

Fehlstellenbewertung bei der Ultraschallprüfung schwerer Rotor- Schmiedeteile

Karl Thomas FENDT *, Hubert MOOSHOFFER **

* Siemens AG Corporate Technology München, München

** Siemens AG Corporate Technology

Kurzfassung

Turbinen- und Generatorkomponenten wie Scheiben und Wellen werden bereits während des Herstellungsprozesses mit Ultraschall zerstörungsfrei geprüft. Dadurch soll die strukturelle Integrität der Bauteile zu einem Zeitpunkt sichergestellt werden, in dem eine vollständige Ultraschallprüfung des Bauteils möglichst leicht durchzuführen ist und möglichst wenig Aufwand in die Fertigung geflossen ist. Die dabei zum Einsatz kommenden Prüfanweisungen sind, abgesehen von der Einführung automatisierter Prüfung und Array-Technik, seit 1989 weitgehend unverändert.

Aufgrund langer Schallwege (bis zu 3m) und der guten Durchschallbarkeit der verwendeten Stähle liegen die Registrier- und Entscheidungsgrenzen in einem Größenbereich (Wellenlänge und kleiner), in dem hauptsächlich signalamplitudenbasierte Quantifizierungsverfahren eingesetzt werden können. Konkret bedeutet dies, dass das in den 1950er Jahren etablierte AVG-Verfahren angewandt wird.

In dieser Veröffentlichung wird ausgearbeitet, welche Vorteile sich durch die Anwendung moderner Rekonstruktionsverfahren auf die Turbinenscheiben- und Welleninspektion im Vergleich zu den klassischen Bewertungsmethoden ergeben. Zur Anwendung kommen die synthetische Apertur-Fokussierungstechnik (SAFT), sowie Simulationsmethoden auf der Basis von Oberflächen- (Kirchhoff-Approximation) und Volumensdiskretisierung (EFIT). Dadurch lassen sich Signal-Rausch-Abstand, Auflösungsvermögen - und damit das Trennungvermögen von Gruppenanzeigen - deutlich verbessern.

Fehlstellenbewertung bei der Ultraschallprüfung schwerer Rotor-Schmiedeteile

Fendt K.T., Dr. Mooshofer H.

Unrestricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Motivation

Produktion von Gas- und Dampfturbinen

- Fehlstellen in Rotorkomponenten kritisch
- Vollständige Ultraschallprüfung in Schmiede
- Inspektionsergebnis Ausgangspunkt für bruchmechanische Berechnungen



Motivation

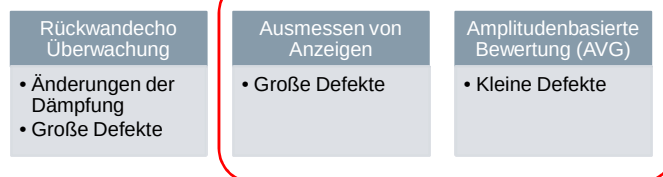
Inspektion

- Automatisierte Puls-Echo Kontaktinspektion
- Mehrere Einschallwinkel (Longitudinal)
- 2-4 MHz Mittenfrequenz
- Volumeninspektion und Rückwandecho

SAFT

- Erhöhte Auflösung
- Verbesserte SNR

Bewertungskriterien



Outline

Motivation

Methoden

- Synthetische Apertur Fokussierungs Technik (SAFT)
- Modellbasierte Defektbewertung mit SAFT als Ausgangsbasis
- Inverses Verfahren
- Simulation

Messungen & Ergebnisse

- Testkörper
- Turbinenscheibe

Vergleich EFIT - Kirchhoff

Zusammenfassung

SAFT

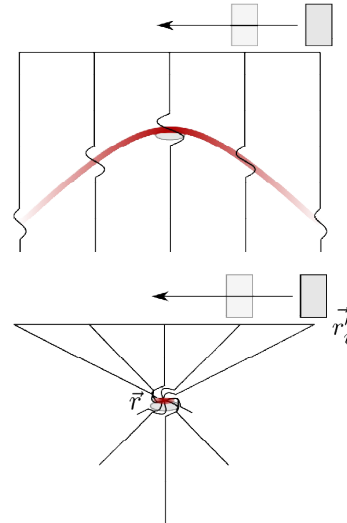
Prinzip

- Summation lauffzeitkorrigierter Signale
- Analytisches Signal & Normbildung → Demodulation
- Schallfeldgewichtung → Homogene Grauwerte & Artefaktunterdrückung

$$I(\vec{r}) = \frac{|\sum_{i=1}^N \alpha(\theta_i) a_i^+(\tau = \frac{2}{c_L} |\vec{r}_i|)|}{\sum_{i=1}^N \alpha(\theta_i)}$$

