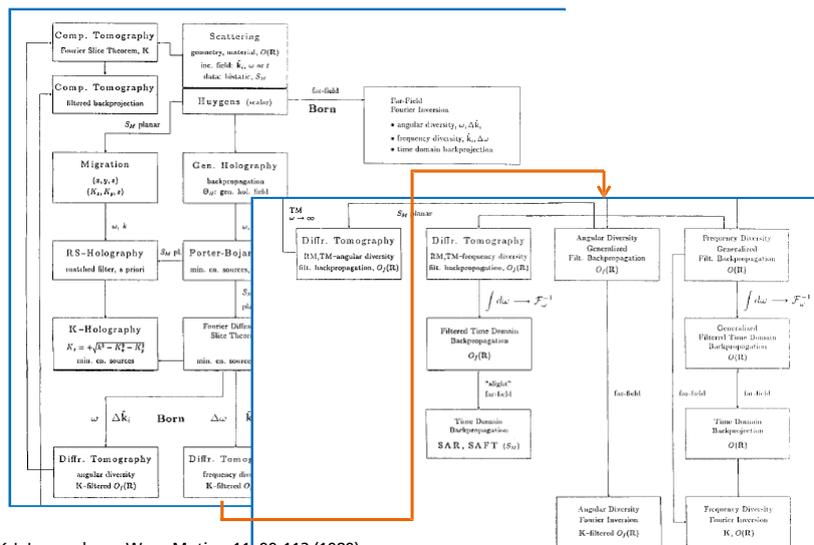


© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
 am Fraunhofer IZP Saarbrücken



General Framework of Linearized Inverse Scattering Solutions



© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
 am Fraunhofer IZP Saarbrücken



Naheliegende Fragen ... und Antworten

- Was leisten die verschiedenen Verfahren?
- Welche Randbedingungen sind zu beachten?
- Welches Verfahren ist für die jeweilige Fragestellung ‚am besten‘ geeignet?
- Wer bietet Modellierungslösungen an?



- Leitfaden als Anleitung zu Auswahl der Methode
- Verständliche Beschreibung der Verfahren
- Musterlösungen zu speziellen Anwendungsgebieten



© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Leitfaden – Struktur und Inhalt

© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Inhaltsangabe

1. Einführung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur

© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung →
 - Vorwärtsrechnung und inverse Verfahren
 - Modellansätze (Strahlen, Wellen, analytische, numerische Verfahren)
 - Aufbau der Broschüre und Anleitung zur Nutzung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur

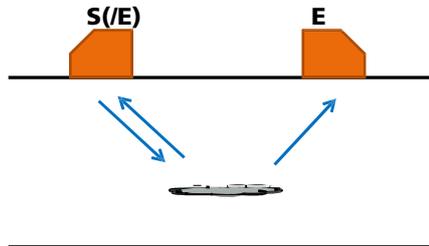
© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur



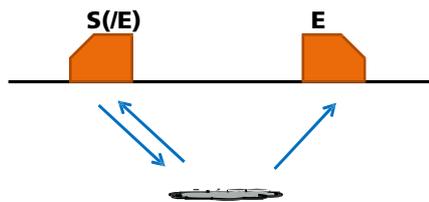
© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Fraunhofer
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur



- Ray-Tracing
- Analytische Methoden
- Halb-analytische Methoden
 - Generalisierte Punktquellensynthese
 - Superposition Gaußscher Strahlen
 - Pencil-Methode
- Numerische Methoden
 - Finite Elemente Methode
 - Finite Differenzen Methode
 - Elastodynamische Finite Integrationstechnik EFIT

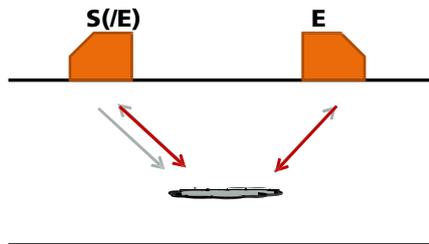
© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Fraunhofer
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur



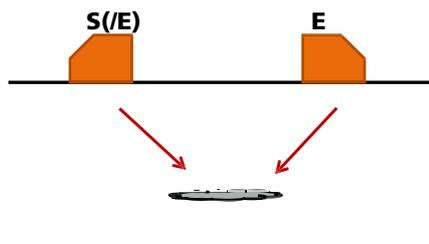
© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung
2. Vorwärtsverfahren
3. Inverse Verfahren
4. Musterlösungen
5. Anhang / Glossar / Literatur



