



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 003 978 A1** 2007.08.09

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 003 978.5**

(22) Anmeldetag: **27.01.2006**

(43) Offenlegungstag: **09.08.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 29/07 (2006.01)**
G01N 29/06 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(74) Vertreter:
**Rösler, U., Dipl.-Phys.Univ., Pat.-Anw., 81241
München**

(72) Erfinder:
**Kröning, Michael, Prof. Dr., 66123 Saarbrücken,
DE; Reddy, Krishna Mohan, 66125 Saarbrücken,
DE; Boulavinov, Andrei, Dipl.-Ing., 66125
Saarbrücken, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE10 2004 059856 A1
DE 33 46 534 A1
US2004/01 87 583 A1
US 51 15 673

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

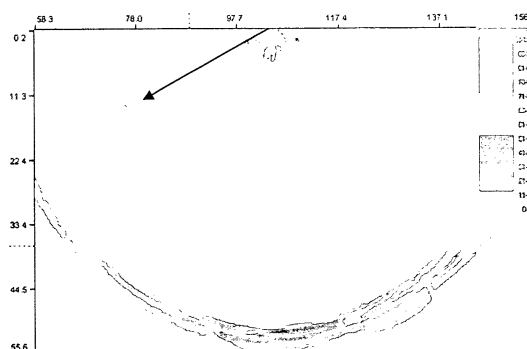
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers**

(57) Zusammenfassung: Beschrieben wird ein Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers mittels Ultraschall.

Die Erfindung zeichnet sich durch folgende Verfahrensschritte aus:

- Ermitteln oder Bereitstellen von den akustisch anisotropen Werkstoffbereich beschreibenden, richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften,
- Einkoppeln von Ultraschallwellen in den akustisch anisotropen Werkstoffbereich des Prüfkörpers,
- Empfangen von im Inneren des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit einer Vielzahl von Ultraschallwandlern,
- Auswerten von mittels der Vielzahl von Ultraschallwandlern generierten Ultraschallsignalen, derart, dass die Auswertung richtungsspezifisch unter Zugrundelegung der richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften erfolgt.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers mittels Ultraschall.

Stand der Technik

[0002] Zerstörungsfreie Ultraschallprüfverfahren an Prüfkörpern, die aus akustisch isotropen Vollmaterialien bestehen und zu Zwecken einer Fehlerprüfung durchgeführt werden, d.h. zum Auffinden von Rissen, Materialinhomogenitäten etc., sind hinlänglich bekannt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung derartiger Prüfverfahren ist die Forderung nach einer möglichst gleichartigen und geradlinigen Ausbreitung von innerhalb eines jeweiligen Prüfkörpers eingekoppelten Ultraschallwellen. Um dies zu erfüllen sollte das Material, aus dem ein jeweiliger Prüfkörper besteht, über das gesamte zu überprüfende Volumen schallakustisch konstante Eigenschaften verfügen, so beispielsweise eine isotrope Dichteverteilung und isotrope elastische Eigenschaften aufweisen. In Erfüllung dieser Voraussetzung ermöglichen diese Prüfverfahren einen zuverlässigen Fehlernachweis, eine exakte räumliche Fehlerortung sowie letztlich auch mittels geeigneter Ultraschallsignalauswerteverfahren die Realisierung einer Fehlerbildgebung, anhand der Form und Größe der Fehlerstelle erkennbar sind. Repräsentativ für eine Vielzahl derartiger Ultraschallprüfsysteme sei auf die DE 33 46 534 A1 verwiesen, aus der eine Ultraschall-Bilddarstellungseinrichtung hervorgeht, die einen Gruppenstrahler-Ultraschallprüfkopf vorsieht, der ein lineares Array aus Ultraschall-Einzelwandlerelementen umfasst, die unter Fortschreiten in Scan-Richtung mit vorgegebener Scan-Frequenz einzeln oder gruppenweise aktiviert werden. Die Qualität der Fehlerbildrekonstruktion, die letztlich auch die quantitativen Aussagen bezüglich Fehlerart, Fehlerlage und Fehlergröße bestimmt, hängt von einer Vielzahl von die Ultraschalleinkopplung in den Prüfkörper, die Ultraschallwellen-Detektion, sowie die empfangene Ultraschallsignale auswertenden Rekonstruktionstechniken bestimmende Parameter ab.

[0003] Die der bisherigen Ultraschallprüftechnik zugänglichen Materialien mit Ausbreitungsgeschwindigkeiten von akustischen Wellen, die unabhängig sind von ihrer Ausbreitungsrichtung, werden als akustisch isotrope Materialien bezeichnet. Hängen jedoch die Schallgeschwindigkeiten der in Materialien eingekoppelten Ultraschallwellen von ihren jeweiligen Ausbreitungsrichtungen ab, so werden diese Materialien anisotrop bezeichnet. Ein bekanntes, natürliches anisotropes Material ist beispielsweise Holz, das mittels gängiger Ultraschallprüftechniken,

wenn überhaupt nur mit Einschränkungen auf Werkstofffehler überprüft werden kann. Weitere anisotrope Werkstoffmaterialien stellen beispielsweise Faserverbund- oder geschichtete Werkstoffe dar, die bevorzugt in modernen Leichtbaukonstruktionen Anwendung finden. Grund für die unbefriedigende Prüfbarkeit derartiger anisotroper Materialien ist die strukturabhängige Art der Ausbreitung von Ultraschallwellen mit ortsabhängigen und materdichteabhängigen Schallgeschwindigkeiten. Hinzu kommt, dass anders als in isotropen Materialien, in denen lediglich zwei Arten von Schwingungsmoden von Volumenwellen, nämlich longitudinale und transversale Moden, auftreten können, in anisotropen Materialien mit drei Ausbreitungsmoden zu rechnen ist, zumal bereits zwei orthogonale Transversalmoden existieren können. In isotropen Materialien ist die Schwingung des longitudinalen Modes stets parallel, die des transversalen Modes stets senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientiert. In anisotropen Materialien hingegen existieren so genannte quasi-longitudinale und quasi-transversale Wellen, deren Polarisationsabweichungen sogar bei geringen Schallgeschwindigkeitsunterschieden bereits beträchtliche Effekte bei der Fehlerbildrekonstruktion verursachen können.