$\alpha(\theta_i)$... Schallfeld

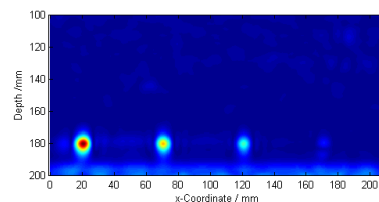
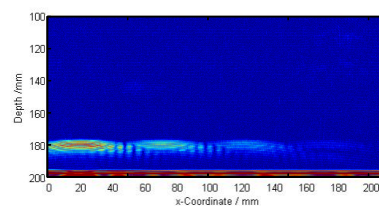
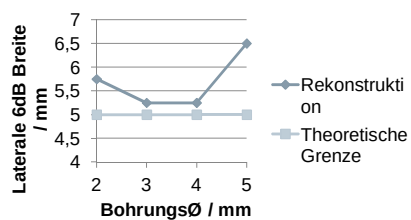
$a_i^+(\tau)$... Analytisches Signal zum Zeitpunkt τ



SAFT

Vergleich B-Bild & SAFT kleiner Bohrungen

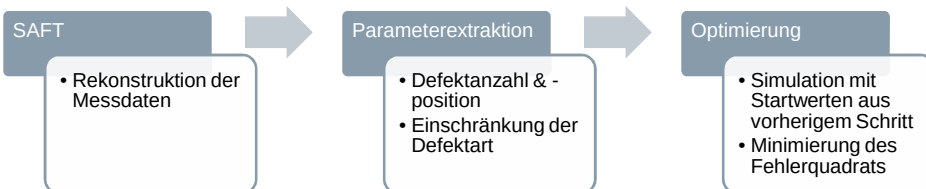
- Refokussierung
- Größenbestimmung durch Ausmessen nicht möglich



Modellbasierte Defektbewertung mit SAFT als Ausgangsbasis

SIEMENS

Ansatz für die Bewertung kleiner Fehlstellen



Vorteile

- Winkelabhängige Streucharakteristik bleibt vorhanden
- Möglichkeit Reflektororientierung und Form zu berücksichtigen

Nachteile

- Höherer Rechenaufwand

Page 7

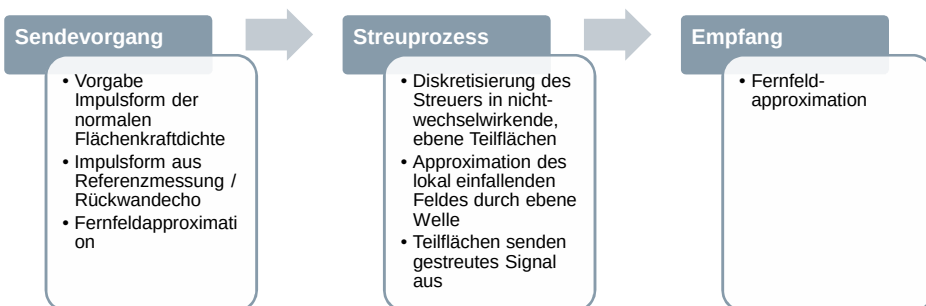
September 2013 Corporate Technology

Unrestricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Simulation

SIEMENS

Kirchhoffnäherung / Physikalische Optik [1]



Vorteile:

- Schnell
- Geeignet für weite Schallwege

Nachteile:

- Hochfrequenznäherung

[1] Langenberg, Marklein, Mayer: "Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall"

Page 8

September 2013 Corporate Technology

Unrestricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Inverses Verfahren

Iterative Gauss-Newton Methode

Anpassen von Simulationsparametern mit dem Ziel, die Simulation möglichst genau mit der Messung in Übereinstimmung zu bringen

