

Digitale Signalverarbeitung erhöht die Auflösung der Ultraschallprüftechnik

Wolfgang HILLGER, Lutz BÜHLING, Detlef ILSE,
Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig

Kurzfassung. Neue Analog-/Digitalkonverter (ADCs) zeichnen sich durch eine hohe Speichertiefe, einen schnellen Datentransfer und durch eine immer höhere Auflösung aus und sind deshalb für Ultraschallprüfsysteme sehr attraktiv. Zurzeit werden ADCs mit 12 bis 14 Bit Auflösung bei 200 MS/s verwendet. Der damit verbundene hohe Dynamikbereich und die hohe Auflösung gestatten effektive Signalverarbeitungs- und Auswerterroutinen. Allerdings erfordern diese ADCs auch entsprechend rauscharme Vorverstärker, damit die „unteren“ Bits nicht nur das Verstärkerrauschen digitalisieren. Bei der in unserem Hause entwickelten Software werden single-shot Peakdetektoren mit 50 dB Dynamikbereich mit linearer oder logarithmischer Kennlinie realisiert. Außerdem sind Impulslaufzeitmessungen mit dem Schwellwertverfahren, im Nulldurchgang oder im Signalmaximum per Software möglich. Die Auflösung kann dabei durch Interpolation größer als das sample-Raster des ADCs sein. Der Vortrag berichtet außerdem über Software-Hoch- und Tiefpassfilter, Tiefenausgleich und Verstärkungseinstellung. Alle Signalverarbeitungsmöglichkeiten lassen sich sowohl online (während der Datenaufnahme) als auch offline (bei den gespeicherten 3D-Daten) einsetzen. Anhand von praktischen Beispielen wird die Wirkungsweise der digitalen Signalverarbeitung demonstriert: nachträgliche Optimierung des Frequenzspektrums für die Bildgebung, Kalibrierung mit Software-Verstärkung sowie nachträgliche Optimierung des Tiefenausgleichs.

Trotz aller Fortschritte in der digitalen Signalverarbeitung kann auf Hardware-Filter nicht vollständig verzichtet werden. Vor dem ADC ist mindestens ein Tiefpassfilter als anti-Aliasing-Filter erforderlich. Das gesamte analoge und digitale System arbeitet nur einwandfrei, solange keine Übersteuerungen vor und bei der Digitalisierung auftreten.

Anhand von praktischen Beispielen wird der Einsatz der digitalen Signalverarbeitung erläutert: Reduzierung des elektronischen Rauschens bei der Ankopplung über Luft, Verbesserung der Auflösung bei B- und C-Bildern durch Optimierung des Frequenzspektrums und nachträgliche Anhebung der Verstärkung bei der Prüfung mit Lamb-Wellen.

1. Einführung

Die Fortschritte der Elektronik und insbesondere der Computertechnik haben dafür gesorgt, dass sich selbst bei bildgebenden Ultraschallprüfsystemen die Hardware auf wenige Kernkomponenten wie Sender, Empfangsverstärker, Multiplexer und Analog-/Digitalkonverter (ADC) reduziert haben und gleichzeitig der Funktionsumfang und Bedienungskomfort erhöht wurden [1].

Moderne bildgebende Ultraschallprüfsysteme wie der USPC 30XX verfügen über einen schnellen (3D) Volumendateneinzug während des Scannens mit bis zu 20.000 A-Bildern pro Sekunde und über Analog-/Digitalkonverter mit 12-14 Bit Auflösung bei 200 Ms/s [2]. Die dadurch erzielte hohe zeitliche Auflösung und Amplitudendynamik nutzt unsere

Software *Hillgus für Windows* optimal aus und ermöglicht damit unterschiedliche digitale Signalverarbeitungsroutinen (ohne zusätzliche Hardware) mit interessanten Möglichkeiten:

