

Untersuchung von Robustheit und SNR der SAFT-Analyse

Hubert MOOSHOFFER^{*}, Matthias GOLDAMMER^{*},
Werner HEINRICH^{**}, Karsten KOLK^{***}

^{*} Siemens AG, Corporate Technology, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München

^{**} Siemens AG, Energy Sector, Huttenstrasse 12, 10553 Berlin

^{***} Siemens AG, Energy Sector, Mellinghofer Str. 55, 45473 Mülheim (Ruhr)

{hubert.mooshofer, matthias.goldammer, werner.o.heinrich, karsten.kolk}@siemens.com

Kurzfassung. Bei der Synthetic Aperture Focussing Technique („SAFT“) gehen mehrere Eigenschaften des Prüfgegenstandes sowie verschiedene Prüfparameter ein. Da eine genaue räumliche und zeitliche Zuordnung der gemessenen Echosignale für die SAFT-Analyse entscheidend ist, ergeben sich höhere Genauigkeitsanforderungen als bei konventioneller Prüfung. In der Praxis ergeben sich durch verschiedene Faktoren Abweichungen, z.B. kann die Schallgeschwindigkeit im Prüfgegenstand örtlich schwanken, oder es können sich bei der Messung Schwankungen des Ankoppelpaltes ergeben.

Im Rahmen dieses Beitrages wird am Beispiel großer zylindrischer Schmiedeteile dargestellt, wie robust die SAFT-Analyse gegenüber Parameterabweichungen ist, und welche Genauigkeitsanforderungen damit für den praktischen Einsatz zu stellen sind. Neben dem Einfluss von Objekt- und Messparametern wird auch gezeigt, inwieweit das Schallfeld des Prüfkopfes die SAFT-Auswertung beeinflusst. Im Hinblick auf Messstörungen (z.B. durch elektrische Störeinflüsse, die nicht vermieden werden können) werden die Auswirkungen solcher Störungen untersucht und es wird dargestellt, inwieweit gestörte Zeitsignale unterdrückt werden dürfen.

1. Einführung

Die SAFT-Analyse verbessert die örtliche Auflösung der Ultraschallprüfung [1], ermöglicht bessere Trennung benachbarter Defektanzeigen und gestattet die Detektion kleiner Defekte in Gegenwart von Gefügestreuung, die ansonsten nicht aus dem Gefügerauschen herausstechen [2]. Grundprinzip der SAFT-Analyse ist die laufzeitrichtige Überlagerung der zu einem Voxel beitragenden Messsignale. Bei voxelorientierter Betrachtung ergibt sich folgende Rekonstruktionsformel [3], wenn die gemessene Echoamplitude mit Φ bezeichnet wird.

$$\text{SAFT}(x', y', z') = \iint \phi \left(x, y, d, t = t_0 + 2 \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}{c} \right) dx dy$$

Für ebene Prüfflächen wurde die FT-SAFT entwickelt, die sich mit der schnellen Fourier-Transformation effizient implementieren lässt [4].

Die Hauptvorteile der SAFT-Auswertung sind eine bessere Abgrenzung nahe benachbarter Defekte (bietet Potential zur möglichen Trennung von Gruppenanzeigen), die Verbesserung der lateralen Größenbestimmung in der Größenordnung einer Wellenlänge

und die Verbesserung des SNR in Gegenwart von Gefügerauschen. Für die SAFT-Inspektion können vorhandene Prüfsysteme benutzt werden, oftmals ohne dass zusätzliche Prüfschritte notwendig werden. Da das Ergebnis der SAFT-Analyse der intuitiven Vorstellung von Schnittbildern näher kommt als z.B. B-Bilder, ist das Ergebnis für erfahrene Ultraschall-Prüfer leicht zu verstehen und zu interpretieren.

Zur Durchführung der SAFT-Analyse wird ausreichend Rechenleistung benötigt, die Messdaten müssen als HF-Daten mit Positionsinformation aufgezeichnet werden. Durch die Weiterentwicklung der Computertechnik und den vermehrten Einsatz mechanisierter Prüfung sind die Voraussetzungen für den Einsatz der SAFT-Analyse heutzutage günstig.

