

Amplitudenbasierte Fehlergrößenbewertung mit SAFT: Auf dem Weg von der bildlichen Darstellung zum Messverfahren

Hubert MOOSHOFER¹, Rainer BOEHM², Werner HEINRICH³, Karl FENDT⁴,
Matthias GOLDAMMER¹, Karsten KOLK⁵, Johannes VRANA⁶

¹ Siemens AG, Corporate Technology, München

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

³ Siemens AG, Power and Gas, Berlin

⁴ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, Erlangen

⁵ Siemens AG, Power Generation, Mühlheim an der Ruhr

⁶ iNDEC - International NDE Consulting, München

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

Kurzfassung. Die Größenbewertung von Anzeigen und die Bestimmung der Nachweisgrenze spielen bei der Ultraschallprüfung eine zentrale Rolle: Sie stellen sicher, dass kritische Ungängen erfasst und bruchmechanisch behandelt werden können.

Bei SAFT wurde bisher die Größe von Ungängen dadurch bestimmt, dass die räumliche Anzeigenausdehnung im Rekonstruktionsergebnis ausgewertet wird, d.h. die Anzahl von Voxel über die sich eine Anzeige erstreckt. Auf diese Weise lassen sich jedoch nur Defektanzeigen bewerten, die größer oder gleich der Wellenlänge sind. Bei kleinen Defekten versagt diese Methode, d.h. es ist keine Größenbewertung möglich. Außerdem bietet diese Methode keine Aussage über die Nachweisgrenze des Verfahrens.

Ein Hauptvorteil von SAFT gegenüber der konventionellen Ultraschallprüfung ist aber gerade die Verbesserung der Nachweisgrenze, denn SAFT steigert das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) gegenüber dem Gefügerauschen und reduziert statistisches Rauschen. Um diesen Hauptvorteil nutzen (und quantifizieren) zu können, wird für SAFT eine Methode zur Nachweisgrenzenbestimmung und zur Größenbewertung der Anzeigen kleiner Ungängen benötigt.

Neben ihrer räumlichen Ausdehnung lassen sich Anzeigen im SAFT-Ergebnis auch durch ihre Amplitude charakterisieren, wenn die Prüfkopfeigenschaften und die geometrischen Verhältnisse beim Scan berücksichtigt werden. Genauer gesagt durch die Amplitudensumme, in die - neben der Echoamplitude - auch die winkelabhängige Streucharakteristik eingeht.

Im Folgenden wird dargelegt, dass sich die Amplitudensumme zur Nachweisgrenzenbestimmung und zur Größenbewertung kleiner Ungängen eignet. Es wird der Zusammenhang zwischen der Amplitudensumme und der Größe von Ungängen dargestellt, und es wird gezeigt, dass auch die Anzeigenposition und die Form des Prüfobjektes eine Rolle spielen können. Auf dieser Basis wird eine Methode zur Größenbestimmung kleiner Anzeigen im SAFT-Ergebnis entwickelt. Damit lässt sich das SAFT-Ergebnis als Ersatzfehlergröße darstellen, so wie das bei konventioneller Ultraschallprüfung z.B. mit Hilfe von AVG-Diagrammen erfolgt. Durch die Vervollständigung um die Größenbewertung ist SAFT nicht mehr nur ein bildgebendes Verfahren, sondern es kann vielmehr als vollwertiges Messverfahren dienen.

1. Einführung

Wie bei jeder zerstörungsfreien Prüfung eines Bauteiles stellen sich auch bei der Ultraschallprüfung zwei wesentliche Fragen:

- Welche Defekte können gefunden werden?
- Und wie sind evtl. gefundene Defekte zu bewerten?

Die erste Frage zielt auf die Nachweisgrenze des Verfahrens. Bedingt durch Gefügerauschen und elektrischem Rauschen, können kleine Defekte, die von diesem überdeckt würden, nicht gefunden werden.

Die zweite Frage zielt darauf, ob das geprüfte Bauteil noch voll oder nur beschränkt einsatztauglich ist. Zur Beantwortung beider Fragen ist die Defektgrößenbewertung erforderlich.

