

Verbesserung der Prüfempfindlichkeit und Aussagekraft der Phased Array Technik durch das eRDM Verfahren

Roman PINCHUK^{*,**}, Andrey BULAVINOV^{*,**}, Wolfgang KAPPES^{*}

*Fraunhofer-IZFP, Saarbrücken, Deutschland

**I-Deal Technologies, Saarbrücken, Deutschland

roman.pinchuk@i-deal-technologies.com

andrey.bulavinov@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Eine neuartige Methode zur Erhöhung der Aussagekraft der Phased Array Technik, genannt „Energy Rejective Diviative Method (eRDM)“ ermöglicht wesentliche Verbesserung der Prüfempfindlichkeit der Ultraschallprüfung. Das Verfahren ist insbesondere geeignet für Anwendung bei modernen Techniken wie Sampling Phased Array oder „Full Matrix Capture“, in denen ein größerer Informationsinhalt für die Ultraschallbildrekonstruktion zur Verfügung steht. Basierend auf dem Prinzip der so genannten „schwachen“ Statistik ermöglicht das eRDM-Verfahren eine hocheffektive Rauschunterdrückung und Verbesserung der Prüfbarkeit von Werkstoffen und Komponenten mit schlechter Schallbarkeit und / oder mit großen Abmessungen und langen Schallwegen.

Anwendungsbeispiele der neuen Technik bei der Prüfung von Radsatz-Vollwellen werden dargestellt.

Einführung

Bei der Anwendung der Ultraschall-Werkstoffprüfung ist in den letzten Jahren die Tendenz feststellbar moderne bildgebende Prüftechnologien wie Phased Array einzusetzen und SAFT-Verrechnungen („Synthetic Aperture Focusing Technique“) der Prüfdaten zu nutzen. Während sich die erste Technik mittlerweile in der Prüfpraxis weit verbreitet hat, gehört die zweite weiterhin zu den „Sonderverfahren“ und wird in der Regel nur bei speziellen Analyseprüfungen verwendet.

Die am Fraunhofer-IZFP entwickelte Sampling Phased Array Technik stellt die Kombination von on-line SAFT und Phased Array dar und vereint die Vorteile von beiden Verfahren, wie hohe Prüfgeschwindigkeit, hoher Anpassungsgrad für die Prüfanwendungen sowie verbessertes Auflösungsvermögen und quantitative 2D und 3D Bildgebung.

Der aktuelle Beitrag präsentiert einen neuartigen Ansatz zur Verbesserung der Aussagekraft der Ultraschallprüfergebnisse, der sowohl für die Phased Array, als auch für Sampling Phased Array und SAFT verwendet werden kann. Insbesondere eignet sich die Technik für die Prüfung von schlecht schallbaren Materialien, inhomogenen Werkstoffen und massiven Erzeugnissen mit langen Schallwegen, wo das Fehlernachweisvermögen eingeschränkt ist bzw. verbessert werden soll.

1. Phasentreue Überlagerung von Ultraschall-Echosignalen bei Phased Array und SAFT

Das Prinzip der Phased Array Technik [1] besteht allgemein bekannt in der zeitlich gesteuerten Anregung von Elementen eines Wandlerarrays, wodurch beim Senden der Ultraschallwellen die so genannte Schallfeldsteuerung, also Veränderung des Einschallwinkels und der Fokustiefe erzielt wird.

Beim Empfangen der Ultraschallwellen erfolgt ebenfalls eine zeitliche Ansteuerung (Verzögerung), in diesem Fall der Empfangskanäle des Ultraschallgerätes, sowie anschließende Addition der empfangenen Ultraschallsignale.

Damit erfolgt bei der Phased Array Datenaufnahme eine zweifache phasentreue Überlagerung: beim Senden überlagern sich Ultraschallwellen im Material, beim Empfangen überlagern sich Amplitudenwerte der empfangenen Ultraschallsignale durch ihre Summation.