2. Mögliche Fehlerquellen bei der SAFT-Analyse

2.1 Artefakte

Bei der SAFT-Analyse kommt es durch Summierung der Beiträge verschiedener Messpositionen zu konstruktiver und destruktiver Interferenz. An der Stelle eines Defektes wird das Signal mehrerer beitragender Messpositionen verstärkt, seitlich von der Defektposition wird das Signal aufgrund variierender Phase abgeschwächt, jedoch in der Regel nicht vollständig. Dadurch entstehen in der Nachbarschaft von Defektanzeigen Artefakte. Für die laterale Defektbegrenzung ist die SNR zwischen Defekt und Artefakten maßgeblich.

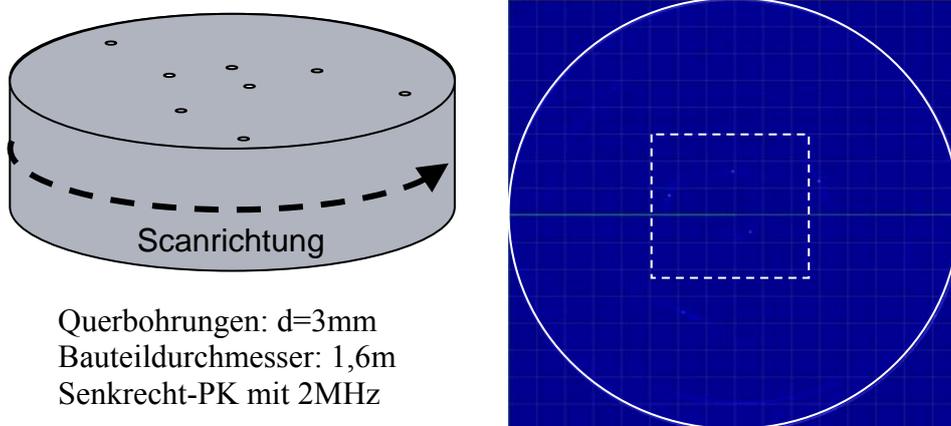


Bild 1. Prüfbodens mit Querbohrungen und betrachteter Ausschnitt (Scheibenmitte)

Zur Bestimmung der SNR wurden Querbohrungen untersucht, die in ein Schmiedeteil eingebracht sind (siehe Bild 1). In Bild 2 ist das Ergebnis der SAFT-Auswertung im markierten rechteckigen Ausschnitt in Schrägansicht dargestellt. Man erkennt, dass die drei Defektanzeigen um eine Größenordnung höher als die Artefakte sind. Für die drei Querbohrungen, die im Abstand $R=80, 160, 240$ mm vom Zentrum eingebracht sind, ist das Verhältnis Defektanzeige zu Artefakten größer als 13:1 ($SNR > 22\text{dB}$).