- Ultraschallamplituden lassen sich mit über 50 dB Dynamik im linearen oder logarithmischen Maßstab mit 50 dB Dynamikbereich nahezu in real-time messen.
- Impulslaufzeitmessung mit bis zu 5 ns (single-shot) Auflösung (Messung im Schwellwert, Maximum oder Nulldurchgang)
- Spezielle Blendensteuerung mit automatischer Blendenpositionierung für das Zwischenecho
- Nachträglicher (d.h. aus einem gespeicherten Volumen- Scan) Software-Tiefenausgleich in gewählten Blenden
- Zusätzliche Software-Verstärkung mit 0,1 dB Auflösung über gesamten A-Bildbereich oder nur in gewählten Blenden
- Software Hoch- und Tiefpassfilter (im A-Bild Bereich)

2. Digitale Filter in Ultraschallprüfsystemen

Digitale Filter haben wie analoge Filter die Aufgabe, bestimmte Frequenzbereiche in einem Signal zu unterdrücken oder zu separieren [4]. Im Gegensatz zu analogen Filter bestehen diese nicht aus elektronischen Bauteilen wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten, sondern sind mathematische Algorithmen (Rechenvorschriften). Dies ist natürlich nur im zeitdiskreten Bereich möglich, was zur Folge hat, dass analoge Signale vor der digitalen Filterung mit Hilfe eines ADC in den zeitdiskreten Bereich umgewandelt werden müssen.

Bei digitalen Ultraschallsystemen wie bei dem USPC 3XXX ist die Hardware für die digitale Filterung bereits vorhanden, so dass der immer leistungsfähige PC die Filterung zusätzlich übernehmen kann.

Tab.1 listet die Vor- und Nachteile analoger und digitaler Filter auf. Analoge Filter erfordern bei niedrigen Ordnungen nur einen kleinen Bauteil Aufwand, jedoch bereiten die Bauteiltoleranzen (5-10% bei Kondensatoren und Induktivitäten) Schwierigkeiten bei der Reproduzierbarkeit. Ein dadurch häufig erforderlicher manueller Abgleich gestaltet sich aufwendig. Außerdem können Induktivitäten elektromagnetische Störfelder empfangen und dadurch den Signal-Rauschspannungsabstand erheblich verschlechtern.

Digitale Filter weisen diese Nachteile nicht auf. Die Flexibilität digitaler Filter zeigt sich vor allem durch die einfache softwaretechnische Umschaltung von Tief-, Hoch- und Bandpass und Einstellung der Mittenfrequenz sowie der Ordnung (Filtersteilheit). Sie lassen sich einfach reproduzieren.

Die Nachteile der digitalen Filter fallen mit der Verfügbarkeit moderner Rechner und von ADCs, die eine hohe Dynamik und Abtastfrequenz bieten, immer weniger ins Gewicht, jedoch steigen auch die Anforderungen an den Datendurchsatz insbesondere bei Mehrkanalsystemen. So spielt auch die Wahl des Filtertyps keine untergeordnete Rolle: rekursive, sogenannte Infinite-Impluse-Response (IIR)- Filter z.B. erfordern weniger Rechenoperationen als die nichtrekursiven, sogenannten Finite-Impluse-Response (FIR)-Filter, haben jedoch keinen linearen Phasengang und können schwingen, wenn dies nicht durch geeignete Algorithmen verhindert wird [3-5]. Das gesamte analoge und digitale System arbeitet nur einwandfrei, solange keine Übersteuerungen vor und bei der Digitalisierung auftreten.

Analoge Filter	Digitale Filter
<ul style="list-style-type: none"> + kleiner Schaltunsaufwand bei niedrigen Ordnungen + nahezu beliebig schnell + nahezu beliebige Bandbreite 	<ul style="list-style-type: none"> + geringe Stömpfindlichkeit + sehr genau + einfach reproduzierbar + sehr flexibel durch freie Programmierung + theoretisch unendlich steile Filterflanken + lineare Phasenverläufe möglich
<ul style="list-style-type: none"> - bei hohen Ordnungen großer Schaltungsaufwand - stömpfindlich - wegen unvermeidlicher Bauteiltoleranzen nicht exakt reproduzierbar - unflexibel, nach Zusammenbau nicht 	<ul style="list-style-type: none"> - unter Umständen zu lange Berechnungszeiten - durch Abtastfrequenz begrenzte Bandbreite - IIR- Filter können zum Schwingen neigen