- Direkte Bildgebung A- bis D-Bild, E-Bild, S-Bild, TOFD
- Tomografie
- SAFT-Rekonstruktion
- Nichtlineare Rekonstruktionsmethoden

© Fraunhofer

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

Fraunhofer
IPT

Inhaltsangabe

1. Einführung

2. Vorwärtsverfahren

3. Inverse Verfahren

4. Musterlösungen

5. Anhang / Glossar / Literatur

- Analytisches Ray-Tracing
- Halb-analytisches Ray-Tracing
- Punktquellensynthese:
Prüfkopfauslegung Linear-Array
- Punktquellensynthese:
Optimierung der Fehlerprüfung
- Korrektur von Geometrieeffekten bei der Impact-
Echo-Prüfung
- Finite-Elemente-Methode: Prüfkopfmodellierung
- ...

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Musterlösung Prüfkopfmodellierung mit FEM



Christoph Pientschke Forschungszentrum Ultraschall
gGmbH, Halle (Saale) christoph.pientschke@fz-u.de

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Finite-Elemente-Modellierung



→ Tool zur Wandlermodellierung basierend auf physikalischen Eigenschaften

Nachteil: Rechenaufwand, vollständige Kenntnis der Materialparameter notwendig

© Fraunhofer



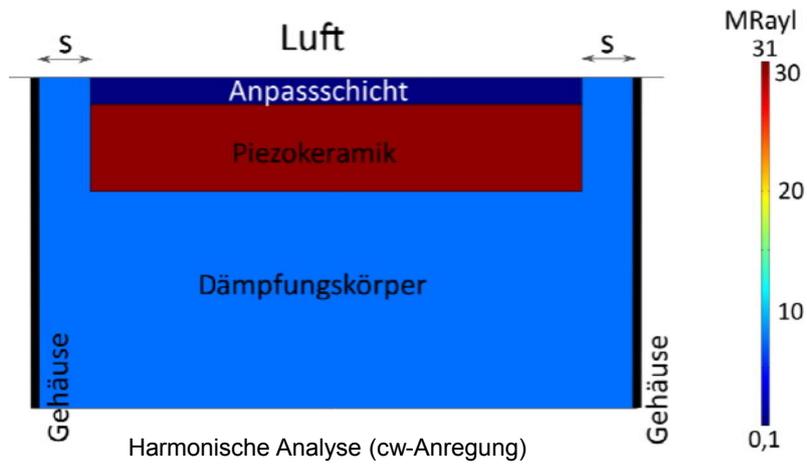
Umsetzung

- Kommerzielles Programm COMSOL Multiphysics
- Rechenmodi:
 - Statische Rechnung
 - Modalanalyse (Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsmoden)
 - Harmonische Analyse (Antwort auf sinusförmige Anregung → cw-Anregung)
 - Transiente Analyse (beliebige zeitabhängige Anregung → rechenintensiv)
 - **Zusätzlich:** Parametersweeps, um Abhängigkeit von geometrischen oder Materialparametern zu ermitteln
- Diverse Randbedingungen, Materialmodelle
- Ergebnisgrößen
 - Direkt: physikalische Größen
 - Abgeleitet: Mittelwerte, Integrale, Extrema, Funktionen von Ergebnisgrößen, Größen entlang von Schnittlinien oder -ebenen, bei zeitlichen Abhängigkeiten: Spektren (aus FFT)

© Fraunhofer



Rotationssymmetrisches Wandlermodell



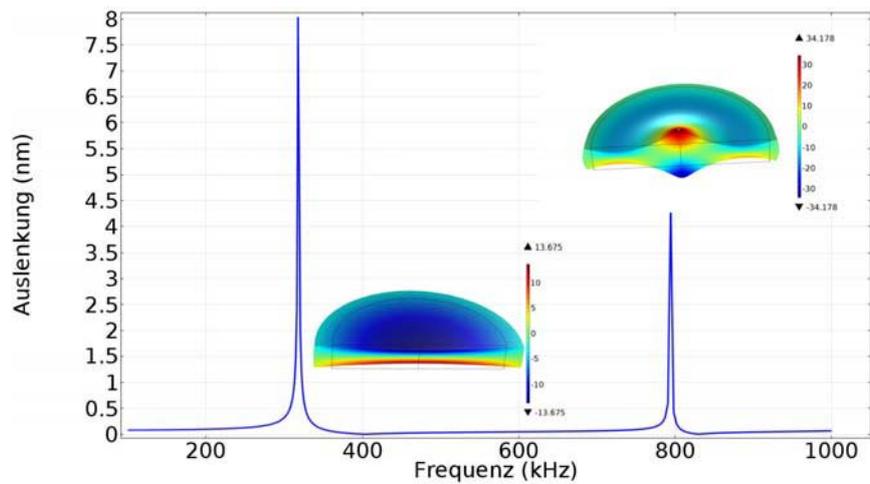
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Auslenkungsamplitude (in z-Richtung)



