

# Der getaktete Gruppenstrahler – ein neues Verfahren zur Signalverarbeitung und Bildrekonstruktion in der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung

Ludwig von BERNUS, Andrei BULAVINOV, Randolf HANKE, Dieter JONEIT,  
Michael KRÖNING, Krishna Mohan REDDY,  
Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken/Dresden

## 1. Einleitung

Die automatisierte Ultraschallprüfung ersetzt zunehmend die manuell durchgeführte Prüfung. Die Verfügbarkeit immer preiswerterer und leistungsstärkerer Bauelemente der Mikroelektronik und der Rechner-technik ermöglicht heute bereits in vielen Fällen den wirtschaftlichen Einsatz von Gruppenstrahlersystemen [1].

Mit der phasengesteuerten Anregung des Ultraschalls kann der Einschallwinkel und ggf. der Fokustiefenbereich elektronisch eingestellt werden mit den Vorteilen einer geringen Anzahl von Prüfköpfen und einer aussagekräftigen Bildrekonstruktion, die einen Schritt hin zu quantitativ bewertbaren Fehlerbildern darstellt.

Die am Fraunhofer Institut durchgeführte Entwicklung einer neuartigen Gruppenstrahlertechnik – des getakteten Gruppenstrahlers („Sampling Phased Array“) – hatte zum Ziel, eine aussagekräftige Fehlerbildrekonstruktion auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten zu erreichen sowie die Prüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen zu ermöglichen.

Damit sollte ein Beitrag, insbesondere zur Prüfbarkeit von Leichtbauwerkstoffen [2] und zum Nachweis auch kleinerer Defektstellen in hochbeanspruchten Werkstoffen [3] geleistet werden.

## 2. Das Prinzip des ‚getakteten Gruppenstrahlers‘

Der elektronisch steuerbare Einschallwinkel bzw. Fokustiefenbereich reduziert die Anzahl der Prüfköpfe, wodurch das Prüfsystem mechanisch wesentlich einfacher aufzubauen und zu handhaben ist.

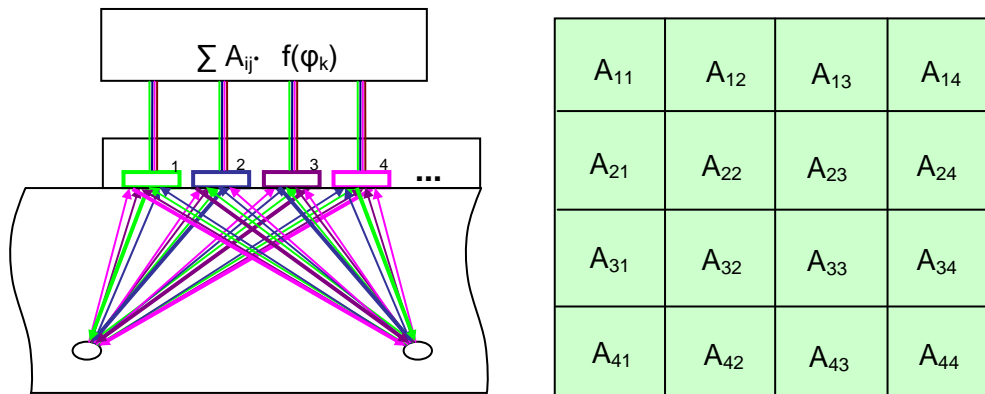
Die Anzahl der Prüftakte und damit die Prüfgeschwindigkeit bleibt jedoch gleich. Möchte man die Bildgebung verbessern durch Erhöhung der Anzahl der Einschallwinkel z.B. für die Darstellung des Prüfergebnisses im ‚Sektorbild‘ wächst die dafür notwendige Prüfzeit entsprechend und wird für die meisten Prüfaufgaben unpraktikabel.

Analysiert man den Informationsgehalt der von den einzelnen Gruppenstrahlerelementen gemessenen Zeitsignale [4], so erkennt man, dass durch die phasengesteuerte Anregung und Addition dieser Signale der größte Teil davon verloren geht. Die Möglichkeiten der schnellen Datenerfassung, Speicherung und Verarbeitung erlauben es, die einzelnen Zeitsignale der ‚Informationsmatrix‘ eines Gruppenstrahlers zu messen. Technisch wird dies dadurch realisiert, dass nur ein Element sendet, alle anderen Elemente empfangen und diese Zeitsignale abgespeichert werden. Sendet das  $i$ -te Element, entspricht dies den Elementen  $A_{ij}(t)$  mit  $j=1..N$



der Informationsmatrix (Bild 1). (i: sendendes Element, j: empfangendes Element, N: Anzahl der Elemente eines linearen Gruppenstrahlers).

Wird dieser Vorgang für alle Elemente ‚i‘ wiederholt (‚Taktung‘), erhält man die vollständige Informationsmatrix.



**Bild 1:** Die Informationsmatrix eines Gruppenstrahlers mit vier Elementen

Aufgrund der Reziprozität von Sender und Empfänger ist  $A_{ij} = A_{ji}$ . Die Diagonalelemente  $A_{ii}$  ( $i=1,N$ ) entsprechen der Information, die ein Prüfkopfelement ‚i‘ beim Abtasten der Gruppenstrahlerapertur messen würde, etwa für eine Bildrekonstruktion nach dem Prinzip der synthetischen Apertur-Fokus-Technik SAFT [5].

Von besonderer Bedeutung ist, dass jede Sendezelle ‚i‘ der Informationsmatrix die Information der vollständigen Antenne der empfangenden Gruppe der Sensorelemente enthält. Sieht man von Details der Wechselwirkung des Ultraschallfeldes mit starken Streuern ab, enthält bereits eine Zeile die Information, die für eine vollständige Bildrekonstruktion benötigt wird. Mit anderen Worten, man kann bereits durch einen Sendetakt eine vollständige Bildrekonstruktion erreichen. Probleme mit dem Signal-Rausch-Verhältnis bzw. mit dem Nachweis flächiger Fehler mit ausgeprägter Richtcharakteristik können technisch umgangen werden z.B. durch gleichzeitiges Senden aller Elemente, die zur virtuellen Punkt- bzw. Linienquelle zusammengefasst werden [6, 7, 8].

