
Schallemissionstomographie – Ein neues bildgebendes Verfahren zur Zustandsüberwachung von Bauteilen

Frank Schubert, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Dresden

Zusammenfassung

Die generelle Akzeptanz von Verfahren des Structural Health Monitoring (SHM) hängt in starkem Maße davon ab, in welcher Form die gemessenen Daten dem Besitzer oder Betreiber einer Anlage zur Verfügung gestellt werden und ob ein komplexes Post-Processing, d.h. eine aufwendige Nachbearbeitung der Daten durch einen wissenschaftlichen Experten notwendig ist oder nicht. Ein lohnenswertes Ziel besteht deshalb darin, SHM mit bildgebenden Tomographie-Verfahren, wie sie aus anderen Gebieten der ZfP bekannt sind, zu verknüpfen. Die Schallemissionsanalyse eignet sich in hohem Maße für passive SHM-Ansätze, da Schallemissionsereignisse, die z.B. durch Rissbildung und -wachstum entstehen, zur Langzeitüberwachung der strukturellen Integrität eines Bauteils herangezogen werden können. Im vorliegenden Artikel wird ein neues bildgebendes Verfahren vorgestellt, das Schallemissionsereignisse als Quellen für eine akustische Laufzeit-tomographie verwendet. Zu diesem Zweck wird der Lokalisierungsalgorithmus iterativ mit einem Tomographiealgorithmus verknüpft. Die Vorgehensweise ist äquivalent zur Lösung des inversen Lokalisierungsproblems in einem

lokal isotropen, heterogenen Medium und führt zu einem Verfahren, bei dem neben der Lage der Schallemissionsereignisse auch das Bauteilvolumen in Form einer lokalen Schallgeschwindigkeitsverteilung abgebildet wird.

Stichworte: Structural Health Monitoring, Zustandsüberwachung, Lokalisierung, Laufzeit-tomographie, Schallemissionstomographie

1. Das Prinzip der Schallemissionstomographie

Die in der traditionellen Schallemissionsanalyse verwendeten Lokalisierungsalgorithmen setzen üblicherweise ein homogenes Matrixmedium mit konstanter Schallgeschwindigkeit voraus, um Zeit und Ort der Quellereignisse zu bestimmen. In der Praxis sind die untersuchten Strukturen jedoch häufig heterogen, d.h. die Schallgeschwindigkeit ist eine Funktion des Ortes und der Zeit. Hervorgehoben wird diese Heterogenität durch Unregelmäßigkeiten der Mikrostruktur (z.B. Zuschlagkörner, Poren), strukturelle Komponenten des Bauteils (z.B. Spannkäme in Beton) und dynamische Materialveränderungen durch den Schädigungsmechanismus selbst (z.B. Mikrorisswachstum).

Diese Inhomogenitäten begrenzen üblicherweise die Genauigkeit der traditionellen Lokalisierungsverfahren.

Um die oben beschriebenen Schwierigkeiten zu umgehen, können die Lokalisierungsalgorithmen mit Algorithmen der Ultraschalllaufzeitotomographie kombiniert werden, wobei die Schallemissionsereignisse als akustische Punktquellen betrachtet werden. Iterativ wird dabei nach jeder tomographischen Inversion eine Relokalisierung der Quellen, d.h. ein Update der aktuellen Quellorte basierend auf der neuesten Schallgeschwindigkeitsverteilung durchgeführt. Dieses Vorgehen ist im Prinzip aus der Geophysik bekannt, wo Erdbeben zunächst lokalisiert und dann zur tomographischen Abbildung des Erdinneren verwendet werden.

Das neue Verfahren wird als Schallemissionstomographie bezeichnet und setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem Lokalisierungs- und dem Tomographie-Algorithmus. Beide werden zunächst einzeln in den Abschnitten 1.1 und 1.2 erläutert und dann in 1.3 zum neuen Algorithmus zusammengeführt. Dabei wird durchgehend auf Formeldarstellungen verzichtet. Letztere sind bei Bedarf der einschlägigen Literatur zu entnehmen [1]. In Kapitel 2 werden numerische Beispiele vorgestellt, anhand derer die physikalische Konsistenz des Algorithmus nachgewiesen wird. Kapitel 3 schließlich liefert einen Überblick über laufende Arbeiten zur experimentellen Verifizierung des Verfahrens sowie einen Ausblick auf die Erweiterung der Algorithmen auf anisotrope Kompositmaterialien, wie sie für Luftfahrtanwendungen relevant sind.

1.1 Quelllokalisierung

Die üblicherweise bei der Schallemissionsanalyse verwendeten Lokalisierungsalgorithmen gehen in der Regel von einem homogenen Matrixmedium aus, das durch eine einzige (isotrope) Schallgeschwindigkeit beschrieben wird. Kennt man die Lage der Sensoren und hat man durch den Einsatz geeigneter Picking-Algorithmen die Ankunftszeit der Wellen an den einzelnen Sensorpositionen bestimmt, so lässt sich ein nichtlineares Gleichungssystem aufstellen, in welches die drei Ortskoordinaten der Quelle sowie die Quellzeit als Unbekannte eingehen. Aus diesem Grunde sind im Dreidimensionalen mindestens vier Sensoren bzw. gemessene Laufzeiten notwendig, um das Lokalisierungsproblem zu lösen.

