

# Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen

Andrey BULAVINOV, Serhiy KOSOV, Michael KRÖNING, Roman PINCHUK, Sergey PUDOVNIKOV, Sridaran Venkat RAMANAN, Krishna Mohan REDDY, Olga YASTREBOVA, Yerbol ZHANTLESSOV  
Fraunhofer IZFP, Saarbrücken  
Dieter JONEIT, Fraunhofer IZFP, Institutsteil Dresden

**Kurzfassung.** Die automatisierte Ultraschallprüfung ersetzt zunehmend die manuell durchgeführte Prüfung. Die Verfügbarkeit immer preiswerterer und leistungsstärkerer Bauelemente der Mikroelektronik und der Rechnertechnik ermöglicht heute bereits in vielen Fällen den wirtschaftlichen Einsatz von Gruppenstrahlersystemen.

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 zwei- und dreidimensionale Fehlerbildrekonstruktion auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten zu erreichen sowie die Prüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen zu ermöglichen. Auch sollte insbesondere für Prüfungen von dickwandigen Komponenten eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitig guter Auflösung erreicht werden, um auch für diese Prüfaufgaben dem Ziel einer quantitativ bewertbaren Prüfung zu entsprechen.

Die neue Prüftechnik wurde auf der Basis moderner Software, Hardware und Rechnerstrukturen für Echtzeit-Signalverarbeitung und Bildrekonstruktion realisiert.

## Einführung

Der elektronisch steuerbare Einschallwinkel bzw. Fokustiefenbereich bei der konventionellen Gruppenstrahlertechnik 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.

Die getaktete Gruppenstrahlertechnik verzichtet auf das „Echolot“-Prinzip. Sie misst die US-Elementarwellen der einzelnen Elemente der Gruppe mit anschließender Synthetisierung von Ultraschallsignalen und Bildern [1, 2, 3]. Diese Technik ist einerseits physikalisch absolut äquivalent der konventionellen Technik mit der Schallfeldsteuerung, bietet andererseits mehrere Vorteile, wie etwa wesentliche Beschleunigung der Prüfung, Verbesserung der Aussagekraft durch synthetische Fokussierung in jedem Punkt des Prüfvolumens auch bei anisotropen Werkstoffen durch die Technik der inversen Phasen Anpassung und eine quantitative Qualität der Ultraschallprüfergebnisse durch 2- und 3-dimensionale Bildgebung [4].

In diesem Beitrag wird im Wesentlichen auf konkrete Anwendungen der getakteten Gruppenstrahlertechnik fokussiert.

## Grundprinzipien der getakteten Gruppenstrahlertechnik

In einem Sende-/Empfangsvorgang des konventionellen Gruppenstrahlers sind in der Regel alle Elemente des Arrays sowohl als Sender als auch als Empfänger beteiligt. Analysiert man den Informationsgehalt der von den einzelnen Gruppenstrahlerelementen gemessenen Zeitsignale [5], 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).

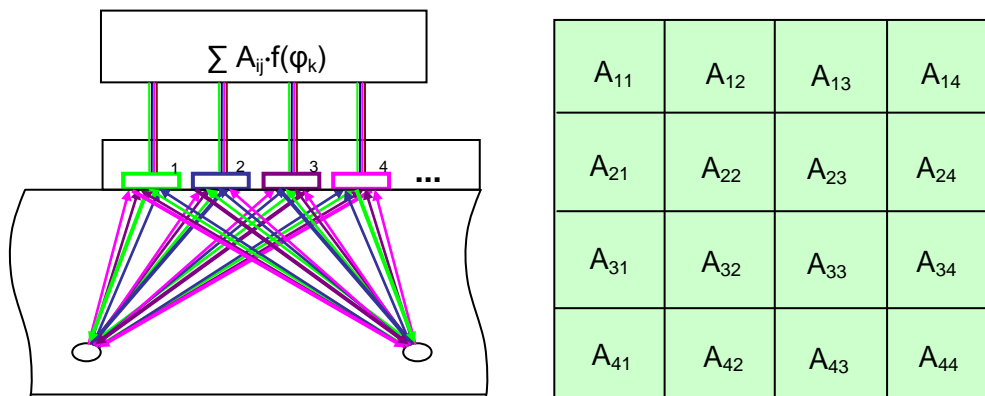


Bild 1: Die Informationsmatrix eines Gruppenstrahlers mit vier Elementen

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.

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. 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 (siehe Abb. 2).