Das Prinzip der SAFT Technik [2] besteht im allgemeinen Sinne in der Rückprojektion bzw. Überlagerung der Ultraschall-Echosignale, die an unterschiedlichen Messpositionen bei zeitlich sukzessiv erfolgten Messvorgängen aufgenommen wurden (Abb.1). Im messtechnisch einfachsten Fall erfolgt die Ultraschallmessung mit einem möglichst divergenten Einzelschwinger, der die Oberfläche des Prüfgegenstandes im Impuls/Echo-Betrieb abtastet und die Echosignale mit hoher Ortsauflösung aufnimmt. Der

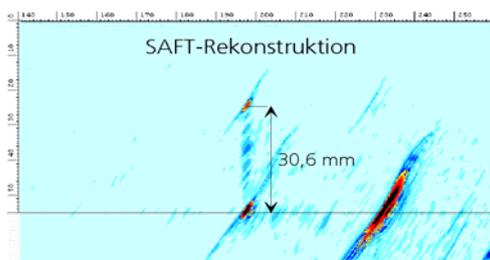
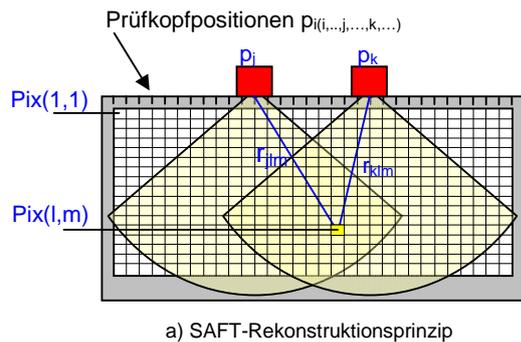


Abb. 1: Schematische Darstellung des SAFT-Prinzips

Rekonstruktionsvorgang besteht in Überlagerung der Amplitudenwerte der empfangenen Ultraschallsignale durch ihre Summation im Pixelraum. Im Gegensatz zur Phased Array Technik erfolgt die phasentreue Überlagerung der Amplitudenwerte nur im Empfangsfall. Dabei vergrößert sich die beim mechanischen Scannen aufgebaute (synthetische) Apertur, also der physikalisch realisierbare Fokusbereich.

In beiden Fällen, bei SAFT und Phased Array, liegt der Signal- bzw. Bildrekonstruktion eine Mittelung der Amplitudenwerte zugrunde. Dabei kann bei der SAFT Rekonstruktion und Abtastschritten von üblicherweise einem zehntel der verwendeten Wellenlänge ein besseres Signal/Rausch-Abstand erzielt werden, da die Anzahl der in einem Volumenpunkt gemittelten Werte höher ist. Ansonsten nutzen beide Techniken ausschließlich die Amplitudenstatistik

(Gaus'sche Verteilung der Amplitudenwerte) aus, die sich bei der phasentreuen Überlagerung der Signalwerte ergibt.

4. eRDM Verfahren: Nutzung der Phasenstatistik zur Erhöhung der Aussagekraft der Ultraschallprüfung

Neben der Amplitudeninformation verfügt jeder einzelne Signalwert über Phaseninformation. Die Gleichheit der Phasenwerte von überlagerten Ultraschallsignalen liegt sowohl der SAFT als auch der Phased Array Rekonstruktion zugrunde. Allerdings

weisen auch die Phasenwerte der Ultraschallsignale eine statistische Verteilung auf. Diese kann analysiert und als zusätzlicher Parameter bei der Aufaddition der Ultraschallsignale bzw. bei der SAFT-Rekonstruktion verwendet werden.

Das Funktionsprinzip des eRDM Verfahrens demonstrieren wir auf der Basis der Sampling Phased Array (SPA) Technik [3], die einerseits Phased Array Wandler für die Ultraschall-Datenaufnahme verwendet, andererseits, ähnlich wie SAFT, einen großen statistischen Informationsinhalt bietet.

Ein SPA-Messdatensatz eines aus N Elementen bestehenden Arrays beinhaltet $N \times N$ Ultraschallsignale, die den einzelnen Kombinationen der Sende- und Empfangselemente entsprechen (Abb. 2). Jedes Signal kann Informationen über mehrere sich im Material befindenden Materialunregelmäßigkeiten beinhalten. Durch entsprechende phasentreue Überlagerung kann diese Information winkelaufgelöst dargestellt werden.