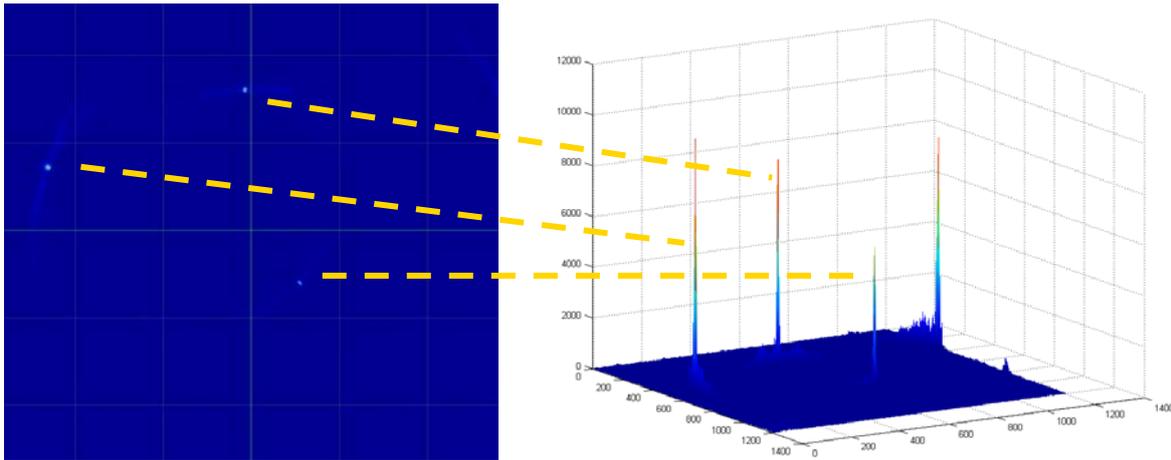


Bild 2. SAFT-Analyse dargestellt als Schnittbild und als Schrägsicht

2.2 Parameterfehler

In die SAFT-Analyse gehen verschiedene Parameter ein, die Auswirkungen auf deren Genauigkeit haben. Für die laufzeitrichtige Überlagerung der zu einem Punkt beitragenden Messsignale spielen sowohl Schallwege als auch Schallgeschwindigkeit eine wichtige Rolle, d.h. es gehen die Objektparameter Schallgeschwindigkeit und Oberflächenform ein. Neben ungenauer Kenntnis von Schallgeschwindigkeit und Oberflächenform, können auch Schwankungen beider Parameter zu fehlerhafter SAFT-Auswertung führen. Weitere Fehlerquellen können aus fehlerhafter Einstellung von Messparametern resultieren, zum Beispiel durch fehlerhafte Messposition(en) oder falsche Prüfkopfparameter. Im Folgenden werden die Auswirkungen von Parameterabweichungen/-fehlern betrachtet, und es wird daraus gefolgert, welche Genauigkeitsanforderungen sich für den praktischen Einsatz stellen.

2.3 Messstörungen

Obwohl in der Praxis durch verschiedene Maßnahmen, wie z.B. Minimierung von Kabellängen oder Schirmung von Steckern und Kabeln, der Einfluss elektromagnetischer Störungen minimiert wird, lässt er sich oft nicht vollständig vermeiden. Insbesondere bei langen Schallwegen liegen empfangene Echos im Bereich weniger Millivolt, so dass mit hohen Verstärkungsfaktoren gearbeitet wird. Je nach Umfeld der Prüfanlage können jedoch erhebliche Störeinflüsse auftreten, die schlecht zu unterdrücken sind. Die Auswirkungen von Messstörungen werden am Ende von Abschnitt 3 untersucht.

3. Robustheit der SAFT-Analyse

3.1 Einfluss der Schallgeschwindigkeit

Aus der Gegenüberstellung zweier SAFT-Auswertungen mit unterschiedlich eingestellter Schallgeschwindigkeit in Bild 3 sieht man, dass sich durch Fehler in der Schallgeschwindigkeit Doppelanzeigen (im Innenbereich) oder kreisförmige Anzeigen bzw. Kreisabschnitte (im Außenbereich) ergeben können. Dies rührt daher, dass im betrachteten Fall die radial gemessenen A-Bilder von der Mess(ober-)fläche bis zur gegenüberliegenden Seite reichen, so dass Defekte von beiden Seiten angeschallt werden.

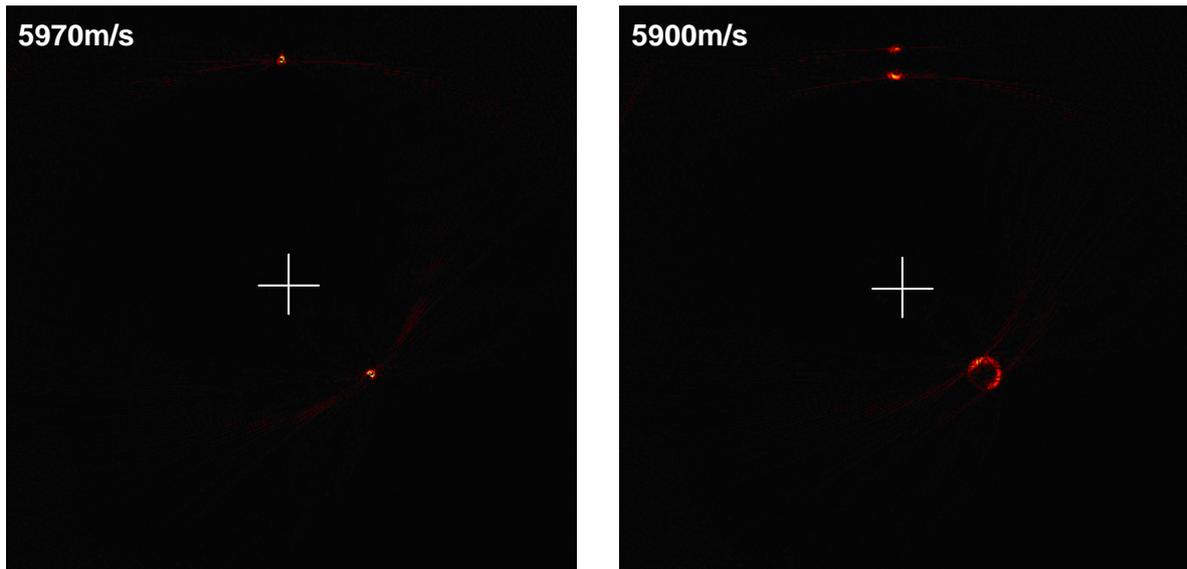


Bild 3. SAFT-Analyse mit korrekt eingestellter Schallgeschwindigkeit (links) bzw. zu klein eingestellter Schallgeschwindigkeit (rechts).