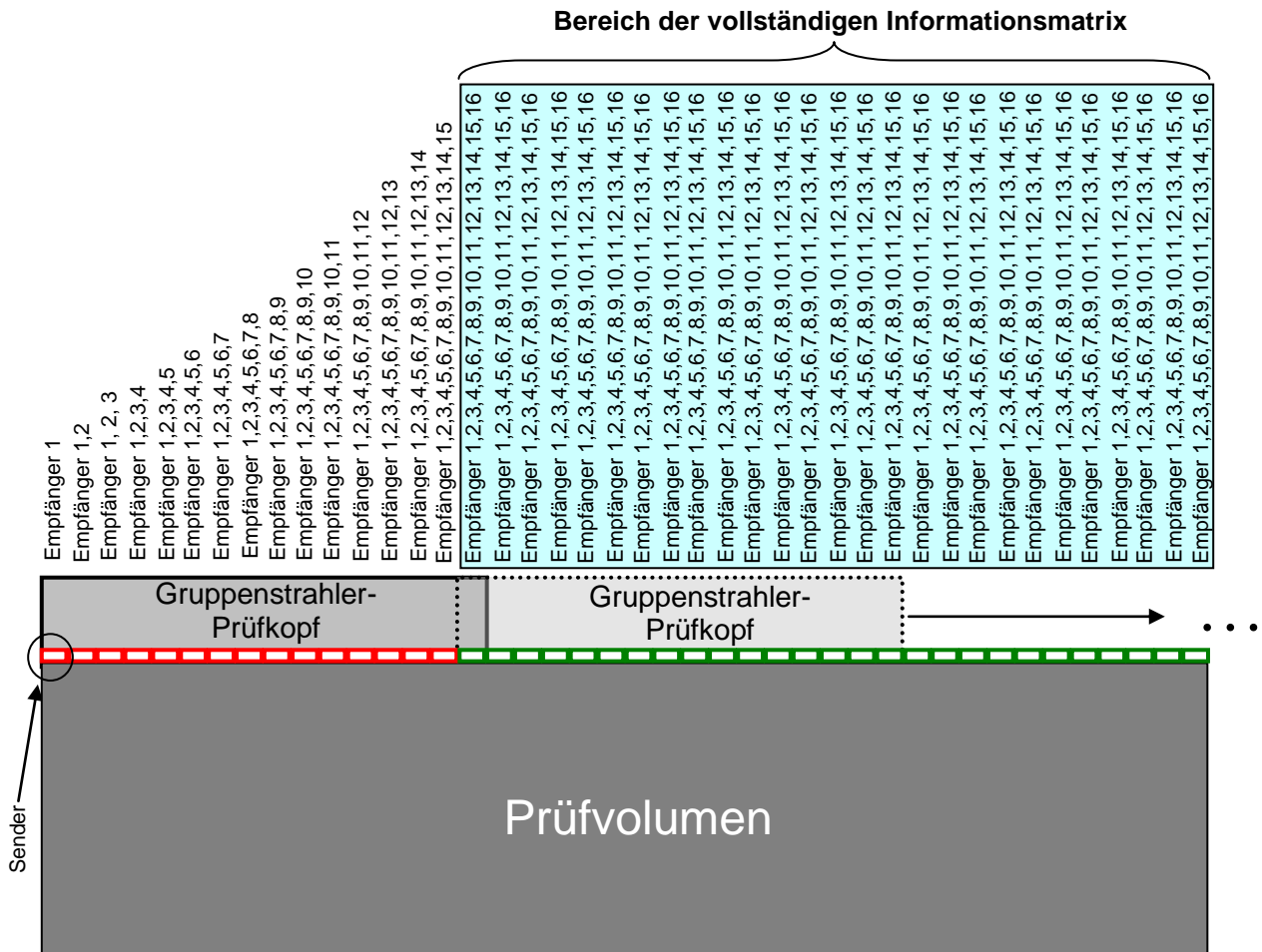


Abb. 2: Scannen in Schwenkrichtung im getakteten Gruppenstrahlerbetrieb mit Einsatz eines Sendeelements.  
 Füllung der Informationsmatrix durch positionsbezogene Datenaufnahme

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 Echtzeitleistung gelingt z.B. durch den Einsatz von Kirchhoff-Algorithmen, die aus der Seismik bekannt sind [6].

## Entwicklungsplattform

Im Fraunhofer IZFP wurde eine Ultraschallplattform entwickelt, die die o.g. Prinzipien des getakteten Ultraschalls sowie der 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. 3).

1. Ultraschallfrontend  $\mu$ -USE
2. Rechnermodul (Computation Module, CM)
3. CM-Interface: Tranceiver ,Optischer Link – Interner Bus’
4. Koordinateniniferface

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. Die Anzahl der Kanäle kann ebenfalls durch einen 4-fachen Multiplexer erweitert werden. Das Frontend ist auf der Basis von modernen Mikroelektronikkomponenten ausgeführt, erfüllt alle Anforderungen an die Ultraschall-Prüfgerätetechnik und hat eine kompakte Bauform (Abb. 3 rechts oben: Frontend-Elektronik „ $\mu$ -USE“ mit 16x4 Ultraschallkanälen).

Das Rechnermodul stellt ein Marktprodukt dar, das speziell für schnelle Rechnungen unter Verwendung von parallelen Rechnerstrukturen entwickelt wurde (Abb. 3 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.

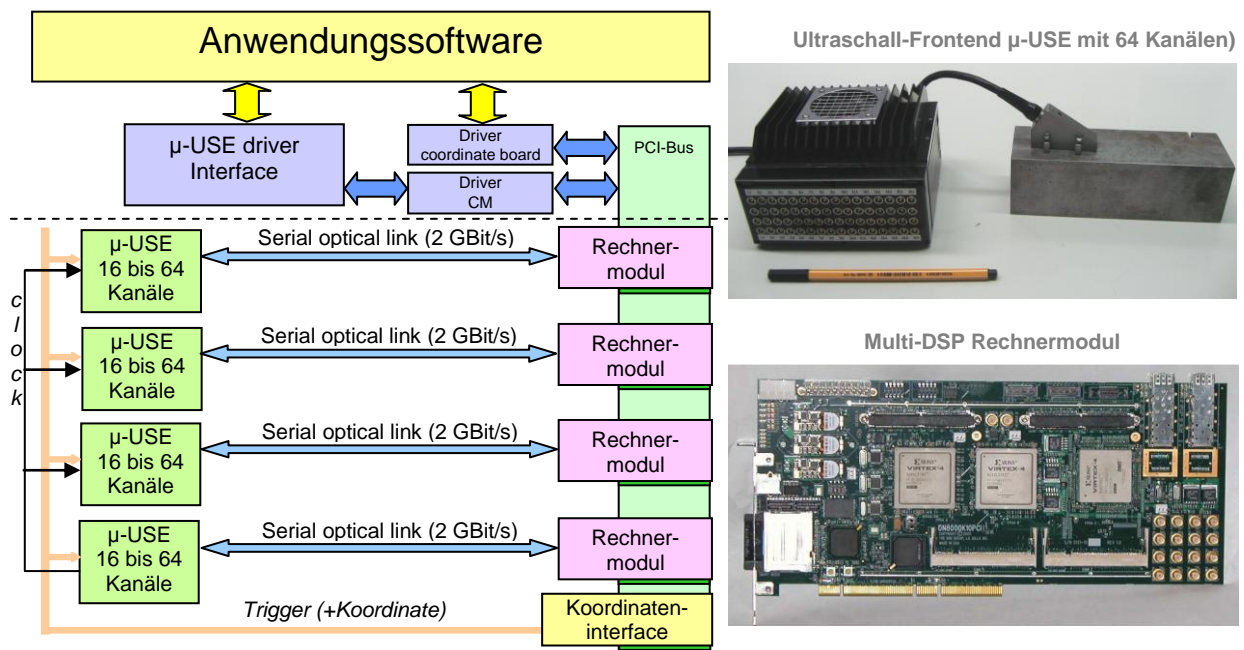


Abb. 3: Ultraschall-Plattform 'Sampling Phased Array'

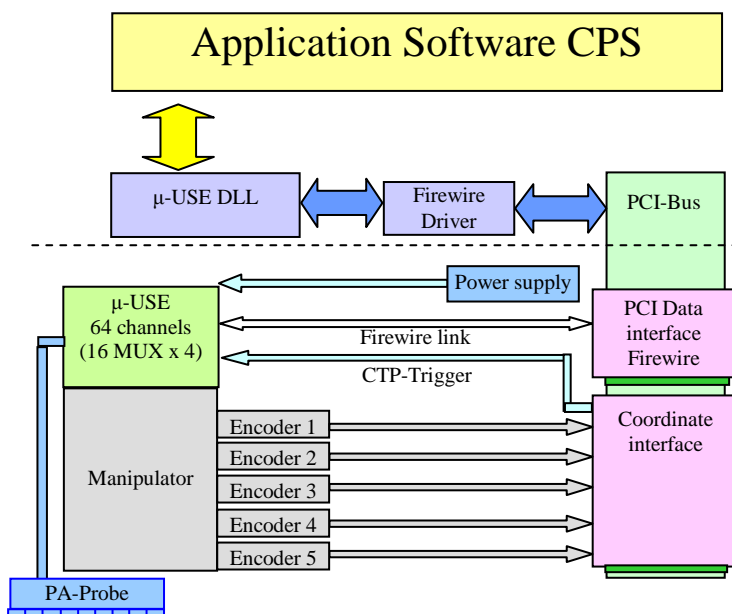
## Anwendungen der getakteten Gruppenstrahlertechnik

### 1. Schnelle Prüfungen in Tauchtechnik mit 3D-Bildrekonstruktion

Das Blockschaltbild des Gesamtsystems ist in Abb. 4 dargestellt. Die Ultraschallplattform besteht aus folgenden Komponenten:

1. Ultraschallelektronik (US-Frontends  $\mu$ -USE)
2. Ultraschallwandler
3. Mechanisches System einschließlich ggf. Tauchwanne, Servomotoren, Sensorhalterungen, Steuerelektronik, Weggeber und Koordinateninterface
4. Anwendungssoftware einschließlich eine Bibliothek von Rekonstruktionsalgorithmen

Geprüft werden kann in Tauch- oder in Kontakttechnik. Das zu prüfende Bauteil wird mit dem fünfschigen Manipulator abgetastet. An jeder Prüfposition des Ultraschallwandlers wird entweder ein Prüftakt im defokussierten Sendebetrieb oder N Prüftakte (N-Anzahl der



Systemblockschaltbild



Tauchwanne mit Manipulator

Abb. 4: Tauchtechniksystem auf Sampling Phased Array Basis

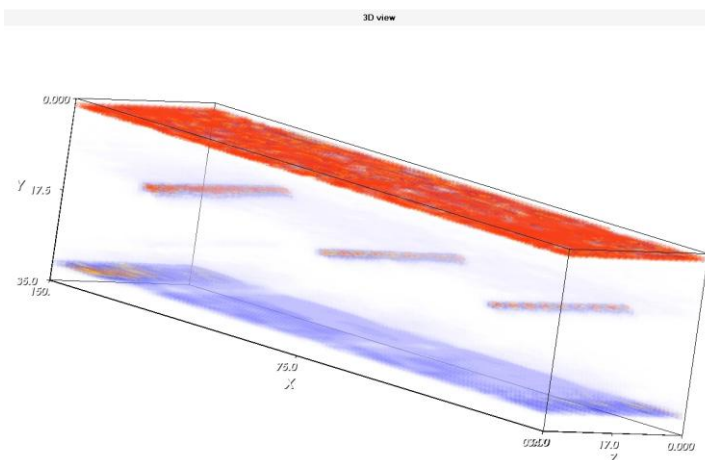


Abb. 5: 3D-Rekonstruktion eines Testkörpers mit 3 Zylinderbohrungen

Ultraschallkanäle) im getakteten Sendebetrieb durchgeführt, wobei bei jedem Senden alle Kanäle Ultraschallsignale empfangen. Die tomografische Rekonstruktion von Ultraschall-Bildern erfolgt in Echtzeit, sodass das 3D-Volumen des Bauteils sowie alle Projektionsbilder während der Messung dargestellt werden können (siehe Abb. 5).

Standardfunktionen der Bildverarbeitung wie Drehen, Rotieren, Zoomen, Amplitudenschwellen, Durchsichtigkeit u.a. sind verfügbar.



## 2. Schnelle Stabstahlprüfungen mit hoher Ortsauflösung

Der Einsatz von Gruppenstrahlersystemen bei Industrieanwendungen mit hohen Prüfgeschwindigkeiten 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 sowohl die Auswertung der Prüfergebnisse 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).

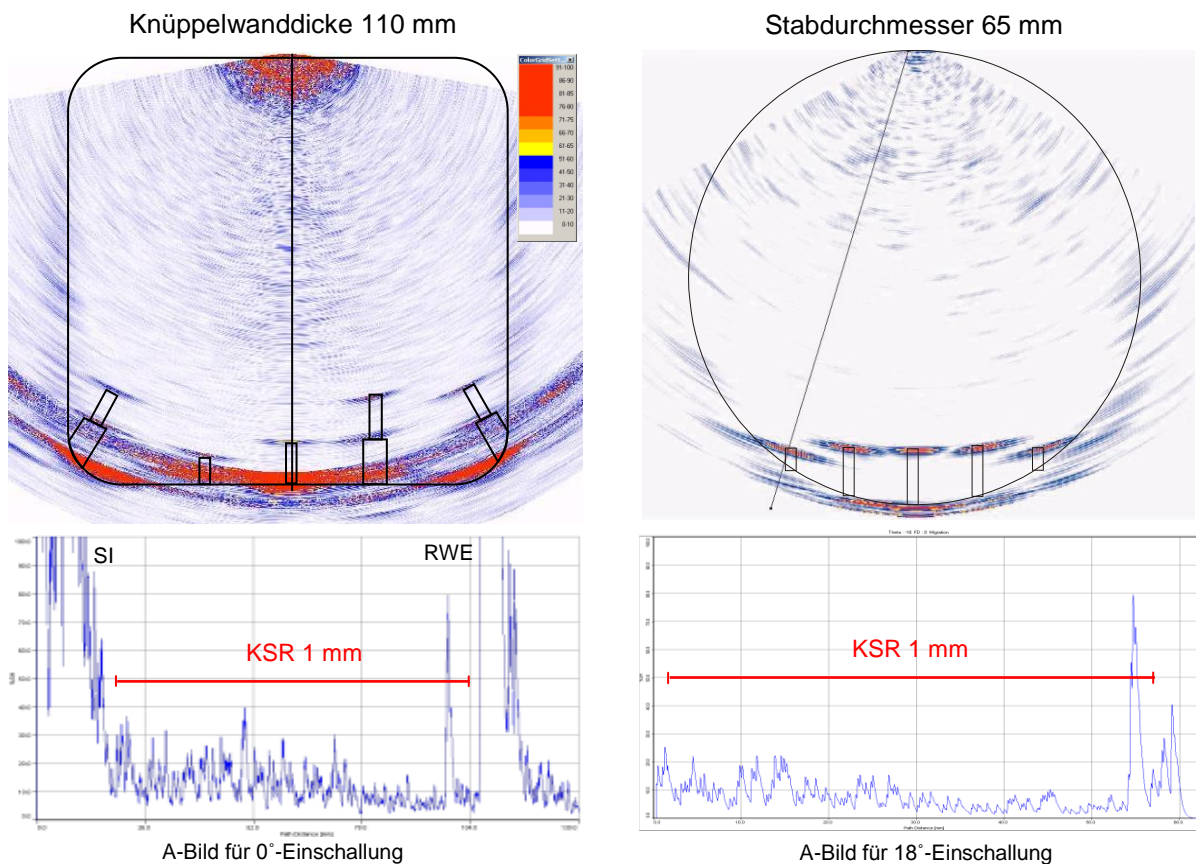


Abb. 6: US-Prüfergebnisse bei der Stabprüfung. Testkörper mit künstlichen Reflektoren KSR 1 mm

