

Simulation der Echosignale komplexer Defekte für die Ultraschallprüfung großer Stahlkomponenten

Hubert MOOSHOFER*, René MARKLEIN**

* Siemens AG Corporate Technology

** Ingenieurbüro Dr.-Ing. Marklein

Kurzfassung

Zur Simulation von Ultraschallprüfungen werden meist Verfahren eingesetzt, die auf der Punktquellensynthese (PQS) basieren, da sich so die Schallausbreitung mit relativ geringem Rechenaufwand simulieren lässt. Nachteilig ist jedoch, dass bei der Modellierung von Reflektoren weitere Vereinfachungen, wie z.B. die Kirchhoff-Näherung, notwendig sind und nur explizit modellierte Wellentypen bzw. Ausbreitungsvorgänge simuliert werden. Auf der anderen Seite gibt es numerische Simulationsverfahren, die auf der Diskretisierung der Wellengleichungen bzw. fundamentalen Grundgleichungen beruhen und alle physikalisch möglichen Ausbreitungs-, Reflexions- und Beugungseffekte simulieren. Letztere sind jedoch hinsichtlich der Größe des Simulationsvolumens und der simulierten Zeitdauer durch Speicher- und Rechenaufwand sowie durch Verfahrenseigenschaften wie numerische Dispersion beschränkt. Für große Stahlkomponenten ist zur Simulation der Ultraschallprüfung ein Verfahren erforderlich, das sowohl für große Schallwege als auch für komplexe Defekte geeignet ist. Hierzu wurde ein neuartiges Simulationsverfahren (3D-EFIT-EPQS) entwickelt, das die Vorteile der Punktquellensynthese mit denen der diskreten Simulation vereint. Die Schallausbreitung über große Wege und die Reflexion/Beugung an Defekten werden mittels Kopplung von Elastodynamischer Punktquellensynthese (EPQS) und Elastodynamischer Finiter Integrationstechnik (EFIT) modelliert. Im Rahmen dieses Beitrages wird das Simulationsverfahren vorgestellt und dessen Vorteile aufgezeigt. Es wird gezeigt, dass sich mit dem Verfahren das Fehlersignal im Fernfeld gängiger Prüfkopftypen effizient berechnen lässt, so dass eine dreidimensionale Defektmodellierung möglich wird. Die Simulationsergebnisse werden Messergebnissen an einem Testkörper gegenübergestellt.

Simulation der Echosignale komplexer Defekte für die Ultraschallprüfung großer Stahlkomponenten

DGZfP-Jahrestagung, 06.-08.05.2013, Dresden

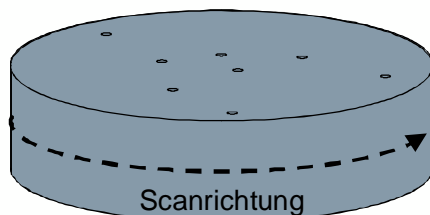
Dr.-Ing. Hubert Mooshofer, Siemens Corporate Technology, München
PD Dr.-Ing. habil. René Marklein, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Marklein, Fulda

Ultraschallprüfung großer Stahlkomponenten

Einsatz großer Schmiedeteile im Energiemaschinenbau
insbesondere in Form von Scheiben/Wellen für Turbinen und Generatoren

Eine Ultraschallprüfung wird bei der Herstellung und im Service durchgeführt

Beispiel: Testscheibe für UT



Querbohrungen: $d=3\text{mm}$
Bauteildurchmesser: 1,6m
Bauteildicke: 0,5m
SPK mit 2MHz

Ultraschallprüfung großer Stahlkomponenten

Typische Charakteristika der Herstellungsprüfung:

- Herstellungsprüfung im konturarmen Zustand
- Zylindrische Geometrie (mit/ohne Innenbohrung)
- Große Schmiedeteile
- Lange Schallwege (im Meterbereich)
- Schallschwächung ist abhängig von Material und Wärmebehandlung
- Moderate Prüffrequenz (im unteren MHz-Bereich)
- Verwendung mehrerer Einschallpositionen und –richtungen
(z.B. von der Mantelfläche aus senkrecht und mit mehreren Einschallwinkeln)

Simulation von Defektechos

Ziel: Simulation der Ultraschall-Echosignale von realen und künstlich präparierten Defekten

→ Simulation von Prüfkopf, Schallfeld und Defektreflexion

Simuliertes Prüfzenario und Randbedingungen:

Materialdefekt

- Langer Schallweg
- Unterschiedliche Defektposition / -orientierung
- Einfache und komplizierte Defektformen

Prüfkopf

- SPK, WPK und Phased-Array
- Durchmesser
- Frequenz und Bandbreite

Prüfobjekt

- Homogenes isotropes Material
- Unterschiedliche Materialparameter
- Schwach/nichtgekrümmte Oberfläche