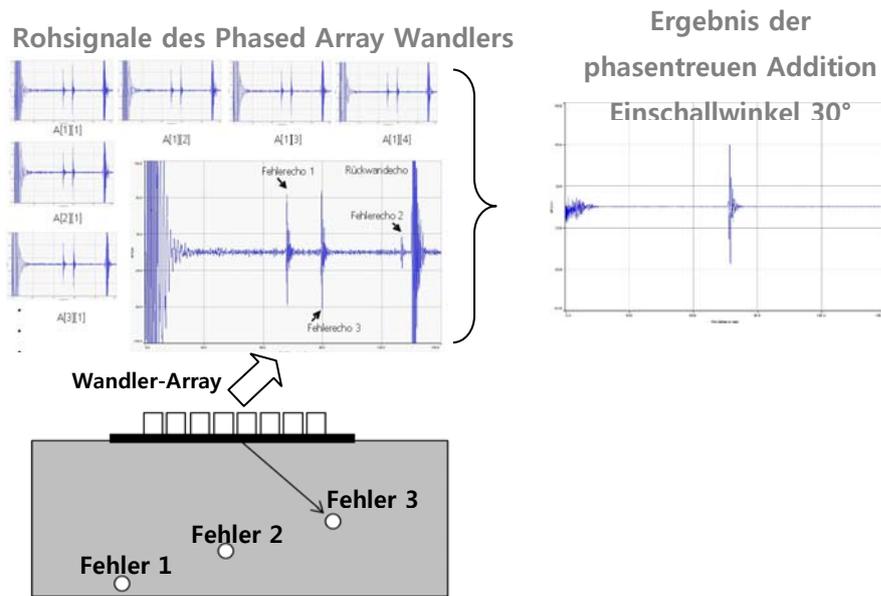


Abb. 2: Informationsinhalt der SPA Technik

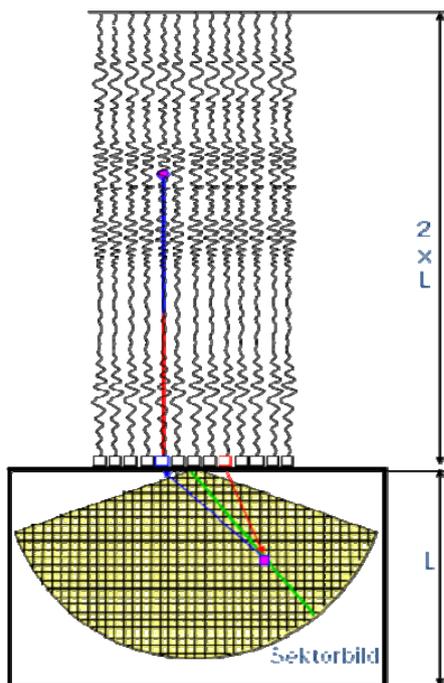


Abb. 3: Schematische Darstellung der SPA-Rekonstruktion

Die Abb. 2 rechts zeigt das rekonstruierte A-Bild für den Einschallwinkel von 30. Dieses Prinzip kann auf die Rekonstruktion des gesamten Sektorbildes erweitert werden, indem für jedes Volumenelement aus aufgenommenen $N \times N$ Ultraschallsignalen unter Berücksichtigung der Laufzeiten ein Amplitudenwert berechnet wird (Abb. 3).

In diesem Falle ergibt sich außer der statistischen Verteilung der Amplitudenwerte, die bei der SAFT-Rekonstruktion zusammengefasst werden, eine statistische Verteilung der Phasenwerte, deren Wertebereich zwischen $-\pi/2$ und $\pi/2$ liegt. Dies ist auf die harmonische Natur des Ultraschallsignals zurückzuführen.

Im Idealfall für einen Volumenelement (Pixel) Ω mit einem Reflektor ergibt sich der Amplitudenwert als

$$\Omega = \text{SUM} \{a_0, a_1, \dots, a_{n-1}\},$$

wobei die a_i – die Elementaramplituden der Einzelmessungen sind.

Die entsprechenden Phasen der aufzuaddierenden Signalwerte

$$\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{n-1}\},$$

die mittels Hilbert-Transformation ermittelt werden können, sollen in diesem Falle die gleichen Werte aufweisen, d.h. $\varphi_0 = \varphi_1 = \dots = \varphi_{n-1}$.

