

Erkennung und Elimination von Störsignalen bei der Ultraschallprüfung mit EMUS- Prüfköpfen

Hans-Jürgen SALZBURGER, Frank NIESE
Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp), Saarbrücken

Kurzfassung. Elektromagnetische Ultraschall (EMUS) Prüfköpfe senden und empfangen elastische Wellen auf induktivem Wege mittels Spulen und überlagerten Magnetfeldern. Die zur Empfindlichkeitssteigerung hochohmig ausgelegte Empfangsspule detektiert neben dem Ultraschallsignal auch andere elektromagnetische Signale. Dadurch registriert der Empfänger eines EMUS-Prüfkopfes neben Spannungssignalen einer Ultraschallwelle auch solche von extern induktiv einwirkenden elektromagnetischen Signalquellen. Beide durchlaufen die gleiche Verstärkungs- und Filterkette wie die Ultraschallsignale und können nicht ohne weiteres von diesen unterschieden werden. Der vorliegende Beitrag stellt einen neu entwickelten Ansatz vor, Störsignale zu erkennen und zu eliminieren.

1. Einleitung

Elektromagnetische Ultraschall (EMUS) Prüfköpfe senden und empfangen auf induktivem Wege elastische Wellen.

Eine elektrische Spule vorgegebener Geometrie und Windungszahl wird von einem HF-Strom-Impuls/Burst beaufschlagt, dessen Mittenfrequenz der der anzuregenden Ultraschallwelle entspricht. Dieser Stromimpuls induziert innerhalb der Skintiefe eines dicht zur Spule befindlichen elektrisch leitfähigen Mediums Wirbelströme. Deren flächige Verteilung innerhalb der Skintiefe ist spiegelbildlich zur Geometrie der Spulenfläche. Überlagert man diesen Wirbelströmen ein statisches oder quasistatisches Magnetfeld parallel zur Materialoberfläche oder in senkrechter Richtung erzeugt man räumliche und zeitlich periodische elastische Verschiebungen, also elastische Wellen im Frequenzbereich des Ultraschalls.

Eine am Orte der Spule ankommende elastische Welle erzeugt durch das vorhandene Magnetfeld ein der Verschiebungsgeschwindigkeit und der magnetischen Induktion proportionales elektrisches Feld, welches in der Spule eine proportionale Spannung induziert. Dies ist der Mechanismus der Erzeugung eines elektrischen Signals aus einem elastischen Wellenimpulse.

Die Pegel der auf diese Weise generierten Spannungssignale liegt im μV Bereich; nur durch starke und rauscharme Vorverstärkung und möglichst schmalbandige elektronische Filterung erhält man auswertbare Pegel der Ultraschallsignale.

Die zum Empfangen eingesetzte Spule ist zum einen als elektrische Induktivität dazu prädestiniert auch andere elektromagnetische Signale induktiv zu empfangen. Zum anderen wird die Impedanz der Spule hochohmig ausgeführt, um möglichst hohe Pegel der induzierten Spannungssignale von Ultraschallsignalen zu erreichen.

Beide Gegebenheiten führen dazu, dass der Empfänger eines EMUS-Prüfkopfes neben Spannungssignalen einer Ultraschallwelle auch solche von extern induktiv einwirkenden elektromagnetischen Signalquellen detektiert. Diese durchlaufen die gleiche Verstärkungs- und Filterkette wie die Ultraschallsignale und können nicht ohne weiteres von diesen unterschieden werden.

2. Störquellen

Störquellen sind überall dort vorhanden, wo mittels elektrischer/elektronischer Bauteile hohe Spannungen und Ströme schnell geschaltet werden. Hierzu zählen Servo-Motoren, Frequenzumrichter, Thyristoren u.a. wie sie für die Steuerung von Maschinen und Anlagen genutzt werden.