Randbedingungen

- 3D-Simulation
- Auf (leistungsfähigem) PC lauffähig
- Praktikable Rechenzeit / Speicherbedarf

Modellierungstool: Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT)

Ing.-Büro
Dr.-Ing.
Marklein



SIEMENS

EFIT bildet die komplette Physik der linearen Elastodynamik ab, d.h. alle Wellenmodi und alle Wellenumwandlungen

Grundgleichungen der linearen Elastodynamik

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \underline{j}(\mathbf{R}, t) dV = \oint_{S=\partial V} \underline{T}(\mathbf{R}, t) \cdot \underline{dS} + \iiint_V \underline{f}(\mathbf{R}, t) dV$$

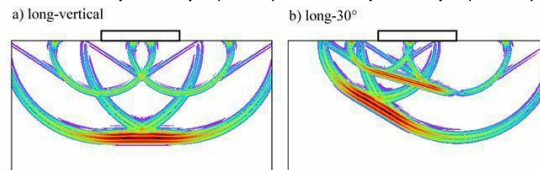
$$\frac{d}{dt} \iiint_V \underline{S}(\mathbf{R}, t) dV = \oint_{S=\partial V} \underline{T}^T : \underline{v}(\mathbf{R}, t) \underline{dS} + \iiint_V \underline{h}(\mathbf{R}, t) dV$$

Materialgleichungen

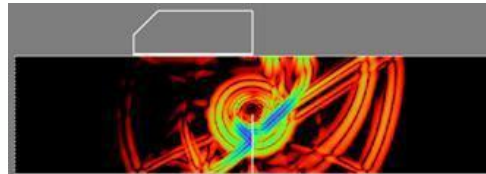
$$\underline{j}(\mathbf{R}, t) = \rho_{e0}(\mathbf{R}) \underline{v}(\mathbf{R}, t)$$

$$\underline{S}(\mathbf{R}, t) = \underline{s}(\mathbf{R}) : \underline{T}(\mathbf{R}, t)$$

Anregung beliebig: Senkrechtprüfkopf (SPK), Winkelprüfkopf (WPK), Phased Array (PA)



Reflektoren beliebig: Riss, KSR etc.



Methoden zur räumlichen Diskretisierung: FDM, FVM, FEM, FIT

Ing.-Büro
Dr.-Ing.
Marklein



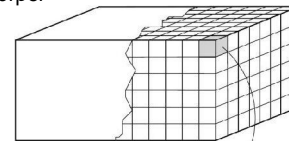
SIEMENS

Durch die Anwendung der Diskretisierungsmethoden

- Finite Differenzen Methode (FD)
- Finite Volumen Methode (FVM)
- Finite Elemente Methode (FEM)
- Finite Integrationstechnik (FIT)

wird das Festkörpervolumen in einzelne Volumenelemente zerlegt.

Festkörper



Volumenelement



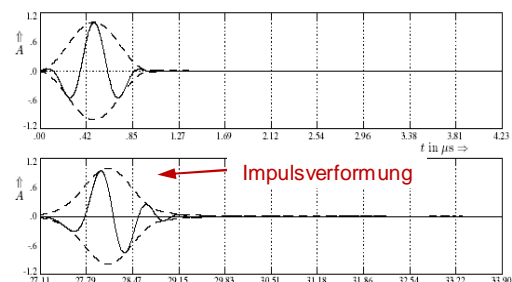
Durch diese Diskretisierung werden verschiedenartige Fehler induziert

- geometrische Diskretisierungsfehler
- Modifikation der physikalischen Parameter, die die Wellenausbreitung beschreiben

Letztere lassen sich über die so genannte numerische Dispersionsrelation quantitativ angeben:

$$\frac{1}{(c \Delta t)^2} \sin^2\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(\Delta x)^2} \sin^2\left(\frac{k_i \Delta x}{2}\right)$$

Effekt der numerischen Dispersion:



Rechen/Speicheraufwand 2D/3D-EFIT

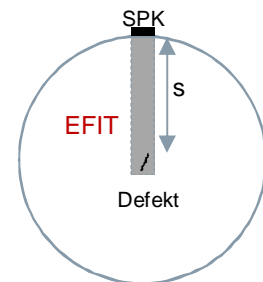
Beispiel:

Defekt in Stahl mit $c_p = 5920$ m/s; $c_s = 3250$ m/s

Lage bei $s = 0,1$ m bzw. $s = 1$ m; Defektgröße $d \leq 2$ mm

Simulationsbereich 10 mm bzw. 100mm zentriert um den Defekt

Breitbandiger Senkrechtrückkopf: $f_{center} = 2$ MHz; $f_{max} = 4$ MHz



Simulationsparameter:

Minimale Wellenlänge: $\lambda_{min} = c_{min} / f_{max}$

Simulierte Zeitdauer: $t = 2s/c_p$

Maschenweite: $\Delta x \leq x_{max} = \lambda_{min}/G$

$G =$ Genauigkeitsfaktor (typ ≥ 10)

$\Delta t \leq t_{max} = \Delta x / (\sqrt{n} * c_{max})$

$n =$ Anzahl der Dimensionen

→ Wahl $\Delta x = 100$ μ m; $\Delta t = 10$ ns / 8 ns (für 2D-EFIT / 3D-EFIT)

Rechen/Speicheraufwand 2D/3D-EFIT

Simulationstyp	2D-EFIT			3D-EFIT		
Defektposition	100mm	100mm	1000mm	100mm	100mm	1000mm
Simulierter Bereich	10mm	100mm	10mm	10mm	100mm	10mm
Gittergröße	1k x 100	1k x 1k	10k x 100	1k x 100 ²	1k x 1k ²	10k x 100 ²
Daten pro Gitterpunkt	5 x 8Byte	5 x 8Byte	5 x 8Byte	9 x 8Byte	9 x 8Byte	9 x 8Byte
Speicher	4MByte	40MByte	40MByte	720MByte	72GByte	7,2GByte
Zeitschritte	3400	3400	34k	4300	4300	43k
Rechenaufwand*)	1,7G	17G	170G	387G	38,7T	3,87T

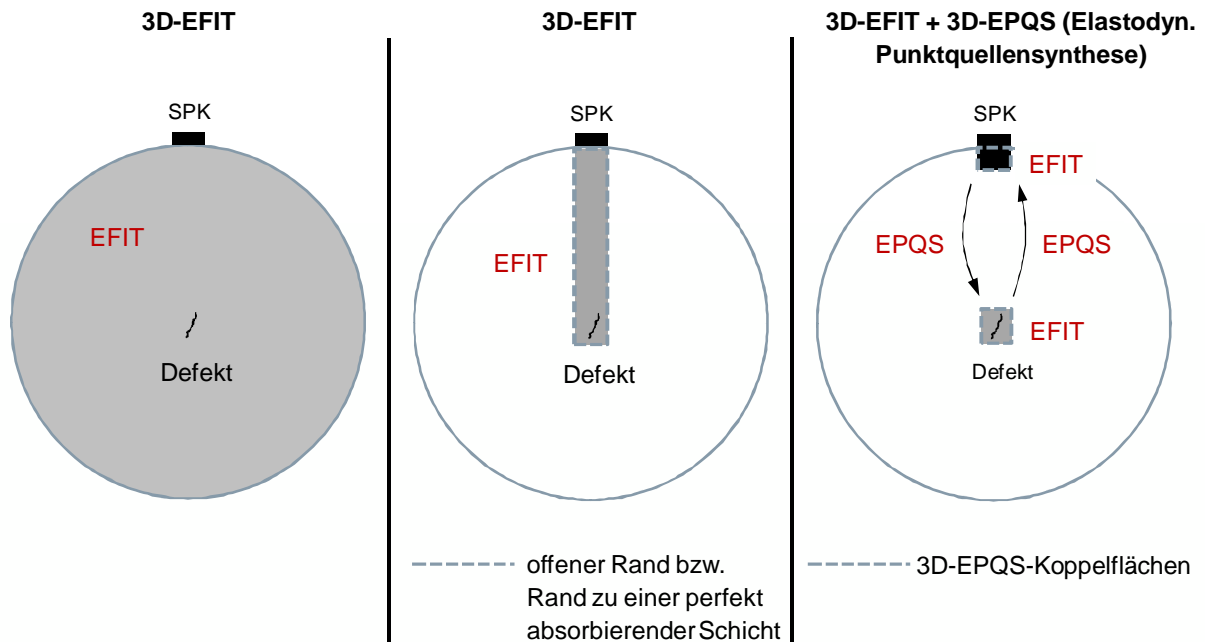
*) In willkürlichen Einheiten, nur zum relativen Vergleich

→ 2D-EFIT auf leistungsfähigem PC implementierbar

→ 3D-EFIT auf leistungsfähigem PC implementierbar, wenn Simulationsbereich ausreichend klein

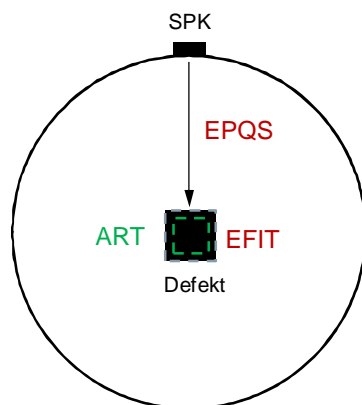
→ Diskrete Simulation langer Schallwege nicht sinnvoll wegen der Numerischen Dispersion