Damit kann eine vollständige Sektorrekonstruktion mit beliebig vielen Einschallwinkeln und einer Fokussierung auf jeden Bildpunkt durch einen Sendetakt berechnet werden.

Hierfür stehen heute geeignete Methoden der Echtzeitsignalverarbeitung zur Verfügung, die als integriertes, effizientes Rechnen bezeichnet werden können [9].

### 3. Rekonstruktion der US-Prüfergebnisse

Aus den Zeitsignalen  $A_{ij}$  können virtuelle A-Bilder durch Annahme entsprechender Phasenbeziehungen gerechnet werden. Physikalisch betrachtet müssen diese gerechneten A-Bilder äquivalent zu den konventionell gemessenen Signalen sein, mit dem Unterschied, dass der Fehler nicht mit einem gerichteten Schallfeld angeschallt wird. Im Falle eines Gruppenstrahlers wird das Schallfeld nicht analog im Prüfobjekt aus den Elementwellen aufgebaut, sondern virtuell im Rechner. Grenzen würden diesem Verfahren gesetzt im Falle starker Nichtlinearitäten.

Die A-Bild-Rekonstruktion ist von außerordentlicher Bedeutung in der Werkstoffprüfung, um die Regelwerkskonformität des getakteten Gruppenstrahlers nachweisen zu können.

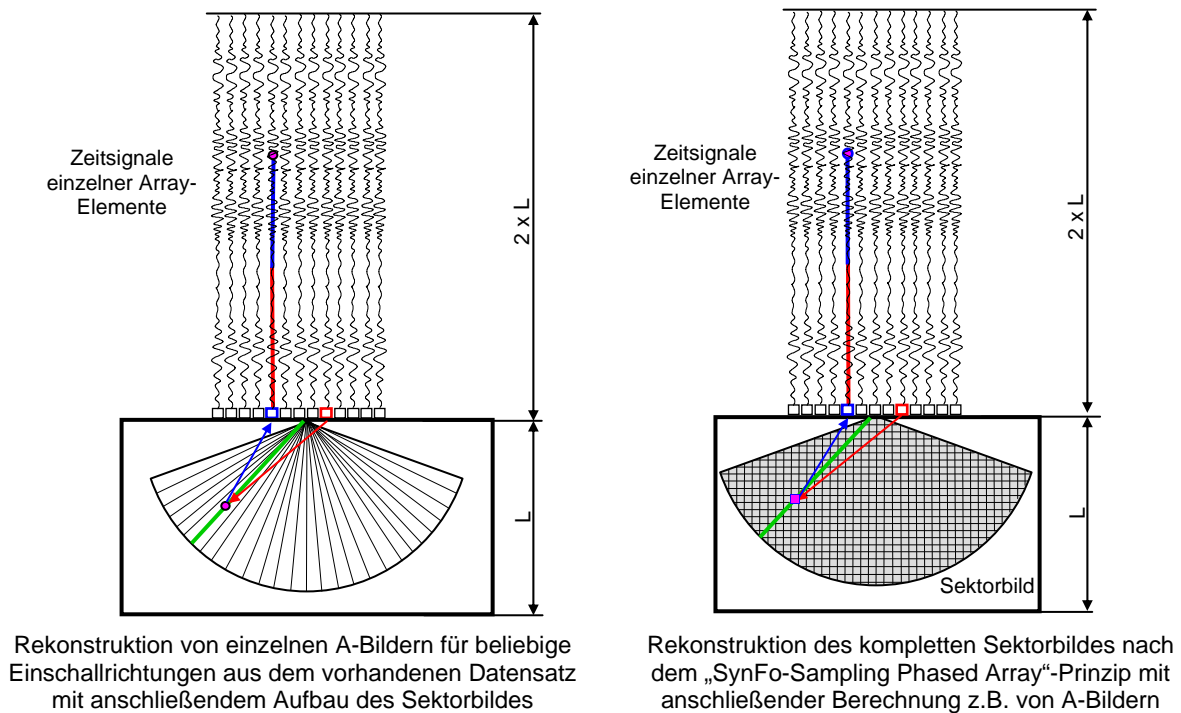
In nahezu konventioneller Vorgehensweise können aus den A-Bildern der verschiedenen Einschallwinkel mit jeweils wählbarer Fokussierung B-Bilder, C-Bilder und Sektorbilder berechnet werden.

Prinzipiell ermöglicht das Verfahren des getakteten Gruppenstrahlers die Entwicklung von Rekonstruktionsverfahren, die über den bestehenden Stand der Technik hinausgehen. Eine der

Möglichkeiten ist die Verwendung von Methoden der synthetischen Apertur, ein Aspekt, der insbesondere eine Erweiterung der Informationsmatrix  $A_{ij}$  bei der Prüfkopfbewegung erlaubt. Damit können z.B. größere Gruppenaperturen erreicht werden, mit den entsprechenden prüftechnischen Vorteilen.

Die Integration von Algorithmen der ‚Synthetischen Apertur-Fokus-Technik‘ SAFT, führt zu einem System (SynFo-Sampling-Phased Array), das eine Echtzeitrekonstruktion von Sektorbildern erlaubt mit automatischer Fokussierung auf jeden Bildpunkt im Rahmen der physikalisch gegebenen Grenzen (Nahfeld). Die Echtzeitlösung gelingt z.B. durch den Einsatz von Kirchhoff-Algorithmen, die aus der Seismik bekannt sind [10].

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Unterschied der Rekonstruktionsverfahren, wobei jedes dieser Verfahren alle Arten der US-Bildgebung ermöglicht.