Tab.1: Analoge und digitale Filter

3. Anwendungsbeispiele

3.1 CFK-Laminat

Bild 1a zeigt das A-Bild eines 4 mm dicken CFK-Laminats mit Eintritts- und Rückwandecho sowie der 1. Wiederholung des Rückwandechos. Die Echos haben nahezu eine Idealform für eine hohe Zeitaufösung: sie bestehen nur aus einem positiven und einem negativen Impuls. Erreicht wurde dies durch eine breitbandige Signalkette bestehend aus: Anregung mit einem Avalance-Pulser, Prüfkopf 5 MHz breitbandig, Breitbandverstärker. Das Rückwandecho hat aufgrund der Schallschwächung im CFK eine mit FFT gemessene 6 dB-Bandbreite von 0.9 bis 6.4 MHz, allerdings nur mit einem Maximum bei 2.8 MHz [6]. Trotz dieser Idealsignale wird zwar die relativ große Delamination im C-Bild klar dargestellt (Bild 1b), jedoch nicht alle Testbohrungen. Dieses C-Bild zeigt nur die Bohrungen mit 8, 6, und 4 mm \varnothing .

Wird auf demselben 3D-Datensatz vor der C- Bildberechnung ein 5 MHz Hoch- und ein 7 MHz Tiefpassfilter angewendet, so entsteht ein Rückwandecho im Frequenzbereich von 3 bis 7,2 MHz mit einem Maximum bei 5 MHz. In diesem Bereich ist einerseits die Wellenlänge gegenüber der ersten Messung nahezu halbiert, andererseits die Fokussierung für den Prüfkopf durch seine angegebene Mittenfrequenz optimal. Dadurch können in dem C-Bild (Bild 2b) mit diesem Frequenzspektrum auch die Testbohrungen mit 3 und 2 mm \varnothing angezeigt werden. Allerdings werden infolge der schmaleren Bandbreite die Echoimpulse im A-Bild (Bild 2a) etwas breiter, sie bestehen jetzt aus mehr als drei Impulsen.

Bild 3a stellt ein B-Bild (Längsschnitt) durch die beiden linken 4 mm Bohrungen und der Delamination dar. Oben ist das Eintrittsecho als horizontale Linie, unten das Rückwandecho dargestellt. Alle Echos sind als gewellte Linien angezeigt, da das Manipulationssystem während des Scannens in Achsenrichtung vibrierte. Die beiden Bohrungen werden nicht eindeutig als Durchgangsbohrungen angezeigt, bei den Delaminationen des Impact-Schadens erkennt man die unterschiedlichen Tiefenlagen.

Derselbe 3D-Datensatz wurde anschließend 3 MHz- hochpass- und 8 MHz tiefpassgefiltert und zusätzlich die Funktion Echostart aktiviert.