[0004] Aber auch die Untersuchung an Prüfkörpern, die aus unterschiedlichen akustisch isotropen Materialien bestehen, bspw. schichtförmig zusammengesetzte Prüfkörper, vermag mit den derzeit bekanntesten Prüfverfahren keine exakte räumliche Fehlerortung innerhalb des Prüfkörpers zu gewährleisten, zumal die Ultraschallwellen an den Grenzflächen aneinander stoßender Materialschichten längs ihrer Ausbreitungsrichtung gebrochen werden. Bereits bei der Ultraschallprüfung in Tauchtechnik treten prinzipiell gesehen derartige, an Grenzflächen zwischen z.B. Wasser und Stahl hervorgerufene Brechungseffekte auf, wodurch die vorstehend beschriebene Fehlerlokalisierung zum Teil erheblich eingeschränkt wird, zumal Brechungs- oder Beugungseffekte selbst an Grenzschichten zwischen zwei ansonsten isotropen Werkstoffen, eine Ortung von Fehlern nahezu unmöglich macht. Gründe dafür sind die fehlende Kenntnis des Schalllaufweges, der nicht mehr als geradlinig angenommen werden kann und damit auch die der effektiven Schallgeschwindigkeit. Auch der Fehlernachweis selbst kann unter Verwendung einer begrenzten Zahl von Einschallwinkeln mangelhaft sein, zumal der Schall bedingt durch Beugungseffekte den Fehlerort nicht erreichen kann. Aus diesem Grund werden sicherheitsrelevante Strukturwerkstoffe mit einer möglichst großen Anzahl von Einschallwinkeln geprüft, wobei die so genannte Gruppenstrahlertechnik, wie sie der vorstehend zitierten DE 33 46 534 A1 entnehmbar ist, eingesetzt.

[0005] Um einen quantitativen Eindruck von dem Einfluss akustisch anisotroper Materialien auf das

tatsächliche Ultraschallwellen-Ausbreitungsverhältnis zu erhalten, sei auf das in **Fig. 1a** dargestellte Prüfergebnis verwiesen, das mittels eines Ultraschallgruppenstrahler-Prüfkopfes US an einem aus Kohlenfaserverbundwerkstoff bestehenden Prüfkörper PK gewonnen worden ist, gemäß der in **Fig. 3** skizzierten Prüfsituation. Bei dem mittels des Ultraschallwellen-Gruppenstrahlerprüfkopfes US untersuchten Prüfkörpers PK handelt es sich um einen über eine ebene Prüfkörperoberfläche PKO verfügenden, aus Kohlenfaserverbundwerkstoff bestehenden Prüfkörper PK, mit einer Faserorientierung von 15° zur Prüfkörperoberfläche PKO geneigt. Die Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung ist in etwa 3 mal größer als die in der dazu senkrechten Ausbreitungsrichtung. Ferner ist innerhalb des Prüfkörpers PK eine als Modellreflektor eingebrachte Fehlerstelle FS eingebracht, die sich unmittelbar unterhalb des auf der Prüfkörperoberfläche PKO aufliegenden Ultraschallwellen-Gruppenstrahlers US befindet.

[0006] In **Fig. 1a** ist ein zweidimensionales Sektorbild eines konventionell betriebenen Ultraschallgruppenstrahlers US dargestellt, d.h. sämtliche Ultraschallwandler dienen gemeinsam als Ultraschallwellensender und vermögen die innerhalb des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen zu detektieren. Anhand des in **Fig. 1a** dargestellten Sektorbildes ist entnehmbar, dass der Schalleinkoppelort, d.h. der Ort des Ultraschallwellen-Gruppenstrahlerprüfkopf, mittig zur Abszisse des dargestellten Koordinatensystems angeordnet ist. Die im Bereich der Schalleinkopplung auftretenden Empfangssignale rühren von Einkoppeleffekten nahe der Prüfkörperoberfläche her, stellen selbst jedoch keine Fehler innerhalb des Prüfkörpers dar. Die von der Einkoppelstelle beabstandeten halbkreisförmig angeordneten Reflexions-signale stellen Reflexionsereignisse an der Rückwand des Prüfkörpers dar, die unter nahezu allen Einschallwinkeln auftreten. Durch die durch den Prüfkörper vorgegebene Messsituation hinsichtlich der Lage der künstlich in den Prüfkörper eingebrachten Fehlerstelle, müsste im Falle eines aus einem isotropen Material bestehenden Prüfkörpers, der Reflektorort exakt unterhalb des erkennbaren Schalleintrittspunktes liegen. Im Sektorbild gemäß **Fig. 1a** erhält man jedoch keine Anzeige unter 0° , sondern vielmehr ein Reflektorereignis R unter Winkeln um die 45° . Dieses Prüfergebnis macht deutlich, dass das anisotrope Material des Prüfkörpers zu einer verfälschten Lageinformation einer tatsächlich im Prüfkörper vorhandenen Fehlerstelle führt.

[0007] Auch eine Einkopplung der Ultraschallwellen in Richtung der Faserstruktur führt zu keinem anderen zufrieden stellenden Auswertergebnis.