Methodik der Simulation



Hybrides Verfahren: EPQS gekoppelt mit EFIT + Auld-Reziprozitätstheorem

3D-EPQS + 3D-EFIT + Auld'sche Reziprozitätstheorem (ART)



--- 3D-EPQS-Koppelflächen
--- ART-Fläche

1. Schallfeldberechnung des Prüfkopfes mit 3D-EPQS
2. Simulation des Streu- bzw. Beugungsvorgangs am Defekt mit 3D-EFIT
3. Berechnung des Echosignale über das Auld'sche Reziprozitätstheorem (ART)

Größe der EFIT-Box, z.B.: $X = Y = Z = 10 \text{ mm}$

Schalllaufweg der Druckwelle: $S_p = 10 \text{ mm}$

$$N_x = N_y = N_z = \frac{10 \text{ mm}}{100 \mu\text{m}} = \underline{\underline{100}}$$

$$\underline{\underline{N_x \times N_y \times N_z \times N_K \times 8 \text{ Byte} = 72 \text{ MByte (Hauptspeicher)}}$$

$$T = \frac{S_p}{c_p} = \frac{10 \text{ mm}}{5,9 \times 10^3 \text{ s}} \approx \underline{\underline{1,7 \mu\text{s}}} \Rightarrow N_t = \frac{T}{\Delta t} = \frac{1,7 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-9}} = \underline{\underline{170}} \text{ (Zeitschritte)}$$

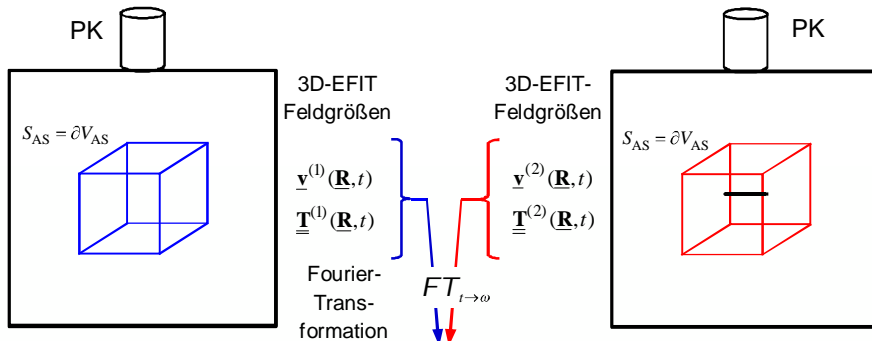
3D-EPQS & 3D-EFIT-Rechenzeit: ca. < 5 min

Modellierung des Echosignals / Auld'sches Reziprozitätstheorem

Puls-Echo-Prüfung: Das Echosignal wird anhand zweier Modellierungen berechnet

Modellierung 1: ohne Defekt

Modellierung 2: mit Defekt



Echosignal:

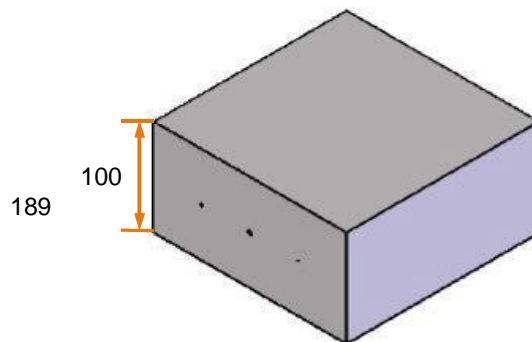
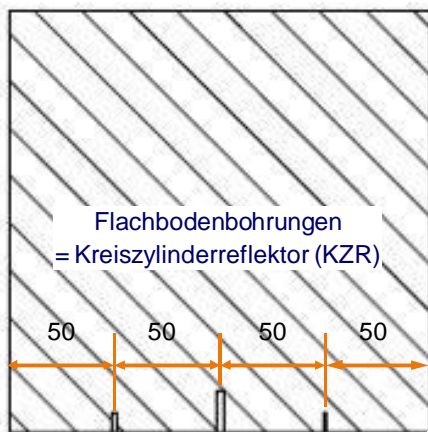
$$u(t) = FT_{\omega \rightarrow t}^{-1} \left\{ u(\omega) = \frac{1}{4f(\omega)} \iint_{S_{AS} = \partial V_{AS}} \left[\underline{v}^{(1)}(\mathbf{R}, \omega) \cdot \underline{T}^{(2)}(\mathbf{R}, \omega) - \underline{v}^{(2)}(\mathbf{R}, \omega) \cdot \underline{T}^{(1)}(\mathbf{R}, \omega) \right] \cdot \underline{n} \, dS \right\}$$