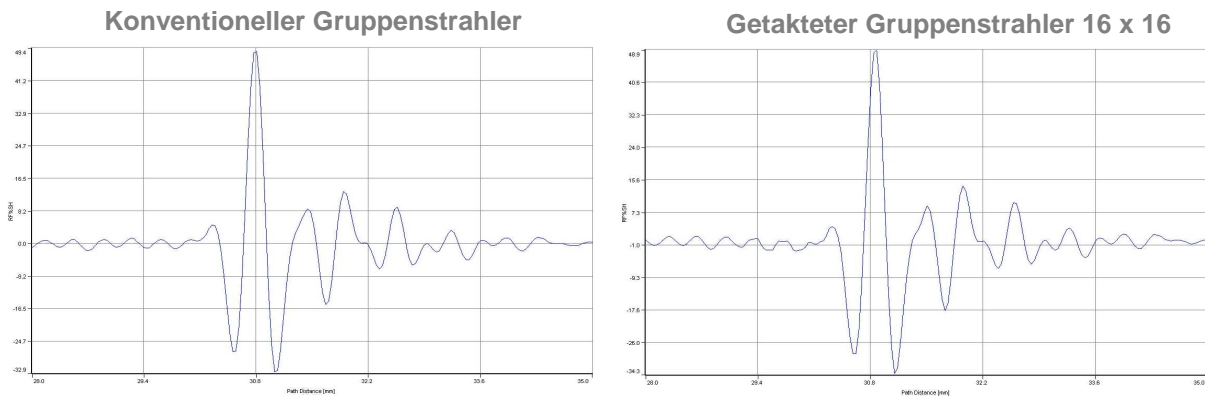
**Bild 2:** Möglichkeiten der US-Bildrekonstruktion

#### 4. Validierung der Prüftechnik

Wesentlich für die Einsetzbarkeit der Methode ist der Nachweis, dass die virtuellen A-Bilder äquivalent zu denen der konventionell gemessenen sind.

Dies erleichtert die Validierung der Prüftechnik und ermöglicht die Anwendung geltender Regeln und Prüfvorschriften.

Für eine Vielzahl von unterschiedlichen Reflektorarten wurden konventionell A-Bilder gemessen und mit den berechneten verglichen, um einen experimentellen Nachweis der Äquivalenz zu führen [7]. Bild 3 zeigt beispielhaft die A-Bilder einer Zylinderbohrung mit einem Durchmesser von 1 mm. Die Signale sind bis ins Detail äquivalent, gleiches gilt unter Nutzung der vollständigen Informationsmatrix für das akustische Rauschen.



**Bild. 3:** Prüftechnische Äquivalenz des konventionellen und des getakteten Gruppenstrahler (Anschallung einer Zylinderbohrung  $\varnothing 3$ ,  $30^\circ$  Longitudinalwelle 5 MHz, 30 mm Schallaufweg)

## 5. Prüftechnische Vorteile des getakteten Gruppenstrahlers

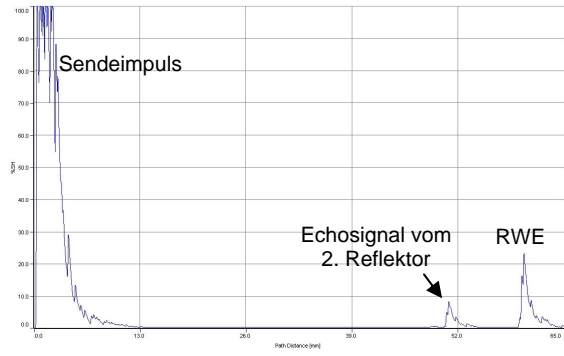
Die ‚SynFo-Sampling-Phased Array‘-Technik bietet eine Reihe von prüftechnischen Vorteilen, von denen einige exemplarisch diskutiert werden.

Für die Prüfpraxis ist eine Beschleunigung der Prüfung von großer Bedeutung. Das Potential dafür zeigen folgende Beispiele:

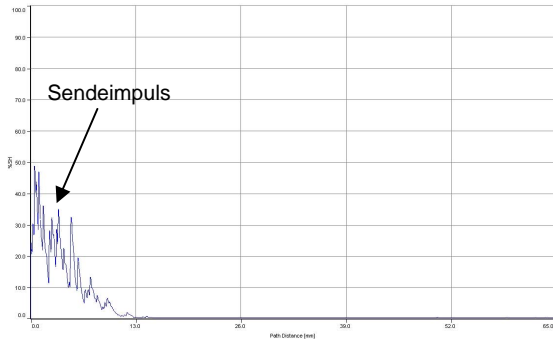
Sind fünf Einschallwinkel gefordert, können diese mit ‚SynFo‘ in einem Prüftakt gemessen und in Echtzeit ausgewertet werden. Dies führt bereits in diesem einfachen Fall zu einer Beschleunigung um den Faktor 5.

Für eine quantitativ bewertbare Ultraschallbildrekonstruktion, z.B. in Form eines Sektorbildes, kann dieser Unterschied bis zu einem Faktor von 1000 anwachsen.

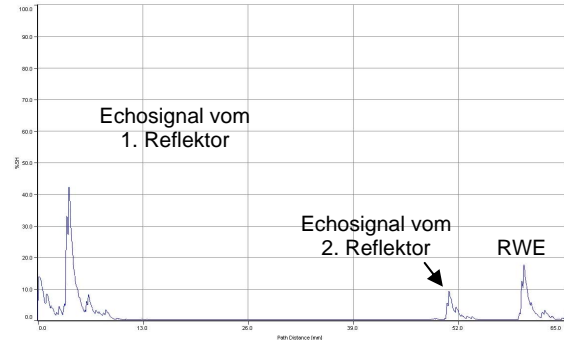
Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus dem Umstand, dass die ‚Sampling‘-Technik im Prinzip eine Sende-Empfangstechnik darstellt, wodurch die tote Zone unter der Oberfläche des Prüfobjektes wesentlich verringert werden kann. Gleichzeitig können alle Reflektoren mit optimaler Fokussierung des virtuellen Schallfeldes dargestellt werden. Dieser Vorteil ermöglicht den Entfall von Sonderprüftechniken z.B. für den oberflächennahen Bereich und zur Bewertung der Befunde (siehe Abb. 4: A-Bilder, Abb. 5: Sektorbilder).