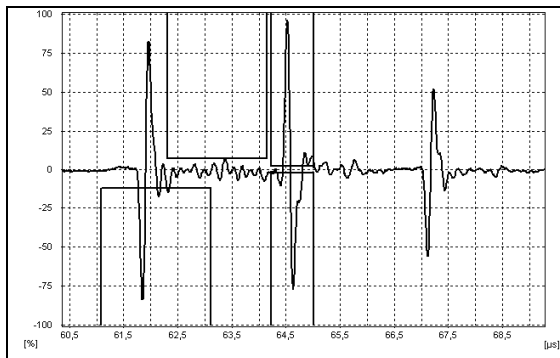


Bild 1a: A-Bild

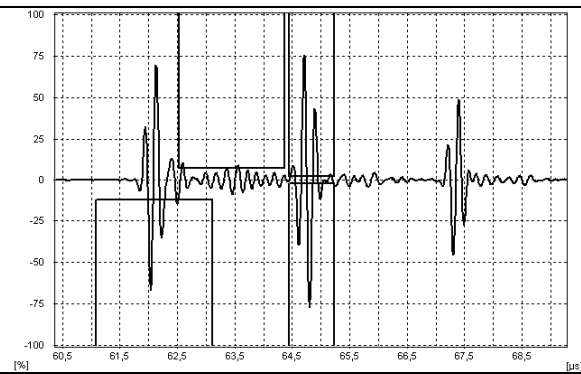


Bild 2a: A-Bild mit Hoch- und Tiefpassfilter

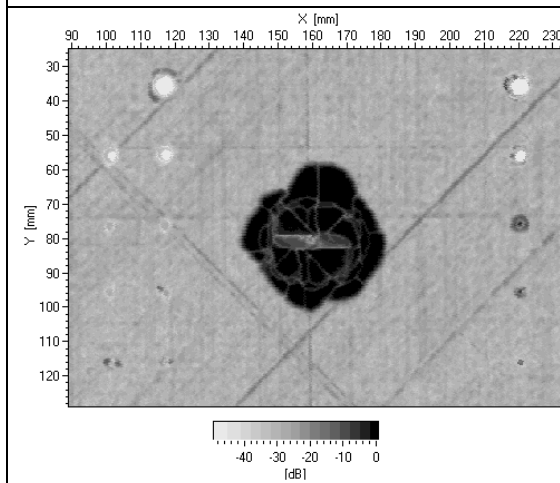


Bild 1b: C- Bild des Zwischenechos

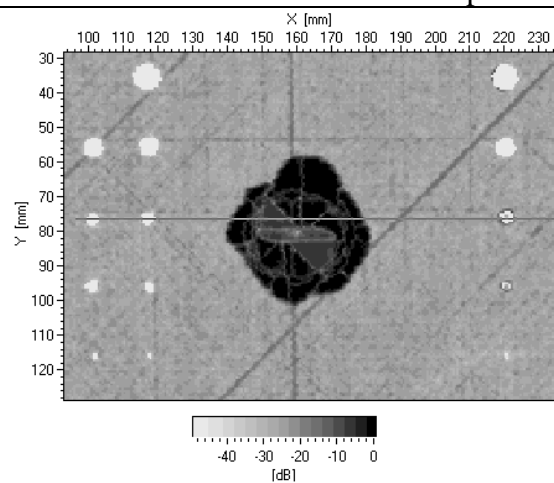


Bild 2b: C- Bild des Zwischenechos Hoch- und Tiefpassfilter

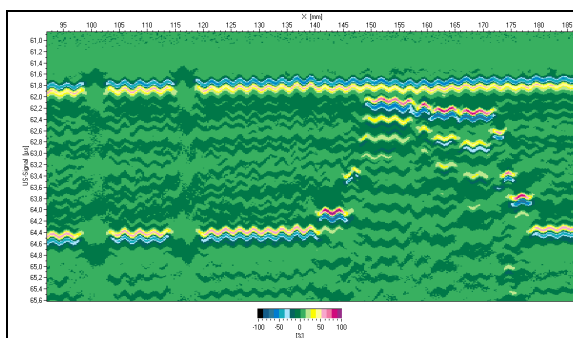


Bild 3a: B-Bilder längs einer Zeile ohne Software-Filterung

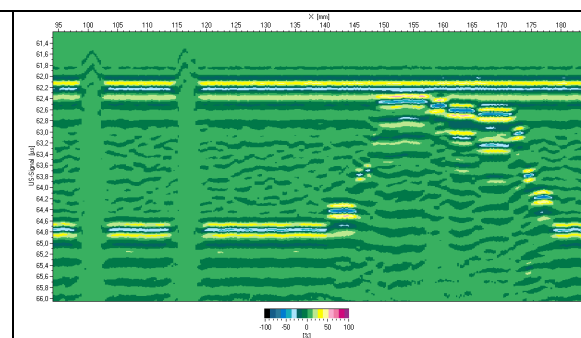


Bild 3b: B-Bilder längs einer Zeile mit Echostart-Berechnung und Software-Hoch- und Tiefpassfilterung

Dadurch erhält man eine eindeutige Anzeige der beiden Durchgangsbohrungen. Außerdem werden die Vibrationen des Prüfkopfes eliminiert, so dass die Echos als horizontale Linien dargestellt werden. Wegen der verkleinerten Signalbandbreite erfolgt eine Echodarstellung

jeweils in drei horizontalen Linien gegenüber der breitbandigen Auswertung mit zwei Linien.