$f(\omega)$: Spektrum des Echosignals
 $S_{AS} = \partial V_{AS}$: geschlossene Fläche, die den Defekt umschließt, AS=Auld Surface
 \underline{n} : Normalenvektor der geschlossenen Auld-Fläche S_{AS}

Testkörper

Testkörper für Labortests → Beschränkte Größe / Gewicht

Aussagefähigkeit für Prüfsituation → Prüfung im Fernfeld / mit Kontakttechnik



Die Bohrung Ø 1 konnte nicht ausreichend tief präpariert werden

$\varnothing 2$ $\varnothing 4$ $\varnothing 1$
 $t = 10$ $t = 20$ $t = 5$

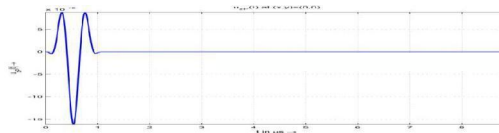
Alle Angaben in mm

EPQS-Schallfeld

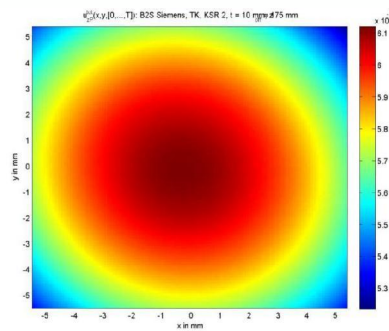
Anregung:

- a) gemessene Kraftverteilung entlang PK-Sohle, synthetische Zeitfunktion (RC2)
- b) gemessene Kraftverteilung entlang PK-Sohle, gemessene Zeitfunktion (Rückwandecho)

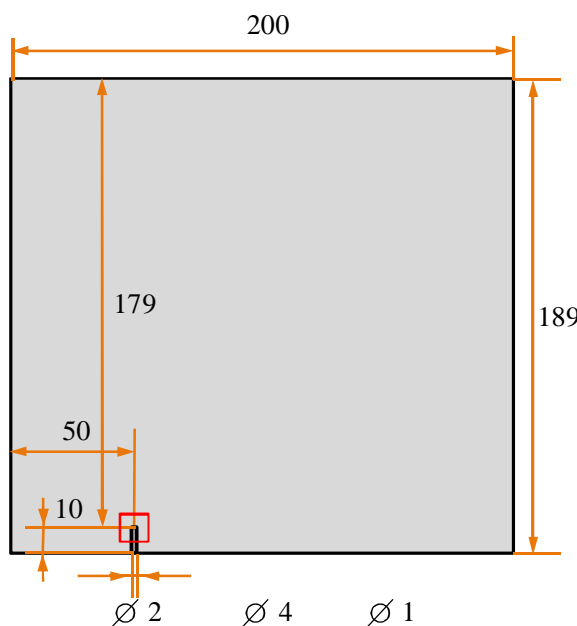
Synthetische Zeitfunktion:
Raised Cosine mit 2 Zyklen (RC2)



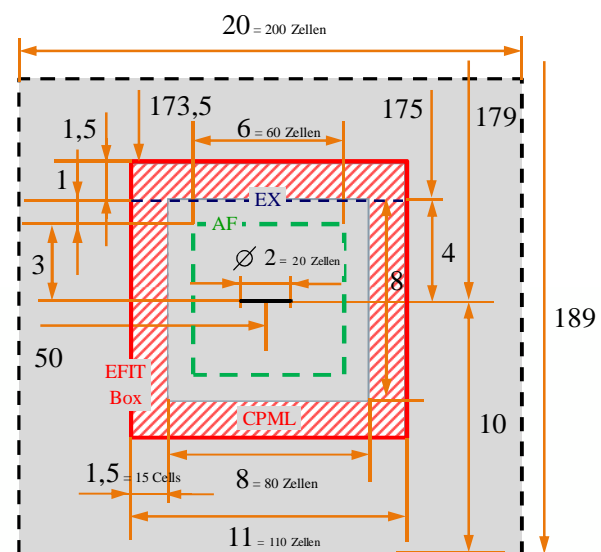
EPQS-Schallfeld an der Koppelfläche
(über alle Zeitpunkte aufsummiert)