Ein Beispiel einer solchen Störumgebung kann die in **Abbildung 1** gezeigte Ultraschall-Prüfstation einer Produktionsanlage für lasergeschweißte Tailored Blanks sein [1]. Eine Vielzahl von Robotern bewegen das Prüfobjekt in und aus der Schweißkabine, wenden und positionieren es auf einen Prüftisch; ein weiterer Roboter bewegt den EMUS-Prüfkopf entlang der Schweißnaht (Bildmitte hinten); abhängig vom online erhaltenen Befund stapelt ein dritter Roboter das geschweißte und geprüfte Blank auf den OK- oder NOK-Stapel. Diese Vorgänge laufen SPS-gesteuert teilweise asynchron nebeneinander ab.

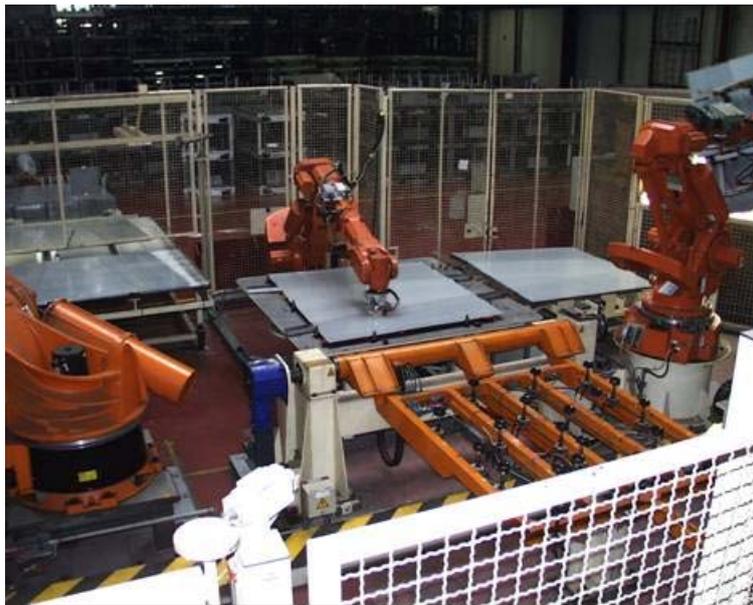


Abbildung 1: Automatisierte Ultraschall-Prüfstation einer Produktionsanlage für nichtlineare Laserschweißnähte von Tailored Blanks (©ThyssenKrupp Tailored Blanks)

Die Schaltpulse der Servo-Motoren der Roboter emittieren breitbandige elektromagnetische Signale, die von dem Empfangsprüfkopf detektiert werden. Diese durchlaufen die gleiche Verstärkungs- und Filterkette wie die Ultraschallsignale und können nicht ohne weiteres von diesen unterschieden werden.

Da sich Prüfkopf und/oder Prüfobjekt bewegen scheiden bewährte Maßnahmen zur Elimination inkohärenter statistischer Signale wie z.B. Mittelung im Zeitbereich aus.

3. Maßnahmen zur Entstörung

3.1. Klassisches Differenzprinzip

Eine der klassischen Maßnahmen zur Elimination von Störsignalen ist das z.B. aus der Wirbelstromprüfung bekannte Differenzprinzip. Hierbei werden zwei in Abtast- und/oder Bewegungsrichtung nahe benachbarte und elektrisch entkoppelte Empfangssonden (Tast- oder Durchlaufsonden) verwendet, deren Ausgänge in Differenzgeschaltet sind.

Von beiden Sonden sowohl in Phase als auch in Amplitude gleich detektierte Signale - dazu gehören auch von außen auf jede der beiden Spulen wirkende Störsignale - liefern am Ausgang ein Null-Signal. Eine lokal begrenzte Impedanzänderung bedingt durch eine Inhomogenität hingegen wird beim Abscannen von beiden Sonden unterschiedlich detektiert, am Differenzausgang ist ein von Null verschiedenes Signal vorhanden.

Bei der EMUS-Prüfung ist eine im Prinzip ähnliche Vorgehensweise möglich, jedoch mit der Maßgabe, dass das Differenzprinzip sowohl für die räumliche Komponente (Wellenlänge) wie auch die zeitliche Komponente (Frequenz) des Ultraschallsignals angewendet werden muss.