Dem obigen Ansatz liegt ein einfaches Strahlenmodell zugrunde, bei dem die Laufzeit einer Welle von der Quelle zum Sensor ausgedrückt wird durch die geometrische Distanz zwischen beiden, dividiert durch die konstante Schallgeschwindigkeit des Matrixmediums. Das oben erwähnte Gleichungssystem ist im Allgemeinen nicht analytisch lösbar, kann aber iterativ, z.B. nach dem Verfahren von Geiger [2] gelöst werden. Dazu beginnt man mit plausiblen Startwerten für die Orts- und Zeitkoordinaten der Quelle. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit lassen sich dann die theoretischen Ankunftszeiten der Wellen entlang der Strahlen zu den Sensoren berechnen. Aus der Differenz zwischen theoretischen und tatsächlich gemessenen Ankunftszeiten können Korrekturwerte für den nächsten Iterationsschritt abgeleitet werden. Dieses Verfahren wird schrittweise wiederholt bis die Orts- und Zeitkoordinaten der Quelle gegen einen konstanten Wert konvergieren. Dies ist üblicherweise nach wenigen Iterationen der Fall. Das Verfahren lässt sich auf einfache Art und Weise auf heterogene Medien erweitern, indem jedem Strahl eine individuelle (bekannte) Schallgeschwindigkeit zugeordnet wird.

Wie bereits oben erwähnt, sind zur Lokalisierung im Dreidimensionalen mindestens vier Sensorsignale notwendig. In diesem Fall ist die Lösung eindeutig bestimmt. Liegen mehr als vier Sensorsignale vor, was in der Praxis meist der Fall ist, ist das Problem überbestimmt und es muss eine Ausgleichsrechnung durchgeführt werden. In zwei- oder quasi-zweidimensionalen Geometrien, wie z.B. in platten- oder schalenförmigen Luftfahrtstrukturen, verringert sich die Zahl der minimal notwendigen Sensoren von vier auf drei.

Als Alternative zum obigen iterativen Vorgehen bieten sich direkte algebraische Lösungsansätze an, wie sie z.B. erfolgreich beim Global Positioning System (GPS) eingesetzt werden [3,4]. Sie erweisen sich insbesondere bei bis zu einem gewissen Grade fehlerhaft ermittelten Ankunftszeiten als deutlich robuster als der iterative Ansatz. Einen Überblick über die Problematik liefern Kurz et al. in [5].

1.2 Akustische Laufzeitotomographie

Bei der akustischen Tomographie wird das untersuchte Bauteil unter verschiedenen Winkeln mit akustischen Wellen durchschallt, ganz analog zur Vorgehensweise bei der Röntgentomographie. Die Transmissionsdaten werden danach einem Tomographiealgorithmus übergeben, der ein Abbild der lokalen Änderungen einer bestimmten physikalischen Größe innerhalb des Bauteils konstruiert. Bei der physikalischen Größe kann es sich z.B. um eine Schallgeschwindigkeit („Laufzeitotomographie“), eine akustische Dämpfung („Dämpfungstomographie“) oder um einen akustischen Impedanzunterschied handeln („Reflexionstomographie“).

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf die akustische Laufzeitotomographie. Dazu wird eine bestimmte Anzahl von Aktoren/Sensoren auf der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils verteilt und die akustischen Wellen werden von einem Akteur zu den gegenüberliegenden Sensoren gesandt, wobei die Aktoren der Reihe nach durchgetaktet werden (Abb. 1).

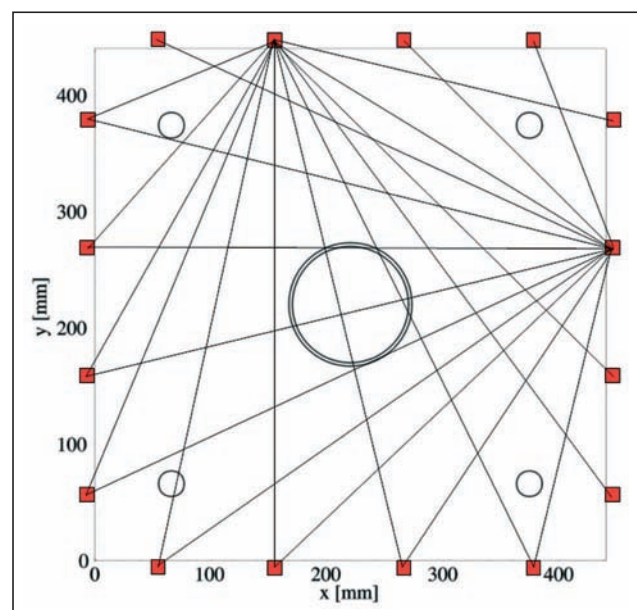


Abb. 1: Akteur/Sensor-Geometrie bei der traditionellen Ultraschall-Laufzeitotomographie. Die Wandler sind auf der Oberfläche des Bauteils verteilt. Um eine gute Strahlüberdeckung zu gewährleisten ist eine möglichst große Anzahl gleichmäßig verteilter Wandler notwendig

In der Regel wird jeder Wandler sowohl als Aktor als auch als Sensor betrieben, so dass sich bei N Wandlern maximal $N(N-1)/2$ akustische Strahlen ergeben. Die genaue Anzahl der nutzbaren Strahlen hängt von der Platzierung der Wandler ab. Aus den gemessenen Laufzeiten entlang der sich kreuzenden Strahlen lässt sich ein Abbild der räumlichen Schallgeschwindigkeitsverteilung im Inneren des Bauteils berechnen.