Eine Phasenabweichung besagt, dass der Pixel ‚instabil‘ ist, was als Rauschen interpretiert werden kann. Zur Quantifizierung dieser Phasenabweichung können verschiedene charakteristische Funktionen (Kerne) wie Standardabweichung oder Entropiebewertung verwendet werden. Auf der Basis dieser Funktionen kann eine effektive Rauschunterdrückung realisiert werden.

Die Effizienz des eRDM Verfahrens kann am Beispiel der Phased Array Prüfung von Radsatzvollwellen demonstriert werden. Die Aufgabe besteht im Nachweis von quer zur Wellenachse verlaufenden Rissen im Radsatzlagerschenkel, Notschenkel und Radsatz sowie in Übergangsbereichen, der in der Industriepraxis durch die Umfangsabtastung der Welle mit Phased Array Wandler und einen Winkelschwenk aus einer Axialposition des Prüfkopfes realisiert wird (siehe Abb. 4). Die Prüfung erfolgt mittels automatisierter Ultraschall-Prüfanlagen (Abb. 5).

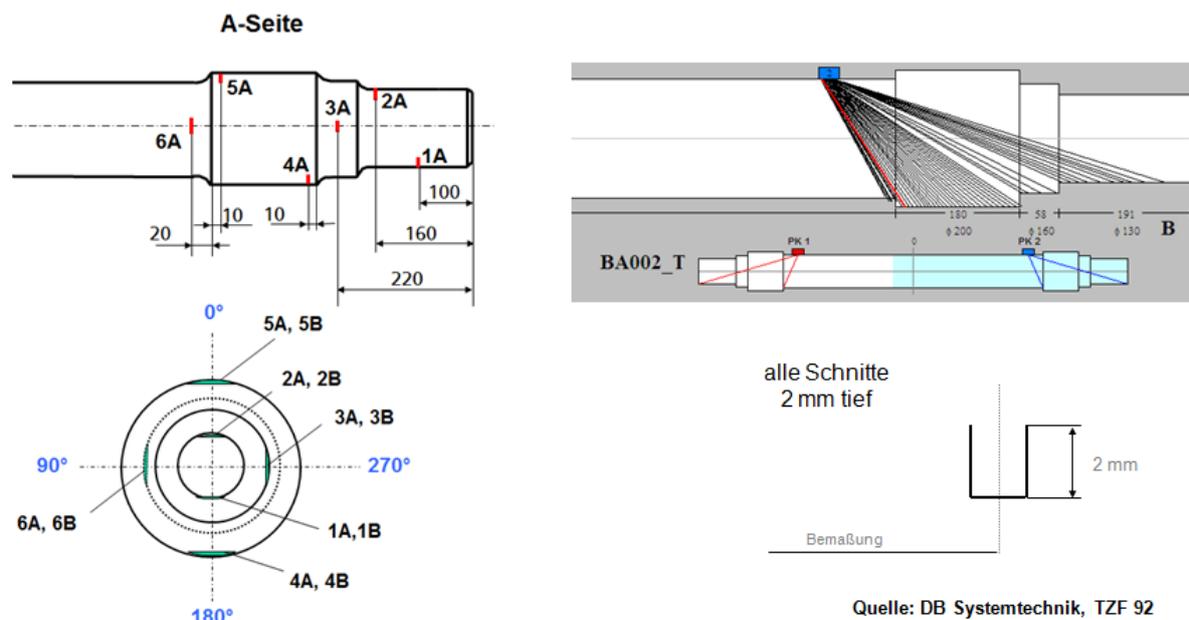


Abb. 4: Ultraschall Phased Array Prüfung von Eisenbahn-Radsatzwellen

Als Referenzreflektor für die Empfindlichkeitsjustierung werden 2mm tiefe Nuten verwendet, die in eine Testwelle eingebracht werden. Die Testfehler sollen mit ausreichendem Signal/Rausch-Abstand nachgewiesen.

Eine für Studienzwecke hergestellte Testwelle wies erhöhte Schallschwächung auf, sodass kein sicherer Nachweis von Referenzfehlern mit der konventionellen Phased Array Technik möglich war.