1.1 Defektgrößenbewertung bei klassischer UT

Für die klassische Ultraschallprüfung gibt es mehrere Methoden zur Größenbewertung, z.B. Registrierlänge, Halbwertslänge, AVG-Diagramm und Vergleichskörpermethode [1,8]. Dabei sind zwei grundsätzlich verschiedene Fälle zu unterscheiden:

Bei Defekten, die größer sind als der Durchmesser des auf sie treffenden Schallbündels, kann ein einzelnes A-Bild nur einen Teil des Defektes erfassen. Daher wird in diesem Fall die Echodynamik ausgewertet, d.h. die Änderung des Echsignals bei Verschiebung des Prüfkopfes. Wenn z.B. der Zentralstrahl den Rand eines sehr großen oberflächenparallelen Defektes trifft, dann wird nur etwa halb so viel Schallenergie reflektiert, als wenn das komplette Schallbündel auf den Defekt trifft. Diese Überlegung motiviert die Bestimmung der Halbwertslänge.

Bei Defekten, die kleiner sind als der Durchmesser des auf sie treffenden Schallbündels, wird zwar der ganze Defekt vom Schall erfasst, aber die Echodynamik liefert keine Information über die Defektgröße. Da der Scan über einen kleinen Reflektor gleichwertig zum Durchschieben einer kleinen Feldsonde durch das laterale Schallfeldprofil ist, liefert die Echodynamik lediglich Informationen über das Profil des Schallbündels. Andererseits hängt in diesem Fall die Echoamplitude von der Defektgröße, wie aus der Fernfeldformel hervorgeht [2].

$$I_{KSR}(z_{ksr}) = \pi^2 \frac{D_{ksr}^2 N^2}{D^2 z_{ksr}^2} I_0 \quad (1)$$

Dies ermöglicht eine Defektgrößenbewertung anhand der Echoamplitude, wenn zuvor eine Amplitudenjustierung durchgeführt wurde. Die Amplitudenjustierung sorgt für die Trennung (und Eliminierung) der Einflüsse von Prüfkopf/Prüfgerät gegenüber dem Reflexionsverhalten des Defektes. Zur klassischen UT Defektgrößenbewertung können AVG-Diagramme der Prüfköpfe herangezogen werden, in denen die Echoamplitude (indirekt, ausgedrückt als Verstärkung) in Abhängigkeit von Schallweg und Defektgröße als Kurvenschar dargestellt ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass das auszuwertende A-Bild so aufgenommen wird, dass der Defekt senkrecht angeschallt wird. Um die Richtigkeit der Annahme sicherzustellen wird das Defektecho gezüchtet, d.h. durch Bewegung (und ggf. Drehung) des Prüfkopfes auf der Prüflingsoberfläche maximiert. Die so ermittelte Ersatzfehlergröße entspricht also der *minimalen* Größe eines realen Defekts, der dann eine gleich hohe Echoamplitude erreicht, wenn er eine ebene Fläche hat, die senkrecht angeschallt wurde.

1.2 (Bisherige) Defektgrößenbewertung bei SAFT

Bei der Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) wird das Volumen des Bauteil in Voxel unterteilt und in jedem Voxel durch rechnerische Überlagerung der Ultraschallsignale synthetisch fokussiert. Das Ergebnis ist ein voxelbasierter Volumendatensatz, d.h. jedem Voxel ist ein SAFT-Amplitudenwert zugeordnet.¹ Da das SAFT-Ergebnis weder eine Abhängigkeit von der Position des Prüfkopfes noch von der Echolaufzeit hat, sind die Methoden der Defektgrößenbewertung aus der klassischen UT nicht anwendbar.

Bekanntere Methoden der Defektgrößenbewertung für SAFT [3] beruhen auf der Auswertung der zu einer Anzeige gehörigen Voxel, d.h. es wird sozusagen die Defektmaske ausgewertet. Dabei sind verschiedene Arten der Auswertung möglich:

- Anzahl der Voxel, aus denen eine Anzeige besteht
- Gesamtvolumen der Voxel aus denen eine Anzeige besteht
- Ausdehnung der Anzeige in einer Richtung
- Größte Ausdehnung der Anzeige über alle Richtungen
- Räumlicher Abstand zwischen Risspitzen

Zwar können die Werte leicht durch Bildverarbeitung ermittelt werden, doch verleiten sie leicht zu Fehlschlüssen. Denn die Ortsauflösung der SAFT-Auswertung ist begrenzt – auch bei sehr feinem Voxelraster. Dies bedeutet, dass nahe benachbarte Anzeigen im SAFT-Ergebnis nicht voneinander abgegrenzt werden können, wenn sie näher aneinander liegen, als der durch die Ortsauflösung definierte Mindestabstand. Es bedeutet aber auch, dass die Anzeigen kleiner Defekte eine Mindestgröße nicht unterschreiten können.