[0008] In **Fig. 2a** ist hierzu ein Sektorbild eines konventionell betriebenen Gruppenstrahlers mit Abstrahlrichtung längs zur Richtung der Faserstruktur

dargestellt, aus dem entnommen werden kann, dass aufgrund von Beugungserscheinungen unter nahezu allen Einschallwinkeln der künstlich in den Prüfkörper eingebrachte Testreflektor zu sehen ist. Dieser stellt sich im Sektorbild gemäß **Fig. 2a** als Halbkreis mit kleinerem Radius dar. Es ist ersichtlich, dass der grundsätzliche Nachweis des Vorhandenseins von Fehlstellen zwar möglich ist, jedoch sind eine Lokalisierung von Fehlstellen sowie auch eine Charakterisierung hinsichtlich Größe und Art der Fehlstelle nicht möglich.

Darstellung der Erfindung

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörper mittels Ultraschall derart anzugeben, dass eine zuverlässige Fehlerstellendetektion mit genauer Angabe über die räumlich exakte Lage, Art und Größe der innerhalb des akustisch anisotropen Werkstoffbereiches befindlichen Fehlerstelle möglich wird.

[0010] Die Lösung der der Erfindung zugrunde liegenden Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Den Erfindungsgedanken vorteilhaft weiterbildende Maßnahmen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der weiteren Beschreibung, insbesondere unter Bezugnahme auf die Ausführungsbeispiele zu entnehmen.

[0011] Lösungsgemäß zeichnet sich ein Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers mittels Ultraschall durch die Abfolge folgender Verfahrensschritte aus.: Zunächst gilt es, die den akustisch anisotropen Werkstoffbereich beschreibenden, richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften zu ermitteln bzw. durch Rückgriff auf einen diesbezüglich bereits vorliegenden Datenbestand entsprechend bereitzustellen. Da das Schallausbreitungsverhalten innerhalb von anisotropen Werkstoffbereichen aufweisenden Prüfkörpern beispielsweise auf der Basis elastodynamischer Ansätze im Detail verstanden und beschrieben werden kann, ist es möglich, diesbezügliche detaillierte Kenntnisse vorzugsweise im Rahmen experimenteller Untersuchungen über die schallakustischen Eigenschaften nahezu beliebiger anisotroper Prüfkörper zu gewinnen und diese mittels geeigneter mathematischer Darstellungen, wie beispielsweise im Rahmen so genannter Steifigkeitsmatrizen, für weiterführende Anwendungen verfügbar zu machen. Insbesondere können aus derartigen Steifigkeitsmatrizen richtungsspezifische Schallausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb jeweils zu untersuchender Prüfkörper entnommen werden.

[0012] Mit Hilfe dieser, die schallakustischen Eigen-

schaften eines zu untersuchenden Prüfkörpers beschreibenden Kenntnisse ist es möglich, durch Einkoppeln von Ultraschallwellen in den akustisch anisotropen Werkstoffbereich des Prüfkörpers und entsprechenden Empfang von im Inneren des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit einer Vielzahl von Ultraschallwandlern die hierdurch detektierten Ultraschallsignale richtungsselektiv unter Zugrundelegung der richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften auszuwerten.

[0013] Bei der lösungsgemäßen richtungsselektiven Ultraschallsignalauswertung werden die Phasenbeziehungen einzelner unter unterschiedlichen Detektionsrichtungen durch entsprechende Reflexionsereignisse innerhalb des Prüfkörpers herrührende Elementarwellen erfasst. Der Empfang der Ultraschallwellen erfolgt gleichsam dem Aussenden und Einkoppeln von Ultraschallwellen in den Prüfkörper mittels eines Ultraschallwellen-Gruppenstrahlerprüfkopfes, wobei die richtungsselektive Ultraschallwellenauswertung unter Anwendung eines Signalauswerteverfahrens erfolgt, das im Weiteren erläutert wird. Unter Berücksichtigung der schallakustischen Anisotropie der innerhalb des Prüfkörpers vorhandenen Werkstoffbereiche erfolgt letztlich eine Anpassung des auszuwertenden detektierten Ultraschallwellenfeldes derart, so dass eine quasi Standardprüfungssituation geschaffen wird, wie sie auch bei der Auswertung von Ultraschallsignalen durchgeführt wird, die aus akustisch isotropen Prüfkörpern entstammen.

[0014] Hierzu werden Schalllaufzeiten berechnet, die jeweils eine Ultraschallwelle benötigt, vom Ort ihrer Entstehung, der dem Einkoppelort an der Prüfkörperoberfläche entspricht und an dem ein als Sender dienendes Ultraschallwandlerelement vorgesehen ist, zu einem innerhalb eines zu rekonstruierenden Prüfkörperbereiches befindlichen Raumpunkt und zurück an den Ort eines Empfängers unter Berücksichtigung der anisotropen Werkstoffeigenschaften bzw. elastischen Materialkonstanten.

[0015] Um eine richtungsselektive Auswertung der innerhalb des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit dem Anspruch einer weitgehend vollständigen Volumenerfassung des Prüfkörpers durchführen zu können, wird ein mit einer Anzahl n Ultraschallwandler aufweisender Ultraschall-Gruppenstrahlerprüfkopf auf eine Oberfläche des Prüfkörpers aufgesetzt, über die sowohl Ultraschallwellen in den Prüfkörper eingekoppelt sowie auch aus dem Prüfkörper zum Nachweis entsprechender reflektierter Ultraschallwellen ausgekoppelt werden.