Geometrie und Diskretisierung KSR2



Maßstab: 200 mm $\hat{=}$ 100 mm

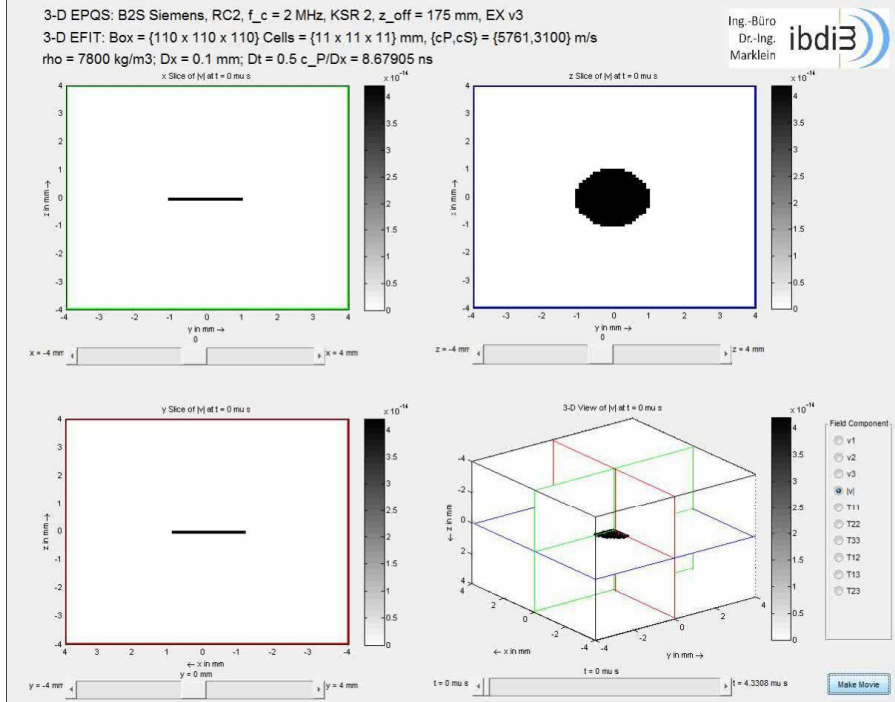


- EFIT-Volumen
- ▨ absorbierendes EFIT-Volumen (CPML)
- - - geschlossene Fläche für Auld'sches Reziprozitätsth. (AF)
- - - EPQS-Koppelfläche (EX)

Maßstab: 2 cm $\hat{=}$ 10 cm

Wellenfilm KSR2 (Video)

Video



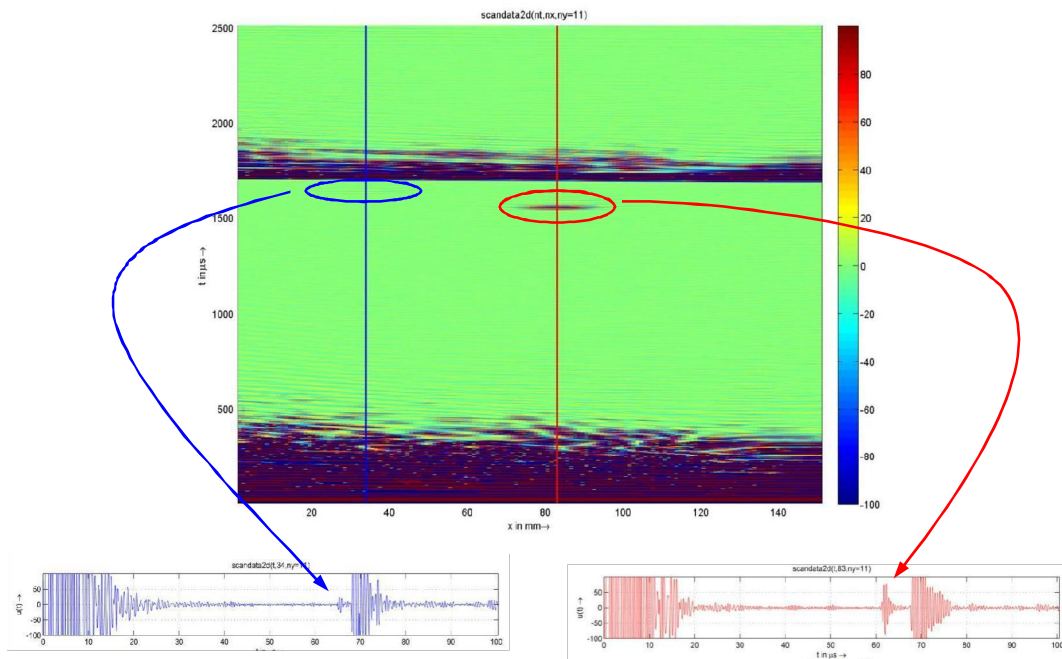
Seite 15

Mai 2013

Corporate Technology

Frei verwendbar © Siemens AG 2013. Alle Rechte vorbehalten.