Zur Ortsauflösung von SAFT findet man in der Literatur verschiedene Untersuchungen [4]. Ein wichtiger Einflussfaktor ist die Größe der Prüfkopfapertur. Bei ebener Prüffläche ist die Auflösung umso höher je kleiner die Prüfkopfapertur ist, da durch das breitere Schallbündel eine größere synthetische Apertur erreicht wird. Aber auch die Oberflächenform spielt eine Rolle. Bei einem zylindrischen Prüfling wird die Auflösung zur Mitte hin feiner, bis zu einem wellenlängenabhängigen Wert. In [5] ist die Auflösung für das Beispiel einer Scheibe mit Innenbohrung (Stahl, ca. 1,5 m Außendurchmesser und ca. 0,25 m Innendurchmesser) für einen 2 MHz Prüfkopf wie folgt angegeben:

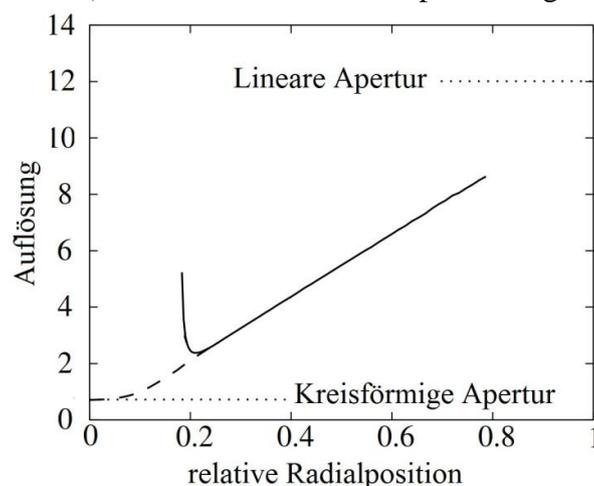


Abb. 1. Ortsauflösung von SAFT für ein zylindrisches Bauteil mit Innenbohrung abhängig von der relativen Radialposition (0=Mittelachse; 1=Mantelfläche)

¹ Falls nur eine Schnittebene mit SAFT ausgewertet wird, ist das SAFT-Ergebnis ein pixelbasierter Datensatz bzw. ein voxelbasierter Datensatz mit der Höhe von einem Voxel, für den die angestellten Überlegungen analog gelten.

2. Vollständige Defektgrößenbewertung für SAFT

Da SAFT das Signal-Rausch-Verhältnis gegenüber Gefügerauschen und auch elektrischem Rauschen verbessert [7], eignet es sich insbesondere dazu, kleine Defekte zu detektieren. Auch wenn zwei nahe benachbarte kleine Defekte nicht aufgelöst werden können, so lassen sie sich doch eindeutig nachweisen (bzw. die Abwesenheit von kleinen Defekten). Da eine Größenbestimmung mit Methoden der Bildverarbeitung wie erläutert nicht möglich ist, wird eine andere Methode benötigt, die dies leistet.

2.1 SAFT-Amplitude vs. Echo-Amplitude

Das Ergebnis einer SAFT-Auswertung wird in Form von Amplitudenwerten dargestellt. Diese werden im Folgenden als SAFT-Amplitudenwerte bezeichnet, und müssen von den Echoamplitudenwerten der A-Bilder unterschieden werden. Bei der SAFT-Auswertung wird für jeden Ort eine Vielzahl von Echoamplituden phasenrichtig aufsummiert (siehe (1)), so dass man auch von Amplitudensummen sprechen kann.