So entstand der Bedarf an einer verbesserten Phased Array Technik, die die geforderte Prüfeempfindlichkeit trotz erschwelter Prüfbedingungen ermöglichen könnte.



Abb. 5: Automatisierte Ultraschallprüfanlage

Die Ultraschallprüfung wurde mit einem Phased Array Prüfkopf mit einer Elementanzahl von 14, Prüffrequenz von 3.5 MHz, Elementabstand von 1.6 mm und Vorsatzkeil zur Anregung von Transversalwellen (Nominalwinkel im Stahl 60°) durchgeführt. Dabei wurden Ultraschallprüfdaten im Sampling Phased Array Modus $N \times N$ aufgenommen, sodass in jeder Prüfposition ein Prüfzyklus bestehend aus 14 Prüftakten erfolgte. Die Rekonstruktion für den erforderlichen Einschallwinkel erfolgte aus 196 Einzelsignalen, die eine ausreichende Basis für die Signalstatistik des eRDM-Verfahrens bieten.

Abb. 7 stellt die normierte Phasenabweichung für jeden Amplitudenwert des für eine Messposition rekonstruierten Ultraschallsignals in Abb. 6 dar. Für die Erkennung der Signalwerte mit instabiler Phase reicht ein einfacher Schwellenwert, da die Phasen $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{n-1}\}$ immer im Wertebereich zwischen $-\pi/2$ und $\pi/2$ liegen. Für die unter dem gesetzten Schwellenwert liegende Werte wird eine so genannte ‚Sperrfunktion‘ (‚Rejective Function‘) berechnet (siehe Abb. 8). Ihre Berechnung erfolgt durch eine normierte Faltung der Phasenabweichung (mit einem Schwellenwert) mit der Gaus-Funktion.

Das gefilterte Signal (Abb. 9) ist das Ergebnis der Multiplikation des ursprünglich rekonstruierten Signals (Abb. 6) mit der ‚Sperrfunktion‘ (Abb. 8), die pixelweise ausgeführt wird.

Im Gegensatz zu typischen Filterungsverfahren basiert die eRDM Filterung weder auf Veränderung der Signalfrequenz, noch auf Verwendung der Amplitudenschwellen. Weggefiltert werden „phaseninstabile“ Signalwerte, sodass das Frequenzspektrum des resultierenden Signals bzw. die Phaseninformation der „stabilen“ Signalwerte nahezu unverändert bleibt.

