

Quantifizierung des Defektnachweises mittels SAFT

Hubert MOOSHOFER¹, Matthias GOLDAMMER¹, Karsten SCHÖRNER¹
¹ Siemens AG, Corporate Technology, München

Kontakt E-Mail: hubert.mooshofer@siemens.com

Kurzfassung

Die Ultraschallprüfung mit SAFT erfreut sich zunehmender Verbreitung, denn sie verbessert sowohl Nachweisgrenze, als auch Defektlokalisierung und die Möglichkeiten zur Defekttrennung. Mit der heutzutage verfügbaren Rechenleistung können auch große Bauteile, wie z.B. Turbinenscheiben, vollständig mit SAFT geprüft werden. Für den praktischen Einsatz reicht es jedoch nicht Bilder mit besser Auflösung bzw. niedrigerem Gefügerauschen zu produzieren. Als Ergebnis einer Prüfung muss vielmehr über die Einsatztauglichkeit von Bauteilen entschieden werden können. Hierzu sind quantitative Methoden erforderlich.

Um sicherzustellen, dass sich ein Prüfverfahren für den beabsichtigten Zweck eignet, müssen dessen Eigenschaften quantitativ charakterisiert werden. Zu den wichtigsten Verfahrenseigenschaften zählen dabei Nachweisgrenze und Ortsauflösung.

Eine formelmäßige Berechnung der Ortsauflösung ist dabei besonders hilfreich, denn die experimentelle Bestimmung würde eine Serie von Testdefekten erfordern. In diesem Beitrag wird die heuristische Berechnungsformel aufgegriffen, die 2013 im Fachausschuss Ultraschallprüfung vorgestellt wurde und deren Einsatz an einem Beispiel demonstriert.

Die Nachweisgrenze lässt sich hingegen gut experimentell bestimmen, wenn man in der Lage ist, kleine Defektanzeigen hinsichtlich ihrer Größe zu bewerten. Da es sich um kleine Defekte im Bereich der Ortsauflösung und darunter handelt, lassen sich bekannte pixelbasierte Methoden nicht einsetzen. Daher wurden die Eigenschaften der SAFT-Amplitude im Hinblick auf die Größenbewertung untersucht. Auch wenn sich diese von den Eigenschaften der Echoamplitude unterscheiden, kann gezeigt werden, dass sie die Basis für eine Größenbewertung darstellen kann.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren gezeigt, mit dem sich das Ergebnis der SAFT-Prüfung als Ersatzfehlergröße darstellen lässt. Das Verfahren basiert auf der Echosignalsimulation und lässt sich insbesondere für kleine Defekte einsetzen. Damit ermöglicht es sowohl die Bewertung von Anzeigen im Prüfergebnis als auch die Bestimmung der Nachweisgrenze.

Mit den gezeigten quantitativen Methoden steht das wichtigste Rüstzeug bereit, um SAFT in der Praxis einsetzen zu können.

The Siemens logo is displayed in a white box with a blue border, set against a background of industrial machinery and a turbine.

H. Mooshofer, M. Goldammer, K. Schörner

2017-11-07

Quantifizierung des Defektnachweises mit SAFT

Frei verwendbar © Siemens AG 2017

siemens.com

Gliederung

The Siemens logo is displayed in a white box with a blue border, set against a blue background.

Funktionsprinzip SAFT

Vorteile und Anwendung

Quantitative Methoden:

- Ortsauflösung
- Defektgrößenbewertung

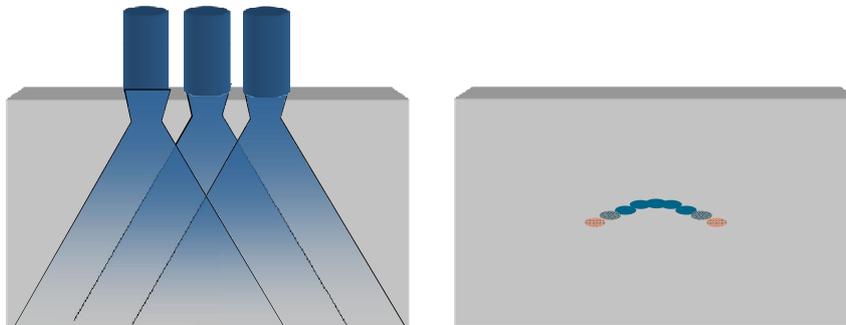
Zusammenfassung / Ausblick

Frei verwendbar © Siemens AG 2017

Seite 2 2017-11-07

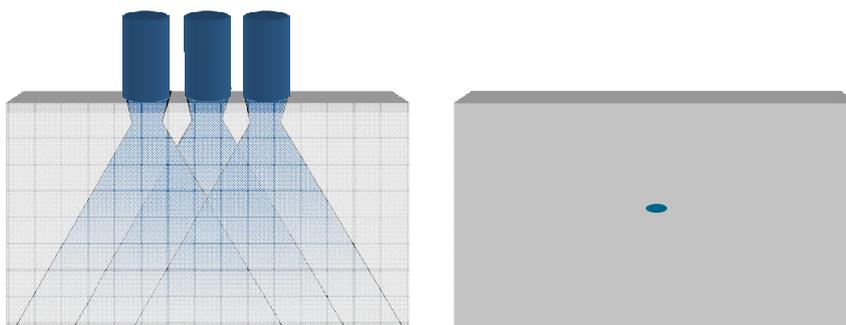
Corporate Technology

SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique



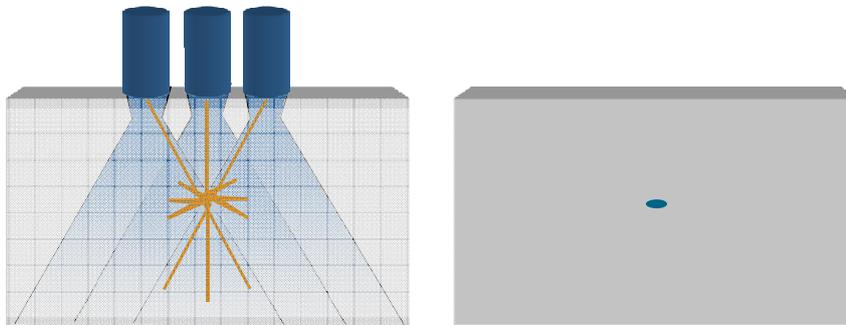
Klassische UT: Sichelförmige Anzeige

SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique



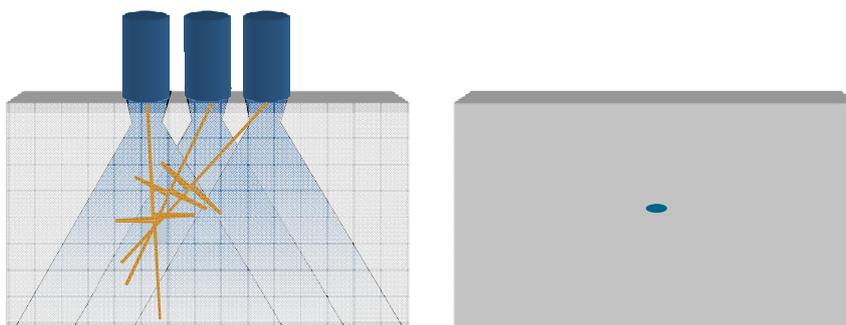
Ziel: Eine fokussierte Anzeige anstatt einer sichelförmigen Anzeige
→ Festlegung eines Voxel-Rasters; Phasenrichtige Addition der Echsignale

SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique



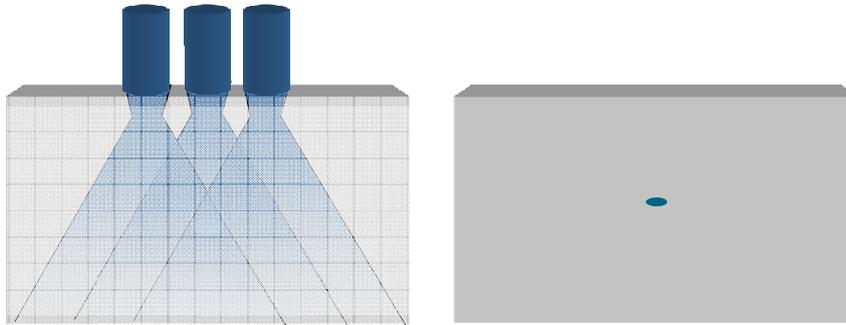
Ziel: Eine fokussierte Anzeige anstatt einer sichelförmigen Anzeige
 Am Ort eines Reflektors: Konstruktive Interferenz

SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique



Ziel: Eine fokussierte Anzeige anstatt einer sichelförmigen Anzeige
 An einer Stelle ohne Reflektor: Destruktive Interferenz

SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique



- Berechnung für jedes Voxel im Prüfvolumen
 → Jede Stelle (Voxel) wird individuell durch Rechnung fokussiert
 → SAFT = **S**ynthetic **A**perture **F**ocusing **T**echnique

Vorteile SAFT

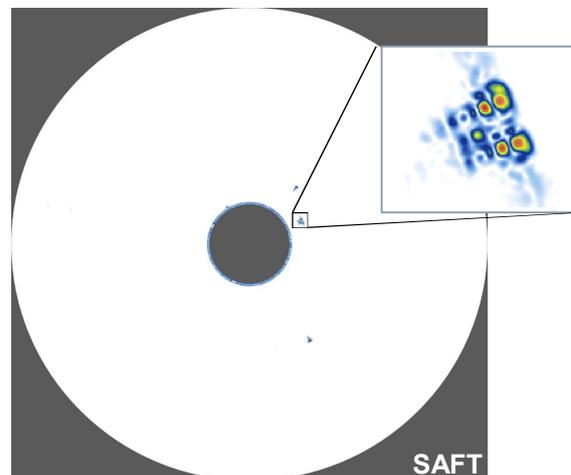
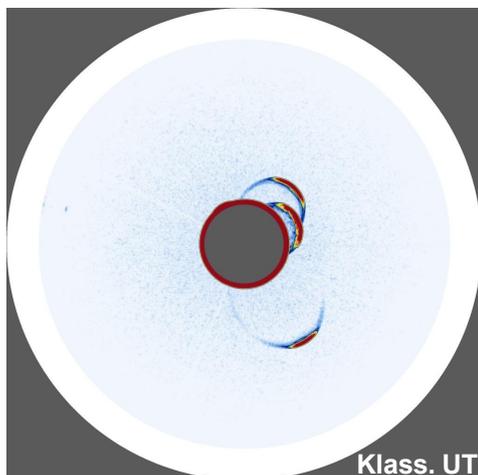
Vorteile:

- Abgrenzung nahe benachbarter Defekte
 → Mögliche Trennung von Gruppenanzeigen
- Verbesserung der lateralen Größenbestimmung
- Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei Gefügerauschen
- Nutzung vorhandener Prüfsysteme
 → Keine zusätzlichen Prüfschritte
- Ergebnis ist für erfahrene Prüfer leicht zu verstehen / interpretieren

Anwendung bei Siemens:

- Prüfung von Turbinenscheiben
- Komplettauswertung statt Analysetechnik
- Große Datenmengen erfordern leistungsfähigen PC mit GP-GPU
- Quantitative Auswertung

Beispiel: Testscheibe mit Querbohrungen



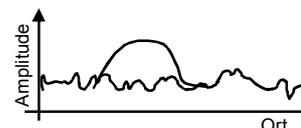
Frei verwendbar © Siemens AG 2017
Seite 9 2017-11-07

Corporate Technology

Charakterisierung von SAFT

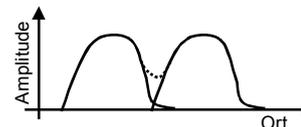
Nachweisgrenze: Beschreibt die erforderliche Größe eines Defektes um in Gegenwart von Rauschen detektiert werden zu können.