Will man die klassische analoge Differenzbildung z.B. mittels eines Differenzverstärkers anwenden, muss die Ultraschallwelle in dem Empfängerpaar **gegenphasige** Spannungen induzieren, während von außen einwirkende Störsignale **gleichphasige** Signale erzeugen.

Dies erreicht man mit einer neuentwickelten zweikanaligen, phasensensitiven Empfängerspule eines EMUS-Winkelprüfkopfes. Diese besteht aus zwei geometrisch und elektrisch identischen mäanderförmigen Spulenwicklungen, die in Schallausbreitungsrichtung um eine halbe Spurwellenlänge λ_s zueinander versetzt sind (Spurwellenlänge λ_s ist die auf die Werkstückoberfläche projizierte Wellenlänge λ einer schräg in das Werkstück oder streifend zur Oberfläche abgestrahlten Welle).

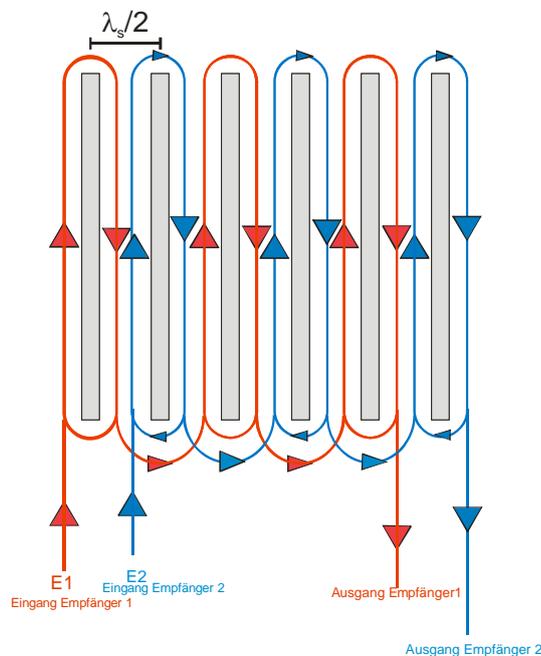


Abbildung 2: Ausführung der Spule eines zweikanaligen phasenselektiven Empfängers

Abbildung 2 zeigt in der Draufsicht das Wickelschema der Empfängerspule eines solchen zweikanaligen phasenselektiven Empfängers. Diese befindet sich entweder in einem zur Werkstückoberfläche senkrecht oder horizontal orientierten Magnetfeld.

Die Erfahrungen aus der Praxis haben jedoch gezeigt, dass Störimpulse nicht wie erwartet in beiden Empfängern gleichphasige und gleichhohe Signale induzieren, die dann in einem Differenzverstärker kompensiert werden. Vielmehr werden sowohl **in Phase** als auch in **Amplitude unterschiedliche** Signale induziert. Ultraschallsignale hingegen werden von beiden Empfängern mit einem **festen** Phasenversatz von 180° detektiert.

Es lag daher nahe, durch Auswertung der **relativen Phasenlage** der Signale in den beiden Empfängern einen automatisierbaren Klassierungsalgorithmus für Nutz- und Störsignale zu erstellen [2].

3.2. Auswertung der relativen Phasenlage

Labor- und Feldversuche haben gezeigt, dass von externen Signalquellen herrührende induktiv eingekoppelte **Störsignale** in beiden Empfangsspulen **variierende** Phasenlagen $\Delta\varphi$ mit $0^\circ \leq \Delta\varphi < 180^\circ$ oder $180^\circ < \Delta\varphi \leq 360^\circ$ aber mit $\Delta\varphi \neq 180^\circ$ haben, während Ultraschallsignale durch den örtlichen Versatz der beiden Empfangsspulen über die gesamte Signallänge **konstant um $\Delta\varphi = 180^\circ$** phasenverschoben sind.