3.2 CFK-Keil

Die Prüfung eines CFK-Keils mit einem Dickenbereich von 1,5 bis 33,5 mm stellt wegen der großen frequenzabhängigen Schallschwächung des Werkstoffs hohe Anforderungen an ein Ultraschallsystem, besonders wenn der gesamte Dickenbereich in einem Befund dargestellt werden soll. Auch hier wurde ein 3D-Datensatz aufgenommen. Allerdings wurde bei der Datenaufnahme der Tiefenausgleich nicht optimiert, so dass das Rückwandecho über den großen Dickenbereich nicht konstant gehalten werden konnte. Das Rückwandecho ist daher kaum im A-Bild zu erkennen (Bild 4a). Entsprechend zeigen das D-Bild (Bild 4b) des Rückwandechos und das daraus berechnete Dickenprofil (Bild 4c) nur einen Bereich bis zu 11 mm an.

Mit einem zusätzlichen Software-Tiefenausgleich kann die Rückwandechoamplitude über den gesamten Dickenbereich nahezu konstant gehalten werden. Da außerdem das elektronische Rauschen mit angehoben wird, entfernen zusätzlich ein Hochpass (0,07 MHz) und ein Tiefpass (4,6 MHz) die unerwünschten Frequenzanteile. Mit diesen zusätzlichen Signalverarbeitungsalgorithmen kann der gesamte Dickenbereich in einem D-Bild und im Dickenprofil dargestellt werden. Die sich damit ergebenden Befunde sind in den Bildern 5a-5c dargestellt.

Die Punktwolken im gelben Bereich des D-Bildes (Bild 5b) weisen auf eine erhöhte Porosität hin.