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

In diesem Beitrag werden folgende Bezeichnungen verwendet:

- Amplitudensumme = SAFT-Amplitude = SAFT-Amplitudenwert
- Echoamplitude = Echo-Amplitudenwert = Amplitude bei klassischer Prüfung

Eine Amplitudensumme (= SAFT-Amplitude) hängt sowohl von der Anzahl der Summanden als auch von deren Werten (= Echoamplitude) ab. Dadurch hat eine Amplitudensumme andere Eigenschaften als eine Echoamplitude. Wenn es dabei gelingt Schwankungen, die von Anzahl und Auswahl an Summanden herrühren, zu trennen von Schwankungen, die aus der Änderung der einzelnen Summanden herrühren, dann eignet sich die Amplitudensumme als Ansatzpunkt zur Größenbewertung kleiner Defekte im SAFT Ergebnis.

2.2 Eigenschaften der Amplitudensumme

Zum besseren Verständnis der Amplitudensumme werden nun deren Eigenschaften genauer untersucht. Wie in [6] kann auf vereinfachte Formeln für die Echoamplitude eines ungerichteten Punktreflectors zurückgegriffen werden:

$$A = \exp\left(-\frac{(\beta - \beta_0)^2}{k}\right) \exp\left(-\frac{p^2}{n^2/4}\right) \exp(j2\pi p) \quad (2)$$

$$p = (\|\vec{x}_{rec} - \vec{x}_{probe}\| - \|\vec{x}_{refl} - \vec{x}_{probe}\|) / (0.5\lambda) \quad (3)$$

$$k = \frac{\beta_{div}^2}{\ln 2} \quad (4)$$

Der Winkel β zwischen dem Lot zur Prüffläche und dem Vektor von der Prüfkopfposition \vec{x}_{probe} zur rekonstruierenden Position \vec{x}_{rec} wird mit dem Einschallwinkel β_0 und dem Faktor k verrechnet, wobei letzterer die Divergenz des Schallbündels β_{div} repräsentiert. Mit p wird die Phasendifferenz zwischen der zu rekonstruierenden Position \vec{x}_{rec} und dem Ort des Defektes \vec{x}_{refl} bezeichnet. Die Prüfkopf-Bandbreite wird durch den Faktor n berücksichtigt.

Für die Amplitudenbewertung wird das Maximum einer SAFT-Anzeige herangezogen. Das Maximum befindet sich am Ort maximaler konstruktiver Interferenz,

d.h. $\vec{x}_{rec} = \vec{x}_{refl}$. Für diesen Ort folgt $p = 0$, so dass sich Formel (2) erheblich vereinfacht zu

$$A = \exp\left(-\frac{(\beta - \beta_0)^2}{k}\right) \quad (5)$$

Für eine Defektgrößenbewertung müssen jedoch ausgedehnte Reflektoren betrachtet werden. Daher muss die Amplituden- und Winkelcharakteristik des Reflektors in der Formel ergänzt werden, wobei mit β_{refl} die Defektorientierung bezeichnet wird, und mit k_{refl} ein von der Divergenz des reflektierten Schallbündels abhängiger, analog zu k aus der Defektgröße zu berechneter Faktor.

$$A = A_{refl} \cdot \exp\left(-\frac{(\beta - \beta_0)^2}{k}\right) \exp\left(-\frac{(\beta - \beta_{refl})^2}{k_{refl}}\right) \quad (6)$$

Im Folgenden wird mit diesem vereinfachten Modell die Amplitudensumme für verschiedene Parametervariationen ausgewertet. Die im Folgenden gezeigten Graphen beruhen auf folgenden Standardparametern, abgesehen von dem Parameter, der jeweils variiert wird: Stahl, CLW = 5900m/s, 2MHz Senkrechtprüfkopf (LW), Durchmesser 12mm. Die Amplitudensumme wird dabei berechnet zu:

$$ASUM = \sum_{\vec{x}_{probe}} A(\beta = \beta(\vec{x}_{probe})) \quad (7)$$

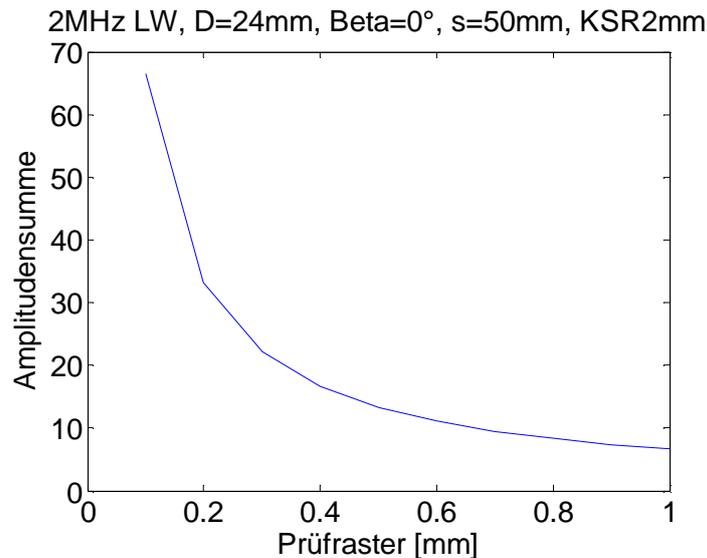


Abb. 2. Abhängigkeit der Amplitudensumme vom Prüfraster

Wie in Abb. 2 gezeigt, erhöht sich die Amplitudensumme bei einer Verfeinerung des Prüfrasters. Eine quantitative Auswertung zeigt, dass es sich näherungsweise um eine Hyperbel handelt, solange das Prüfraster ausreichend fein ist. D.h. das Prüfraster beeinflusst direkt die Anzahl von Summanden. Dieses Ergebnis legt nahe, die Amplitudensumme mit Bezug auf das Prüfraster zu normieren. Die notwendige Bedingung, dass das Prüfraster ausreichend fein sein muss, ist bei oberflächennahen Bereichen am kritischsten, bei oberflächenfernen Bereichen hingegen grundsätzlich unkritisch.

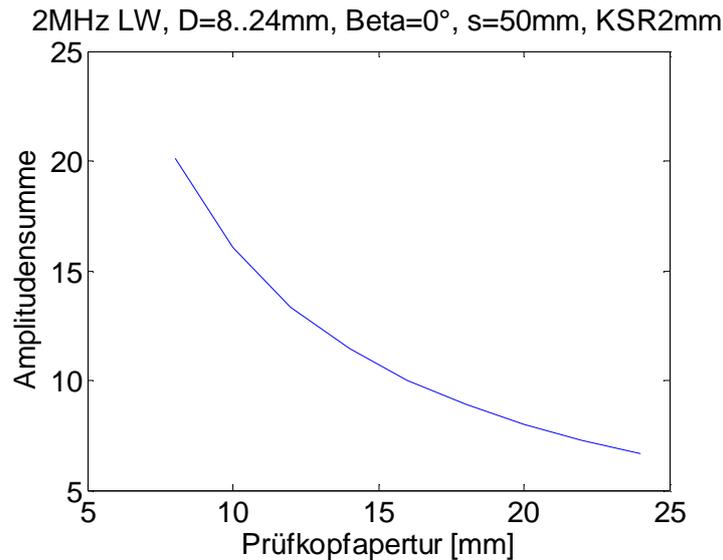


Abb. 3. Abhängigkeit der Amplitudensumme von der Größe der Prüfkopfapertur

Mit zunehmendem Prüfkopfdurchmesser verringert sich der Öffnungswinkel des Schallbündels. Dadurch tragen lateral weiter entfernte Positionen weniger zur Amplitudensumme bei. Wie in Abb. 3 gezeigt sinkt die Amplitudensumme mit zunehmender Größe der Prüfkopfapertur. Obwohl für die zugrundeliegenden Prüfdaten eine klassische Amplitudenkalibrierung durchgeführt wurde, muss daher die Größe der Prüfkopfapertur bekannt sein und berücksichtigt werden.