⇒ Minimierung des Fehlerquadrats Messdaten M - Simulationsdaten $S(p^{(i)})$

Funktional $\|M - S(p^{(i)})\|^2 \rightarrow \min$

Bestimmung des nächsten Parametersatzes anhand der Jakobimatrix $J(p^{(i)}) = \frac{\partial S(p)}{\partial p} \big|_{p=p^{(i)}}$

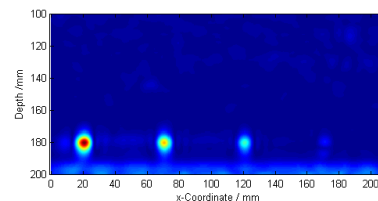
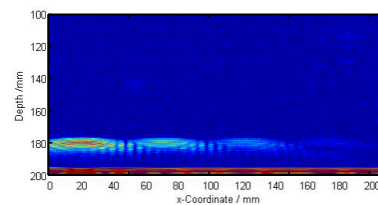
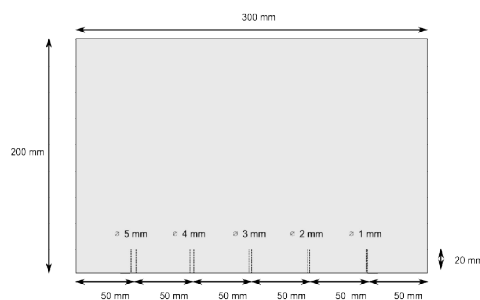
Parameter Update $p^{(i+1)} = p^{(i)} - [J(p^{(i)})^t J(p^{(i)})]^{-1} \cdot [J(p^{(i)})^t \{M - S(p^{(i)})\}]$

Bestimmung der Jacobmatrix durch Variation der Parameter um den aktuellen Parametersatz $S(p^{(i)})$

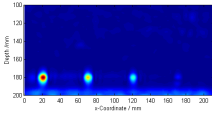
⇒ Parameteranzahl + 1 Simulationen für jeden Iterationsschritt

Messungen & Ergebnisse: Testkörper

- Präparation nach Norm für Ultraschallprüfkörper
- Mehrere Defektserien eingearbeitet
- Raster scan 211 x 11 mm, 1mm Auflösung
- 1,2,4 MHz Prüffrequenz



Messungen & Ergebnisse: Testkörper

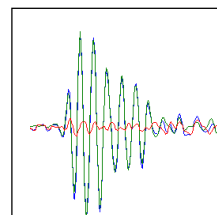
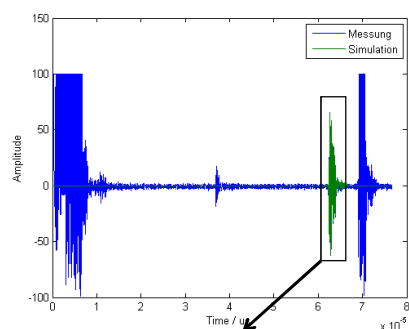
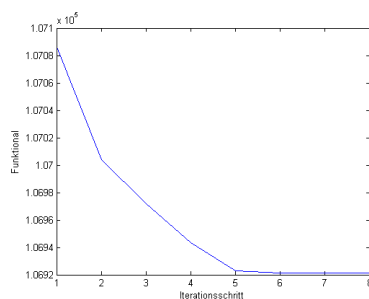
- Prüfkopfabmessungen und Scanparameter bekannt
- Defektanzahl und Position aus SAFT
 

- Anregungsimpuls und Schallgeschwindigkeit aus Rückwandecho
- Einschränkung der Defektgeometrie auf Kreisscheibe
- Wahl der zu optimierenden Parameter:
 - Defektposition (3)
 - Defektgröße (1)
 - Prüfkopfverkipfung (2)

Messungen & Ergebnisse: Testkörper

Rekonstruktionsergebnis

- 4 MHz, 5 mm Flachbodenbohrung
- Differenzsignal nach Optimierung im Größenbereich des Rauschens