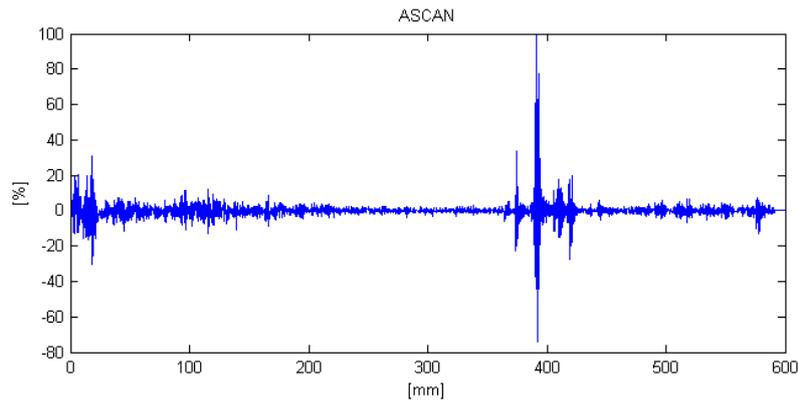


Abb. 6: Das nach dem SPA-Prinzip rekonstruierte Ultraschallsignal

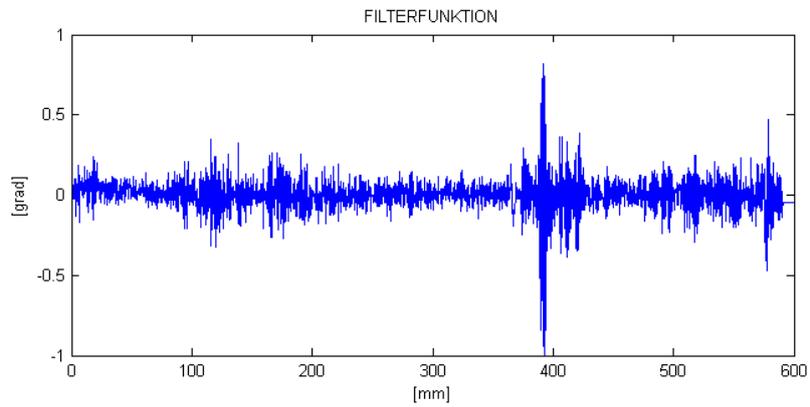


Abb. 7: Normierte Phasenabweichung der zusammengefassten Amplitudenwerte

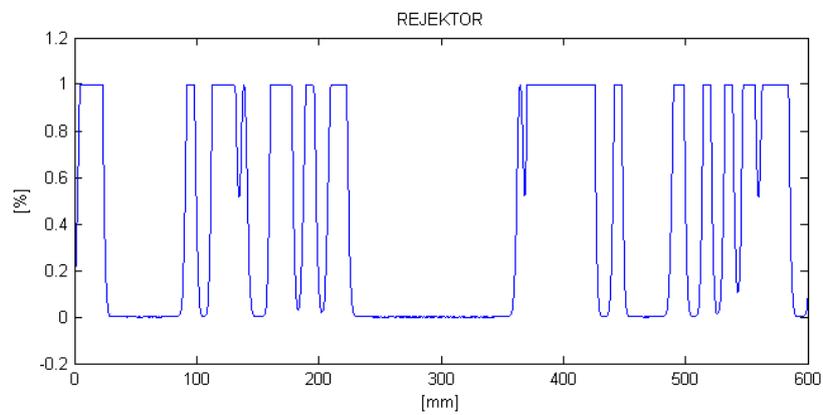


Abb. 8: Sperrfunktion

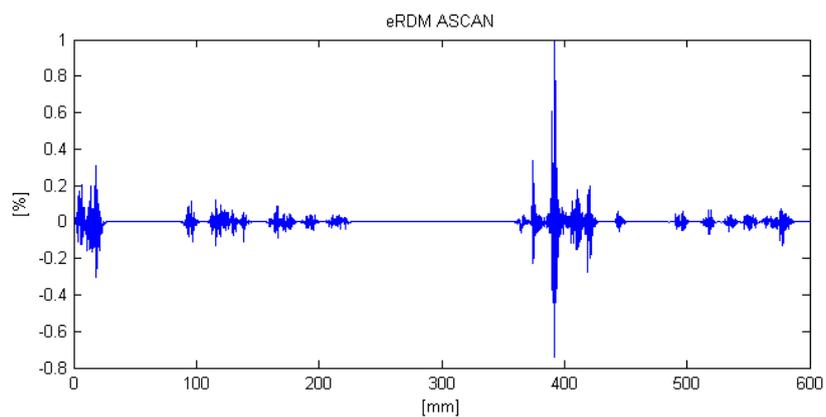


Abb. 9: Das gefilterte Signal

Das Ergebnis der Ultraschallprüfung an Testwelle mit Referenzfehlern ist in Abb. 10 dargestellt. In der C-Bild Darstellung (oben links) können wegen teilweise nicht ausreichendem Signal/Rausch-Abstand (SNR) nicht alle Testfehler nachgewiesen werden, wie z.B. der Fehler Nr. 4A. Die durch die eRDM-Verarbeitung erzielte Verbesserung des SNR (oben rechts) gestattet einen eindeutigen Fehlernachweis.