Mathematisch lassen sich zwei Klassen von Tomographieverfahren unterscheiden [6]. Die transformationsbasierten Verfahren sind aus der Röntgentomographie und der medizinischen Ultraschalltomographie bekannt. Sie verwenden das Fourier-Slice- bzw. das Fourier-Diffraction-Theorem für nichtbeugende bzw. beugende Quellen. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine große Robustheit und eine sehr hohe Rechengeschwindigkeit aus, die mit heutiger Computertechnik quasi-Online-Abbildungen in 3-D ermöglicht. Die Nachteile liegen darin, dass die Transmissionsdaten entlang von gleichmäßig verteilten, geraden Strahlen vorliegen müssen.

Eine zweite Klasse von Tomographiealgorithmen stammt aus der Geophysik und verwendet iterative Verfahren zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsverteilung. Die bekannteste und älteste Methode ist die Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART). Andere Techniken sind SIRT (Simultane iterative Rekonstruktionstechnik) und SART (Simultane algebraische Rekonstruktionstechnik). Die oben genannten Techniken sind weniger effizient als die Fourierbasierten Verfahren und leiden aufgrund ihres iterativen Charakters teilweise unter Stabilitätsproblemen, weisen aber auch eine Reihe von Vorteilen auf. So können sie auch bei stark unregelmäßiger Strahlüberdeckung und bei unvollständigen Datensätzen angewendet werden. Der wichtigste Vorteil liegt jedoch in der Möglichkeit, gekrümmte Strahlverläufe zu berücksichtigen, was insbesondere bei akustischen Wellen von Bedeutung ist, die beim Übergang in ein anderes Material im Allgemeinen einen Brechungsindex ungleich Eins erfahren. Es existieren leistungsfähige Ray-Tracing-Algorithmen, die neben der Brechung auch Beugungseffekte berücksichtigen [7,8].

Die Funktionsweise eines iterativen Tomographiealgorithmus ist ähnlich derjenigen des iterativen Lokalisierungsalgorithmus aus Abschnitt 1.1. Man beginnt mit einem Startmodell für die Schallgeschwindigkeitsverteilung (z.B. homogenes Medium) und berechnet die theoretischen Ankunftszeiten zwischen Aktoren und Sensoren. Aus dem Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Zeiten lassen sich Korrekturwerte gewinnen, die die Schallgeschwindigkeitsverteilung Schritt für Schritt systematisch anpassen, bis die berechneten Ankunftszeiten entlang der Strahlen möglichst gut mit den gemessenen Zeiten übereinstimmen. Bei der ART erfolgt die Korrektur Strahl für Strahl, d.h. nach Behandlung jedes einzelnen Strahls werden die Schallgeschwindigkeiten der durch ihn geschnittenen Zellen sofort korrigiert. Bei der SIRT werden zunächst alle verfügbaren Strahlen ausgewertet und dann eine mittlere Korrektur der Schallgeschwindigkeit der betroffenen Zellen vorgenommen. Will man zusätzlich gekrümmte Strahlen berücksichtigen, kann nach jeder Iteration ein Update des Strahlenverlaufs basierend auf der aktuellen Geschwindigkeitsverteilung erfolgen.

1.3 Schallemissionstomographie

Nachdem die beiden einzelnen Komponenten „Lokalisierung“ und „Laufzeittomographie“ vorgestellt wurden,

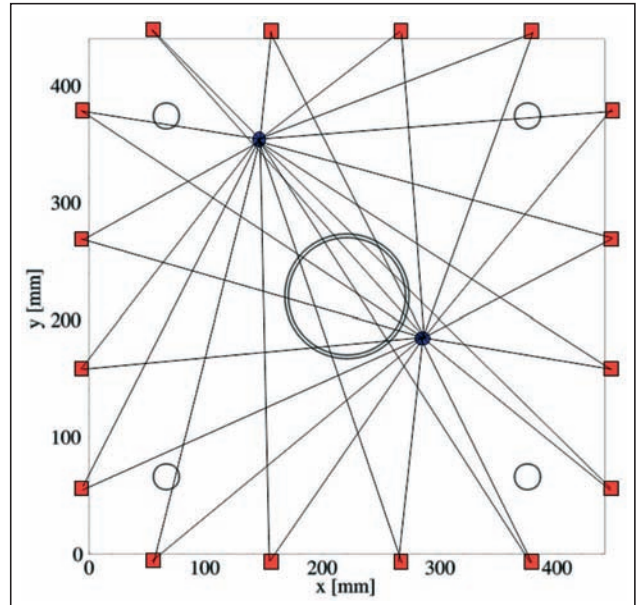


Abb. 2: Aktor/Sensor-Geometrie bei der Schallemissionstomographie. Die Schallemissionsereignisse werden als Quellen für die Ultraschall-Laufzeittomographie verwendet. Im Gegensatz zur herkömmlichen Tomographie werden lediglich Sensoren, aber keine Aktoren benötigt