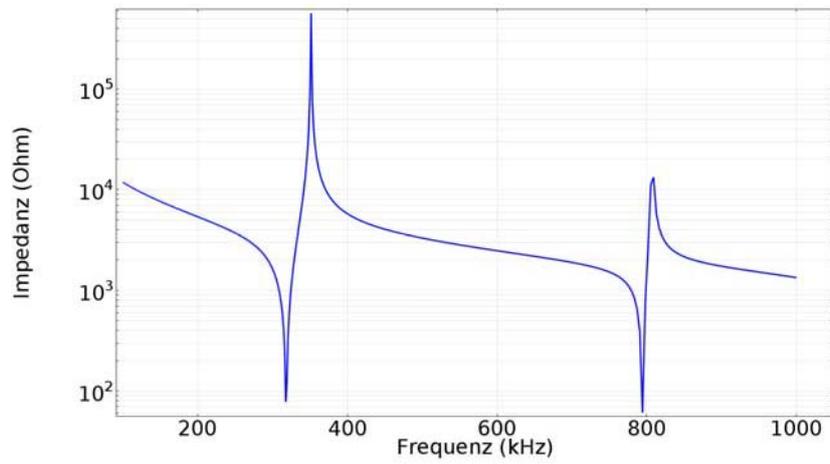
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Impedanzspektren



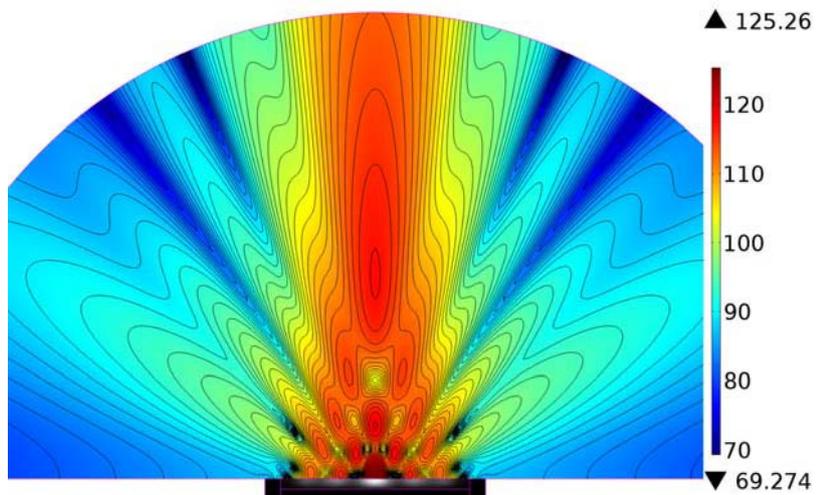
© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken



Schallfeld (dB)