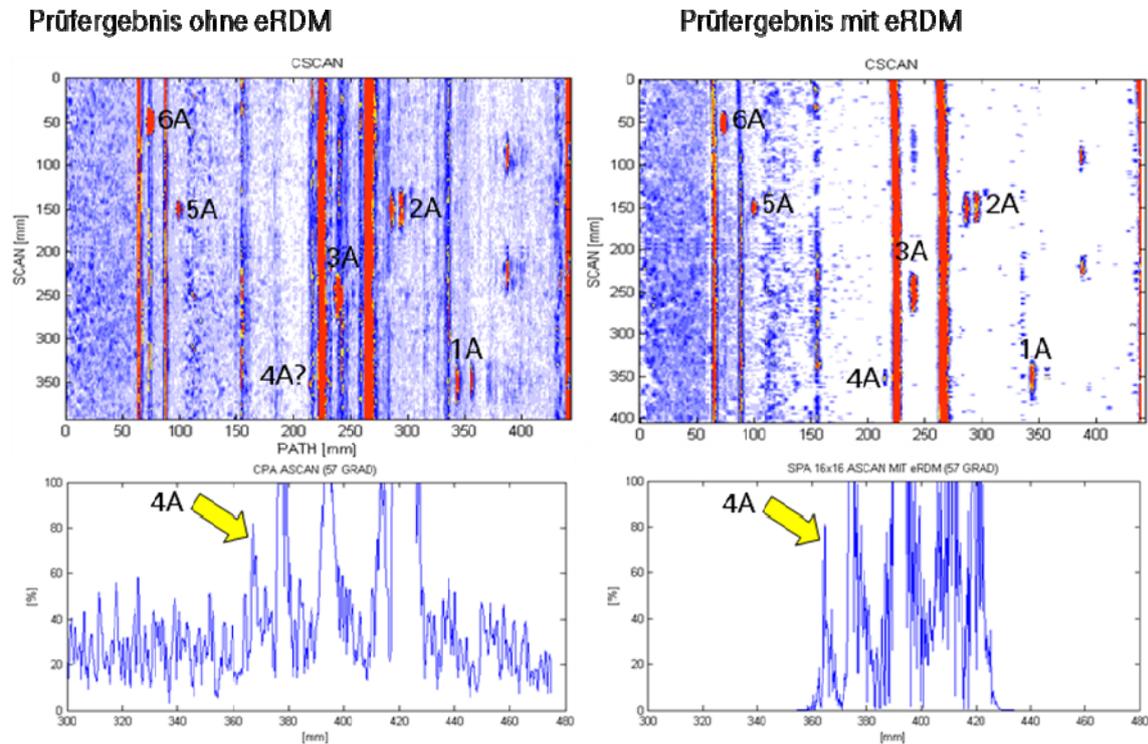


Abb. 10: Ultraschall-Ergebnisbilder bei der Prüfung mit und ohne eRDM-Filterung

Ein weiteres Anwendungsbeispiel des eRDM Verfahrens ist in Abb. 11 und 12 geschildert. Geprüft wurde ein rohgeschmiedeter Stab mit zwei Flachbodenbohrungen (KSR 3 und KSR5), deren Nachweis mit konventionellen Prüfverfahren wegen schlechter Einschallsbedingungen nicht möglich war.

Skizze des Stabstahltestkörpers mit zwei künstlichen Fehlern:

Durchmesser: 320 mm

Fehler 1:

Kreisscheibenreflektor \varnothing 5 mm

Fehler 2:

Kreisscheibenreflektor \varnothing 3 mm

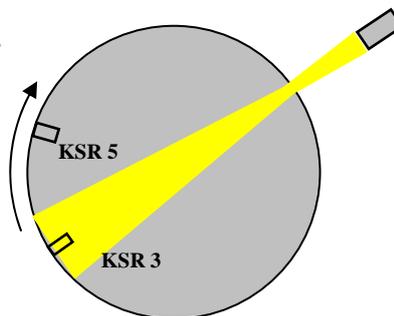
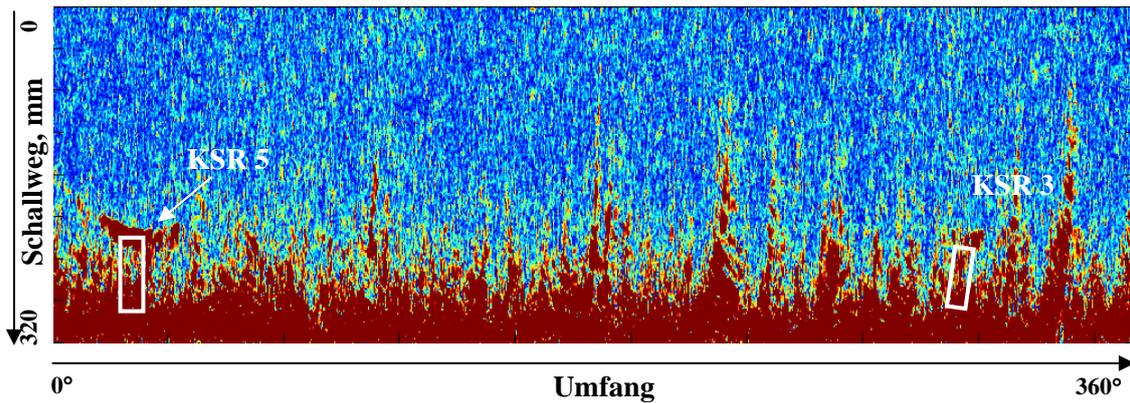