[0016] Die Ultraschallwandler werden vorzugsweise direkt oder mittels geeigneter Koppelmittel an der Oberfläche des Prüfkörpers appliziert. Dabei können die Ultraschallwandler ungeordnet oder geordnet in

Form von eindimensionalen Arrays (längs einer Reihe), von zweidimensionalen Arrays (feldförmig) oder von dreidimensionalen Arrays (in Abhängigkeit von der dreidimensionalen Oberfläche des Prüfkörpers) an der Oberfläche des Prüfkörpers angebracht werden.

[0017] Die n Ultraschallwandler eignen sich vorteilhafterweise jeweils dazu Ultraschallwellen in den Prüfkörper einzukoppeln als auch Ultraschallwellen zu empfangen, d.h. sie werden sowohl als Ultraschallsender und Ultraschallempfänger eingesetzt bzw. angesteuert. Der Einsatz ausschließlicher Ultraschallsender und Ultraschallempfänger ist ebenfalls denkbar, dies führt jedoch bei gleicher räumlicher Auflösung der Messergebnisse zu einer größeren Anzahl von zu applizierenden Ultraschallwandlern.

[0018] Vorzugsweise eignen sich als Ultraschallwandler piezoelektrische Wandler, aber auch der Einsatz von Wandlern, die auf elektromagnetischen, optischen oder mechanischen Wirkprinzipien beruhen, ist möglich.

[0019] In vorteilhafter Weise sind die n Ultraschallwandler in einem manuell handhabbaren Ultraschallprüfkopf zusammengefasst, der eine einfache Anwendung und Applizierung an die Prüfkörperoberfläche erlaubt. Andere Applikationen der Ultraschallwandler, bspw. an gegenüberliegenden Oberflächen des Prüfkörpers ergeben sich in Abhängigkeit von Form und Größe des Prüfkörpers sowie der jeweils gestellten Untersuchungsaufgabe. Es hat sich gezeigt, dass mit dem lösungsgemäßen Verfahren eine optimale räumliche Auflösung der Messergebnisse erzielt werden kann, wenn die Zahl der vorzusehenden Ultraschallwandler gleich oder größer als 16 gewählt wird.

[0020] In einem zweiten Schritt wird aus der Gesamtzahl der n Ultraschallwandler ein erster Ultraschallwandler oder eine erste Gruppe von Ultraschallwandlern ausgewählt, wobei im Falle der Auswahl einer Gruppe von Ultraschallwandlern die Anzahl i der der Gruppe zugehörigen Ultraschallwandler kleiner als die Gesamtzahl n aller Ultraschallwandler sein sollte.

[0021] Die Festlegung der Anzahl i der US-Sender bestimmt die pro Aktivierung der US-Sender in den Prüfkörper eingekoppelte elastische Energie, unter der Voraussetzung, dass die i US-Sender zeitgleich aktiviert werden. Je größer die Anzahl aller gleichzeitig aktiven Sender gewählt wird, umso höher ist die in den Prüfkörper eingekoppelte elastische Energie. Ferner erfolgt die Festlegung von i Ultraschallwandlern als Sender in vorteilhafter Weise derart, dass i unmittelbar benachbart angeordnete Ultraschallwandler, möglichst als flächig zusammenhängendes Ultraschallsenderarray ausgewählt werden. Unter

der Voraussetzung, dass alle Sender zeitgleich senden, bestimmen die Anzahl i der US-Sender und die konkrete Zusammensetzung der Sendergruppe, insbesondere deren Anordnung auf der Prüfkörperoberfläche, zudem die Gesamtabstrahlcharakteristik (Apertur) der Sendergruppe und darüber hinaus die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen der Messungen.

[0022] Im Weiteren wird der erste Ultraschallwandler, d.h. $i = 1$, oder alle i der ersten Gruppe angehörigen Ultraschallwandler zum Aussenden von Ultraschallwellen aktiviert, die in den Prüfkörper eingekoppelt. An Störstellen innerhalb des Prüfkörpers oder an den jeweiligen Einkoppelbereichen gegenüberliegenden Prüfkörperoberflächen werden die Ultraschallwellen reflektiert und gelangen wieder zurück an den Oberflächenbereich der n auf der Prüfkörperoberfläche applizierten Ultraschallwandler, von denen alle n oder nur ein begrenzter Teil m die Ultraschallwellen empfängt, wobei die Anzahl m stets größer sein sollte als die Anzahl i der am Ultraschallaussenden beteiligten Ultraschallwandler.

[0023] Nach jedem einzelnen Messtakt werden die von den m als US-Empfänger dienenden Ultraschallwandler oder maximal von allen n US-Wandlern empfangenen Ultraschallwellen in Ultraschallsignale umgewandelt und abgespeichert, d.h. einer entsprechenden Speichereinheit zugeführt und dort gespeichert.

[0024] Alternativ zu einer zeitgleichen Aktivierung von i ausgewählten, einer Gruppe zugehörigen und als US-Sender dienenden Ultraschallwandler, ist es denkbar die US-Sender phasenverschoben, d.h. teilweise oder vollständig zeitversetzt anzuregen. Dadurch kann, wie vorstehend i.V.m. dem Phased Array-Prinzip beschrieben, die Einschallrichtung bzw. die Fokussierung der elastischen Energie der Ultraschallwellen auf einen bestimmten Volumenbereich innerhalb des Prüfkörpers vorgenommen werden. Auch lässt sich damit u. a. die Apertur der i US-Sender optimiert auf bestimmte Einschallrichtungen oder Fokussierungen einstellen.