Messdaten des Labortestkörpers



Seite 16

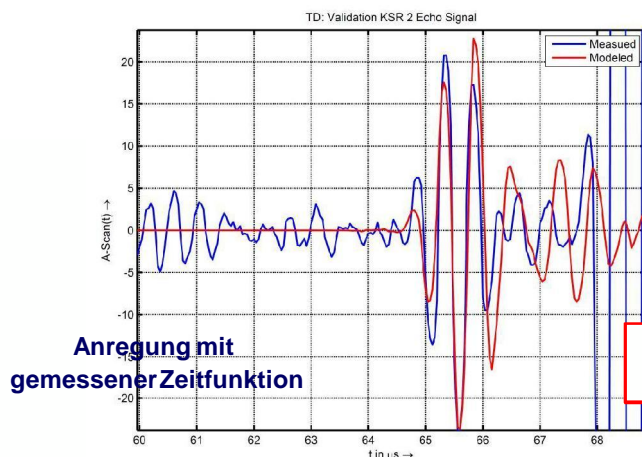
Mai 2013

Corporate Technology

Frei verwendbar © Siemens AG 2013. Alle Rechte vorbehalten.

Vergleich Zeitsignal KSR2

Überlagerung von Messsignal (blau)
und EPQS-EFIT-Simulation (rot)

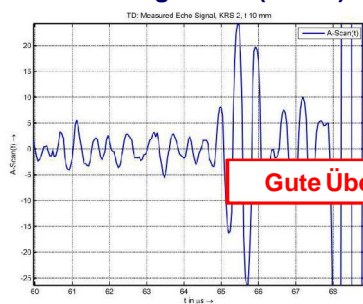


Anregung mit
gemessener Zeitfunktion

Die Aussagekraft der Phasen-
information ist begrenzt

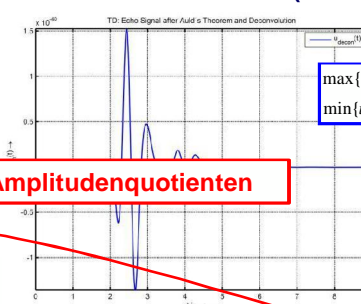
Vergleich Echoamplitude KSR2 / KSR4

Messung am TK (A-Bild)



$$\max\{u_{\text{measured}}^{\text{KSR 2}}(t)\} = 26.36$$

Simulation EPQS-EFIT (A-Bild)



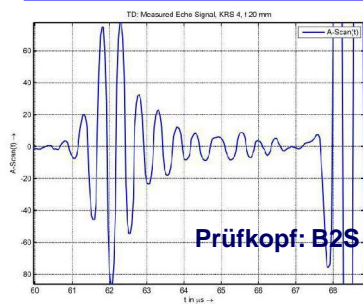
$$\max\{u_{\text{deconv}}(t)\} = +1.53 \times 10^{-10}$$

$$\min\{u_{\text{deconv}}(t)\} = -1.49 \times 10^{-10}$$

Gute Übereinstimmung des Amplitudenquotienten

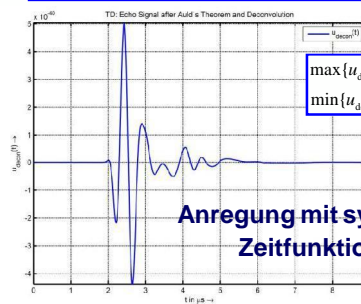
Amplitude Ratio: $\frac{\max\{u_{\text{measured}}^{\text{KSR 4}}(t)\}}{\max\{u_{\text{measured}}^{\text{KSR 2}}(t)\}} = \frac{86.23}{26.36} = 3.27$

Amplitude Ratio: $\frac{\max\{u_{\text{deconv}}^{\text{KSR 4}}(t)\}}{\max\{u_{\text{deconv}}^{\text{KSR 2}}(t)\}} = \frac{5.03}{1.53} = 3.28$



$$\max\{u_{\text{measured}}^{\text{KSR 4}}(t)\} = 86.23$$

Prüfkopf: B2S



$$\max\{u_{\text{deconv}}(t)\} = +5.03 \times 10^{-10}$$

$$\min\{u_{\text{deconv}}(t)\} = -4.37 \times 10^{-10}$$

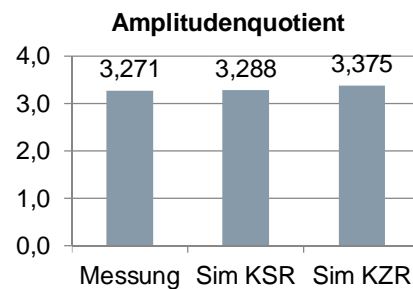
Anregung mit synthetischer
Zeitfunktion (RC2)

Ergebnisse für KSR und KZR

Um Messung und Simulation zu vergleichen wird der Amplitudenquotient KSR4/KSR2 betrachtet.
Der Amplitudenquotient von Flachbodenbohrungen wird