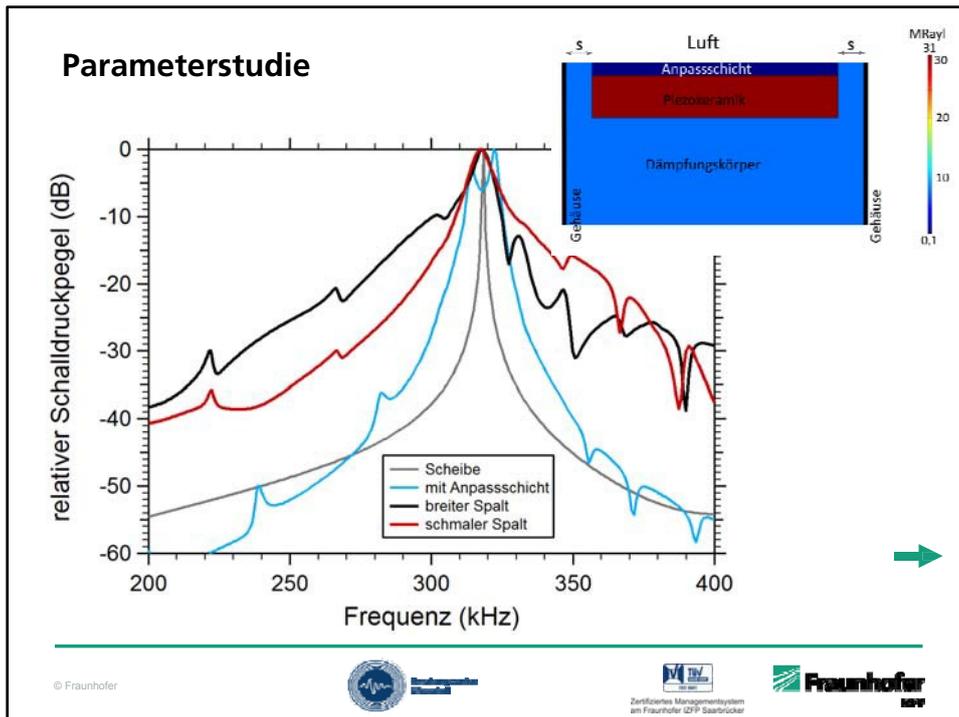


© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken





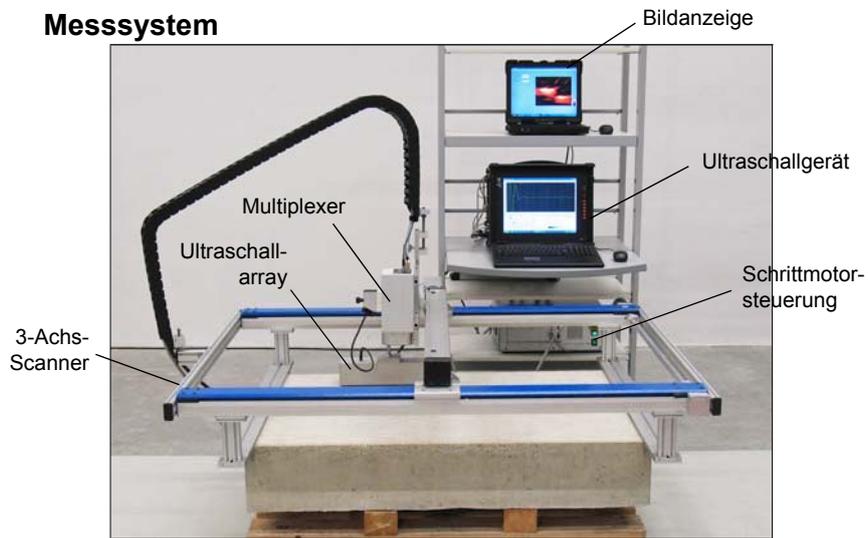
Musterlösung Automatisiertes SAFT-Abbildungssystem FLEXUS