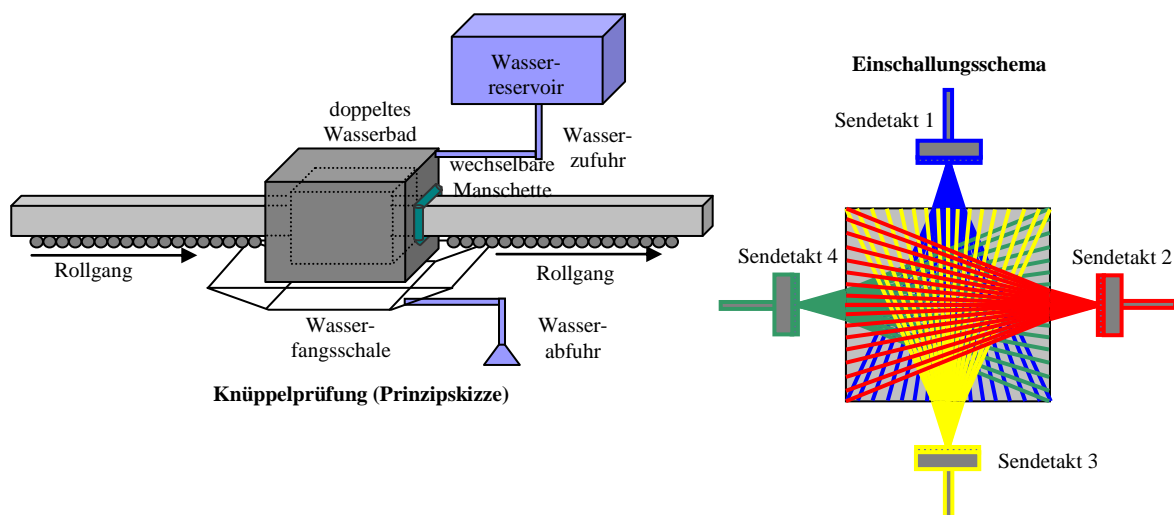


Abb. 7: Prinzipschema einer US-Stabprüfanlage auf Sampling Phased Array Basis

Diese Prüftechnik kann in Produktionslinien bei der Stabstahlherstellung integriert werden und damit wesentlich höhere Qualitätsanforderungen (Prüfempfindlichkeit, Auflösungsvermögen, bessere Abdeckung des Prüfvolumens) als herkömmliche Prüftechniken gewährleisten (Abb. 7).

### **3. Ultraschall-Prüfsysteme mit verteilten Aperturen**

Der Stand der Technik der Ultraschallprüfung von Werkstoffen und technischen Komponenten während der Fertigung und im Rahmen von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen ist in technischen Regelwerken festgeschrieben. Trotz zunehmender Automatisierung der Prüfdurchführung und der Verwendung von moderner Messtechnik wie sie z.B. in den Gruppenstrahlerprüfsystemen Anwendung findet, sind die Grundlagen des Fehlernachweises mit der Festlegung von Zulässigkeitskriterien seit Jahrzehnten nahezu unverändert geblieben.

Der Fehlernachweis und damit verbunden die Zulässigkeit nachgewiesener „Werkstoffungängen“ beruht auf Ersatzreflektoren, wie Zylinder-, Flachlochbohrungen oder Nuten, die mit der Prüftechnik gefunden werden müssen (Prüfempfindlichkeit). Anzeigen in einer geprüften Komponente, deren Echohöhe oder deren Ausdehnung einen festgelegten Betrag überschreiten, sind im Sinne einer festgeschriebenen Qualitätsbewertung unzulässig. Dieser Sachverhalt erlaubt nur eine sehr ungenaue Aussage über die Größe und Art noch verbliebener Fehler - insbesondere Risse - in technischen Werkstoffen und Fügeverbindungen.

64-Element-Gruppenstrahler, 16 aktive Elemente mit einem Elementabstand von 0.6 mm, Prüffrequenz 5 MHz, Wellenlänge im Stahl ca. 1.2 mm

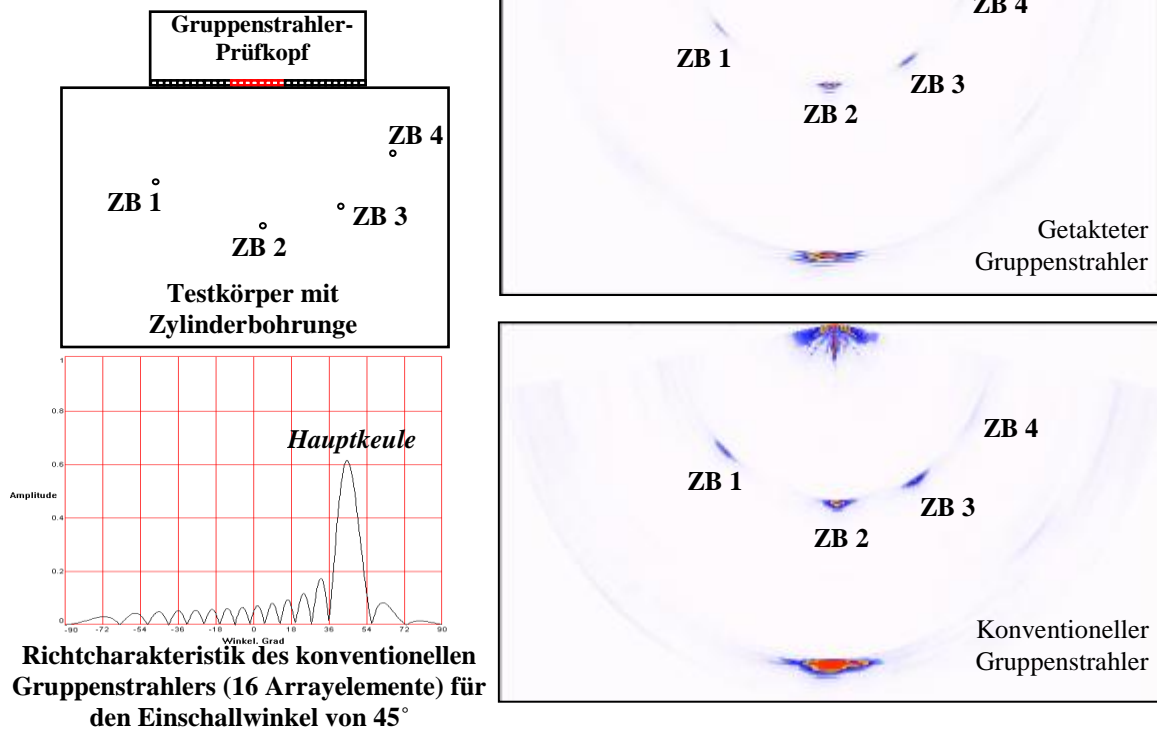


Abb. 8: Vergleich unter Erfüllung des ‚Sampling-Theorem‘

Der größte Vorteil der ‚SynFoc‘-Algorithmen ergibt sich aus dem Umstand, dass das Sampling-Theorem verletzt werden darf. Grund dafür ist, dass die Nebenkeulen einer Sensorgruppe, die das Sampling-Theorem nicht erfüllt, sich bei der ‚SynFoc‘-Rekonstruktion zu Null mitteln. Dieser Vorteil wird von uns unter der Bezeichnung ‚TOMOSAFT‘ genutzt [7]. Dies zeigen die Bilder 8 und 9.

Damit kann ohne Erhöhung des Aufwandes an Sensoren und Ultraschallkanälen die Apertur der Sensorgruppe vergrößert werden, wodurch auch in größere Bauteiltiefen fokussiert werden kann.