a) Konventioneller Gruppenstrahler ohne Fokussierung

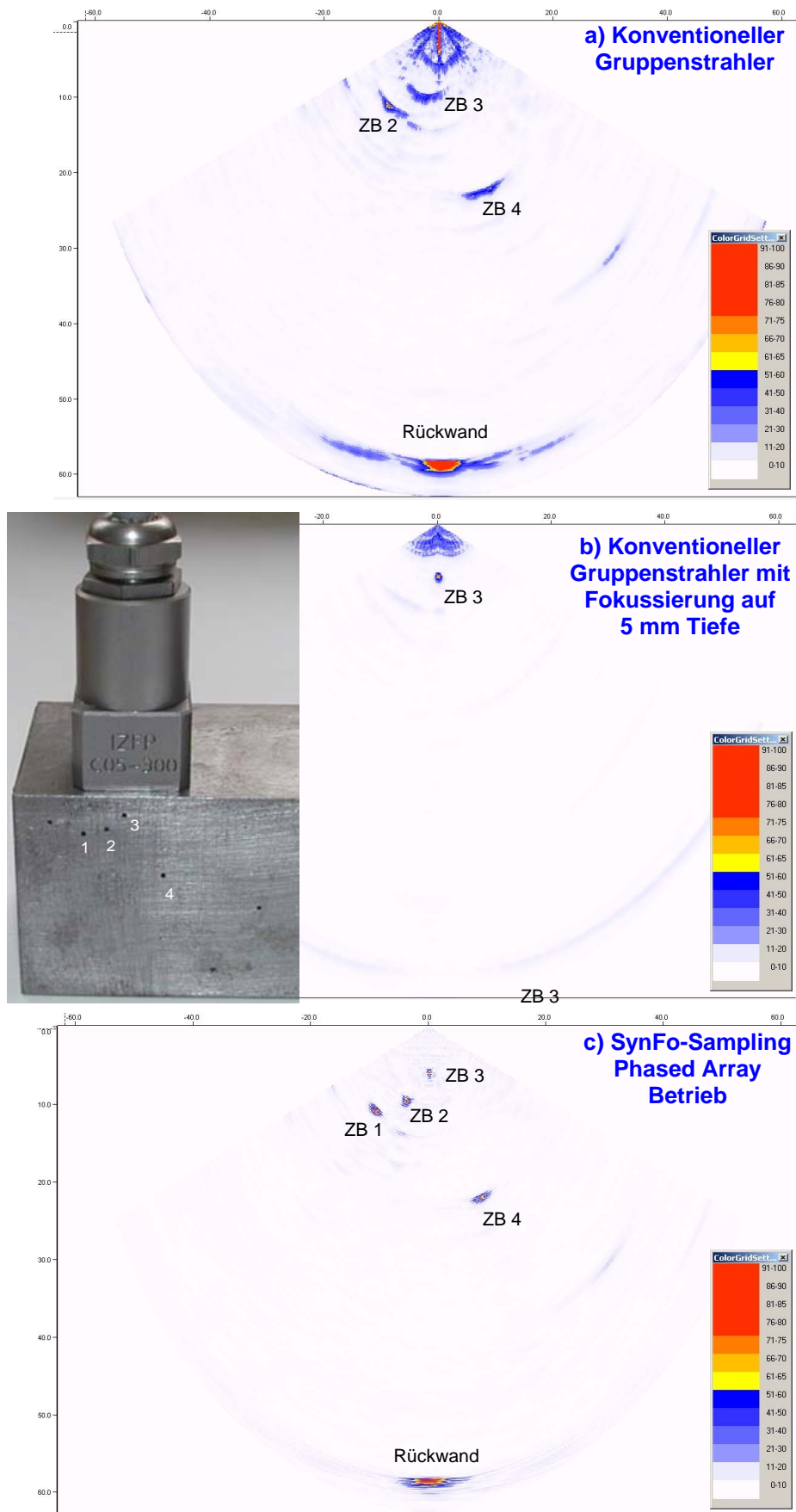


b) Konventioneller Gruppenstrahler mit Fokussierung auf 3 mm Tiefe



c) SynFo-Sampling Phased Array Mode

**Bild. 4:** Vergleich des konventionellen und des SynFo-Sampling Phased Array bei der Anschallung des Reflektors im nahen Nahfeld



**Abb. 5:** Testmessungen im Nahfeld in konventionellem und getaktetem Gruppenstrahlerbetrieb

## 6. Neue Prüflösungen

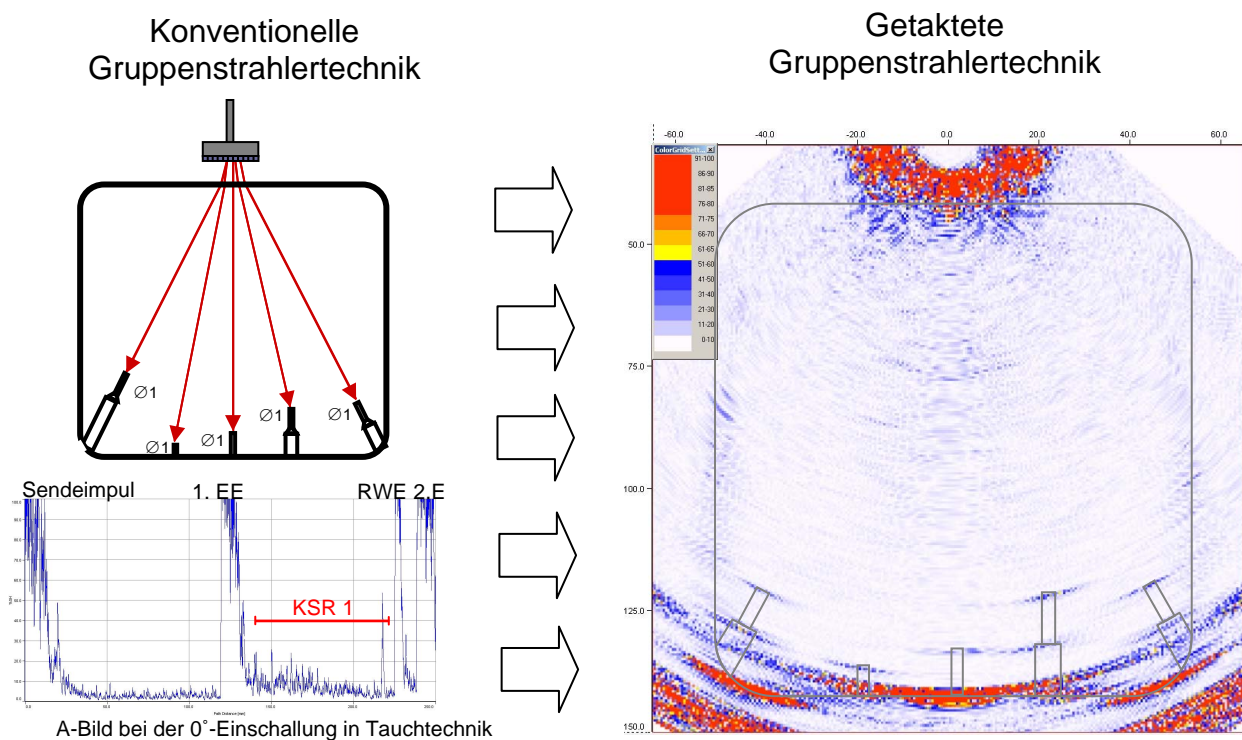
Neben der Beschleunigung der Prüfung bei gleichzeitiger Erzeugung weitgehend quantitativ bewertbarer Ultraschallbilder ermöglicht das ‚Sampling‘-Prinzip neuartige Prüflösungen, die mit bestehender Technik nicht erreichbar sind. Drei Beispiele werden im folgenden diskutiert:

### 6.1. Quantitative Bildgebung bei schnellen Prüfungen großer Volumina

Der Einsatz von Gruppenstrahlersystemen bei schnellen Industrieanwendungen wie z.B. bei der Prüfung von Stahlknüppeln und Stangen ist durch die kurzen Taktzeiten nur beschränkt möglich. Die getaktete Gruppenstrahlertechnik gestattet es, gleichzeitig alle Einschallwinkel in nur einem Sendetakt des Gruppenstrahlerprüfkopfes zu realisieren. Das bedeutet, dass durch die getaktete Gruppenstrahlertechnik eine wesentliche Verbesserung der Aussagekraft der Ultraschallprüfung bei sehr hohen Prüfgeschwindigkeiten erzielt werden kann.

Dabei kann man die Auswertung der Prüfergebnisse sowohl nach bestehenden Prüfvorschriften durchführen (z.B. Auswertung von A-Bildern nach dem AVG-Verfahren), als auch zweidimensionale Schnittbilder in Echtzeit rekonstruieren und auswerten (Abb. 6).

Prinzipiell toleriert die Algorithmik der Bildrekonstruktion eine Verletzung des ‚Sampling-‘



**Bild 6:** Potentiale der schnellen quantitativen Bildgebung am Beispiel der Knüppelprüfung.

Theorems', das der Gruppenstrahlertechnik zugrunde liegt. Dadurch können Standardsensoren eingesetzt werden, die um das Prüfobjekt optimal angeordnet werden können. Diese Technik wurde von uns ‚TOMO-SAFT' genannt.

### 6.2. Prüfung von akustisch anisotropen Werkstoffen

In der Luft- und Raumfahrt, der chemischen Industrie und der Kerntechnik werden Geometrien und Materialien verwendet, die aus Sicht der klassischen Ultraschallprüfung als schwer prüfbar gelten. Im Einsatz sind Mischverbindungen bzw. Kohlefaserverbundwerkstoffe mit inhomogenen und anisotropen Schallgeschwindigkeitsverteilungen.

In isotropen Medien sind die Wellenfronten von Elementarwellen sphärisch, der Schall breitet sich senkrecht zur Wellenfront aus. In anisotropen Medien sind die Wellenfronten nicht sphärisch, das Schallfeld – plausibel argumentiert – wird verzerrt [11].

Die Phasenbeziehungen von Elementarwellen, die mit Hilfe des getakteten Gruppenstrahlers gemessen werden, können unter Berücksichtigung der Anisotropie des Werkstoffes so angepasst werden, dass eine quasi Standardprüfsituation auch für anisotrope Werkstoffe erreicht wird. Die Schalllaufzeiten von einem Bildpunkt zu einem Sensorelement werden dazu berechnet z.B. aus der Steifigkeitsmatrix oder auch unter Verwendung experimentell erhaltener, richtungsabhängiger Schallgeschwindigkeiten. Dieses Verfahren kann als ‚inverse Phasenanpassung‘ [12] bezeichnet werden.

Für die Berechnung der Schallausbreitung können die entsprechend dem Stand der Technik verfügbaren Algorithmen genutzt werden [13].

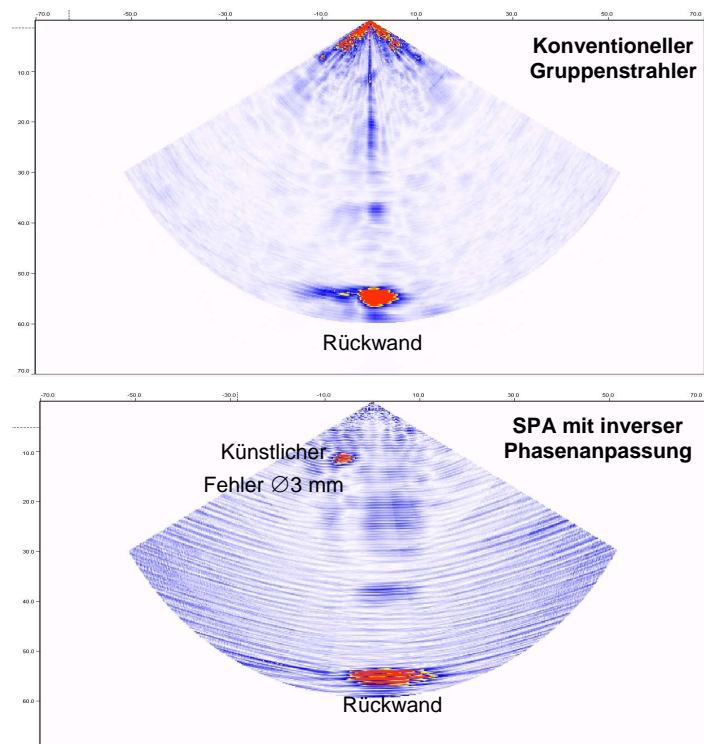
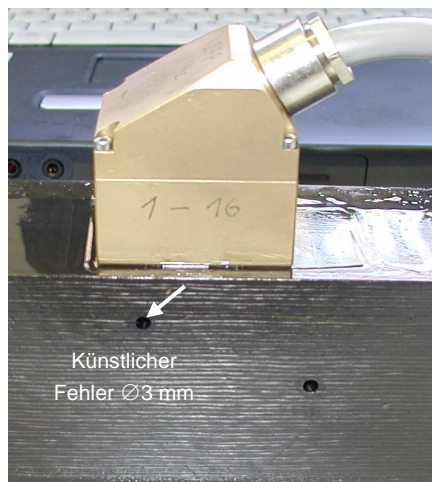
In der Abb. 7 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfung eines mehrschichtigen Kohlefaser-Testkörpers dargestellt.