Zur Trennung von Stör- und Ultraschallsignalen bietet sich daher die Ermittlung und Auswertung der Phasenlage der beiden Empfangssignale an. Hierzu wurde die in Abbildung 3 skizzierte Signalverarbeitung durchgeführt:

- Getrennte Vorverstärkung und (optional) Bandpassfilterung der Empfangssignale der beiden Empfangsspulen und getrennte digitale Aufzeichnung
- Berechnung der jeweiligen Phasen φ_1 und φ_2 der beiden Empfangssignale (relativ zu einem Phasenbezugspunkt, z.B. Triggerzeitpunkt des ADC) für jeden Samplepunkt über ein Zeitintervall von mehreren Perioden.
- Bestimmung der Phasenunterschiede $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ der beiden Empfangssignale für jeden Samplepunkt
- Überprüfung, ob $\Delta\varphi$ über eine einstellbare Anzahl von Samplepunkten in einem vorgegebenen Auswertintervall liegt.

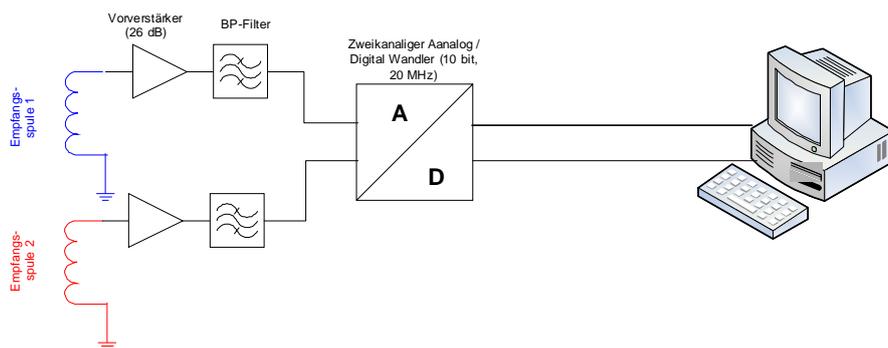


Abbildung 3: Getrennte Verarbeitungskette der beiden Empfangssignale

4. Erprobungsbeispiele

Die folgenden Abbildungen zeigen die Wirkungsweise des Ansatzes. Hierzu wurden sowohl Daten von statischen Messungen im Labor als auch Überrollmessungen an verschiedenen Anlagen des Prüfsystems AUROPA aufgenommen. Die von den beiden Empfangsspulen detektierten HF-Signale werden nach Vorverstärkung und Bandpassfilterung bis zu einer Tiefe von 2 ms bei einer Samplerate von 10 MHz ($=20\,000$ (2×10^4) Samples) in zwei Kanälen getrennt digitalisiert. Die beiden HF-Signale und das

Ergebnis der weiteren digitalen Verarbeitung werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Im oberen Schrieb der Abbildungen sind jeweils die beiden digitalisierten HF-Signale (blaue und rote Farbe) der Empfangsspulen nach Vorverstärkung und Filterung aufgezeichnet.

Der zweite Schrieb zeigt die aus den digitalisierten HF-Daten rechnerisch ermittelte Phasenlage bezogen auf einen Nullpunkt für jeden der Samplepunkte der beiden Empfangssignale.

Der dritte Messschrieb gibt die Differenz der Phasen $\Delta\phi$ der beiden Empfangssignale wieder. Liegt diese während mehrerer Signalperioden in dem Auswertebereich $[180^\circ - y, 180^\circ + y]$, so wird der zugehörige Signalabschnitt gekennzeichnet (grüne Kurve) und als Ultraschallsignal (Nutzsignal) klassiert. Alle anderen Signalabschnitte, die dieses Kriterium nicht erfüllen, werden als Störsignal erkannt und zu Null gesetzt.

Der untere Schrieb stellt die Einhüllende aller Signalanteile, die das o.a. erwähnte Kriterium eines Ultraschallsignals erfüllen, dar. Alle anderen Signalanteile sind eliminiert.

Abbildung 4 zeigt im oberen Schrieb die beiden A-Scans einer in der Lauffläche eines Eisenbahnradatzes umlaufenden Rayleigh'schen Oberflächenwelle [3] aufgenommen bei einer statischen Messung im Labor. In diesem Radatz befinden sich in der Lauffläche ein Testfehler (Sägeschnitt) und zwei reale Fehler in Form zweier von der Fahrkante ausgehenden Anrisse.