→ Einfache experimentelle Bestimmung an einem defektfreien Bauteil
(Voraussetzung: Quantitative Bewertung kleiner Defekte)



Auflösung: Beschreibt den erforderlichen Abstand zweier nahe benachbarter Defekte um diese anhand ihrer Anzeigen als separat zu identifizieren.

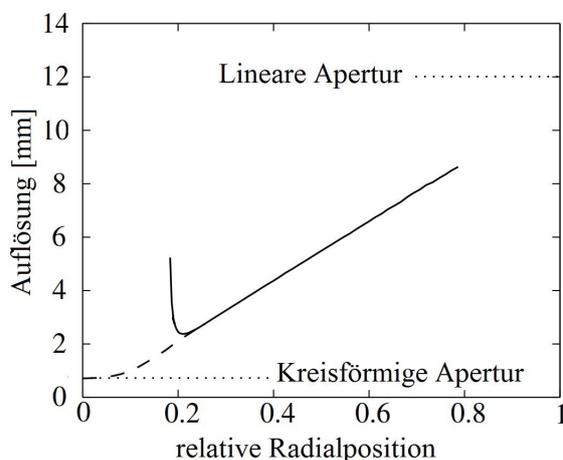
Zwei Anzeigen können aufgelöst werden, wenn es einen deutlichen Abfall zwischen den beiden Maxima gibt
→ Experimentelle Bestimmung würde Testdefekte erfordern
→ Berechnungsformeln vermeiden Präparationsaufwand



Frei verwendbar © Siemens AG 2017
Seite 10 2017-11-07

Corporate Technology

Ortsauflösung von SAFT



Wichtige Einflussfaktoren:

- Oberflächenform des Prüflings
- Größe der Prüfkopfapertur

Bei ebener Prüffläche: $D_{PK}/2$

Im Zentrum eines Zylinders: $\lambda/4$

Beispiel: Auflösung von SAFT bei der Prüfung einer zylindrischen Stahl-Scheibe.

$D_{\text{außen}} = \sim 1,5 \text{ m}$; $D_{\text{innen}} = \sim 0,25 \text{ m}$

SPK, $f = 2 \text{ MHz}$; $D_{PK} = 24 \text{ mm}$ (B2S)

Quelle: Fendt et al., „Investigation of the SAFT resolution for heavy rotor forging ultrasonic inspection“, 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium

Frei verwendbar © Siemens AG 2017

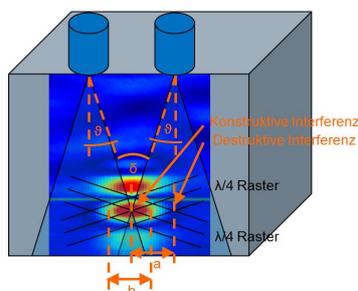
Seite 11

2017-11-07

Corporate Technology

Heuristische Formel für Anzeigenlänge

- Divergenzwinkel ϑ des Schallbündels
- Defekt mit Ultraschall sichtbar unter Winkel δ
- Für eine ebene Oberfläche gilt: $\delta = 2\vartheta$
- Die Anzeigenlänge ist ungefähr gleich dem Abstand zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz
- Heuristische Formel durch Trigonometrie



$$b = \frac{\lambda/4}{\sin(\delta/2)}$$

Vergleich mit theoretischen Werten

Ebene Oberfläche: $\sin(\delta/2) = \lambda/(2D)$

→ $b = D/2$ d.h. Anzeigenlänge = Auflösung ✓

In Zylindermitte: $\delta = 180^\circ$ (von vorne gesehen)

→ $b = \lambda/4$ d.h. Anzeigenlänge = Auflösung ✓

Vergleich mit Experiment

Rekonstruktion einer 1mm FBB in Stahl

Prüfung mit B2S ($\lambda = 3 \text{ mm}$, $\vartheta = 3,5^\circ$)