Durch die ‚inverse Phasenanpassung‘ ergeben sich folgende Vorteile:

1. Die ‚Sampling Phased Array Technik‘ mit inverser Phasenanpassung ermöglicht einen Fehlernachweis und eine Fehlerbildrekonstruktion für anisotrope Werkstoffe .
2. Die Technik ermöglicht durch rechnerische Variation der Strukturannahmen eine Charakterisierung anisotroper Werkstoffe.
3. Die Anzahl der sendenden Elemente, der Abstand und die Anordnung des Sensorsystems können optimiert bzw. minimiert werden in Anhängigkeit von den Anisotropieparametern des Prüflings.

Da die Prüfung in Tauchtechnik als eine Prüfung von heterogenen Materialien behandelt werden kann, können komplizierte Oberflächengeometrien geprüft werden ohne aufwendige Justage der Sensorelemente. Dies führt zu Erleichterungen bei der Einrichtung des Prüfsystems und zu geringeren Kosten beim Aufbau der mechanischen Sensorhalterung und -führung.

**Gruppenstrahler-PK am Testkörper mit künstlichen Reflektoren**



**Bild 7:** Ultraschallprüfung von Kohlefaser-Strukturen: Vorteile der getakteten Gruppenstrahlertechnik mit inverser Phasenanpassung



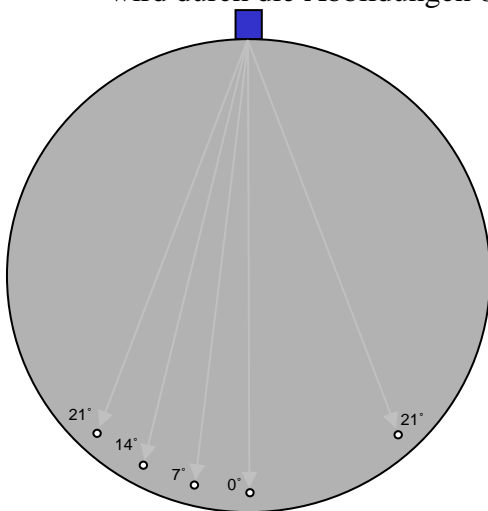
### 6.3. Lange Schallwege, Kombination der getakteten Gruppenstrahlertechnik mit synthetischen Aperturen

Die Ultraschallprüfungen an großen Komponenten wie z.B. Turbinenwellen sind in der Regel sehr zeitaufwendig, da bei großen Laufwegen nur niedrige Impulswiederholraten realisiert werden können. Hinzu tritt das Problem, dass insbesondere bei großen Laufwegen die Auflösung von Reflektoren und damit ihre Charakterisierung problematisch wird, wenn eine hohe Nachweisempfindlichkeit gefordert wird. Die Gruppenstrahlertechnik wird für solche Prüfungen bereits genutzt, kann aber die physikalisch bedingten Grenzen nicht überwinden. Die Ultraschallprüfung einer großen Turbinenwelle (Durchmesser bis 1,5 Meter) kann bei Einsatz der Gruppenstrahlertechnik bis zu einigen Tagen dauern, und beeinflusst damit den ganzen Produktionszyklus.

Durch den Einsatz der getakteten Gruppenstrahlertechnik ist man in der Lage, mehrere Einschallwinkel in einem Sendetakt zu realisieren. Allerdings entsteht bei größeren Laufwegen das Problem eines nicht ausreichenden Signal/Rausch-Abstandes, da die Sendeenergie, die in einem Sendetakt ausgestrahlt wird, selbst beim defokussierten Senden mit allen Gruppenstrahlerelementen (Maßnahme zur Erhöhung der Prüfeempfindlichkeit durch Emulation einer punktförmigen Schallquelle) nicht ausreichend ist. Prinzipiell müsste zur Erhöhung der Prüfeempfindlichkeit die Apertur des Gruppenstrahlers vergrößert werden. Dies würde bei der konventionellen Technik zu großen Bauformen des Prüfkopfes führen und gleichzeitig die Auflösung von Reflektoren beeinträchtigen.