Der A-Scan enthält Anzeigen, die mit 'U' und mit 'SF' bzw. 'SI' gekennzeichnet sind. Die mit 'U' gekennzeichneten Signale sind Ultraschallsignale (Umlaufsignale und direkte bzw. Folge-Echos der zuvor beschriebenen Fehler); die mit 'SF' und 'SI' gekennzeichneten Signale sind induzierte elektromagnetische 'Störimpulse', die mit Laborgeräten erzeugt wurden.

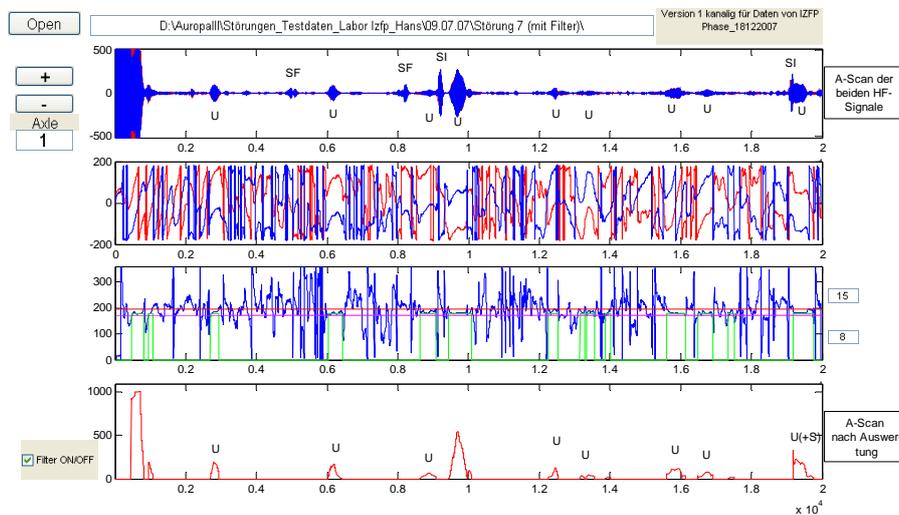


Abbildung 4: A-Scan einer statischen Messung am Testradatz (Labor)

Abbildung 5 stellt den Bereich von Sample 8000-10000 der **Abbildung 4** vergrößert dar. In dieser gespreizten Darstellung erkennt man deutlich die beiden phasenverschobenen (roten und blauen) HF-Signale der beiden Empfänger. Die mit 'SF' und 'SI' bezeichneten Störsignale sind über die ca. 6-7 Perioden umfassende Signaldauer 'außer' Phase, jedoch mit sich kontinuierlich ändernder Phasendifferenz; bei den mit 'U' bezeichneten Ultraschallsignalen ist diese Phasendifferenz jedoch relativ konstant gleich 180° .

Die berechnete Phase der beiden HF-Signale ist im zweiten Schrieb ebenfalls gespreizt dargestellt; Sie zeigt die relativ konstante Differenz in den Abtastpunktbereichen 8550-

8850 und 9400-9900. An den mit 'U' gekennzeichneten Signalbereichen ist die Differenz konstant ca. 180° .

Im dritten Schrieb ist die daraus berechnete Phasendifferenz dargestellt. Die Bereiche, in denen die Phasendifferenz über mehrere Perioden nahezu konstant ist und die im parametrierbaren Phasenintervall liegen, sind mit einer grünen Linie markiert (Samples 8550-8850 und 9400-9900). In diesen Sample-Intervallen wird das zugehörige Signal als Ultraschallsignal ('U') klassiert und dargestellt. In allen anderen Bereiche, in denen diese Kriterien nicht erfüllt sind, werden die entsprechenden Signalanteile zu Null gesetzt. Dadurch erscheinen die Signale 'SF' und 'SI' nicht mehr im Messschrieb nach der Auswertung.