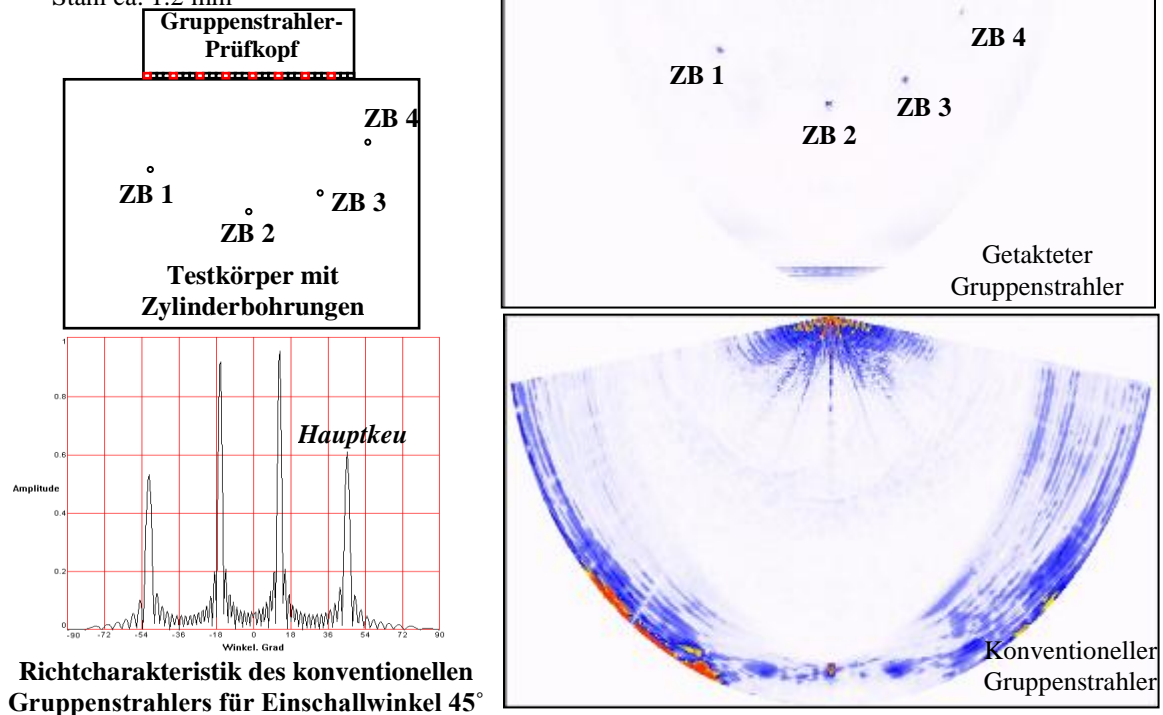
Erreicht wird damit bereits eine hohe Qualität der Bildgebung, wie Bild 9 zeigt. Die Detailauflösung wird im wesentlichen bestimmt durch die Apertur der Elemente der Sensorgruppe. Bemerkenswert ist die ‚Zeichnung‘ der Rückwand des Testkörpers.

Zusammenfassend gilt, dass die Bildgebung wesentlich verbessert wurde, wobei hohe Prüfgeschwindigkeiten möglich sind und die Systemkosten durch den Entfall der Phasenschieberelektronik und der möglichen Reduzierung der Anzahl der Gruppenelemente in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen bleiben.

Voraussetzung ist allerdings die Nutzung integrierter effizienter Algorithmen und einer maßgeschneiderten Rechnerarchitektur.



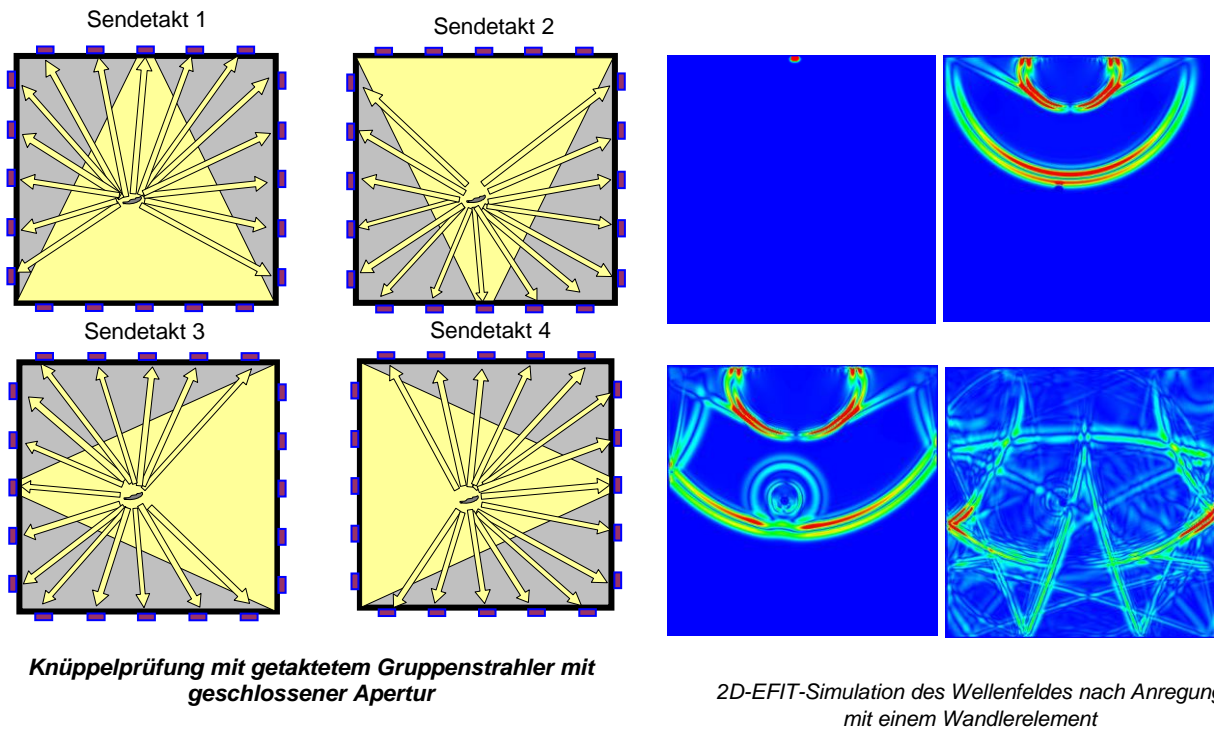
64-Element-Gruppenstrahler, 16  
 aktive Elemente mit einem  
 Elementabstand von 2.4 mm,  
 Prüffrequenz 5 MHz, Wellenlänge im  
 Stahl ca. 1.2 mm



**Abb. 9: Vergleich unter Verletzung des 'Sampling Theorem'**

Die nächsten Entwicklungsarbeiten betreffen die Qualifikation der Technik für die wichtigsten Regelwerke (z.B. Druckbehälterverordnung). Ebenfalls von praktischer Bedeutung ist die Entwicklung einer Simulationssoftware zur Ermittlung einer optimalen verteilten Apertur (Abb. 10). Es ist denkbar, dass praxisnah ingenieurmäßige Regeln für die Prüfplanung formuliert werden können.

Die Technik bietet auch das Potential, die Werkstoffanomalie quantitativ über die Richtungsabhängigkeit des gestreuten Schallfeldes zu charakterisieren. Entsprechende Ansätze werden derzeit formuliert.