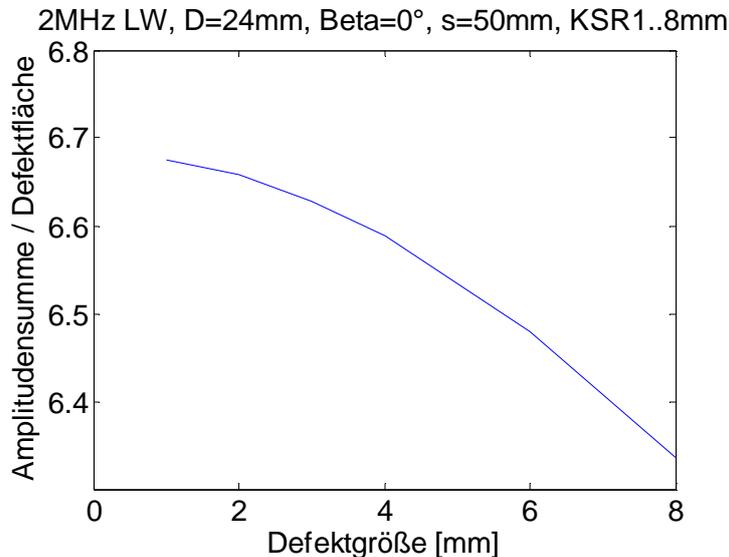


Abb. 4. Abhängigkeit der Amplitudensumme von der Defektgröße

In Abb. 4 ist - im Gegensatz zu den vorherigen Abbildungen - die Amplitudensumme geteilt durch die Defektfläche gezeigt. Bei zunehmender Defektgröße steigt wie erwartet auch die Amplitudensumme. Die Steigung ist aber - im Gegensatz zur klassischen Ultraschallprüfung - nicht proportional zur Defektfläche, sondern etwas geringer, so dass in Abb. 4 die Kurve zu größeren Defektgrößen hin etwas abfällt. Die bisherige Erfahrung für steigende Prüfkopfapertur lässt sich auf diesen Fall übertragen: Ein größerer Defekt reflektiert stärker gerichtet als ein kleinerer, so dass etwas weniger Rasterpositionen zur Amplitudensumme beitragen.

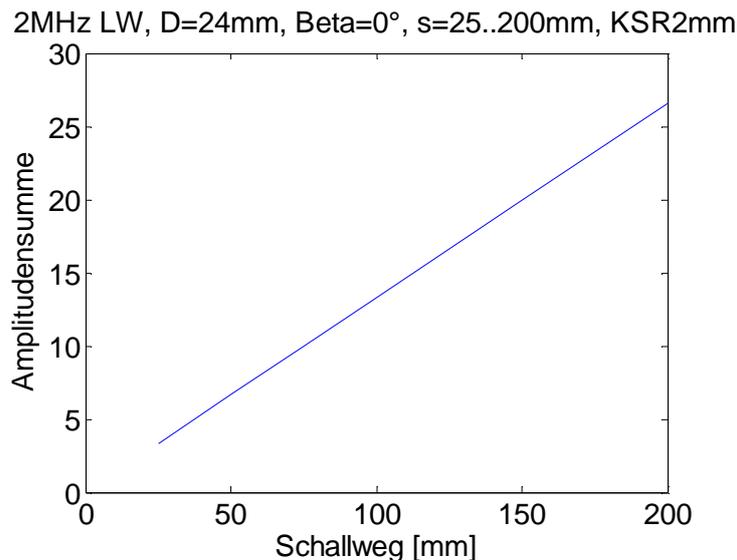


Abb. 5. Abhängigkeit der Amplitudensumme vom Schallweg

Wie in Abb. 5 zu sehen, hat eine Vergrößerung des Schallweges einen ähnlichen Effekt, wie eine Verkleinerung des Prüfrasters.

2.3 Defektgrößenbestimmung für SAFT auf Basis der Amplitudensumme

In den vorangegangenen Untersuchungen zeigte sich, dass die Amplitudensumme einerseits die Defektgröße widerspiegelt, dass sie andererseits aber von mehreren anderen Parametern beeinflusst wird. Sie ist insbesondere ortsabhängig und nicht proportional zur Defektfläche.

Ziel der SAFT Defektgrößenbewertung ist es, die zu einem Voxel gehörige Amplitudensumme in eine Ersatzfehlergröße umzurechnen. Der umgekehrte Weg ist jedoch einfacher: Für eine bekannte Ersatzfehlergröße können die vom Prüfkopf gemessenen Echosignale berechnet werden und diese einer SAFT-Auswertung unterzogen werden. Als Ergebnis erhält man die Amplitudensumme für diese Ersatzfehlergröße.