Abb. 11: Einschallschema bei der Stabstahlprüfung in Tauchtechnik

Mittels SAFT-Rekonstruktion in Kombination mit eRDM-Verfahren konnte der eindeutige Fehlernachweis von Referenzreflektoren erzielt werden.

B-Bild ohne Rauschunterdrückung



B-Bild mit Rauschunterdrückung

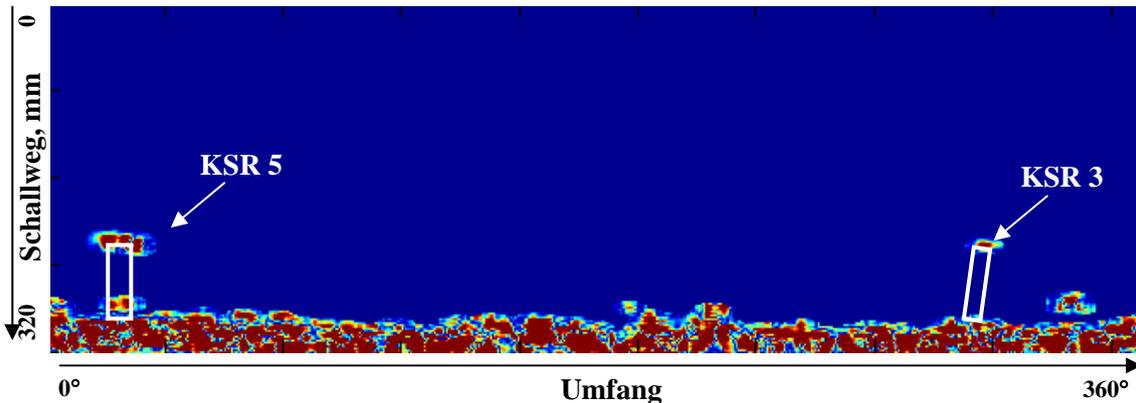


Abb. 12: B-Bilder ohne Signalverarbeitung (oben) und mit eRDM / SAFT

4. Zusammenfassung

Eine neuartige Signalverarbeitungstechnik eRDM zur Verbesserung des Fehlernachweisvermögens der Phased Array Technik wurde entwickelt und an einigen Anwendungsbeispielen demonstriert. Das Verfahren eignet sich in erste Linie zur Prüfung von schlecht prüfbar Komponenten und Materialien bzw. zur Lösung von komplexen Prüfaufgaben wie:

- Ultraschallprüfung von inhomogenen Werkstoffen (Beton, Kohlefaserverbundwerkstoffe)
- Ultraschallprüfung von Materialien mit Grobkorn (Guss, Austenit)
- Ultraschallprüfung von massiven Bauteilen (lange Schallwege)
- Ultraschallprüfungen bei schlechten Einschallbedingungen (unbearbeitete Oberflächen)

Referenzen

- [1] Wüstenberg H.; Schenk G.: Entwicklungen und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall. In: DGZfP-Jahrestagung 2003. Mainz 2003
- [2] W. Müller, V. Schmitz, G. Schäfer, Reconstruction by the Synthetic Aperture Focusing Technique. Nuclear Engineering and Design, 1988, pp. 393 –404
- [3] Bernus L. von, Bulavinov A., Dalichow M., Joneit D., Kröning M., Reddy K.M.: Sampling Phased Array - a New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging, In: European Conference for Non-destructive Testing, Berlin, September 2006