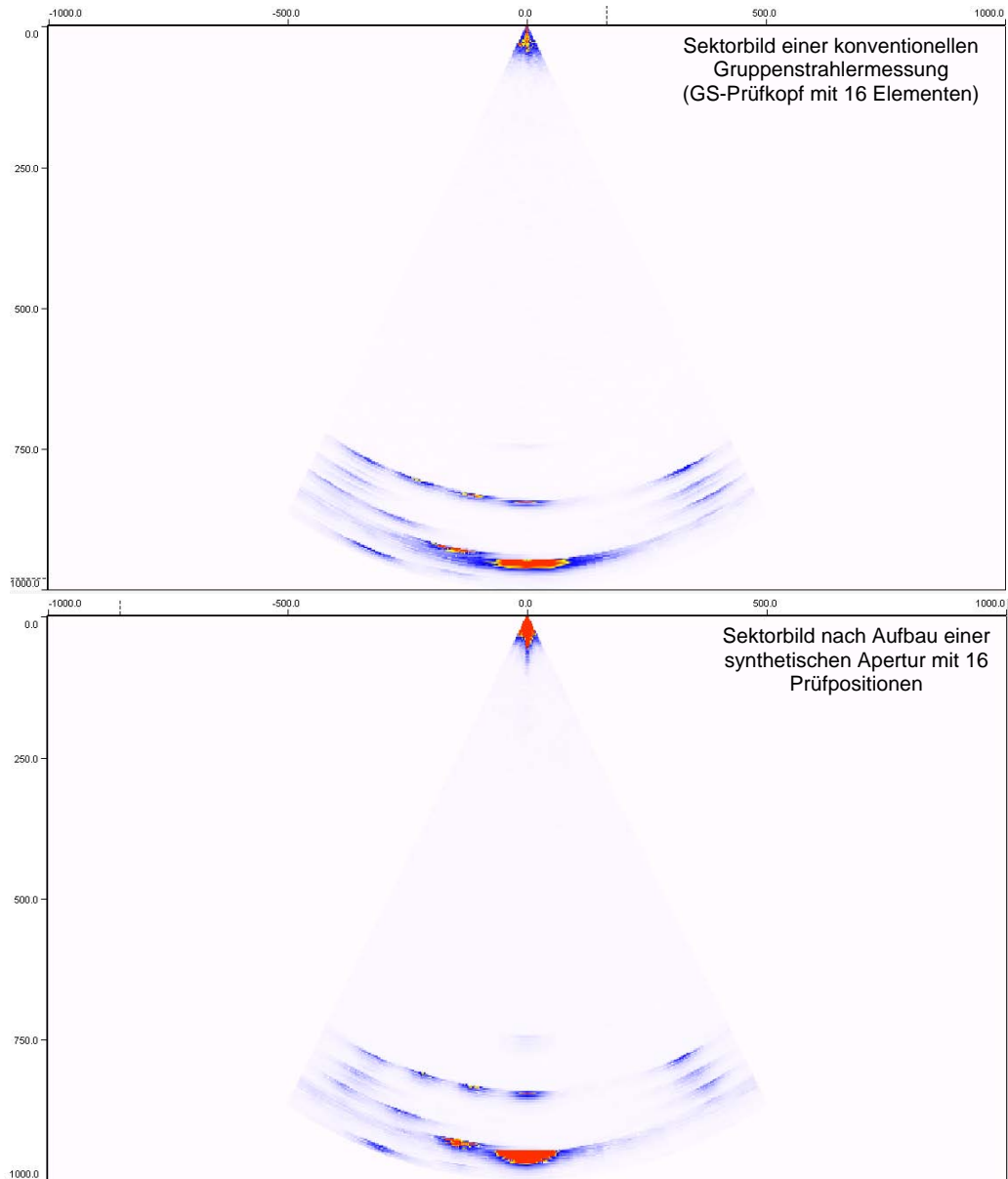
Diese Einschränkungen können durch den Aufbau einer synthetischen Apertur beim Abtasten des Prüfkörpers in Schwenkrichtung überwunden werden. Dafür werden die empfangenen Ultraschallsignale der einzelnen Gruppenstrahlerelemente von mehreren Prüfpositionen zur Rekonstruktion der synthetischen Gruppenstrahlersignale für beliebige Einschallrichtungen genutzt mit folgenden Vorteilen:

1. An einer Prüfposition wird mit dem getakteten Gruppenstrahler nur einmal gesendet, während bei der konventionellen Gruppenstrahlertechnik mehrere Sendetakte benötigt werden (je nach Anzahl der zu realisierenden Einschallwinkel). Werden z.B. bei der Prüfung von Turbinenwellen neun Einschallwinkel gefordert ( $0^\circ$ ,  $\pm 7^\circ$ ,  $\pm 14^\circ$ ,  $\pm 21^\circ$ ,  $\pm 28^\circ$ ), wäre die Prüfung mit getakteter Gruppenstrahlertechnik bereits neunmal schneller.
2. Bei gleicher oder besserer Prüfeempfindlichkeit (je nach der Größe der aufgebauten synthetischen Apertur) ermöglicht die synthetische Apertur-Technik ein besseres Auflösungsvermögen, durch den Einfluss der Elementapertur auf die Auflösung. Dies wird durch die Abbildungen 8 und 9 dargestellt.



**Abb. 8:** Testkörper für die Ultraschallprüfung von Turbinenwellen

Ein Testkörper (Turbinenwelle mit Querbohrungen  $\varnothing 3$  mm) wurde mit konventioneller und getakteter Gruppenstrahlertechnik angeschallt (Abb. 8). Selbst bei relativ kleinen aufgebauten Aperturen (16 Prüfpositionen mit einem Schussabstand von 1.8 mm) erreicht man mit der getakteten Gruppenstrahlertechnik gleiche Prüfeempfindlichkeiten und Signal/Rausch-Abstände wie bei der konventionellen Gruppenstrahlertechnik. Die Winkelauflösung ist im getakteten Gruppenstrahlerbetrieb deutlich besser (Abb. 9). Die synthetisch aufgebaute Apertur ist im Beispiel doppelt so groß wie die Apertur des 16-Element-Gruppenstrahlerprüfkopfes.



**Abb. 9:** Ergebnisse der Ultraschallprüfung an Turbinenwelle mit einem Durchmesser von 940 mm

## 7. Entwicklungsplattform

Im Fraunhofer IZFP wurde eine Ultraschallplattform entwickelt, die die o.g. Prinzipien des getakteten Ultraschalls sowie einer konventionellen Gruppenstrahlertechnik realisiert. Mit dieser Plattform können auch kurzfristig Systeme für spezifische Prüfaufgaben aufgebaut werden.