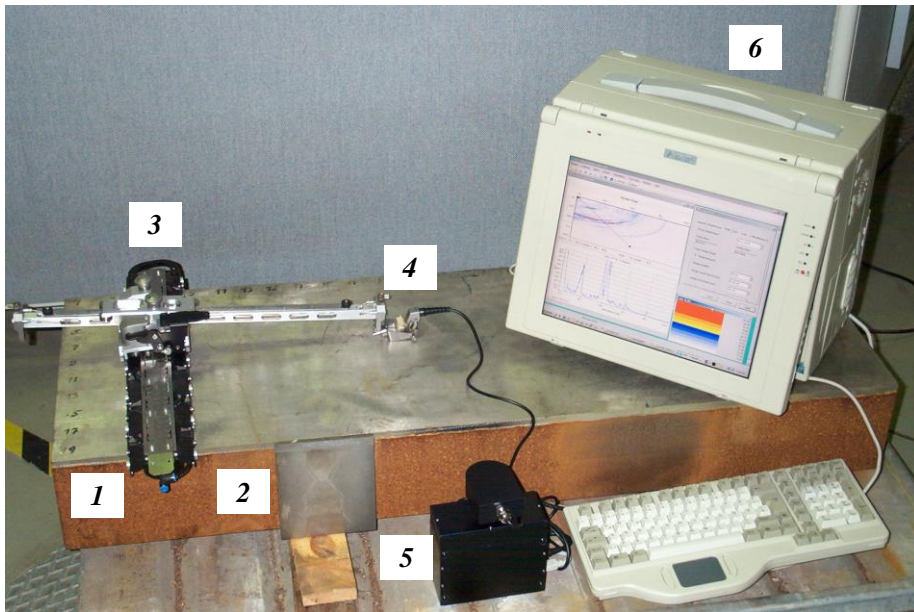
**Abb. 10: Schematische Darstellung des TOMOSAFT-Prinzips und EFIT-Simulation der Wellenausbreitung nach Anregung mit einem Wandlerelement**

#### 4. Analyseprüfungen an Schweißnahtverbindungen

Basiert auf dem getaktetem Gruppenstrahlerprinzip wurde im IZFP ein Analysesystem für Ultraschallprüfungen an Schweißnähten aufgebaut (Abb. 11): der Prüfkopf wird von einem Manipulator über den Schweißnahtbereich geführt und es werden 2- und 3-dimensionale Bildrekonstruktionen (Ultraschall-Laufzeittomografie) nach dem Kirchhoff-Migrationsalgorithmus erstellt.

Die Ultraschallprüfung kann u. a. mit herkömmlichen Gruppenstrahlerwandlern mit entsprechenden Vorsatzkeilen durchgeführt werden. Neben den besonderen Funktionen zur Anwendung der getakteten Gruppenstrahler-Technik bietet das Elektronikmodul auch die uneingeschränkte Funktion der konventionellen Gruppenstrahlertechnik. Das System ist kommerziell erhältlich.

Dabei werden regelwerkskonform alle übliche Projektionsdarstellungen (A-, B-, C-, D-Bilder) ermöglicht und die entsprechende Software für ihre Auswertungen (Cursors, Zoom-Funktionen usw.) bereitgestellt. Durch die tomografische, insbesondere dreidimensionale Abbildung von Materialungängen ergibt sich eine quantitative Qualität der Ultraschallprüfungen, die mit konventionellen Techniken nicht möglich wäre (Abb. 12).



- 1: Testkörper
- 2: Schweißnaht
- 3: Manipulator
- 4: Gruppenstrahler-Wandler
- 5: Sampling Phased Array Elektronik
- 6: Industrie-PC

Abb. 11: Portables Analysesystem auf Sampling Phased Array Basis

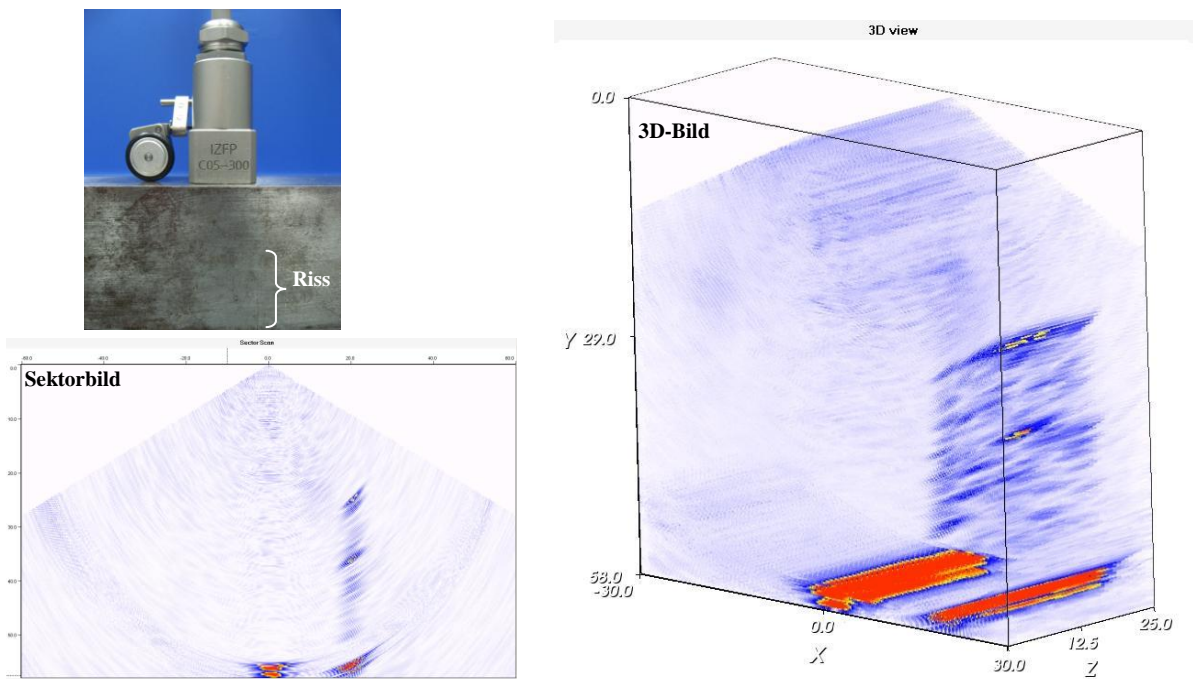


Abb. 12: 2D- und 3D-Abbildungen eines Risses

## 5. Prüfung von Turbinenwellen

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.

Ein Testkörper (Turbinenwelle mit Querbohrungen  $\varnothing 3 \text{ mm}$ ) wurde mit konventioneller und getakteter Gruppenstrahlertechnik angeschallt (Abb. 13). 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. Die synthetisch aufgebaute Apertur ist im Beispiel doppelt so groß wie die Apertur des 16-Element-Gruppenstrahlerprüfkopfes.