Martin Schickert
MFA Weimar



Abbildungssystem

Messsystem

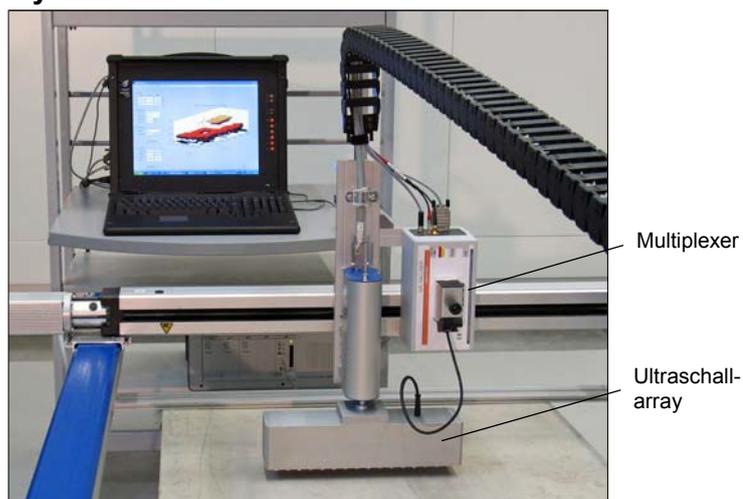


© Fraunhofer



Abbildungssystem

Messsystem



© Fraunhofer



Abbildungssystem

Ultraschall-Array



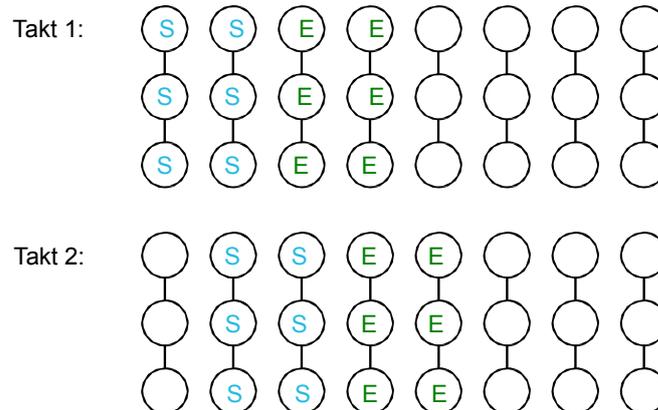
48 Wandler in 16 Gruppen
Transversalwellen 55 kHz
(MEPAWeimar)

© Fraunhofer



Abbildungssystem

Ultraschallarray: Elektronische Array-Ansteuerung



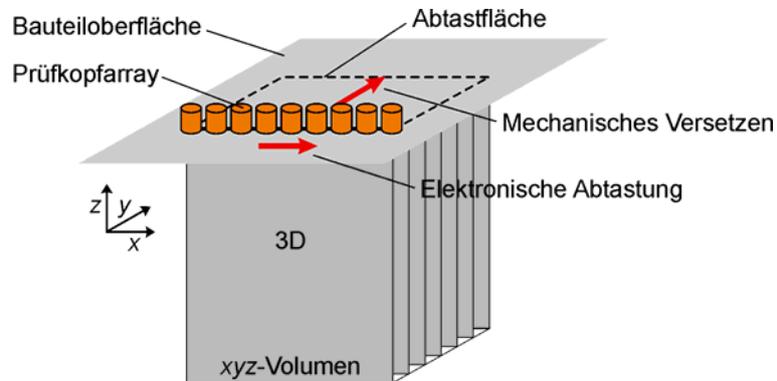
Beispiel: 6 Sender/6 Empfänger in S/E-Anordnung
(beliebige Ansteuermöglichkeiten konfigurierbar)

© Fraunhofer



Abbildungssystem

Effiziente Abtastung und 3D-Schnittbildberechnung



- Kombination elektronische Umschaltung/mechanisches Versetzen
- 3D-SAFT-Rekonstruktion aus 2D-SAFT-Schnitten
- min. 3 s/Schritt (Messung, versetzen, SAFT)

© Fraunhofer



SAFT-Verfahren

Aperturkonfigurationen

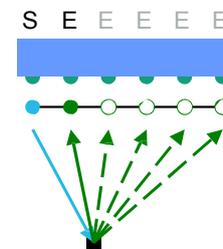
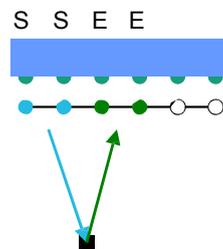
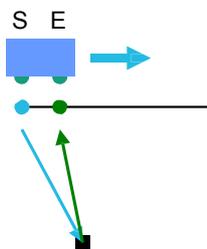
Einzel-PK

Prüfkopf-Array

Bewegter realer PK

Bewegter virtueller PK

Kombination von PKs



© Fraunhofer



SAFT-Verfahren

Aperturkonfigurationen

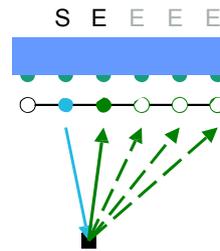
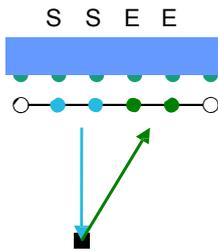
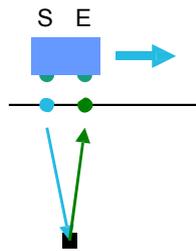
Einzel-PK

Prüfkopf-Array

Bewegter realer PK

Bewegter virtueller PK

Kombination von PKs



© Fraunhofer

MPA

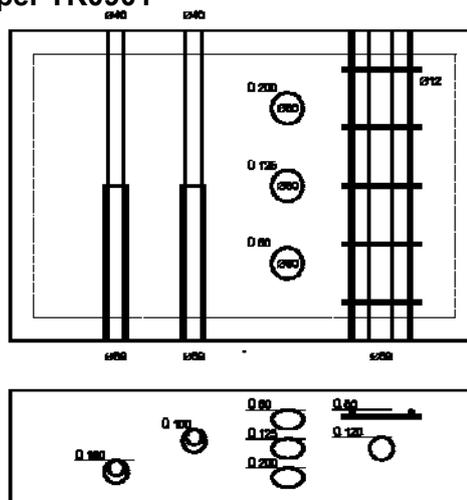
Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Fraunhofer
IPT