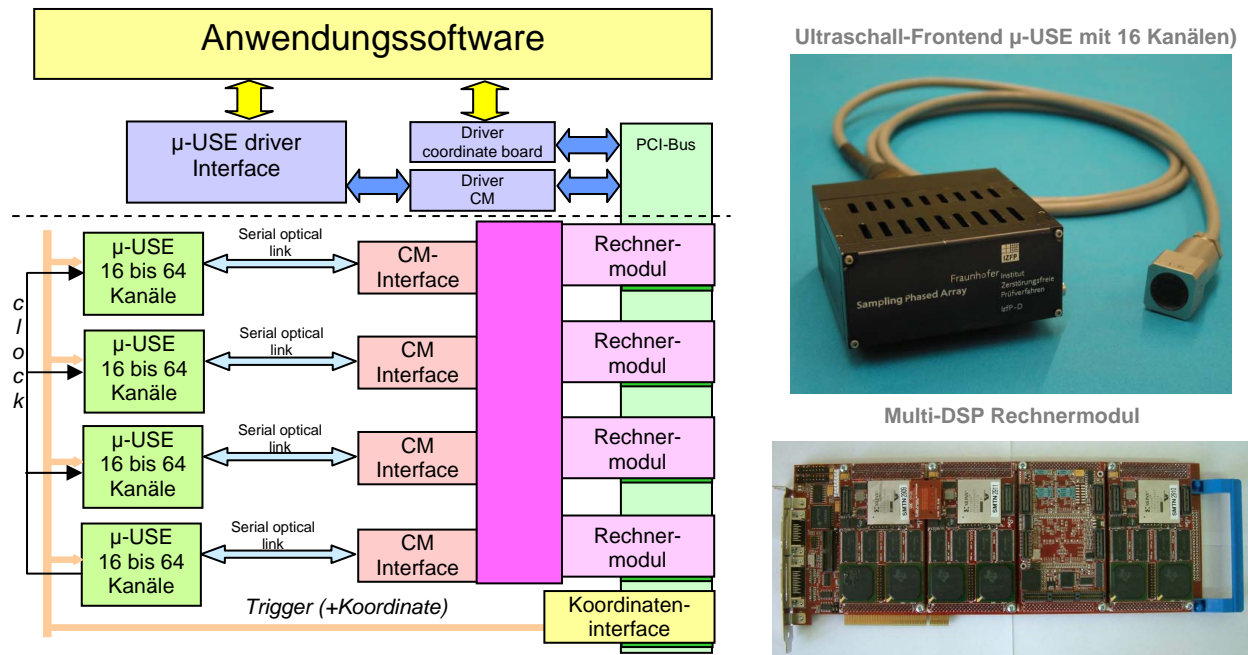
Die Ultraschallplattform ‚Sampling Phased Array‘ besteht grundsätzlich aus folgenden Hardwaremodulen (siehe Abb. 10).

1. Ultraschallfrontend  $\mu$ -USE
2. Rechnermodul (Computation Module, CM)
3. CM-Interface: Transceiver ‚Optischer Link – Interner Bus‘
4. Koordinateninferface
5. Leit-PC mit PCI-Bus zum Einbau von bis zu 4 Rechnermodulen
6. Prüf- und Steuerungssoftware

Das Ultraschallfrontend  $\mu$ -USE stellt ein Ultraschall-Elektronikmodul dar, das über 16 vollständige parallele Ultraschallkanäle verfügt (erweiterbar auf 32 und 64 Kanäle), d.h. es kann auch für konventionelle Mehrkanalanwendungen eingesetzt werden. Das Frontend ist auf der Basis von modernen Mikroelektronikkomponenten ausgeführt, erfüllt alle Anforderungen an die Ultraschall-Prüfgerätetechnik [14] und hat eine kompakte Bauform (Abb. 10 rechts oben).

Das Rechnermodul stellt ein Marktprodukt dar, das speziell für schnelle Rechnungen unter Verwendung von parallelen Rechnerstrukturen entwickelt wurde (Abb. 10 rechts unten). Die Signal- und Bildrekonstruktionsalgorithmen wurden in diesem Modul realisiert.

Weitere Komponenten der Ultraschallplattform (Rechnermodul-Interface, Koordinateninterface) sind ebenfalls kommerziell verfügbare Marktprodukte durch deren Einsatz die Entwicklungskosten gesenkt werden können.



**Bild 10:** Ultraschall-Plattform ‚Sampling Phased Array‘

## 8. Zusammenfassung

Der ‚getaktete Gruppenstrahler‘ ermöglicht neuartige Ansätze bei der Entwicklung und Anwendung von Ultraschallprüfsystemen.

Es wurde im IZFP eine Entwicklungsplattform gebaut, mit folgenden Systemverbesserungen im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik.

1. Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit bei verbesserter Aussagekraft mit der Möglichkeit zur Integration der Prüfsysteme in Fertigungslinien (Prüfgeschwindigkeiten bis zu einigen Metern pro Sekunde)
2. Quantitative Bildgebung unter Echtzeit-Bedingungen
3. Verbesserung der Prüfbarkeit von ‚schlecht‘ prüfbareren Materialien wie z.B. inhomogene anisotrope Werkstoffe (Kohlefaser, austenitische Stähle und Schweißverbindungen)
4. Preiswertere Prüfelektronik auf der Basis moderner mikroelektronischer Technologien und durch den Entfall der ‚Phasenschieberelektronik‘
5. Erfüllung nationaler und internationaler Regelwerksanforderungen

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] H. Wüstenberg, G. Schenk, Entwicklungen und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall, Mainz, DGZfP-Jahrestagung 2003
- [2] J. Klenner: Werkstoffvisionen im Verkehrsflugzeugbau, Konferenz „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft“, Weimar, 29. – 31. Oktober 2003
- [3] P. Ciorau: A Contribution to Detecting and Sizing Linear Defects by Phased Array Ultrasonic Techniques, 4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, London, 6-8 December 2004
- [4] R.Y. Chiao, L.J. Thomas: Analytic Evaluation of Sampled Aperture Ultrasonic Imaging Techniques for NDE, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol. 41, No.4, July 1994
- [5] W. Müller, V. Schmitz, G. Schäfer, Reconstruction by the Synthetic Aperture Focusing Technique. Nuclear Engineering and Design, 1988, pp. 393 –404
- [6] Kröning M., Hentschel D., von Bernus L., Bulavinov A., Reddy K. M.; Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2004 059 856.8, Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall. Tag der Anmeldung: 10.12.2004
- [7] Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Saarbrücken 2005 (Dissertation).
- [8] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M., von Bernus L.: Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2005 051 781.1, Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall. Tag der Anmeldung: 28.10.2005
- [9] Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar: Introduction to Parallel Computing, 2<sup>nd</sup> Edition, Addison-Wesley, Februar 2003
- [10] Jon F. Claerbout, Cecil and Ida Green Professor of Stanford University, EARTH SOUNDINGS ANALYSIS: Processing versus Inversion, March 23, 2004
- [11] P. Fellingner, R. Marklein, K. J. Langenberg, S. Klaholz, "Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT - elastodynamic finite integration technique", Wave Motion 21, 47-66, 1995
- [12] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M.: Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2006 003 978.5, Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers. Tag der Anmeldung: 27.01.2006
- [13] J.D. Achenbach, Wave propagation in elastic solids, North-Holland, Elsevier, Amsterdam, 1984
- [14] Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung; Deutsche Fassung EN 12668-1:2000