Experiment: $b = 13 \text{ mm}$

Formel: $b = 12,3 \text{ mm}$ ✓

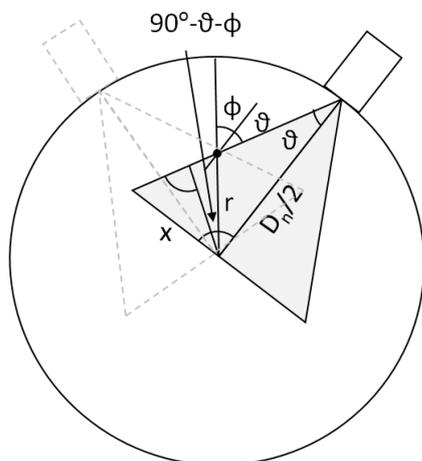
Frei verwendbar © Siemens AG 2017

Seite 12

2017-11-07

Corporate Technology

Beispiel: Senkrechteinschallung bei Zylindergeometrie



$$\sin(\delta/2) \cdot r = \sin(\varphi + \vartheta) \cdot r = \sin(\vartheta) \cdot (D_n/2)$$

$$\sin(\vartheta) = \sin(\beta_{-6dB}) = \frac{\lambda}{2D}$$

$$\delta/2 = \sin^{-1}\left(\min\left(1; \frac{1}{r} \cdot \frac{D_n}{D} \cdot \frac{\lambda}{4}\right)\right)$$

$$R(r) = \frac{\lambda/4}{\min\left(1; \frac{1}{r} \cdot \frac{D_n}{D} \cdot \frac{\lambda}{4}\right)}$$

$$\Rightarrow R(r) = \max\left(\frac{\lambda}{4}; r \cdot \frac{D}{D_n}\right)$$

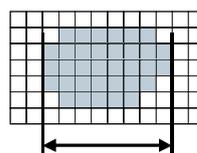
Anzeigenbewertung

SAFT verbessert das SNR → Nachweis von kleineren Defekten als bei klassischer UT
Aber wie können diese Defekte bewertet werden?

- Das SAFT-Ergebnis besteht aus Voxeldaten
- Abhängigkeit von Prüfkopfposition und Echolaufzeit nur implizit
- Methoden der Defektgrößenbewertung der klassischen UT nicht anwendbar

Bekannt: Auswertung mit Methoden der Bildverarbeitung

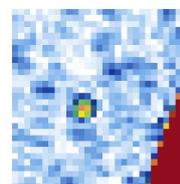
- Anzahl der Voxel, aus denen eine Anzeige besteht
- Ausdehnung der Anzeige in einer Richtung
-



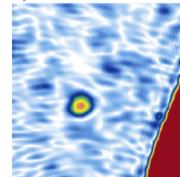
Achtung: Die Ortsauflösung von SAFT ist begrenzt!

- Ein feineres Rekonstruktionsraster ändert nichts an der Ortsauflösung
- Bewertung mittels Bildverarbeitung ist nur oberhalb der Ortsauflösung möglich!

1 mm Reko-Raster



0,1 mm Reko-Raster



SAFT-Amplitude zur Anzeigenbewertung verwendbar?

SAFT-Rekonstruktion: Phasenrichtige Summe einer Vielzahl von Echoamplituden:

$$SAFT(\vec{x}_{rec}) = \sum_{j=1}^N I_j \left(t = \left[\frac{\|\vec{x}_{rec} - \vec{x}_j\|}{c/2} \right] \right)$$

Bezeichnung:

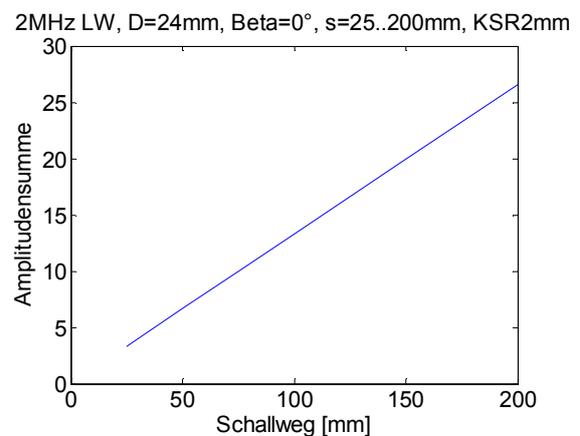
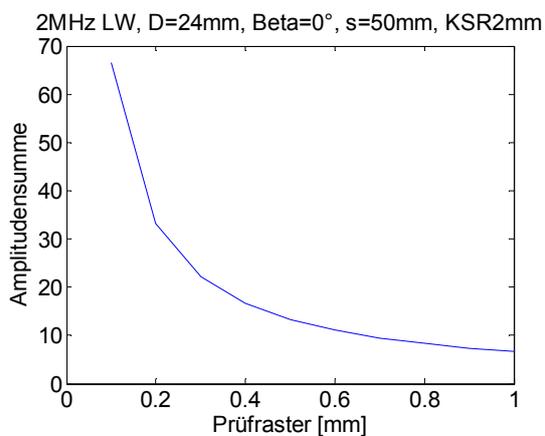
- Echoamplitude = Amplitude bei klassischer Prüfung
- Amplitudensumme = SAFT-Amplitude = Amplitude nach der SAFT-Rekonstruktion

Die Amplitudensumme hängt ab:

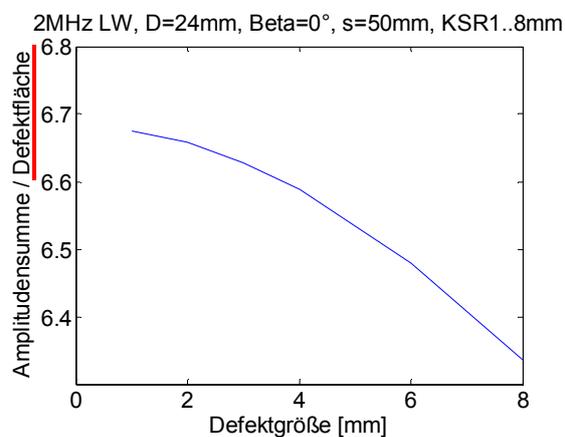
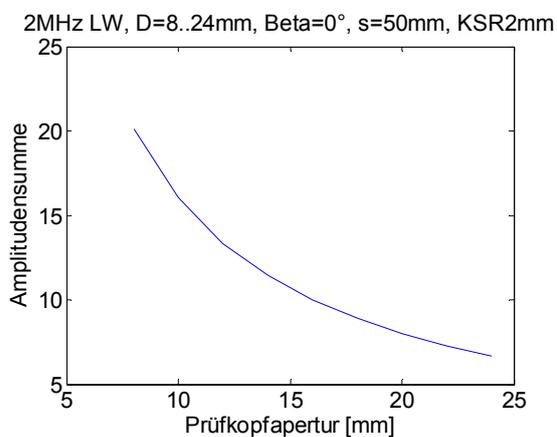
- a) sowohl von der Anzahl der Summanden
- b) als auch von deren Werten (= Echoamplitude)

- ➔ Die Amplitudensumme hat andere Eigenschaften als die Echoamplitude.
- ➔ Aber sie spiegelt die Defektgröße wieder!

Eigenschaften der SAFT-Amplitude (1)



Eigenschaften der SAFT-Amplitude (2)



Ergebnisse der Parameterstudie

Zusammenhang mit Defektgröße:

- Bei kleinen Defekten ($<\lambda$) ist die SAFT-Amplitude ungefähr proportional zur Defektfläche
- Bei größeren Defekten ist die SAFT-Amplitude niedriger (als der proportionale Wert)

→ Umrechnung der SAFT-Amplitude in eine Ersatzfehlergröße ist möglich

Einfache zu verstehende Parameter:

- Proportionalität zu Schallweg bei ebener Oberfläche
- Indirekte Proportionalität zum Prüfraster

Parameter deren Einfluss komplex ist:

- Prüfkopfapertur
- Schallweg bei zylindrischer Oberfläche (nicht gezeigt)
-

Amplitudenbasierte Anzeigenbewertung mit SAFT

Ziel: Umrechnung SAFT-Amplitude → Ersatzfehlergröße (für jedes Voxel).