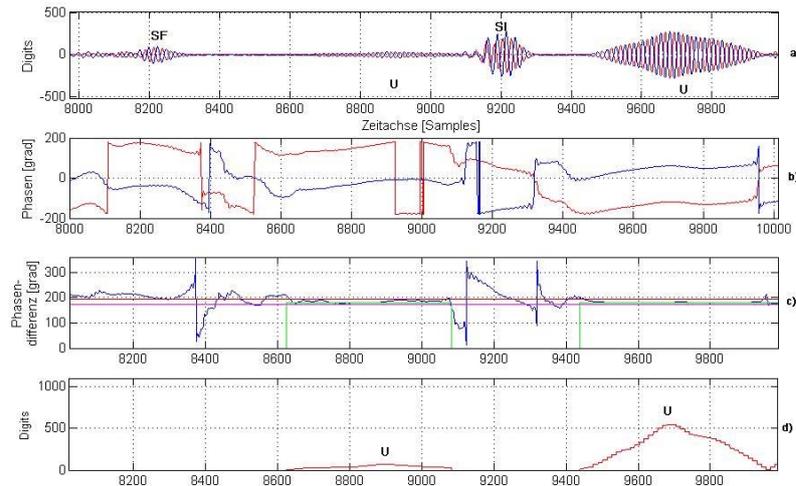


Fig. 4

Abbildung 5: Gespreizter Signalabschnitt von Sample 8000 bis Sample 10000 der Abbildung 4

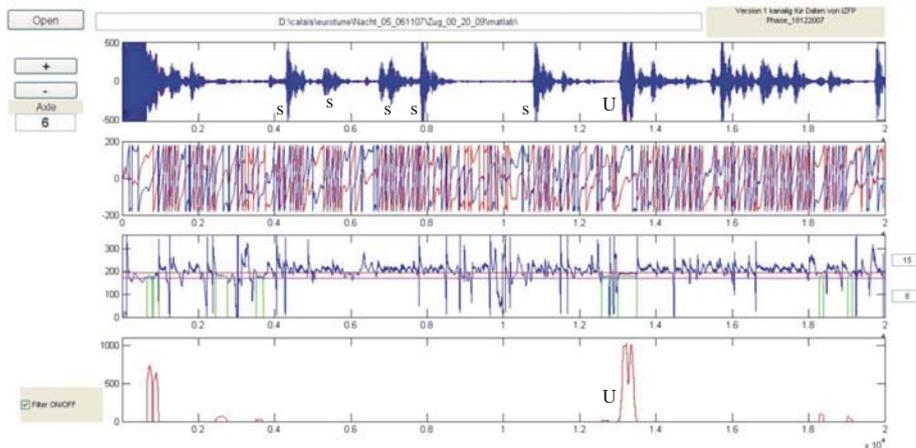


Abbildung 6: A-Scan einer Überroll-Messung mit vielen Störsignalen 'S' und dem Umlaufsignal U

Auch die A-Scans von Überrollmessungen in betrieblicher Umgebung zeigen die zur Störerkennung genutzten Features in den Signalphasen wie am Beispiel der Abbildung 6 und Abbildung 7 erläutert. Deutlich ist in der gespreizten Darstellung der Abbildung 6 zu erkennen, dass das Umlaufsignale 'U' über die gesamte Signaldauer immer außer Phase sind und das mit 'S' gekennzeichnete Störsignale eine über die Signaldauer variierende Phasenverschiebung von $\neq 180^\circ$ haben. Bei geeigneter Parametrierung – Phasendifferenz = $180^\circ \pm y$ während x Perioden – (y und x sind einstellbare Parameter der Auswerte-Software)

ist eine Erkennung und Elimination von Störsignalen anhand dieser Phasenkriterien möglich.