Für die SAFT Defektgrößenbewertung werden nun alle Größen, die auf die Amplitudensumme einen Einfluss haben, wie folgt klassifiziert:

- Eingangsgröße: Amplitudensumme
- Ausgangsgröße: Ersatzfehlergröße
- Variablen (Bei einer Auswertung variable Größen): z.B. Defektposition
- Parameter (Bei einer Auswertung fixe Größen)

Die SAFT-Defektgrößenbewertung erfolgt in zwei Schritten (siehe Abb. 6). Zuerst wird durch die SAFT-Auswertung simulierter Echosignale eine Bewertungsmatrix (mehrdimensionale Tabelle) für die jeweiligen Prüfparameter aufgestellt, die die Amplitudensumme in Abhängigkeit der variablen Größen und der Ausgangsgröße enthält. Im zweiten Schritt wird durch Interpolation und Inversion (Vertauschung von Eingangs- und Ausgangsgrößen) individuell für jede Stelle des SAFT-Ergebnisses die Amplitudensumme in eine Ersatzfehlergröße umgerechnet. Anschließend kann die Ersatzfehlergröße wie gewohnt dargestellt werden.

Damit die Prüfdaten und die simulierten Daten auf ein einheitliches Amplitudenniveau bezogen werden können, muss vor der Prüfung eine konventionelle Amplitudenkalibrierung durchgeführt werden.

Während das AVG-Diagramm neben der Ersatzfehlergröße nur zwei Dimensionen beinhaltet, hat die Defektgrößenbewertung für SAFT mehr Dimensionen, die sich aus der obigen Liste ergeben. Im Gegensatz zum AVG-Diagramm, das von senkrecht angeschallten

Defekten ausgeht, kann die Defektgrößenbewertung für SAFT auch andere Defektorientierungen berücksichtigen.

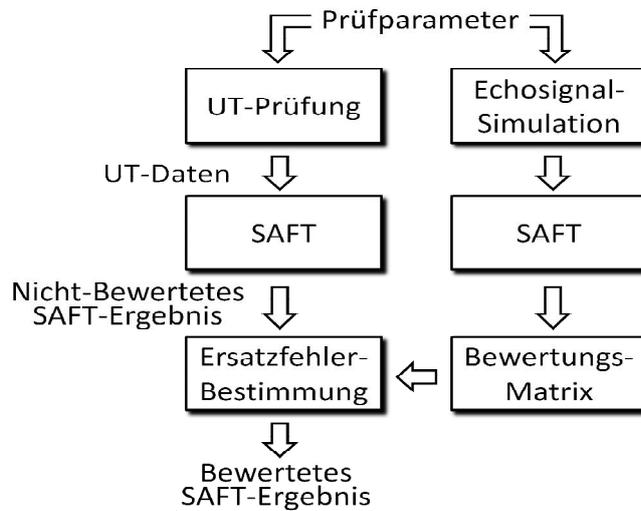


Abb. 6. Blockbild der SAFT-Defektgrößenbewertung

3. Erprobung an einem Testkörper

Das Verfahren wurde an einer Stahlscheibe mit ca. 1,5 m Durchmesser erprobt. Die Scheibe hat eine Innenbohrung von ca. 0,25 m Durchmesser, von der aus eine 1 mm Flachbodenbohrung eingebracht ist. Es erfolgte eine Prüfung mit einem 2 MHz Senkrechtprüfkopf von der Mantelfläche aus. Die HF-Daten wurden SAFT ausgewertet und eine Defektgrößenbewertung durchgeführt.

Das bewertete Ergebnis ist in Abb. 7 dargestellt. Die übersteuerte Innenbohrung (Rückwand) und links davon die Flachbodenbohrung sind gut zu erkennen. Mit 0,98 mm KSR ergibt sich ein plausibler Wert.