Da beide Anzeigen aufgrund der Ultraschallfrequenz von 2MHz und der geringen Bandbreite weiter ausgedehnt sind, kommen sie bei korrekt eingestellter Schallgeschwindigkeit zur Deckung. Bei Rekonstruktion mit schrittweise steigender Schallgeschwindigkeit im Bereich 5900m/s bis 6000m/s (Bild 4) lässt sich beobachten, wie die Echos von beiden Seiten aufeinander zu wandern, zur Deckung kommen und sich schließlich wieder voneinander entfernen.

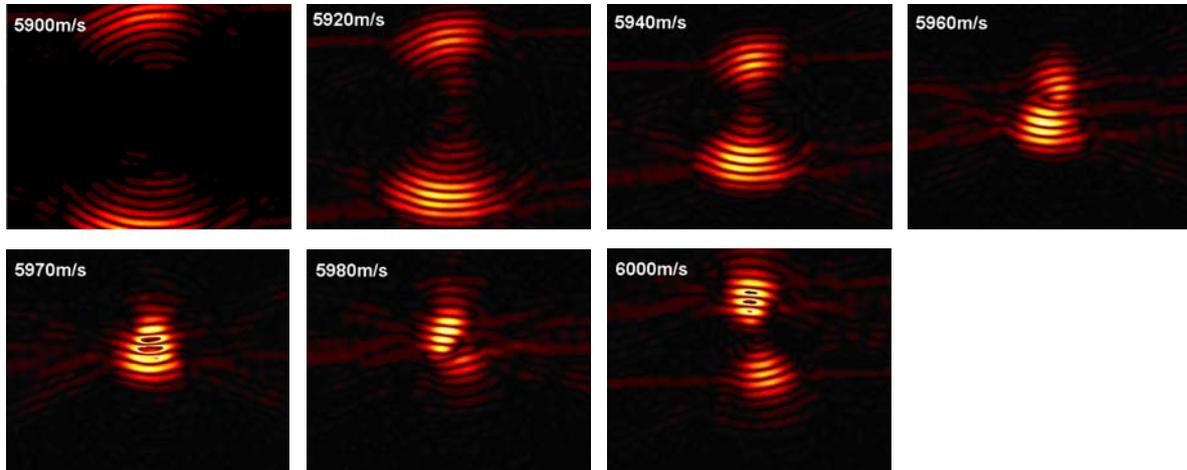


Bild 4. SAFT-Analyse mit im Bereich 5900m/s bis 6000m/s schrittweise steigend eingestellter Schallgeschwindigkeit.

Bereits bei einem Fehler von 10m/s kommen die beiden Echos nicht zur Deckung, so dass man maximal einen Fehler von 0,1% bzw. $\pm 5\text{m/s}$ tolerieren kann. Dies ist plausibel, wenn man bedenkt, dass 0,1% bei einem Schallweg von 1,6m gerade der halben Defektgröße entspricht.

Wenn - in einem anderen Messzenario - Defekte nur aus einer Richtung angeschallt werden, entspricht dies dem Fall, dass nur eine der beiden Anzeigen in der obigen Bilderserie (Bild 4) vorhanden ist. Auch in diesem Fall hat die Schallgeschwindigkeit darauf Einfluss, wie stark fokussiert eine Anzeige erscheint. Allerdings kann man nun größere Fehler zulassen, im betrachteten Beispiel wäre z.B. ein Fehler von $\pm 20\text{m/s}$ noch akzeptabel.

3.2 Einfluss der Oberflächenform

Im Fall zylindrischer Bauteile entspricht die Oberflächenform dem Parameter Bauteildurchmesser. In Bild 5 werden vier SAFT-Rekonstruktionen mit unterschiedlichem Bauteildurchmesser gezeigt. Bei zylindrischen Bauteilen hat ein falscher Durchmesser ähnliche Wirkung wie eine falsche Schallgeschwindigkeit, auch hier haben bereits kleine Abweichungen große Auswirkungen.