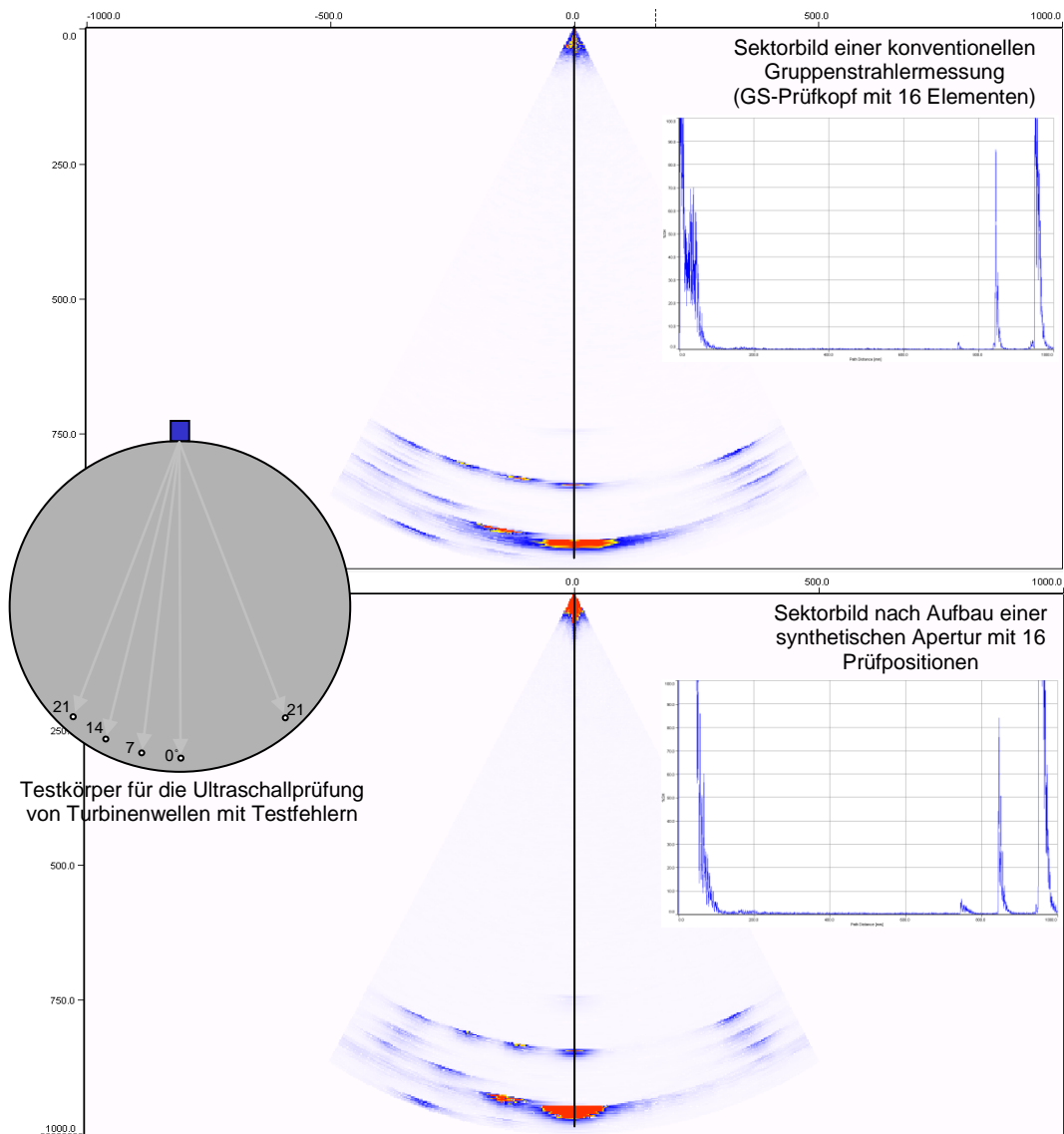
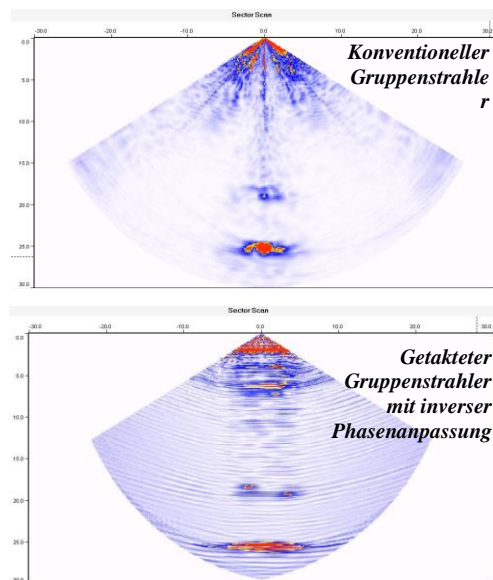


Abb. 13: Ergebnisse der Ultraschallprüfung an einer Turbinenwelle mit einem Durchmesser von 940 mm



## 6. Prüfung von anisotropen Materialien. Getakteter Gruppenstrahler mit inverser Phasenanpassung

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.



Mehrschichtige Kohlefaserstruktur mit natürlichen Fehlern

Werte der Steifigkeitsmatrix:

$$\begin{aligned} C_{11} &= 55.51 \text{ GPa} \\ C_{13} &= 1.80 \text{ GPa} \\ C_{33} &= 12.54 \text{ GPa} \\ C_{44} &= 6.00 \text{ GPa} \\ C_{66} &= 4.00 \text{ GPa} \end{aligned}$$

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 Schallaufzeiten von einem Bildpunkt zu einem Sensorelement werden dazu berechnet z.B. aus der Steifigkeitsmatrix oder auch unter Verwendung

Abb. 14: Prüfergebnisse am Testkörper vom Industriekunden experimentell erhaltener, richtungsabhängiger Schallgeschwindigkeiten. Dieses Verfahren kann als ‚inverse Phasenanpassung‘ [8] bezeichnet werden. Für die Berechnung der Schallausbreitung können die entsprechend dem Stand der Technik verfügbaren Algorithmen genutzt werden. In Abb. 14 und 15 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfung von mehrschichtigen Kohlefaser-Testkörpern dargestellt.

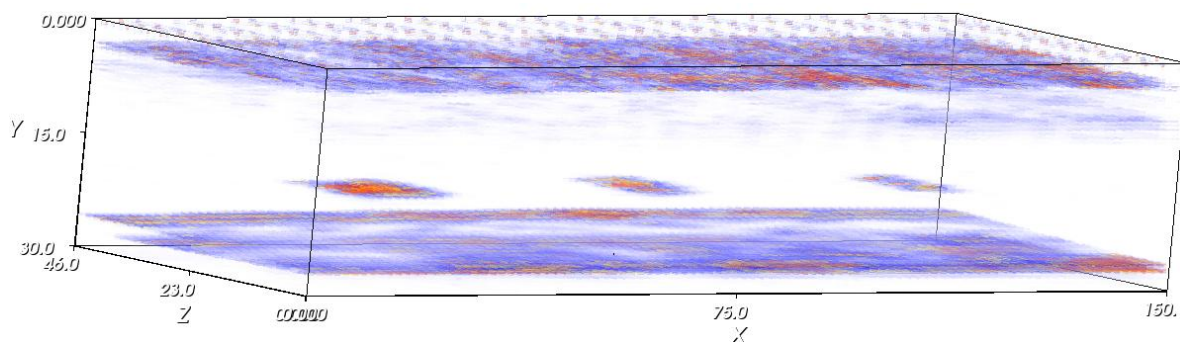


Abb. 15: Ergebnisse der Ultraschallprüfung an Testkörper aus Kohlefaser mit künstlichen Delaminationen

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 Abhängigkeit von den Anisotropieparametern des Prüflings.