[0025] Grundsätzlich ist es nicht erforderlich die als Sender dienenden Ultraschallwandler senderspezifisch zu modulieren, d.h. alle US-Sender werden identisch aktiviert. Aus Gründen einer möglicherweise vereinfachten oder speziellen Auswertung der Messsignale könnte es vorteilhaft sein, die empfangenen Messsignale den jeweiligen US-Sendern zuzuordnen. Hierfür werden die i einer Gruppe zugehörigen Ultraschallwandler moduliert aktiviert, d.h. jeder einzelne Ultraschallwandler wird mit einer unterscheidbaren Modulation aktiviert, so dass die in den Prüfkörper eingekoppelten Ultraschallwellen senderspezifisch detektiert werden können.

[0026] Nach Durchführung eines oder mehrerer Messtakte erfolgt eine geänderte Auswahl von Ultraschallwellen erzeugenden US-Sender. – Aus Gründen einer besseren Messempfindlichkeit bietet es sich an mehrere Messtakte mit einer gleich bleibenden US-Senderkonstellation durchzuführen, um im Wege statistischer Signalauswertung ein verbessertes Signal-/Rauschverhältnis zu erhalten. – Im Falle jeweils eines einzigen als US-Sender dienen Ultraschallwandlers wird ein anderer Ultraschallwandler zum Aussenden von Ultraschallwellen ausgewählt. Vorzugsweise wird ein Ultraschallwandler ausgewählt, der unmittelbar benachbart zu jenem Ultraschallwandler liegt, der zuletzt aktiviert worden ist. Im Falle mehrerer, zu einer Gruppe zusammengefasster Ultraschallwandler gilt es erneut eine Gruppe von Ultraschallwandlern zu bilden, deren Anzahl i zwar identisch, jedoch deren Zusammensetzung sich von jener zuvor gewählten Zusammensetzung unterscheiden sollte, zumindest in einem Ultraschallwandler.

[0027] Auf diese Weise gelingt es den Prüfkörper aus unterschiedlichen Einkoppelbereichen mit Ultraschallwellen zu beschallen. Gleichsam dem ersten Messtakt oder dem ersten Messzyklus, der sich aus mehreren ersten Messtakten zusammensetzt, werden auch mit der neuen US-Senderkonstellation die reflektierten Ultraschallwellen mit allen n Ultraschallwandler oder einem Teil m der Ultraschallwandler empfangen und in Ultraschallsignale umgewandelt, die letztlich ebenfalls abgespeichert werden. Alle n oder m für den Empfang von Ultraschallwellen dienenden Ultraschallwandler verbleiben trotz veränderter US-Senderkonstellationen unverändert, um eine möglichst einfache Messsignalauswertung nachträglich zu ermöglichen, wie dies im Weiteren noch zu entnehmen ist.

[0028] Der vorstehend beschriebenen Verfahrensschritte der wiederholten Aktivierung eines weiteren Ultraschallwandlers oder einer Gruppe von Ultraschallwandlern mit einer geänderten Zusammensetzung an Ultraschallwandlern sowie des Empfangs sowie Abspeicherung der gewonnenen Messsignale werden vorgebar oft wiederholt, um auf diese Weise das Durchschallungs- bzw. Reflexionsvermögen des Prüfkörpers aus einer Vielzahl, vorzugsweise aus allen möglichen Einschallungspositionen zu ermitteln.

[0029] Wird bspw. lediglich ein Ultraschallwandler, d.h. $i = 1$, als US-Wandler aktiviert, so können maximal n Messtakte oder n Messzyklen, bestehend jeweils aus einer wählbaren Anzahl von Messtakten, durchgeführt werden. Im Falle der Aktivierung einer aus i Ultraschallwandler bestehenden Gruppe können maximal alle i Permutationen aus n vorhandenen Ultraschallwandler durchgeführt werden.

[0030] Als Resultat der Durchführung der vorste-

henden Verfahrensschritte wird eine Vielzahl der pro Messtakt bzw. Messzyklus abgespeicherten Messsignale gewonnen, die es im Weiteren unter Maßgabe einer zielführenden Prüfkörperuntersuchung zu analysieren gilt. Ein besonderer Aspekt kommt der Möglichkeit der nachträglichen Auswertung der abgespeicherten Messsignale zu nach Durchführung der eigentlichen Vermessung des Prüfkörpers. Die Auswertung der Ultraschallsignale erfolgt sozusagen offline mit einem Rekonstruktionsalgorithmus, der unter Maßgabe eines virtuell vorgebbaren Einschallwinkels und/oder einer virtuellen Fokussierungen der eingekoppeltem Ultraschallwellen in den Prüfkörper ausgewählt und auf die abgespeicherten Ultraschallsignale angewendet wird. Mit Hilfe derartiger Rekonstruktionsalgorithmen können aus den gespeicherten Ultraschallsignalen synthetisch dreidimensionale Abbilder der Durchschallungs- bzw. Reflexionseigenschaften des Prüfkörpers errechnet werden, ohne, dass es zusätzlicher weitere Ultraschallmessungen bedarf. Dieses Rekonstruktionsprinzip basiert auf der Anwendung der Synthetic Apertur Focussing Technique (SAFT), die darin besteht, dass alle empfangenen Ultraschallsignale möglichst auf eine gemeinsame Zeitachse projiziert werden. Dabei werden alle von einem bestimmten Reflektor bzw. von einer bestimmten Fehlerstelle reflektierten Ultraschallsignale unter Berücksichtigung der anisotropen Schallausbreitungseigenschaften des Prüfkörpermaterials und einer damit verbundenen Phasen Anpassung phasengleich addiert werden. Eine nachträgliche Rekonstruktion beliebiger Einschallwinkel ergibt sich durch eine phasenversetzte Addition der Empfangssignale von verschiedenen Ultraschallempfängern. Durch die off-line Auswertung ist man in der Lage nahezu jeden Einschallwinkel synthetisch zu rekonstruieren und damit einen Ultraschallschwenk („Sweep“) durch den Datensatz durchzuführen.