Umgekehrter Weg einfacher: Für eine bekannte Ersatzfehlergröße können die vom Prüfkopf gemessenen Echosignale berechnet werden und diese mit SAFT ausgewertet werden.

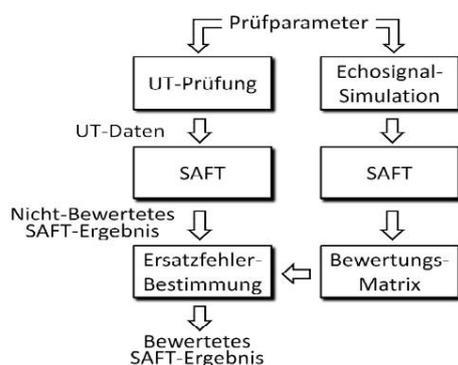
Klassifikation der Parameter:

- Variablen (Bei einer Auswertung variable Größen): z.B. Defektposition
- Parameter (Bei einer Klassifikation der Parameter:

Algorithmus:

- Berechnung der Korrespondenz (Ersatzfehlergröße → SAFT-Amplitude) für den relevanten Wertebereich der Variablen
- Inversion der Korrespondenz SAFT-Amplitude → Ersatzfehlergröße und Anwendung auf die Volumendaten

Blockdiagramm SAFT Defektgrößenbewertung



- (1) SAFT-Rekonstruktion der Prüfdaten
- (2) SAFT-Rekonstruktion simulierter Echosignale mit den gleichen Prüfparametern
- (3) Aufstellung der Bewertungsmatrix
- (4) Durch Interpolation wird individuell für jeden Ort die Amplitudensumme in eine Ersatzfehlergröße umgerechnet.

Prüfdaten und simulierten Daten müssen auf ein einheitliches Amplitudenniveau bezogen sein
→ Vor der Prüfung muss eine konventionelle Amplitudenjustierung durchgeführt werden.

Beispiel SAFT Defektgrößenbewertung

Erprobung an einer Stahlscheibe:

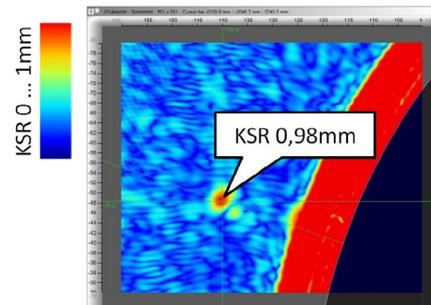
$D_{\text{außen}} = \sim 1,5 \text{ m}$; $D_{\text{innen}} = \sim 0,25 \text{ m}$

1 mm Flachbodenbohrung an Innenbohrung

Prüfung von der Mantelfläche aus mit SPK, $f = 2 \text{ MHz}$

Die HF-Daten wurden mit SAFT rekonstruiert und eine Defektgrößenbewertung durchgeführt.

Das bewertete Ergebnis ist rechts dargestellt.



Zusammenfassung / Ausblick

Der praktische Einsatz von SAFT erfordert quantitative Methoden.

Quantitative Charakterisierung von SAFT

- Experimentelle Bestimmung der Nachweisgrenze
- Berechnung der Ortsauflösung

Amplitudenbasierte Defektgrößenbewertung

- Darstellung des SAFT-Ergebnis als Ersatzfehlergröße
- Bewertung von Defekte in Größenordnung der Ortsauflösung

Vergleich mit klassischer UT:

- Defektgrößenbewertung mittels Bildverarbeitung ↔ Auswertung der Echodynamik
- Defektgrößenbewertung mittels Amplitudensumme ↔ Auswertung der Echoamplitude