liegt das neue Konzept der Schallemissionstomographie auf der Hand. Dazu werden die Schallemissionsereignisse als Punktquellen für die Laufzeittomographie verwendet (Abb. 2). Da im Gegensatz zur traditionellen Tomographie Ort und Zeit der Ereignisse a-priori nicht bekannt sind, werden Lokalisierungsalgorithmus und Tomographiealgorithmus iterativ miteinander verknüpft.

Man beginnt mit einem bestimmten Startmodell der Schallgeschwindigkeitsverteilung, in der Regel einem homogenen Medium mit konstanter (isotroper) Schallgeschwindigkeit. In einem ersten Schritt wird basierend auf diesem Startmodell eine Lokalisierung der Schallemissionsquellen mit einem der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Diese Quellpositionen werden dann dazu verwendet, eine Laufzeittomographie wie in Abschnitt 1.2 beschrieben durchzuführen. Das Ergebnis dieser Tomographie ist ein neues, nunmehr heterogenes Geschwindigkeitsmodell.

Die neue Geschwindigkeitsverteilung wird nun dazu benutzt, eine Relokalisierung der Quellen vorzunehmen, indem jedem Strahl eine individuelle effektive Schallgeschwindigkeit zugeordnet wird. Die verbesserten Quellparameter führen zu einer verbesserten Geschwindigkeitsverteilung, die wiederum zu genaueren Quellkoordinaten führt etc. Dieses iterative Vorgehen mit sich abwechselnder Durchführung von Lokalisierung und Tomographie wird solange wiederholt, bis die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Laufzeiten ein Minimum bzw. eine vorher definierte Schwelle erreichen. Das oben skizzierte Vorgehen entspricht der Lösung des verallgemeinerten inversen Lokalisierungsproblems in lokal isotropen, heterogenen Medien und führt zu einem Verfahren, das neben den Quellkoordinaten das Innere des Bauteils in Form einer räumlichen Geschwindigkeitsverteilung abbildet.

Während die traditionelle Ultraschall-Laufzeittomographie aufgrund der begrenzten Anzahl der Wandler meist mit einer vergleichsweise schlechten Strahlüberdeckung aus-

kommen muss, stehen für die Schallemissionstomographie typischerweise Hunderte oder Tausende von Schallemissionsereignissen zur Verfügung. Jedes neu hinzukommende Ereignis vergrößert dabei die Anzahl der Strahlen und damit die Qualität der tomographischen Abbildung. Eine geringe Anzahl von Sensoren kann vielfach dadurch kompensiert werden, dass eine entsprechend größere Anzahl von Ereignissen detektiert wird.

Die Position der Schallquellen ist meist auf einige aktive Schädigungszonen im Bauteil beschränkt, was zu einer mehr oder weniger ungleichmäßigen Strahlüberdeckung führt. Dies ist aber nicht unbedingt von Nachteil, da insbesondere die unmittelbare Nachbarschaft der Schädigungszonen von Interesse ist und dort eine sehr hohe Strahlüberdeckung verbunden mit einer guten Tomographieauflösung vorliegt.

Ein wesentlicher Vorteil der Schallemissionstomographie gegenüber der traditionellen Schallemissionsanalyse liegt in der Behandlung von Störquellen. So wird z.B. in einem Flugzeug die Mehrzahl aller Schallemissionsereignisse durch Störgeräusche an Kontakt- und Verbindungsstellen verursacht und es muss in der Regel ein großer Aufwand betrieben werden, die Störquellen von den durch Schadensmechanismen hervorgerufenen Nutzsensoren zu trennen. Bei der Schallemissionstomographie können auch diese „Störquellen“ zur Abbildung herangezogen werden, vorausgesetzt sie lassen sich ebenfalls als transiente oder zumindest nicht-stationäre Punktquellen beschreiben. Während die traditionelle Schallemissionsanalyse lediglich akustisch aktive Fehlstellenbereiche nachweisen kann, kann die Schallemissionstomographie sowohl aktive als auch passive Fehler abbilden. Auch Bauteilkomponenten wie z.B. Hüllrohre in Beton lassen sich mit dem Verfahren darstellen.

Die im Inneren des Bauteils statistisch auftretenden Schallemissionsereignisse können im Prinzip auch durch künstlich an der Oberfläche der Struktur erzeugte Schallquellen ersetzt werden. Diese lassen sich z.B. durch eine Vielzahl mehr oder weniger zufällig platzierter Bleistiftminenbrüche oder mechanischer Impacts realisieren. Da jedes zusätzliche Ereignis die Strahlüberdeckung und somit die tomographische Abbildung verbessert, kann der Prüfer gezielt neue Schallquellen erzeugen, um die Abbildung in einem bestimmten Volumenbereich des Bauteils zu verbessern. Dabei kommt es nicht darauf an, die Quelle exakt zu platzieren bzw. den genauen Quellort zu vermessen (wie bei der herkömmlichen Tomographie). Diese Aufgabe wird automatisch vom Iterationsalgorithmus der Schallemissionstomographie erledigt.