[0031] Mit Hilfe der vorstehend beschriebenen Ultraschallprüftechnik unter Verwendung eines so genannten getakteten Gruppenstrahlersystems und einer lösungsgemäß vorgeschlagenen Signalauswertung unter Berücksichtigung der materialeigenen, schallakustisch anisotropen Werkstoffeigenschaften des Prüfkörpers können eine Reihe von Vorteilen im Prinzip der so genannten inversen Phasen Anpassung erzielt werden:

So ermöglicht die getaktete Gruppenstrahlertechnik mit inverser Phasen Anpassung einen Fehlernachweis sowie eine Fehlerbildrekonstruktion für anisotrope Werkstoffe mit einer Qualität und Zuverlässigkeit, die jener Ultraschalltechnikuntersuchung in herkömmlicher Weise an isotropen Werkstoffen entspricht.

[0032] Je nach Wahl der Anzahl der sendenden Ultraschallwandler, des Abstandes sowie der Anordnung des Sensorsystems können Optimierungen in Abhängigkeit von den Anisotropie-Parametern des

zu untersuchenden Prüfkörpers vorgenommen werden.

[0033] Auch eine Ultraschallprüfung in Tauchtechnik ist mit Hilfe des lösungsgemäßen Verfahrens zur Untersuchung heterogener bzw. schallakustisch anisotroper Materialien möglich. Durch die schallakustische Ankopplung über eine Flüssigkeitsschicht zwischen Gruppenstrahlerkopf und zu untersuchender Prüfkörperoberfläche sind dem Verfahren auch Prüfkörpergeometrien mit kompliziert gestalteten Oberflächengeometrien zugänglich. Diese Möglichkeit erleichtert die Herstellung und den Einsatz des Prüfsystems zu geringen Kosten und geringem sensortechnischen Aufwand.

Kurze Beschreibung der Erfindung

[0034] Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen exemplarisch beschrieben. Es zeigen:

[0035] [Fig. 1a](#), b Sektorbilddarstellungen durch einen anisotropen Prüfkörper,

[0036] [Fig. 2a](#), b Sektorbilddarstellungen durch einen anisotropen Prüfkörper und

[0037] [Fig. 3](#) Schematische Darstellung der experimentellen Prüfsituation.

Wege zur Ausführung der Erfindung, gewerbliche Verwendbarkeit

[0038] Wie bereits vorstehend erwähnt, kann aus dem Sektorbild gemäß [Fig. 1a](#) keine Lokalisierung einer Fehlstelle innerhalb eines anisotropen Prüfkörpers vorgenommen werden, lediglich das Vorhandensein einer Fehlstelle ist durch das Rückstreusignal FS erkennbar. Wird hingegen das lösungsgemäße Verfahren wie eingangs beschrieben eingesetzt und die aus sämtlichen Volumenbereichen detektierten Ultraschallwellen unter Maßgabe ihrer richtungsspezifischen Schallwellen-Ausbreitungsgeschwindigkeiten ausgewertet, so kann, selbst bei anisotroper Materialbeschaffenheit des zu untersuchenden Prüfkörpers PK, Lage, Form und Größe einer Fehlstelle FS exakt zur Darstellung gebracht werden. In [Fig. 1b](#) zeigt sich unmittelbar senkrecht unter dem Ort der Schallwelleneinkopplung die räumliche Lage der Fehlstelle FS, wie es auch in der in [Fig. 3](#) dargestellten Prüfsituation der Fall ist.

[0039] Auch im Falle einer Einstellung von Ultraschallwellen in Richtung der Faserstruktur ist es mit Hilfe des lösungsgemäßen Verfahrens möglich, die exakte Lage der Fehlstelle FS gemäß Sektorbilddarstellung in [Fig. 2b](#) zu erfassen und zur Darstellung zu

bringen, ganz im Gegensatz zur Anwendung bisher bekannter Ultraschallprüftechniken, die zu einer Sektorbilddarstellung gemäß [Fig. 2a](#) führen, die in der Beschreibungseinleitung ausführlich erläutert worden ist.

Bezugszeichenliste

FS Fehlerstelle
 US Ultraschall-Gruppenstrahlerprüfkopf
 PK Prüfkörper
 PKO Prüfkörperoberfläche

Patentansprüche

1. Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers mittels Ultraschall, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

- a) Ermitteln oder Bereitstellen von den akustisch anisotropen Werkstoffbereich beschreibenden, richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften,
- b) Einkoppeln von Ultraschallwellen in den akustisch anisotropen Werkstoffbereich des Prüfkörpers,
- c) Empfangen von im Inneren des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit einer Vielzahl von Ultraschallwandlern,
- d) Auswerten von mittels der Vielzahl von Ultraschallwandlern generierten Ultraschallsignale derart, dass die Auswertung richtungsspezifisch unter Zugrundelegung der richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die richtungsspezifischen Schallausbreitungseigenschaften die richtungsspezifischen Schallausbreitungsgeschwindigkeiten darstellen und aus einer den wenigstens einen akustisch anisotropen Werkstoffbereich beschreibenden Steifigkeitsmatrix berechnet oder im Wege einer experimentellen richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeitsmessung ermittelt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Einkoppeln und Empfangen von Ultraschallwellen in der nachfolgenden Weise erfolgt:

- a) Vorsehen von n Ultraschallwandlern an einer Oberfläche eines Prüfkörpers,
- b) Auswählen und Aktivieren eines ersten oder einer ersten Gruppe mit i Ultraschallwandlern aus den n Ultraschallwandlern zum Aussenden von Ultraschallwellen in den Prüfkörper, mit $i < n$,
- c) Empfangen der im Inneren des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit m Ultraschallwandlern, mit $i < m \leq n$, und Generieren von m Ultraschallsignalen,
- d) Abspeichern der m Ultraschallsignale,
- e) Auswählen und Aktivieren eines anderen oder ei-

ner anderen Gruppe mit i Ultraschallwandlern, die sich wenigstens durch einen Ultraschallwandler von der ersten Gruppe unterscheidet zum Aussenden von Ultraschallwellen und Durchführen der Verfahrensschritte c) und d),

f) Wiederholtes Ausführen des Verfahrensschrittes e) mit jeweils der Auswahl eines weiteren Ultraschallwandlers oder einer weiteren Gruppe von i Ultraschallwandlern unter der Maßgabe, dass sich der weitere Ultraschallwandler oder die weitere Gruppe mit i Ultraschallwandlern von einem bereits ausgewählten Ultraschallwandler oder von einer bereits ausgewählten Gruppe mit i Ultraschallwandlern unterscheidet, und

e) Auswerten der abgespeicherten Ultraschallsignale.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Vorsehen von n Ultraschallwandlern in einer ein-, zwei- oder dreidimensionalen arrayförmigen Anordnung erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Aktivieren aller i einer Gruppe zugehörigen Ultraschallwandler zeitgleich, d.h. ohne Phasenverschiebung erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Aktivieren der i einer Gruppe zugehörigen Ultraschallwandler moduliert durchgeführt wird, d.h. jeder einzelne Ultraschallwandler wird mit einer unterscheidbaren Modulation aktiviert, so dass die in den Prüfkörper eingekoppelten Ultraschallwellen Senderspezifisch detektiert werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Auswählen der i einer Gruppe zugehörigen Ultraschallwandler derart durchgeführt wird, dass unmittelbar benachbarte Ultraschallwandler gemäß eines Linear- oder Flächenarrays ausgewählt werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass $n \geq 16$ gewählt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass Ultraschallwandler eingesetzt werden, die auf einem elektromagnetischen, optischen und/oder mechanischen Wirkprinzip beruhen, insbesondere auf dem piezoelektrischen Wandlerprinzip beruhen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Auswerten der Ultraschallsignale mit einem Rekonstruktionsalgorithmus nach Durchführung der Durchschallung des Prüfkörpers mit Ultraschall, durchgeführt wird, und dass der Rekonstruktionsalgorithmus unter Massgabe eines virtuell vorgebbaren Einschallwinkels und/oder Schnittes und/oder 3D-Bereiches mit einer

virtuellen Fokussierung der eingekoppelten Ultraschallwellen in den Prüfkörper ausgewählt und auf die abgespeicherten Ultraschallsignale angewendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswertung der Ultraschallsignale im Wege einer Phasen Anpassung der durch die m Ultraschallwandler empfangenen Ultraschallwellen derart durchgeführt wird, dass Ultraschall-Laufzeiten von jedem als Sender dienenden Ultraschallwandler zu jedem Raumpunkt eines zu rekonstruierenden Prüfkörperbereiches und zurück zu jedem als Empfänger dienenden Ultraschallwandlers unter Berücksichtigung der anisotropen Werkstoffeigenschaften oder elastischen Materialkonstanten rechnerisch ermittelt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Generieren und Abspeichern jeweils der m Ultraschallsignale im Wege einer Analog-Digital-Wandlung erfolgt, bei der die analogen Ultraschallsignale der m Ultraschallwandler in digitale Signale umgewandelt werden und in serieller Form abgespeichert werden.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Empfangen der im Inneren des Prüfkörpers reflektierten Ultraschallwellen mit sämtlichen an der Oberfläche des Prüfkörpers vorgesehenen Ultraschallwandler durchgeführt wird, d.h. $m = n$.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Prüfkörper vollständig aus einem akustisch anisotropen Werkstoff besteht.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