Im Spezialfall zylindrischer Bauteile und senkrechter Einschallung ist der Quotient Schallgeschwindigkeit zu Durchmesser entscheidend. Daher ist eine Kompensation eines falschen Bauteildurchmessers durch eine im gleichen Verhältnis falsch eingestellte Schallgeschwindigkeit möglich. Im allgemeinen Fall müssen jedoch beide Parameter, Schallgeschwindigkeit und Oberflächenform, getrennt voneinander präzise eingestellt werden.

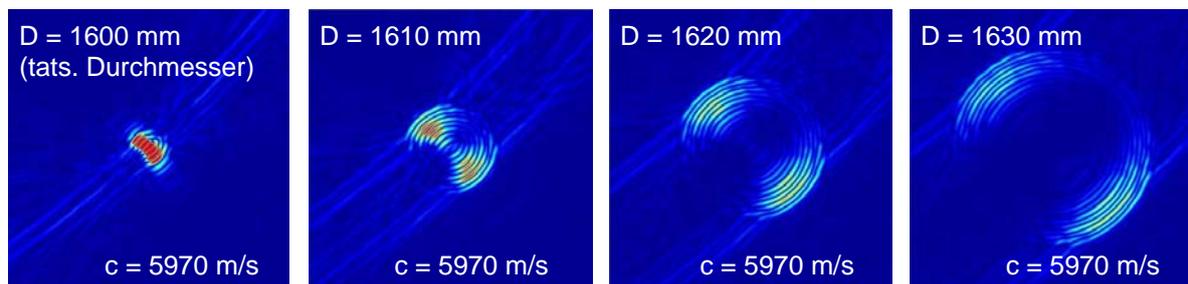


Bild 5. SAFT-Analyse mit schrittweise steigendem Bauteildurchmesser.

3.3 Einfluss der Wandlerparameter

Neben der Bandbreite des Prüfkopfes, die über die zeitliche Länge von Echos die Ausdehnung von Anzeigen beeinflusst, ist auch der Wandlerdurchmesser ein wichtiger Parameter. Vorteilhaft für die SAFT-Analyse sind kleine Wandlerdurchmesser, da sich dadurch ein großer Öffnungswinkel des Schallfeldes ergibt. Mit größerem Wandlerdurchmesser lässt sich andererseits mehr Energie in das Prüfobjekt einbringen, so dass bei langen Schallwegen trotz des geringeren Öffnungswinkels mit größeren Prüfköpfen gearbeitet wird.

Die Auswirkungen des Parameters „Öffnungswinkel“ auf die SAFT-Analyse sind in Bild 6 gezeigt. Die „Energiekonzentration“ ist bei korrekter Einstellung am besten, d.h. die Anzeige eines kleinen Defekts kommt einer punktförmig konzentrierten Anzeige am nächsten. Bei zu großem Öffnungswinkel (Bild 6, links vom korrekten Wert) franst das Rückwandecho aus. Im Bild sind hellblaue Bereiche zu erkennen, die gegenüber möglichen Defektanzeigen einen Störhintergrund darstellen. Bei zu kleinem Öffnungswinkel (Bild 6, rechts vom korrekten Wert) ergibt sich hingegen unvollständige Interferenz an der Stelle des Defektes: Seitlich vom Defekt kommt es erst in größerem Abstand zu destruktiver Interferenz, d.h. die laterale Ausdehnung von Anzeigen wächst.

Angesichts der Tatsache, dass der Transducerdurchmesser D_{TRD} im gezeigten Fall über einen extremen Bereich variiert wurde, bleibt jedoch festzuhalten, dass Ungenauigkeiten diesbezüglich viel weniger kritisch sind als z.B. Ungenauigkeiten bezüglich der Schallgeschwindigkeit. Für die Praxis reicht es aus, den zur Messung verwendeten Transducertyp zu kennen.