## 7. Akustische Maus

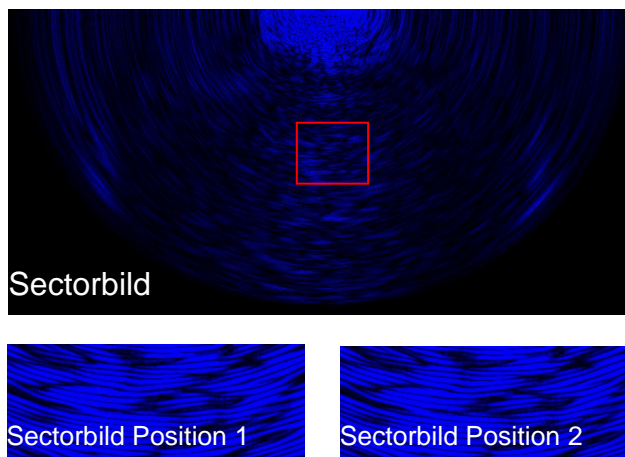
Führt man eine mechanisierte bzw. eine automatisierte Ultraschallprüfung, werden beim Abrastern einer Komponente ortsbezogenen Signale gemessen, die Informationen über den Oberflächenzustand und die Eigenschaften/Struktur im Volumen des Objektes enthalten. Üblicherweise werden die Sensorträger mit Hilfe von mechanischen Systemen bewegt, wobei integrierte Weggeber der Sensorposition messen, wodurch eine ortsbezogene Messdatenerfassung möglich wird. Diese erlaubt wiederum ggf. eine bildhafte Darstellung der Prüf- bzw. Messergebnisse für den abgetasteten Bereich.

Für handgeführte Prüfungen werden ebenfalls Weggebersysteme für eine bildhafte Darstellung entwickelt, da im Beispiel der Ultraschallprüfung selbst die übliche Bildrekonstruktion in Form von B-, C- und D-Bildern nur unter Kenntnis der Sensorposition möglich ist.

Die Mess- bzw. Prüfmechanik ist heute der dominierende Kostenfaktor einer mechanisierten oder automatisierten Prüfung. Ca. 70 % der Systemkosten entfallen auf die Handhabungstechnik, die in vielen Fällen aufgrund des Platzbedarfs nicht oder nur problematisch einsetzbar ist. Für manuell durchzuführende Prüfungen (ca. 70 % aller Ultraschallprüfungen) haben sich Weggebersysteme bzw. Systeme, die die Position des Sensors zu orten vermögen, aufgrund praktischer Probleme nicht durchgesetzt.

Die durch den Ultraschallwandler aufgenommenen Ultraschallsignale beinhalten Informationen über Geometrie des Prüfgegenstandes, seine Oberfläche, im Material vorhandene Ungängen und ggf. Materialstruktur. Diese Informationen können prinzipiell zur Ermittlung der aktuellen zwei- oder dreidimensionalen Koordinate des Ultraschallwandlers dienen. Das bedeutet, dass unter dem Einsatz von speziellen Signal- und Bildverarbeitungstechniken eine einfache und praktikable Erfassung der Sensorposition für die Fehlerortung und Bildgebung aus den aufgenommenen Ultraschallsignalen möglich ist.

Eine der neusten Entwicklungen des Fraunhofer-IZFP ist die Ultraschall-Technologie „Akustische Maus“ [9]. Dank speziell entwickelten Algorithmen der Signal- und Bildverarbeitung kann relative Verschiebung eines Sensorarrays allein aus Ultraschallinformation bestimmt werden. Dank SynFoc-Sampling Phased Array Rekonstruktionstechnik können u.a. hoch aufgelöste Ultraschallbilder im Nahfeld des Gruppenstrahlerwandlers mit sehr hoher Geschwindigkeit rekonstruiert und verarbeitet werden. Abbildungen des Strukturrauschens in verschiedene Zeitpunkte können durch Lösung des energetischen Funktional analysiert werden (Abb. 16). Dadurch können Positionen des Ultraschallwandlers ohne jegliche Weggeboervorrichtungen bestimmt werden.



Energetisches Funktional:

$$E(z) = \iint_{\Omega} \|I_1(x, y) - I_2(x + \alpha z, y)\|^2 dS$$

Euler-Lagrange Gleichung

$$\frac{\partial F}{\partial z} - \frac{d}{du} \frac{\partial F}{\partial z_x} - \frac{d}{dv} \frac{\partial F}{\partial z_y} = 0$$

$$0 = 2\alpha \cdot I_{2x}(x + \alpha z, y) \cdot (I_1(x, y) - I_2(x + \alpha z, y)) - \varphi \cdot \operatorname{div}(\Psi'(|\nabla z|^2) \nabla z)$$

„Time Marching Approach“

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 2\alpha \cdot I_{2x}(x + \alpha z, y) \cdot (I_1(x, y) - I_2(x + \alpha z, y)) - \varphi \cdot \operatorname{div}(\Psi'(|\nabla z|^2) \nabla z)$$

Abb. 16: Funktionsprinzip der akustischen Maus

## **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 zwei- und dreidimensionale Bildgebung unter Echtzeit-Bedingungen
3. Verbesserung der Prüfbarkeit von ‚schlecht‘ prüfbareren Materialien wie z.B. inhomogene anisotrope Werkstoffe (Kohlefaser, austenitische Stähle und Schweißverbindungen)
4. Erfüllung nationaler und internationaler Regelwerksanforderungen

## **Literaturliste**

1. Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Saarbrücken 2005 (Dissertation)
2. Kröning M., Hentschel D., von Bernus L., Bulavinov A., Reddy K. M.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall, Deutsches Patent Nr. DE 10 2004 059 856 B4 2006.09.14
3. Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M., von Bernus L.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall, Deutsches Patent Nr. DE 10 2005 051 781 A1 2007.05.03
4. Kröning M., Reddy K.M., Bulavinov A., Bernus L. von, Joneit D.; Jager W.: Sampling Phased Array: A New Method of Signal Processing and Image Reconstruction in Ultrasonic Non-Destructive Testing. In: Indian Institute of Metals: International Conference & Exhibition on Pressure Vessels and Piping 2006. Kalpakam : Indian Institute of Metals, 2006, B7-1
5. Chiao, R. Y., Thomas, L. J.: Analytic Evaluation of Sampled Aperture Ultrasonic Imaging Techniques for NDE. IEEE Transactions on Ultrasonics. Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 41, No. 4, July 1994
6. Jon F. Claerbout, Cecil and Ida Green Professor of Stanford University, EARTH SOUNDINGS ANALYSIS: Processing versus Inversion, March 23, 2004
7. Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M.: Verfahren und Vorrichtung zur bildgebenden Ultraschallprüfung an einem dreidimensionalen Werkstück, Deutsches Patent Nr. DE 10 2005 051 783 A1 2007.05.03
8. Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers, Deutsches Patent Nr. DE 10 2006 0003 978 A1 2007.08.09
9. L. v. Bernus, Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M., Yastrebova O., Kudalkar V.: Verfahren zur orts aufgelösten, zerstörungsfreien Werkstückuntersuchung, Deutsches Patent DE 10 2006 003 978 A1 2007.08.09