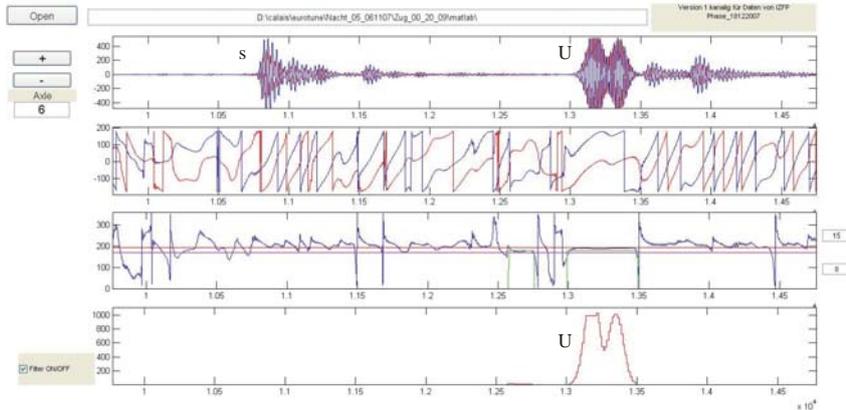


Abbildung 7: Gespreizter Signalabschnitt von Sample 10000- bis Sample 14000 der Abbildung 6

Der zuvor beschriebene Algorithmus wurde in die Datenerfassungs- und -auswertesoftware des Prüfsystems als off- und on-line Version implementiert.

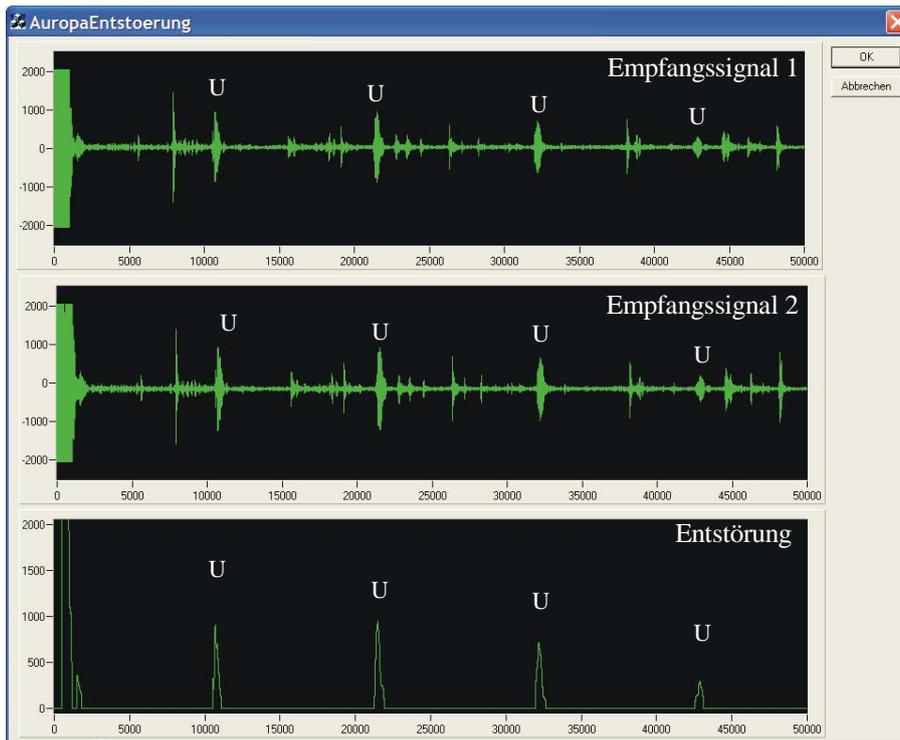


Abbildung 8: Original A-Scans (HF) und Entstörrgebnis (demoduliert) (off-line Version)

Abbildung 8 zeigt einen Screendump der off-line-Version der Visualisierungs- und Entstör-Software. In den beiden oberen Teilbildern sind die unbearbeiteten HF-Signale der beiden Empfangsspulen mit Ultraschall('U')- und Störsignalen dargestellt. Darunter das Ergebnis nach der Entstörung. Die Daten stammen von einem Lokomotiv-Radsatz (Achse 1), an denen gestörte Signale oft auftreten können, einer amerikanischen Eisenbahngesellschaft. Es wurden bei einer Tiefe von 50 000 Samples vier Umlaufsignale 'U' bei einer Umlaufzeit von ca. 1,1ms pro Umlauf aufgenommen.

In Abbildung 9 ist der Screenshot der on-line-Version für den Datensatz von Abbildung 8 dargestellt. Dieser beinhaltet neben dem entörsten A-Bild Angaben zur Zugnummer, Achse, Prüfkopf, Datum und Uhrzeit der Messung.