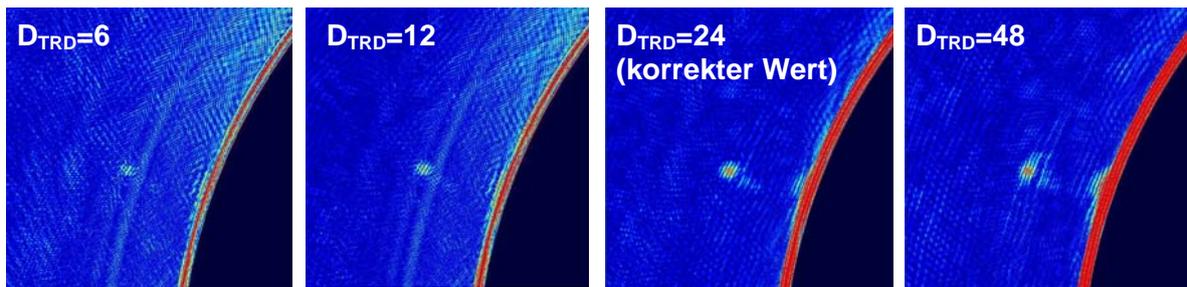


Bild 6. SAFT-Analyse mit unterschiedlichem Prüfkopfdurchmesser.

3.3 Einfluss von Messstörungen

Um den Einfluss von Messstörungen zu untersuchen, wurden diese künstlich simuliert, indem Spikes in einzelne A-Bilder eingefügt wurden. Die Spikes sind kurze Impulse mit maximaler Amplitude, d.h. sie sind deutlich größer als Fehlerechos. In Bild 7 ist eine ungestörte Messung verglichen mit dem Fall, dass ein bzw. drei Spikes in den Messdaten auftreten. Man sieht, dass Messstörungen über einem größeren Bereich „verschmiert“ werden. Bei großer Amplitude der Spikes - wie in der Simulation der Fall - sind bereits einzelne Messstörungen sichtbar. Insgesamt resultiert aus den Messstörungen eine deutliche Verschlechterung des SNR. Im Falle mehrerer Störungen kann es zur Überlagerung kommen, so dass die Amplitude des „Störuntergrundes“ steigt. Auch wenn bei Überlagerung von Messstörungen, tatsächliche Defekte oftmals noch erkannt und von den Störungen abgegrenzt werden können, lässt sich die Notwendigkeit der Unterdrückung von Störungen erkennen.

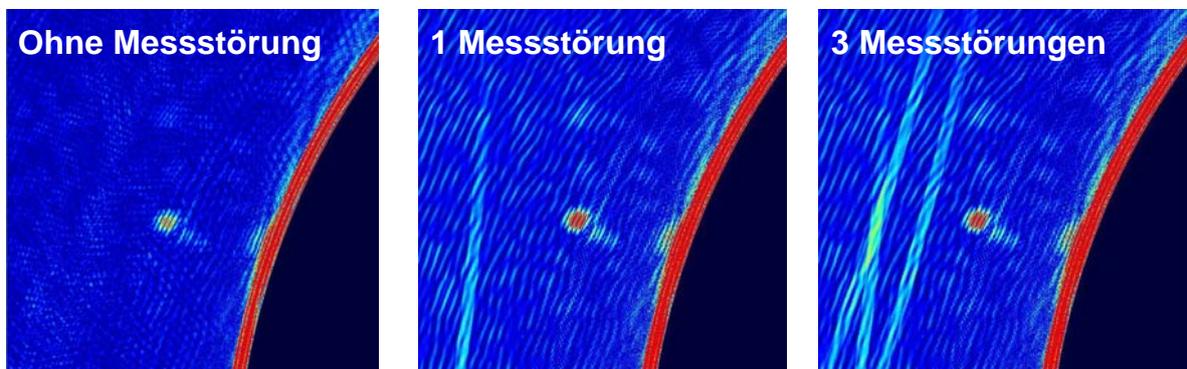


Bild 7. Einfluss von Messstörungen auf die SAFT-Analyse.

3.4 Fehlende bzw. unterdrückte A-Bilder

Messungen können aus verschiedenen Gründen fehlerhaft sein, beispielsweise weil sie aufgrund von Messstörungen unterdrückt wurden oder weil sie aufgrund von Ankoppelfehlern nicht vorhanden sind. Je nach Ursache können die gemessenen A-Bilder ganz oder teilweise unbrauchbar sein. Im Folgenden wird der „Worst Case“ betrachtet, d.h. die Auswirkung mehrerer benachbarter komplett fehlender Messungen auf die SAFT-Auswertung. Dazu werden die entsprechenden A-Bilder vor Durchführung der SAFT-Analyse komplett auf Null gesetzt. Das Ergebnis ist in Bild 8 gezeigt.