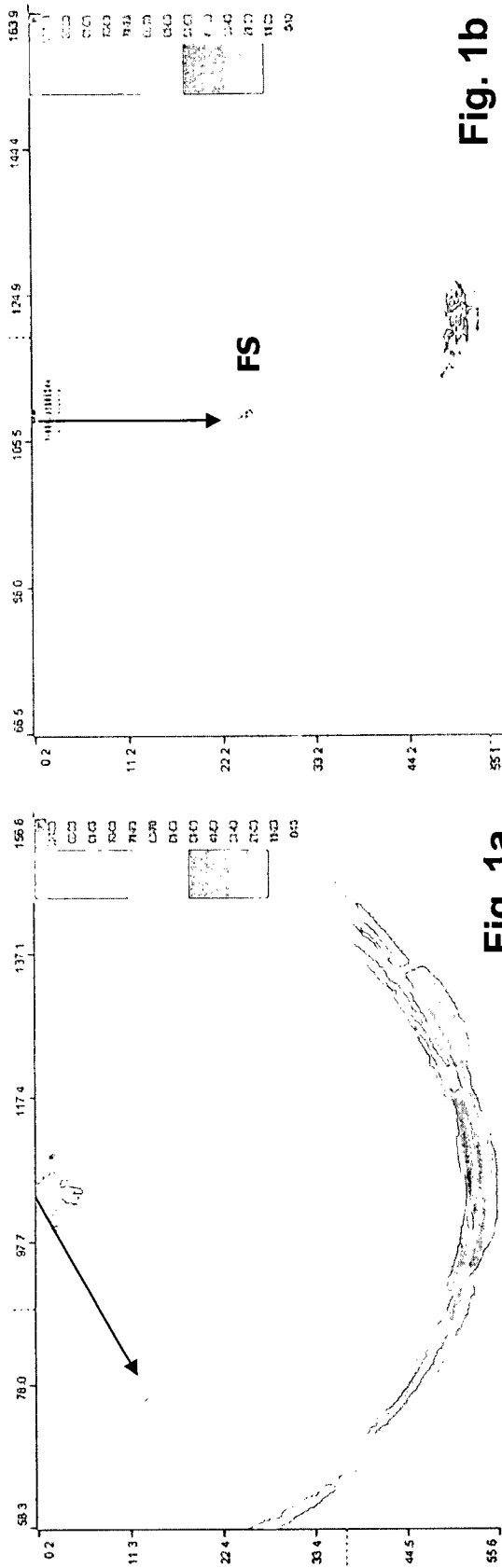


Fig. 1b

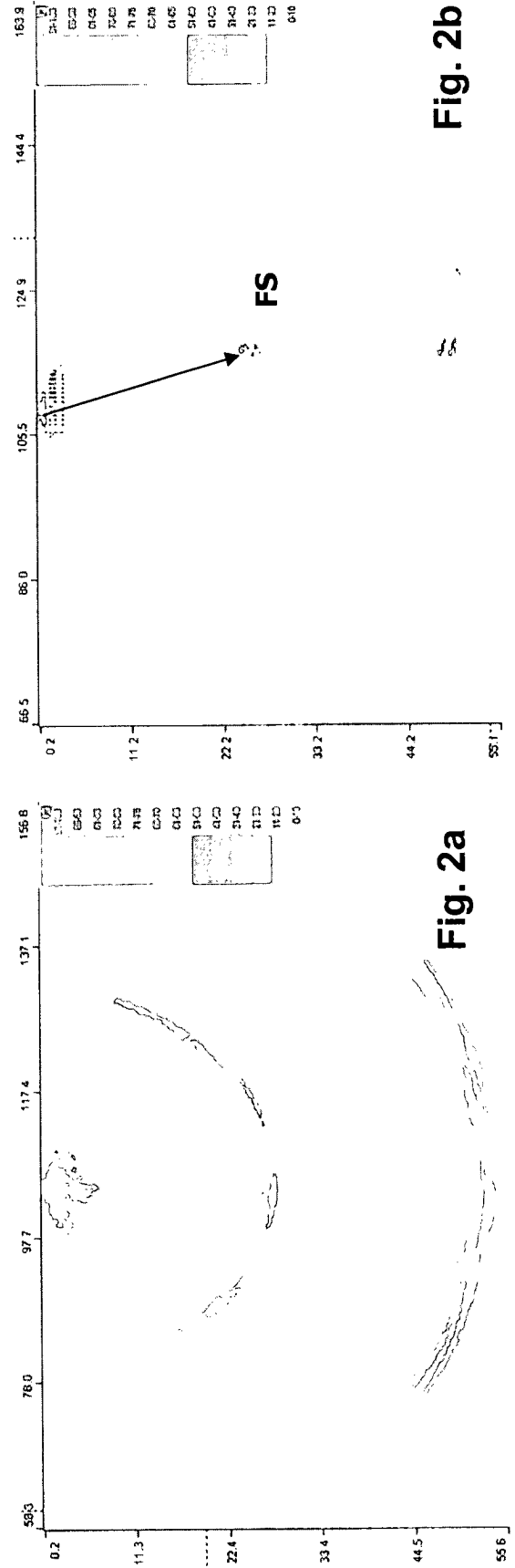


Fig. 2b

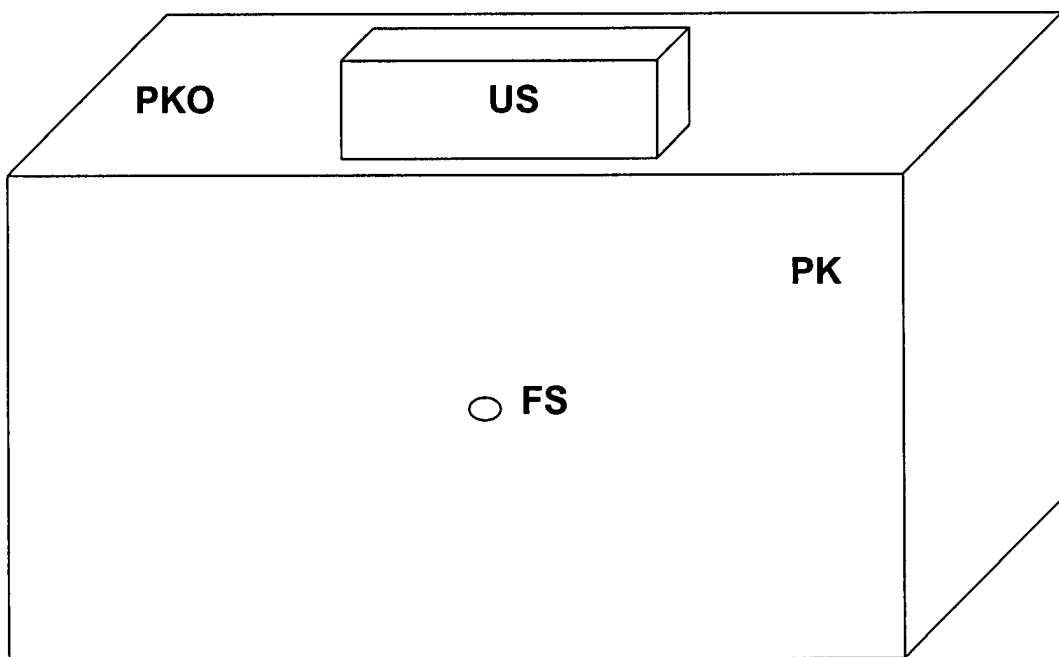


Fig. 3