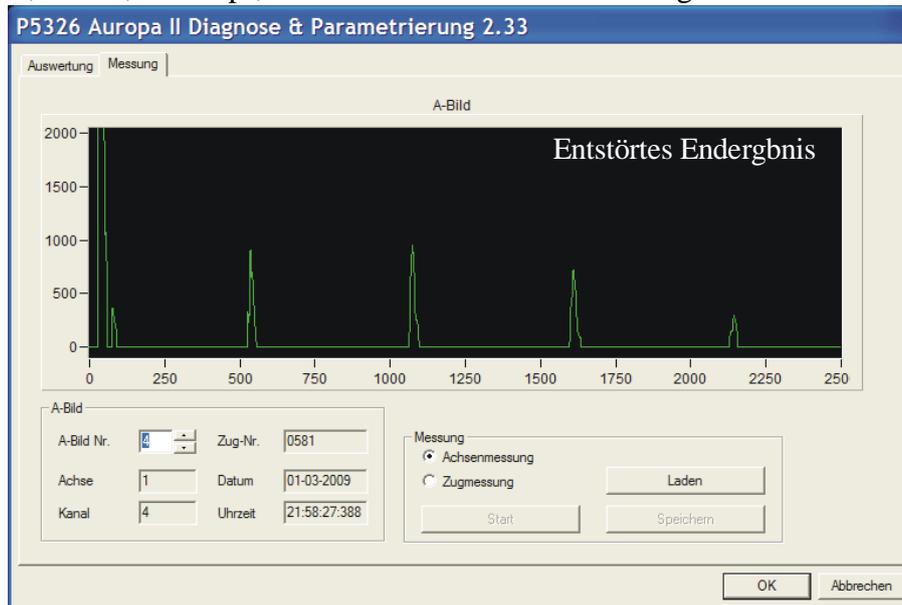


Abbildung 9: Entörster A-Scan (on-line Version)

5. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass mittels phasenselektiver zweikanaliger Ausführung der Empfangsspule eines EMUS-Prüfkopfes Stör- und Nutzsignale über Phasenkriterien selektiert werden können. Jede der beiden Empfangsspulen ist mit einer geeigneten separaten Vorverstärkungs- und Filtereinheit verbunden. Die vorverstärkten und gefilterten Signale werden in getrennten Kanälen digitalisiert und in einem Auswerte-Rechner verarbeitet. Per Software wird die relative Phasenlage der beiden Signale bestimmt, daraus erfolgt die Klassierung in Nutz- und Störsignale. Die Auswertung ist unabhängig von der Signal-Amplitude und kann auch bei verrauschten Signalen mit geringem Signal/Rausch-Abstand angewendet werden. Der Filteralgorithmus lässt die Signalamplitude unverändert; die Nutzsignale können weiterhin nach etablierten Kriterien der Amplitudenbewertung behandelt werden können.

6. Referenzen

[1] Salzburger, H.-J.:

Prozessintegrierte trockene Ultraschallprüfung der Laserschweißnähte von Tailored Blanks

In: Schweißen und Schneiden 2005. Düsseldorf : Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), 2005, S. 265-269. (DVS-Berichte 237).

[2] Salzburger, H. J ;Niese, F.:

Verfahren zum Auswerten von Empfangssignalen, die bei einer zerstörungsfreien Ultraschallwellenuntersuchung gewonnen werden sowie Vorrichtung für eine zerstörungsfreie Ultraschallwellenuntersuchung an einem Prüfkörper

Europäische Patentanmeldung

EP 08012873.9-2204

[3] Schmidt, W. ; Salzburger, H.-J.:

Automatische wiederkehrende Ultraschallprüfung der Laufflächen von Hochgeschwindigkeits-Schienefahrzeugen

In: Schmidt, G. (Hrsg.) ; Steusloff, H. (Hrsg.): Mit vernetzten, intelligenten Komponenten zu leistungsfähigeren Meß- und Automatisierungssystemen. München; Wien : Oldenbourg, 1989, 124-133.