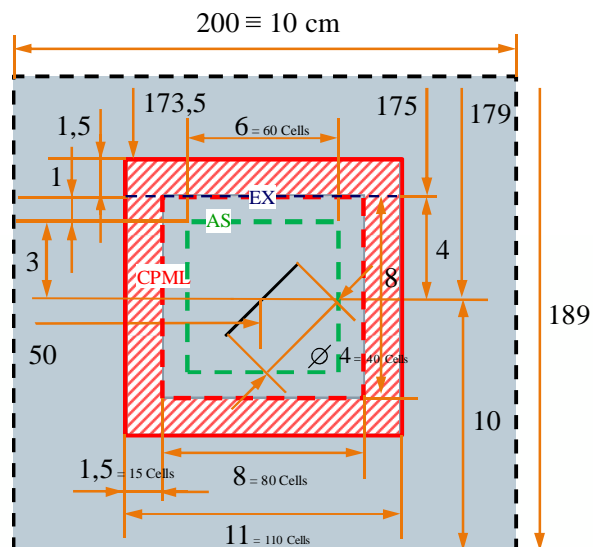
- durch die Simulation von Kreisscheiben (KSR) mit idealisiertem Anregungssignal (RC2) sehr gut wiedergegeben
- durch die detailliertere Modellierung mit Kreiszyylinder (KZR) und gemessenem Anregungssignal wider Erwarten etwas weniger gut wiedergegeben

Größe	Messung	Sim KSR	Sim KZR
2mm	26,36	1,53	1,52
4mm	86,23	5,03	5,13



Weiteres Beispiel: KSR4, in der xz-Ebene gedreht um 45°

Geometrie und Diskretisierung:



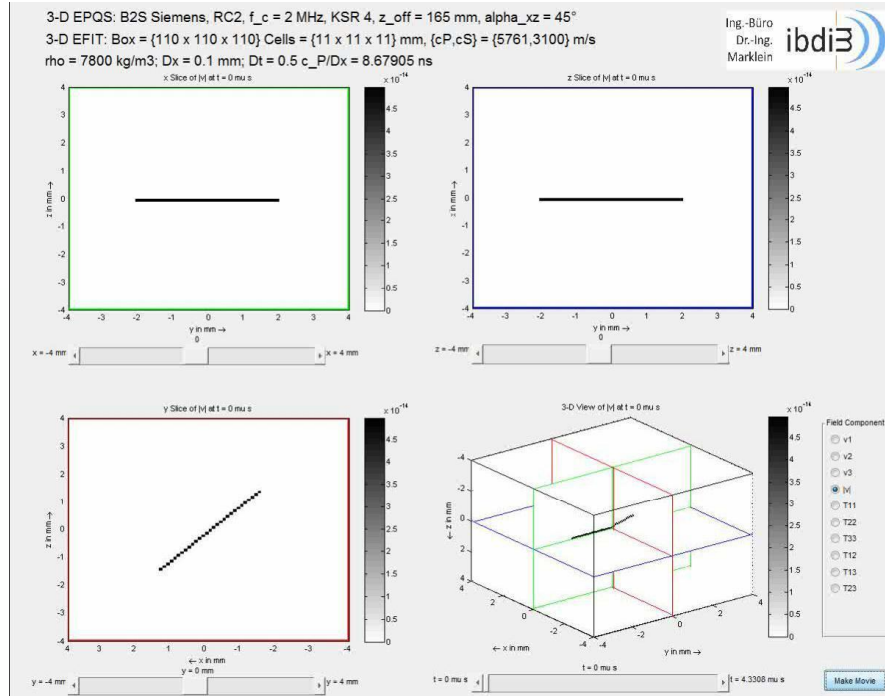
Weiteres Beispiel: KSR4, in der xz-Ebene gedreht um 45°

Ing.-Büro
Dr.-Ing.
Marklein



SIEMENS

Video



Seite 21

Mai 2013

Corporate Technology

Frei verwendbar © Siemens AG 2013. Alle Rechte vorbehalten.

Zusammenfassung

Ing.-Büro
Dr.-Ing.
Marklein



SIEMENS

Ergebnisse:

- Gekoppelte Simulation 3D-EFIT-EPQS mit ART für Senkrecht-PK implementiert
- Vergleich mit Messungen an Testkörper im Labormaßstab durchgeführt
- Erster Test mit guter Übereinstimmung Simulation – Messung
- Das Amplitudenverhältnis von Flachbodenbohrungen wird richtig wiedergegeben
- Die Aussagekraft der Phaseninformation ist begrenzt

Ausblick:

- Weitere Absicherung mit einer größeren Anzahl von Messungen / Simulationen
- Vergleich der Echodynamik von Defekten
- Messdaten eines anderen Testkörpers mit geringerem Gefügerauschen
- Untersuchung anderer Defekttypen
- Erweiterung der Möglichkeiten der Simulation, z.B. Implementierung WPK

Seite 22

Mai 2013

Corporate Technology

Frei verwendbar © Siemens AG 2013. Alle Rechte vorbehalten.