Zum Abschluss dieses Kapitels sei darauf hingewiesen, dass die Schallemissionstomographie eine rein algorithmische Erweiterung der traditionellen Schallemissionsanalyse darstellt. Es ist kein zusätzlicher messtechnischer Aufwand notwendig, da exakt dieselben Rohdaten verwendet werden.

2. Anwendungsbeispiele

Um das physikalische Konzept der Schallemissionstomographie zu testen, wurden zunächst simulierte Schallemissionsdatensätze mit Hilfe der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT, [9]) erzeugt. Dazu wurde der $440 \times 440 \text{ mm}^2$ große Querschnitt eines real existierenden Stahlbetonbauteils der ETH Zürich mit schlaffer Beweh-

rung in den Ecken und einem Spannkabel aus Polyethylen in der Mitte modelliert (siehe Abb. 3). 16 Sensoren wurden gleichmäßig auf dem Umfang des Querschnitts verteilt. Insgesamt 40 isotrope Punktquellen wurden innerhalb des Bauteils erzeugt und zu jedem Ereignis das Zeitsignal der Normalkomponente des Teilchengeschwindigkeitsvektors an den 16 Sensorpositionen herausgeschrieben. Die Ankunftszeiten der Druckwellen wurden anschließend mit Hilfe eines auf einem Energiekriterium basierenden automatischen Picking-Algorithmus ermittelt. Diese Werte dienen als Input für den Tomographiealgorithmus, der im folgenden kurz AE-TOMO genannt wird. Nähere Details zu den Simulationsrechnungen und zur Laufzeitpicking finden sich in [10].

Wir betrachten in den folgenden zwei Abschnitten den Fall von gleichmäßig und ungleichmäßig verteilten Schallemissionsquellen und präsentieren die damit erzeugten tomographischen Abbildungen. Grundlage des AE-TOMO-Algorithmus sind hierbei der iterative Lokalisierungsalgorithmus nach Geiger sowie der tomographische ART-Algorithmus mit nichtgekrümmten Strahlen.

2.1 Beispiel 1: Gleichmäßig verteilte Quellen

Im ersten Beispiel wurden die 40 Schallemissionsquellen rein zufällig innerhalb der Betonmatrix verteilt. Mit den 16 gleichmäßig verteilten Sensoren führt dies – mit Ausnahme der vier Ecken – zu einer mehr oder weniger homogenen Strahlüberdeckung mit insgesamt $40 \times 16 = 640$ Strahlen (Abb. 3).

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse des AE-TOMO-Algorithmus nach einer unterschiedlichen Zahl von Iterationen. Begonnen wird mit einem homogenen Startmodell mit einheitlicher Schallgeschwindigkeit (Iteration 0). Bereits nach 5 Iterationen zeichnen sich die Strukturen der vier Bewehrungseisen in den Ecken sowie des unverpressten Hüllrohrs in der Mitte ab. Nach 15 bis 20 Iterationen tritt ein gewisser Sättigungseffekt ein und die Qualität der Abbildung bleibt annähernd konstant.

In Abb. 4 bedeuten gelbe und rote Farben Schallgeschwindigkeiten, die größer sind als die der Betonmatrix (grün). Diese hohen Geschwindigkeiten treten im Bereich der schlaffen Bewehrungseisen aus Stahl auf. Blaue Farben dagegen kennzeichnen Bereiche mit effektiv niedrigerer Schallgeschwindigkeit als die der Matrix. Dieser Fall tritt im Bereich des unverpressten Hüllrohrs auf, da die Schallwellen um den Kanal herumlaufen müssen und dabei eine effektiv verlängerte Laufzeit erfahren.

Es fällt auf, dass das Bewehrungseisen in der linken unteren Ecke weniger gut abgebildet wird, als die anderen drei, was vermutlich an der schlechteren Strahlüberdeckung liegt (vgl. Abb. 3).

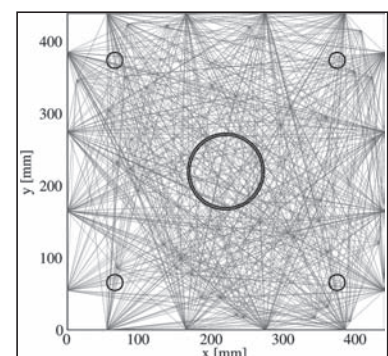


Abb. 3: Strahlüberdeckung des Betonmodells resultierend aus 16 Sensoren und 40 zufällig in der Betonmatrix verteilten Schallemissionsquellen. Daraus ergeben sich insgesamt 640 mehr oder weniger regelmäßig über den Querschnitt verteilte Strahlen für die Schallemissionstomographie