Vergleichsmessungen

Testkörper TK0901

1,2 m x 0,8 m x 0,3 m



© Fraunhofer

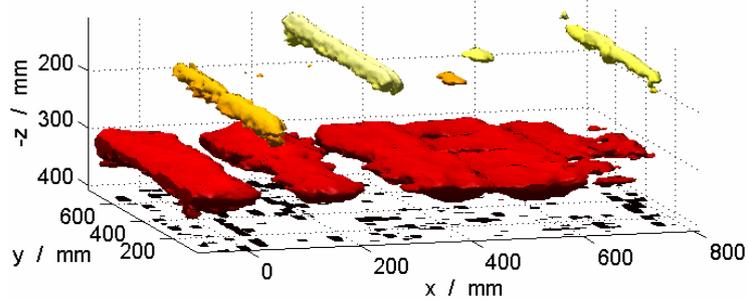
MPA

Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Fraunhofer
Maße in mm

Vergleichsmessungen

3D-SAFT aus 2D-SAFT-Schnittbildern



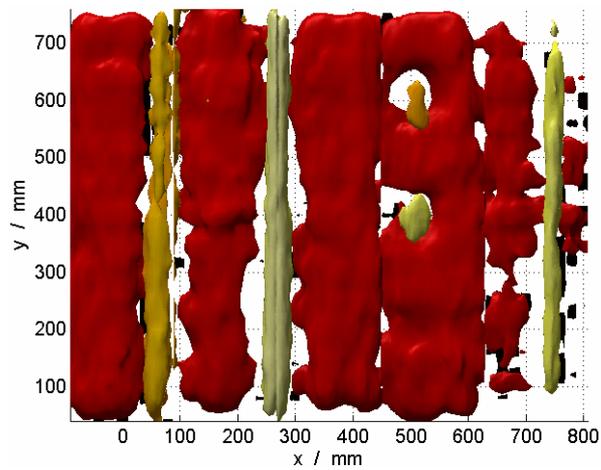
2D-SAFT-C, virtueller PK 3 S / 3 E, Kombination 120 Takte ($\Delta_{\text{max}} = 15$)

© Fraunhofer



Vergleichsmessungen

3D-SAFT aus 2D-SAFT-Schnittbildern



2D-SAFT-C, virtueller PK 3 S / 3 E, Kombination 120 Takte ($\Delta_{\text{max}} = 15$)

© Fraunhofer



ICE-Brücke

Spannkanalortung auf einer ICE-Brücke

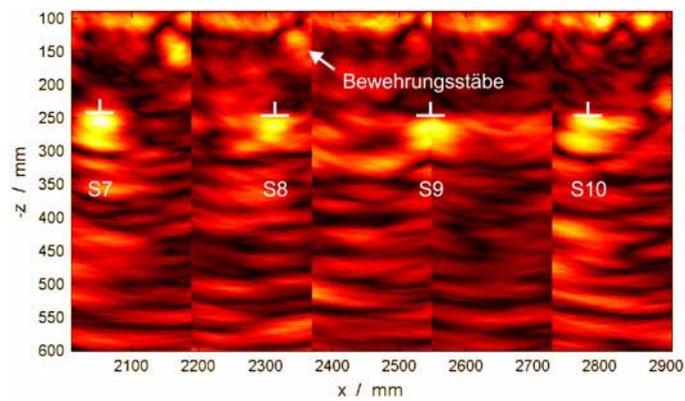


© Fraunhofer



ICE-Brücke

Spannkanalortung auf einer ICE-Brücke



→ 46 von 47 Spanngliedern geortet und lokalisiert

© Fraunhofer



Beispiel: Lokalisierung von Verpressfehlern in Spannkanälen von Betonobjekten

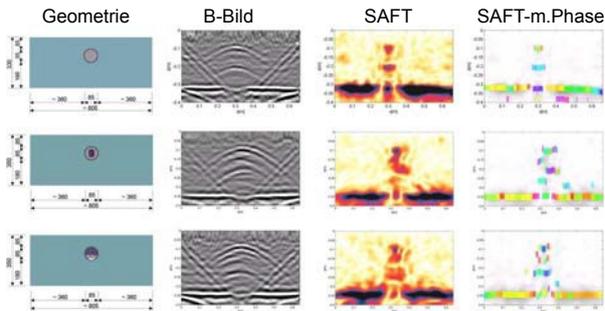
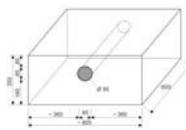