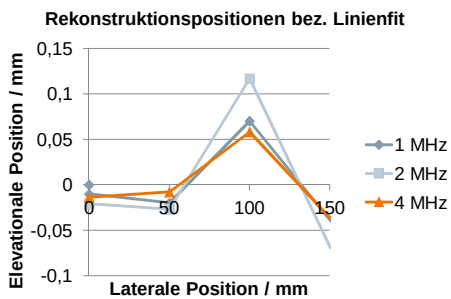
A-Linie bei 21mm
lateral, 6mm
elevational

Residuum in rot

Messungen & Ergebnisse: Testkörper

Rekonstruierte Defektpositionen

- Tiefe durchwegs auf 180mm rekonstruiert
- Ähnlicher Verlauf bei allen 3 Messungen
- Abweichungen vom Ideal < 0.5mm



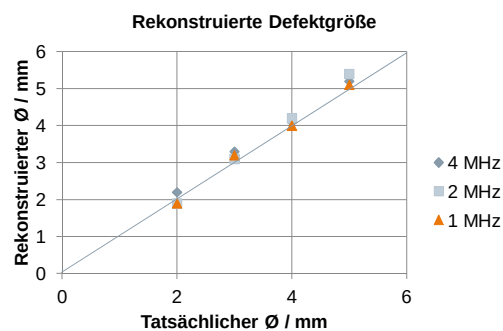
Rekonstruierte Prüfkopfverkipfung

Prüfkopf-frequenz / MHz	Prüfkopf-winkel 1 / °	Prüfkopf-winkel 2 / °
4	-1.5	1.1 bis 1.3
2	-1.5 bis -1.3	5.1
1	1.9 bis 2.2	1.4 bis 1.7

Messungen & Ergebnisse: Testkörper

Zusammenfassung der Größenbewertungen

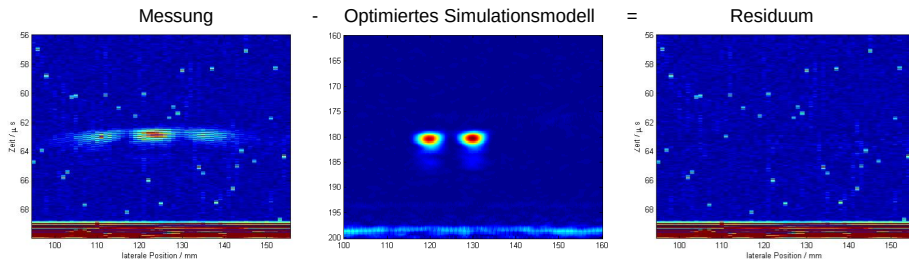
- Fehler der rekonstruierten Defektgrößen $\leq 10\%$
- Gute Übereinstimmung auch im Grenzbereich der Kirchhoffnäherung



Messungen & Ergebnisse: Testkörper

Trennung benachbarter Defekte

- 2 Flachbodenbohrungen, $\varnothing$ 2mm in Abstand von 10 mm

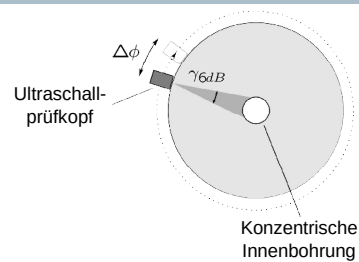


Tats. Defekt $\varnothing$ / mm	KSR $\varnothing$ / mm	Tiefe / mm	Lateral / mm	Elevational / mm	PKWinkel 1 / °	PKWinkel 2 / °
2	2.1	180.1	12.99	9,7	1	2.9
2	2.05	180.3	11.99	10	1	2.9

Messungen & Ergebnisse: Turbinenscheibe

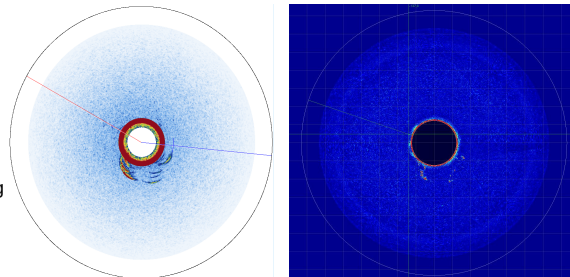
Turbinenscheibe

- $\varnothing$ 1.5m
- 1 mm $\varnothing$ Flachbodenbohrung an der Nabe
- Schallgeschwindigkeit $c = 5900$ m/s
- 2 MHz Prüffrequenz