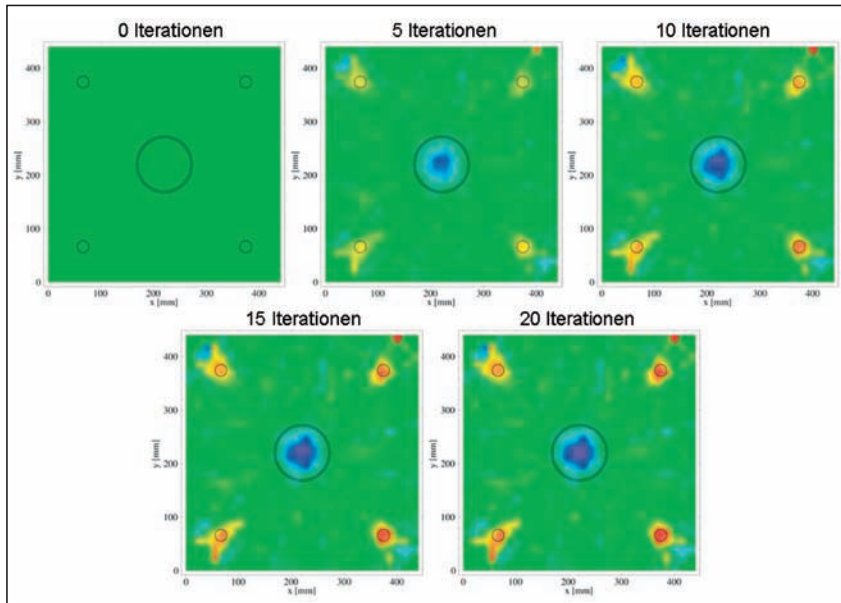


Abb. 4: Ergebnisse der Schallemissionstomographie am Betonmodell mit unverpresstem Hüllrohr nach 0, 5, 10, 15 und 20 Iterationen des AE-TOMO-Algorithmus basierend auf der in Abb. 3 gezeigten Strahlverteilung. Die Stahlbewehrung mit lokal erhöhter Schallgeschwindigkeit (gelbe und rote Bereiche) sowie das Hüllrohr mit lokal erniedrigter Schallgeschwindigkeit (blauer Bereich) sind deutlich zu erkennen

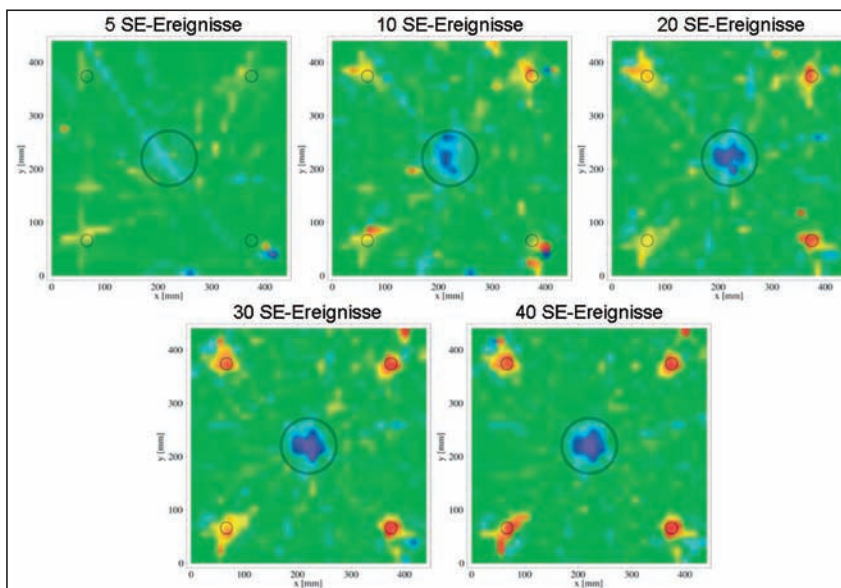


Abb. 5: Ergebnisse der Schallemissionstomographie am Betonmodell mit unverpresstem Hüllrohr basierend auf der Auswertung von 5, 10, 20, 30 und 40 Schallemissions(SE)-Ereignissen nach jeweils 25 Iterationen. Die Qualität der Abbildung steigt mit zunehmender Zahl der verwendeten Ereignisse, da die Strahlüberdeckung immer besser wird

Die Heterogenität der in Abb. 4 dargestellten Schallgeschwindigkeitsverteilung führt unmittelbar zu einer deutlich besseren zeitlichen und räumlichen Lokalisierung der Quellereignisse als beim traditionellen Lokalisierungsalgorithmus, der von einem homogenen Geschwindigkeitsmodell ausgeht. Aus den der Abb. 4 zugrunde liegenden Daten konnte mit Hilfe des AE-TOMO-Algorithmus im Mittel eine um ca. 60% bessere Zeit- und Ortslokalisierung erzielt werden.

Im Unterschied zum herkömmlichen Lokalisierungsalgorithmus führt jedes neu hinzukommende Schallemissions-

ereignis zu einer besseren Annäherung an das tatsächliche Geschwindigkeitsfeld und somit zu einer verbesserten Lokalisierung aller anderen Quellereignisse. Eine Erhöhung der Anzahl der ausgewerteten Ereignisse liefert also im Prinzip immer genauere Lokalisierungsergebnisse, allerdings ist auch hier ein Sättigungseffekt zu beobachten (Abb. 5).