Anwendung: Brücken



Testobjekte: BAM

Testkörper mit Spannkanälen mit künstlichen Fehlstellen



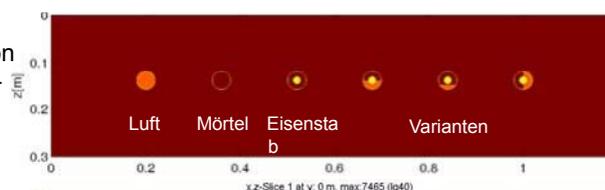
Daten und Bilder von S. Schulze Hupfer Ingenieure, M. Krause, BAM

Dr. Klaus Mayer, Universität Kassel
© Fraunhofer

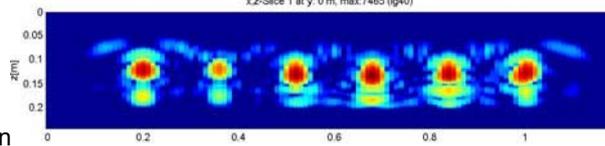


Modellierung verschiedener typischer Testobjekte: Hüllrohre mit unterschiedlicher Füllung

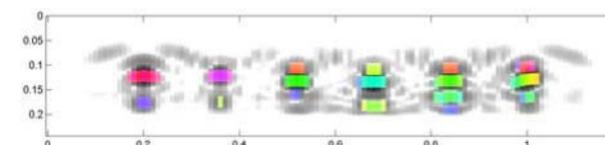
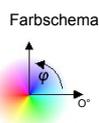
Geometrie für EFIT Wellenfeld-Simulation 55 kHz Scherwellen-Einschallung



SAFT-Ergebnis der modellierten Objekte



Phasenanalyse der SAFT-Rekonstruktion

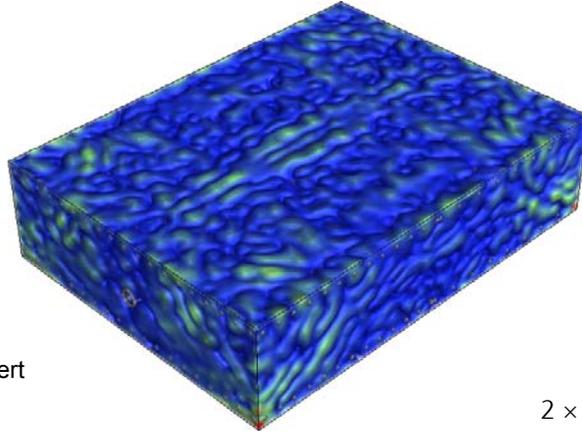


Dr. Klaus Mayer, Universität Kassel
© Fraunhofer



Betonprüfung mit Ultraschall und Impact-Echo

Impact-Echo-Simulation an einem Betonkörper



animiert

$2 \times 1.5 \times 0.5 \text{ m}^3$

■ Dr. Frank Schubert, Fraunhofer IKTS-MD, Dresden

© Fraunhofer

 **Fraunhofer**
IKTS


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IPT

Musterlösung (in Arbeit) Modellierungen zur Bestimmung von Größe und Form nicht-ebener Reflektoren

Prof. Elfgard Kühncke
TU Dresden



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZP Saarbrücken

 **Fraunhofer**
IPT

Ziel: Bestimmung des Krümmungsradius von kugelförmigen Körpern

Messaufbau

- Tauchttechnik
- Runde Körper:

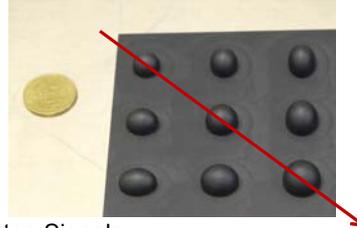
$$r = 12 - 16 \text{ mm}$$

spiegelnde Reflexion → Detektion des reflektierten Signals

nur bei Normaleinfall

- Prüfkopf (eben, $f = 3 \text{ MHz}$) – Ausdehnung der 6-dB-Zone

in Messtiefe: 2,3 mm



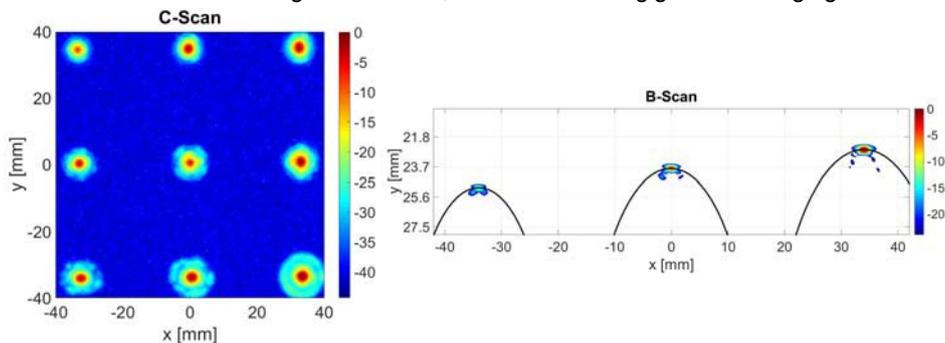
■ Prof. Efgard Kühnicke, TU Dresden

© Fraunhofer



Ziel: Bestimmung des Krümmungsradius von kugelförmigen Körpern

- Größenbestimmung aus B- und C-Scan (z. B. über 6 dB Bereich) nicht möglich → 6 dB-Bereich für alle Kugeln ca. 2 mm, nahezu unabhängig von der Kugelgröße

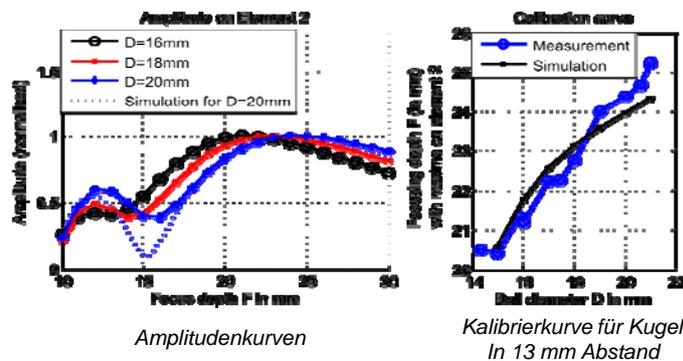


■ Prof. Efgard Kühnicke, TU Dresden

© Fraunhofer



Amplitudenauswertung (zzgl. Phasenauswertung)



- Fokussierung vor, auf und hinter die gekrümmte Grenzfläche
- Erstellung von **Kalibrierkurven** (Krümmungsradius als Funktion des ermittelten Fokussierungsregimes für das Maximum im reflektierten Signal)

■ Prof. Efgard Kühnicke, TU Dresden

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Ausblick

- Zielgruppe des Leitfadens:
insbesondere Praktiker, z.B. Ultraschallprüfer der Stufe 3
- Musterlösungen sollen die Möglichkeit geben, zumindest eine Vorauswahl der in Frage kommenden Verfahren zu treffen
- Musterlösungen behandeln Prüfprobleme, für die die jeweils eingesetzten Simulationsverfahren am besten geeignet sind
- erste Ausgabe sicher unvollständig, daher stetige Erweiterung und Aktualisierung
- Fertigstellung als DGZfP-Merkblatt bis Ende 2015
- Englische Fassung - Vortrag bei der WCNDT 2016
- Vorstellung des Merkblatts in den DGZfP-Arbeitskreisen

© Fraunhofer



Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IPT Saarbrücken

Unterausschuss Modellierung und Bildgebung

- Beiträge zum Leitfaden derzeit von
 - Rainer Boehm, Dr. Martin Krause, BAM, Berlin
 - Dr. Hardy Ernst, QuaNDT, Murten, CH
 - Dr. Reinhard Jansohn, Westinghouse Germany, Mannheim
 - Prof. Elfgard Kühnicke, TU Dresden
 - Dr. Klaus Mayer, Dr. René Marklein, Kassel
 - Dr. Hubert Mooshofer, Siemens, München
 - Dr. York Oberdörfer, GE, Hürth
 - Dr. Christoph Pientschke, Forschungszentrum Ultraschall, Halle
 - Martin Schickert, MFPA Weimar
 - Dr. Frank Schubert, Fraunhofer IKTS-MD, Dresden
 - Herbert Willems, NDT Global, Stutensee
 - Dr. Martin Spies, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

© Fraunhofer


Zertifiziertes Managementsystem
am Fraunhofer IZFP Saarbrücken


Fraunhofer
IZFP