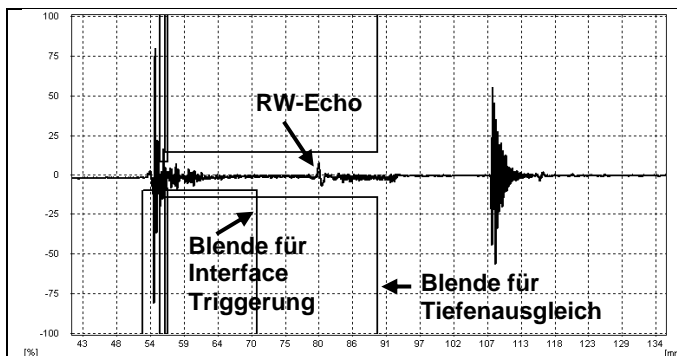


Bild 4a: A-Bild ohne digitalen Tiefenausgleich und software-Filter

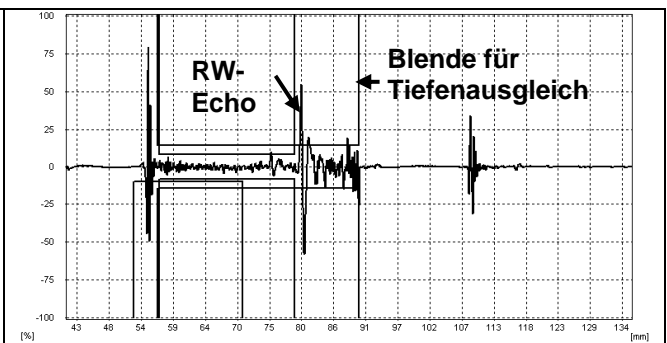


Bild 5a: A-Bild mit digitalen Tiefenausgleich und Software-Filter

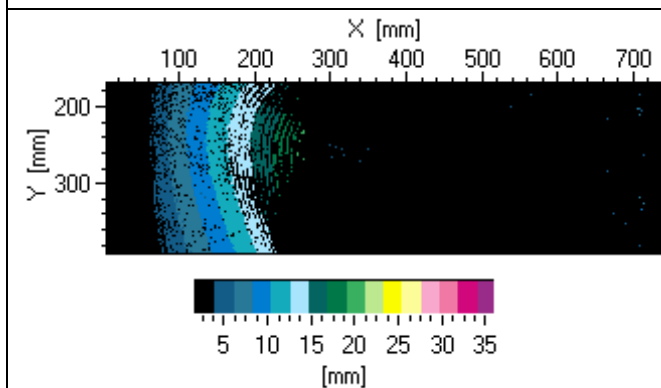


Bild 4b: D-Bild Rückwandecho

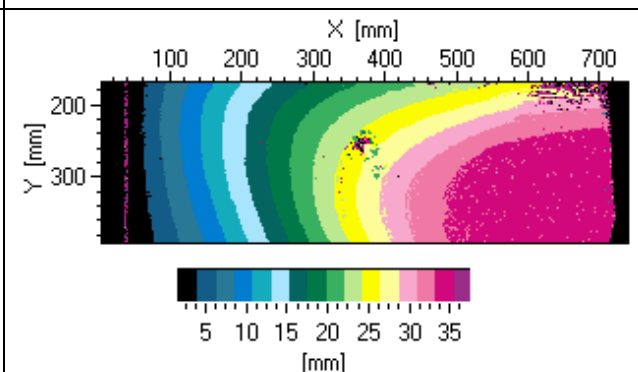


Bild 5 b: D-Bild Rückwandecho mit digitalen Tiefenausgleich und Software-Filter

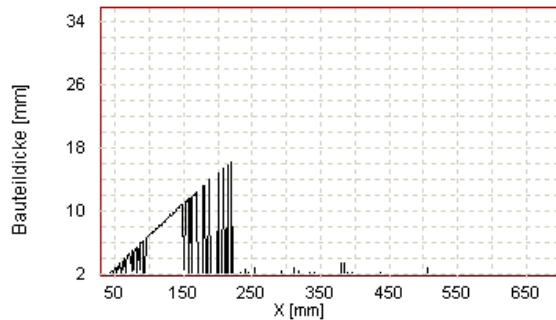


Bild 4c: Dickenprofil D-Bild

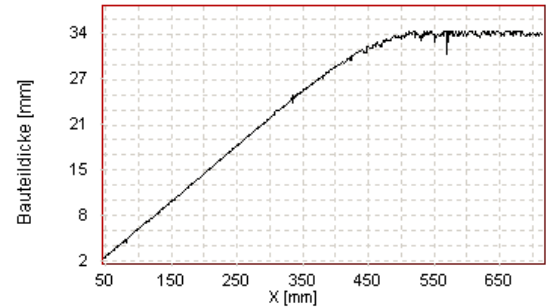


Bild 5c: Dickenprofil aus D-Bild mit digitalen Tiefenausgleich und Software-Filter

3.3 Filterung von breitbandigen Lamb-Wellensignalen

Der Einsatz eines Chirp-Sendeimpulses hat auch bei Lamb-Wellen den Vorteil, dass ein breites Frequenzspektrum mit konstanter Amplitude erzeugt wird und daher die Informationen aus vielen schmalen Frequenzbändern übertragen werden [7]. Dadurch erhält man ein Vielfaches an Informationen bei einer Messung. Nachträglich ist es sogar möglich, eine Optimierung der Prüffrequenz per Software durchzuführen (virtuelle Experimente). Hierzu kommen empfangsseitig digitale Hoch- und Tiefpassfilter zum Einsatz, die das gewünschte Frequenzspektrum herausfiltern. Das gefilterte Empfangssignal sieht dann genau so aus, wie das von einem schmalbandigen Sendepuls hervorgerufene, der üblicherweise verwendet wird. Dieses Verfahren funktioniert hier besonders gut, da die Piezoaktuatoren und -Sensoren weit außerhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben werden. Bild 6 stellt vier Lamb-Wellen A-Bilder dar, die mit schmalbandiger Filterung aus demselben breitbandigen Empfangssignal berechnet wurden [7]. Dabei ist bei Laufzeitmessungen zu beachten, dass sich infolge der Signallaufzeiten durch die Filter das Signal zu höheren Laufzeiten verschiebt. Ein Signalvergleich ist also nur bei exakt gleichen Filterparametern möglich. Per Software kann auch die Verstärkung der gefilterten A-Bilder angehoben werden (nachträgliche Kalibrierung für einen speziellen Frequenzbereich).