Eine weitere Erhöhung der Anzahl der Strahlen führt nicht notwendigerweise zu einer besseren Abbildung solange die Anzahl der Tomographiezellen konstant gehalten wird. Allerdings könnte in diesem Fall das Tomographiegitter weiter verfeinert werden, was wiederum zu einer besseren Bildauflösung führt.

Die strukturellen Komponenten des Betonquerschnitts in den Abb. 4 und 5 sind deutlich zu erkennen. Dennoch sind in den Bildern noch zahlreiche Artefakte vorhanden, die im wesentlichen auf das hier zugrunde gelegte Strahlenmodell mit nichtgekrümmten Strahlen zurückzuführen sind. Aufgrund der starken akustischen Impedanzunterschiede zwischen der Betonmatrix und den Streuern ist dieses Modell im vorliegenden Fall nur unzureichend erfüllt. Die Berücksichtigung von Brechungs- und Beugungseffekten im Rahmen gekrümmter Strahlenmodell könnte hier also zukünftig zu noch besseren Tomographieergebnissen führen.

Ein weiterer Grund für einige der Artefakte liegt in der im Vergleich zur herkömmlichen Ultraschalltomographie unregelmäßigeren Strahlüberdeckung, was zu starken Variationen bei der Strahldichte pro Zelle führt. Hier könnte die Verwendung adaptiv angepasster Zellgrößen zu einer homogeneren Strahldichte und somit auch zu einer besseren tomographischen Abbildung führen.

2.2 Beispiel 2: Ungleichmäßig verteilte Quellen

Im ersten Beispiel waren die Schallemissionsquellen mehr oder weniger gleichmäßig im Bauteilquerschnitt verteilt. In der Praxis treten dagegen die Ereignisse häufiger in unmittelbarer Nähe lokal begrenzter Schädigungsbereiche auf. So werden sich die SE-Ereignisse bei einem Pull-out-Test, bei dem das Hüllrohr kontinuierlich aus der Betonmatrix herausgezogen wird, auf die unmittelbare Nähe der Rohroberfläche konzentrieren. Dies führt zu einer stark ungleichmäßigen, sternförmigen Strahlverteilung wie der in Abb. 6 gezeigten. Erneut wurden 40 Quellen und 16 Sensoren verwendet.

Es ergibt sich eine sehr hohe Strahlüberdeckung im Bereich des Hüllrohres, während die Eckbereiche des Querschnitts praktisch strahlfrei sind. Folglich können die Bewehrungs-

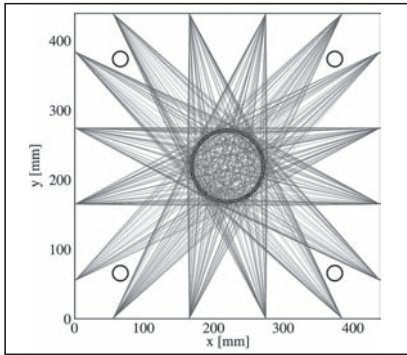


Abb. 6: Strahlüberdeckung des Betonmodells resultierend aus 16 Sensoren und 40 zufällig in der unmittelbaren Umgebung der Hüllrohrwand verteilten Schallemissionsquellen. Daraus ergeben sich insgesamt 640 sternförmig über den Querschnitt verteilte Strahlen für die Schallemissionstomographie

eisen in diesem Fall nicht abgebildet werden, das Hüllrohr dagegen mit einer sehr guten Auflösung. Für die tomographische Inversion wurden vier verschiedene Hüllrohrmodelle verwendet, (i) ein unverpresstes Hüllrohr wie in Beispiel 1, (ii) ein mit Mörtel verpresstes Hüllrohr, (iii) ein Hüllrohr mit Verpressfehler (Hohlraum) im Mörtel sowie (iv) ein mit Mörtel und Stahllitzen verpresstes Hüllrohr. Die Ergebnisse der Schallemissionstomographie zeigt Abb. 7. Man erkennt, dass jedes Modell durch ein spezifisches Tomographiebild gekennzeichnet ist, das sich deutlich von den anderen Fällen unterscheidet. Der Hohlraum im Verpressmörtel (Modell 3) und die Stahllitzen in Modell 4 sind deutlich zu erkennen.

3. Ausblick: Experimentelle Verifizierung

Die Ergebnisse von Kapitel 2 haben gezeigt, dass das physikalische Konzept der Schallemissionstomographie tragfähig ist und eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber der traditionellen Schallemissionsanalyse aufweist. Die experimentelle Verifizierung des Verfahrens ist jedoch noch nicht abgeschlossen und daher Gegenstand aktueller laufender