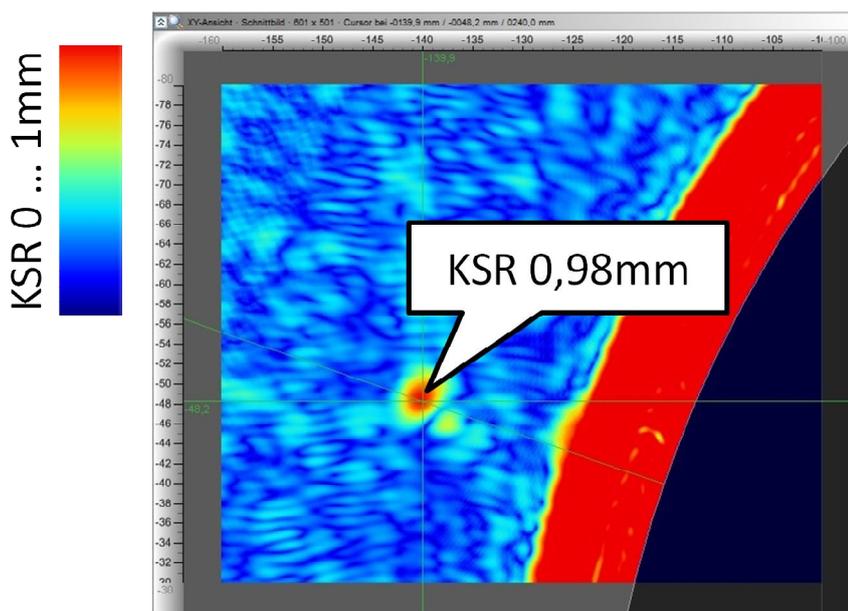


Abb. 7. Bewertetes SAFT-Ergebnis der Testscheibe

4. Ausblick

Durch das dargestellte Verfahren lässt sich das SAFT-Ergebnis als Ersatzfehlergröße darstellen, so wie es bei konventioneller Ultraschallprüfung z.B. mit Hilfe von AVG-Diagrammen erfolgt. Dies ermöglicht nicht nur die Größenbewertung kleiner Defekte, sondern auch eine Bestimmung der Nachweisgrenze durch Bewertung des Rauschniveaus.

Damit ist die Situation der SAFT-Größenbewertung vergleichbar mit der klassischen UT-Größenbewertung: Die Auswertung der zu einer Anzeige gehörigen Voxel, also eine Auswertung an verschiedenen Positionen, entspricht der Auswertung der Echodynamik und eignet sich für größere Defekte (größer als die Ortsauflösung an der jeweiligen Stelle). Die Auswertung der Amplitudensumme entspricht hingegen der Defektgrößenbewertung anhand der Echoamplitude und eignet sich für kleinere Defekte.

Durch die Vervollständigung um die Größenbewertung für kleine Defekte ist SAFT nicht mehr nur ein bildgebendes Verfahren, sondern es kann vielmehr als vollwertiges quantitatives Messverfahren dienen.

Danksagung

Die Autoren danken der Böhler Edelstahl GmbH & Co KG für die Bereitstellung der Messdaten.

Referenzen

- [1] J. Krautkraemer, H. Krautkraemer: „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, 4. Auflage, pp.338
- [2] G.S. Kino: „Acoustic Waves – Devices, Imaging, & Analog Signal Processing“, Prentice-hall, 1987
- [3] G. Brekow, R. Boehm, D. Brackrock, M. Kreutzbruck. „Quantitative Defect Sizing on Components with Different Wall Thickness using UT-SAFT“, WCNDT 2008, Shanghai, China
- [4] L. J. Cutrona: „Comparison of sonar system performance achievable using synthetic-aperture techniques with the performance achievable by more conventional means“, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 58, no. 2, pp. 336-348, 1975.
- [5] K.T.Fendt, H.Mooshofer, S.J.Rupitsch, R.Lerch, H.Ermert: „Investigation of the Synthetic Aperture Focusing Technique resolution for heavy rotor forging ultrasonic inspection“, 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium
- [6] H. Mooshofer, J. Vrana: „Optimization of the Inspection Duration for SAFT“, WCNDT 2016, Munich, Germany
- [7] 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.
- [8] J. Vrana, A. Zimmer, K. Bailey, R. Angal, P. Zombo, U. Büchner, A. Buschmann, R. E. Shannon, H.-P. Lohmann, W. Heinrich: „Evolution of the Ultrasonic Inspection Requirements of Heavy Rotor Forgings over the Past Decades“, Rev. of Prog. in QNDE 29, pp. 1623-1630 (2010).