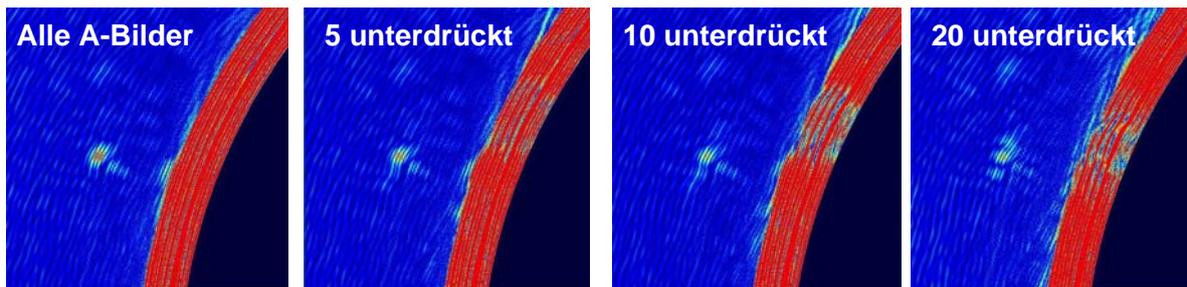


Bild 8. Ergebnis der SAFT-Analyse für unvollständige Messdaten (von links nach rechts wurden 0, 5, 10, bzw. 20 A-Bildern unterdrückt).

Wie man sieht, ändert sich die Amplitude von Defekten mit der Anzahl unterdrückter Messungen. Kleine Reflektoren bleiben auch dann sichtbar, wenn sehr viele benachbarte Messungen unterdrückt werden. Wie man an der Lücke in der Rückwand sehen kann, ist bei spiegelnder Reflexion die Auswirkung unterdrückter Messungen eher sichtbar, als bei kleinen Defekten, die den Schall in alle Richtungen reflektieren.

Insgesamt zeigt sich die SAFT-Auswertung erstaunlich robust, sogar gegenüber dem Fehlen vieler benachbarter Zeitsignale. Die Unterdrückung einzelner A-Bilder stellt im gezeigten Fall kein Problem dar. Grundsätzlich darf man allerdings nicht vergessen, dass die Auswirkungen von der Tiefenlage abhängig sind, und dass in größerer Tiefe, wenn die Anzahl der Echobeiträge für jedes Voxel sehr groß ist, das Weglassen von A-Bildern deutlich weniger problematisch ist, als in oberflächennäheren Zonen.

4. Fazit

Bei der SAFT-Analyse gehen mehr Parameter ein als bei klassischer UT-Prüfung, und es stellen sich höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Parameter. Wichtig ist, Schallgeschwindigkeit und Bauteilform präzise einzustellen - dies hat entscheidenden Einfluss auf das Analyseergebnis. Wenn Defekte aus entgegengesetzter Richtung angeschallt werden, lässt sich die SAFT-Auswertung sogar als Hilfsmittel zur präzisen Schallgeschwindigkeitseinstellung nutzen. Gegenüber anderen Parametern wie z.B. Prüfkopfdurchmesser erweist sich die SAFT-Analyse hingegen als sehr robust - kleine Parameterfehler haben hier nur moderate Auswirkungen.

Im Fall von Messstörungen bietet die SAFT-Auswertung sogar Vorteile, denn sie verbessert die Robustheit gegenüber Messstörungen. Bei ausreichendem Abstand von der Bauteiloberfläche - wenn viele Messpunkte zu einem Voxel beitragen - lassen sich mehrere fehlende A-Bilder verkraften, so dass eine einfache Möglichkeit zur Unterdrückung gestörter Messungen besteht. Werden hingegen gestörte Messungen nicht unterdrückt, verschlechtern sie die SNR.

Referenzen

- [1] R. Boehm, D. Brackrock et al.: „Advanced crack shape Analysis using SAFT“, AIP Conference Proceedings, 2010.
- [2] R. Böhm, W. Heinrich: „Störsignalminderung bei der Ultraschallprüfung durch ein Auswerteverfahren in Anlehnung an die Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT)“, DGZfP-Jahrestagung St. Gallen, 2008.
- [3] A. Zimmer: „Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen“, Dissertation an der Universität Kassel, 2008.
- [4] R. Marklein, K.J. Langenberg, K. Mayer et al.: „Numerical Modeling and Inverse Scattering in Nondestructive Testing: Recent Applications and Advances“, AIP Conference Proceedings, 2005.