4. Fazit

Moderne bildgebende Ultraschallprüfsysteme können leicht durch digitale Signalverarbeitung erweitert werden, wobei keine zusätzliche Hardware nachgerüstet werden muss, da sie im wesentlichen mathematische Algorithmen (Rechenvorschriften) darstellen. Digitale Signalverarbeitung kann bei unserer Software *Hillgus für Windows* online und offline eingesetzt werden und ermöglicht sogar nachträglich eine verbesserte Befunddarstellung, wenn ein 3D-Datensatz mit vollständigem A-Bildeinzug zur Verfügung steht. Software-Filter beispielsweise unterdrücken störende Frequenzanteile aus dem elektronischen Rauschen und können das Frequenzspektrum in Bereiche verschieben, in denen die Fehlstellenabbildung optimal ist. Im Gegensatz zu Hardware-Filtern sind diese wesentlich flexibler, reproduzierbarer und können nicht durch elektromagnetische Felder gestört werden. Um die Empfindlichkeit über die gesamte Bauteildicke konstant zu halten lässt sich auch nachträglich ein optimierter Tiefenausgleich einsetzen.

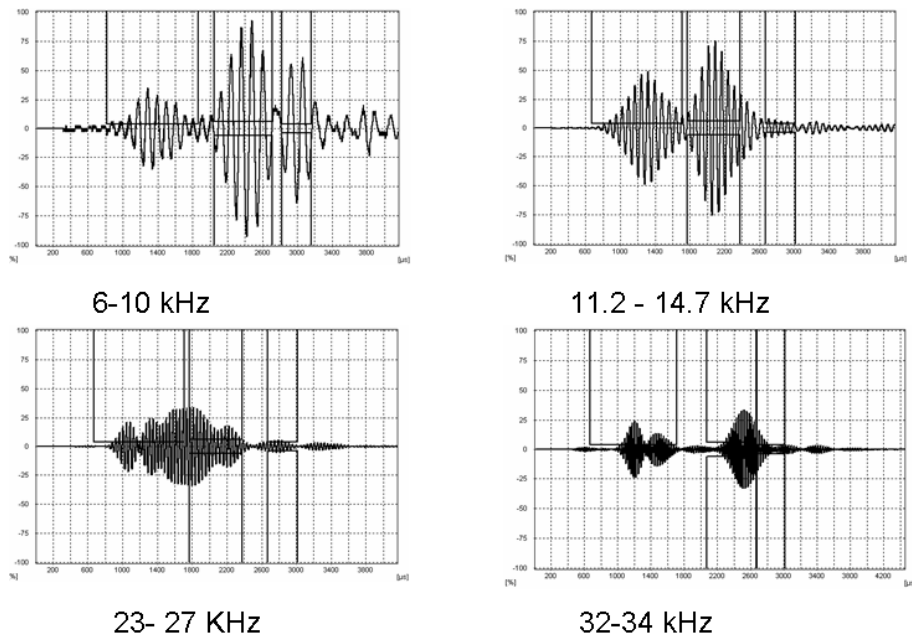


Bild 6: Gefilterte Empfangssignale berechnet aus einem breitbandigen Empfangssignal [7]

Referenzen

- [1] W. Hillger: Imaging of Defects in Concrete Components with Non-Contact Ultrasonic Testing, 16th World Conference on NDT, 30. 08.-03.09. 2004, Montréal, Canada, Conf. Proc.on CD.
- [2] www.Dr-Hillger.de
- [3] U. Tietze, Ch. Schenk; Halbleiter- Schaltungstechnik, Springer Verlag, 1999, 11. Auflage
- [4] J.R. Johnson, Digitale Signalverarbeitung, , Carl Hanser Verlag, 1991, 5. Auflage
- [5] S. A. Azizi, Entwurf und Realisierung digitaler Filter, R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1990, 5. Auflage
- [6] W. Hillger: Ultrasonic Systems for Imaging & Detection, 19th International Congress on Acoustics (ICA 2007), Madrid, 2. -7.September 2007, Special Issue of the journal Revista de Acoustica, vol. 38, year 2007, ISBN: 84-87985-12-2
- [7] W. Hillger, Untersuchungen an der Tail Unit eines Helikopters mit geführten Wellen, DGZfP-Jahrestagung, 14. -16. Mai 2007, Fürth, DGZfP-Berichtsband BB 104-CD