Vergleich B-Bild & SAFT

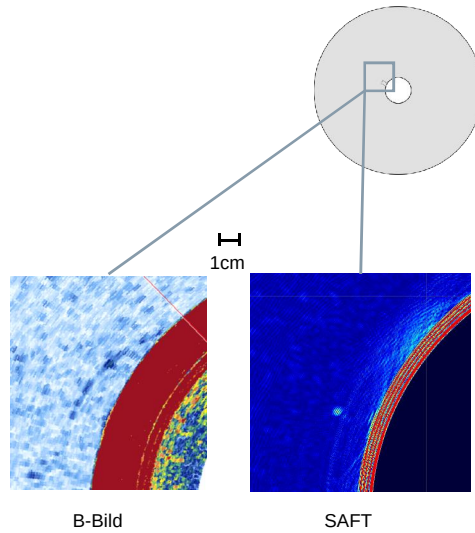
- Refokussierung
- Rauschteppich tiefenunabhängig



Messungen & Ergebnisse: Turbinenscheibe

Größenbewertung der Flachbodenbohrung

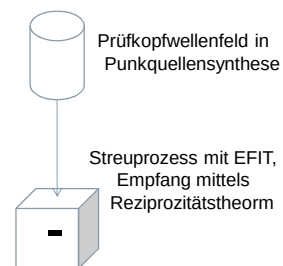
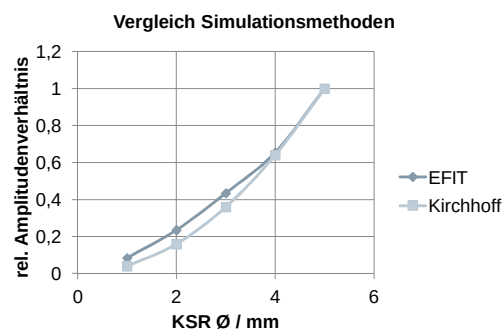
- Synthetischer Anregungspuls
- Rekonstruierte Größe von $\varnothing 1,1$ mm
- Prüfkopfverkipfung $3,6^\circ$ lateral und $1,3^\circ$ elevational



Vergleich EFIT - Kirchhoff

Gekoppeltes Verfahren Punktquellensynthese + EFIT

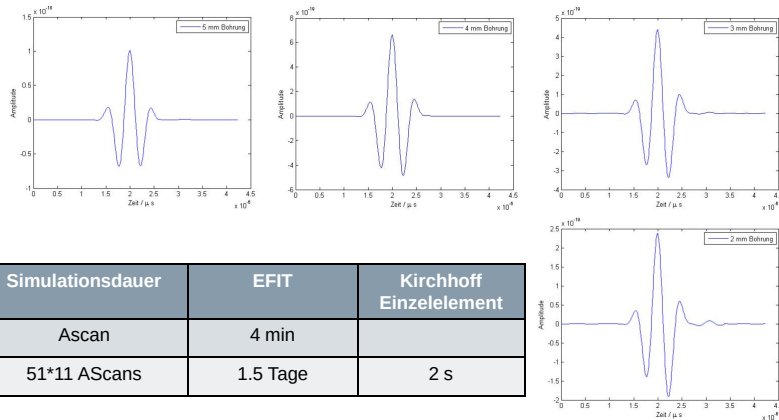
- $80 \times 80 \times 80$ Gitter
- 2-5 mm $\varnothing$ Defekte



Vergleich EFIT - Kirchhoff

Impulsform

- Änderung bei kleinen Defekten



Zusammenfassung

Erweiterung der modellbasierten Defektbewertung im Energiemaschinenbau

- Fehlstellenbewertung durch Anpassen von Defektparametern in Simulationen
- SAFT Rekonstruktion als Basis für die Modellbildung
- Größenbewertungsfehler in eigenen Messungen < 10%
- Korrekte Bewertung durch Defekttrennung

Ausblick

- Erweiterung auf andere Defektgeometrien
- Andere Simulationsmethoden

Vielen Dank an

- Böhler Edelstahl GmbH & Co KG
- Lehrstuhl für Sensorik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg
- Dr. Marklein