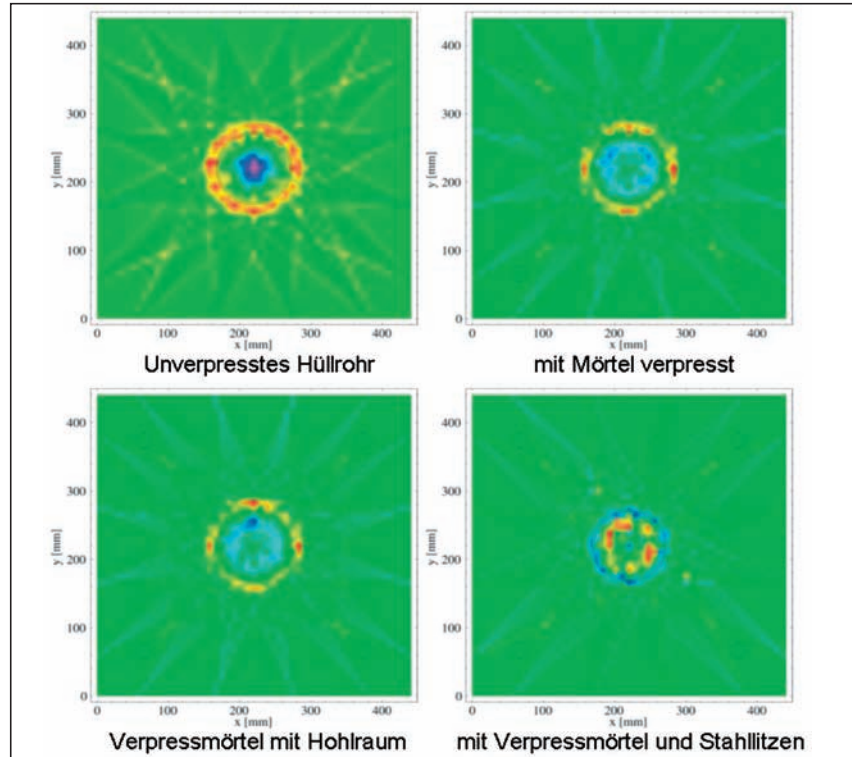


Abb. 7: Ergebnisse der Schallemissionstomographie am Betonquerschnitt mit vier verschiedenen Hüllrohrmodellen basierend auf der in Abb. 6 gezeigten Strahlverteilung. Der Hohlraum im Verpressmörtel (dunkelblauer Bereich im Bild links unten) und einzelne Stahllitzen im Inneren des verpressten Hüllrohrs (rote Bereiche im Bild rechts unten) sind deutlich sichtbar

Arbeiten. Diese konzentrieren sich auf zwei Anwendungsfälle, nämlich die Zustandsüberwachung von Betonbauteilen und die von panelartigen Luftfahrtstrukturen. Im Folgenden kann aus Platzgründen lediglich auf Teilaspekte des letzteren Themas eingegangen werden.

3.1 Zustandsüberwachung von Luftfahrtstrukturen

In der Luftfahrt werden häufig schalenartige Strukturen eingesetzt, die meist entweder aus isotropen Aluminium- oder anisotropen Faserkompositmaterialien (meist CFK) bestehen. Insbesondere in letzteren sollten unter äußerer Belastung in starkem Maße Schallemissionsereignisse auftreten, die z.B. durch Faserbrüche, Matrixablösungen oder Delaminationen zustande kommen. Damit dürfte die oben vorgestellte Schallemissionstomographie eine aussichtsreiche Methode darstellen, um solche Strukturen dauerhaft zu überwachen.

In einem ersten Schritt wurden Laboruntersuchungen an einer 2 mm dicken Aluminiumplatte mit wachsendem Riss durchgeführt (Abb. 8). Zwar sind im Aluminium in der Praxis im Gegensatz zu CFK-Materialien weitaus weniger natürliche Schallemissionen zu erwarten, doch ist die Wellenausbreitung in der Plattenebene isotrop, was eine direkte Anwendung der bislang entwickelten Algorithmen ermöglicht. Die Schallemissionen wurden im vorliegenden Fall durch Bleistiftminenbrüche auf der Paneloberfläche realisiert.

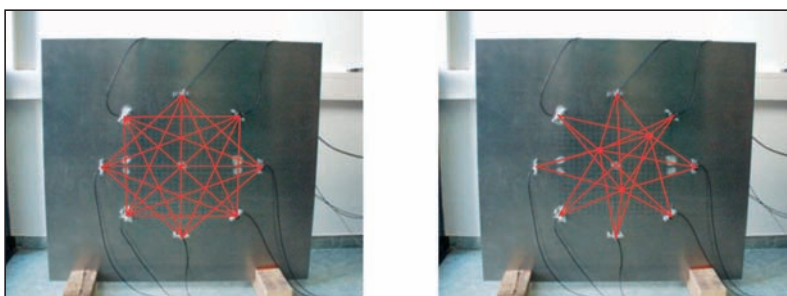


Abb. 8: Für die Tomographie-Untersuchungen verwendetes 2 mm dickes Aluminium-Panel mit einem von der Mitte ausgehenden wachsenden Riss. Die traditionelle Laufzeitstomographie wurde mit Hilfe von 8 gleichmäßig auf der Oberfläche verteilten Wandlern durchgeführt, die als Sensoren und Aktoren fungierten (Strahlenverlauf siehe linkes Teilbild). Für die Schallemissionstomographie wurden Schallemissionsquellen künstlich durch Bleistiftminenbrüche auf der Paneloberfläche erzeugt (Strahlenverlauf für drei ausgesuchte Quellen im rechten Teilbild)

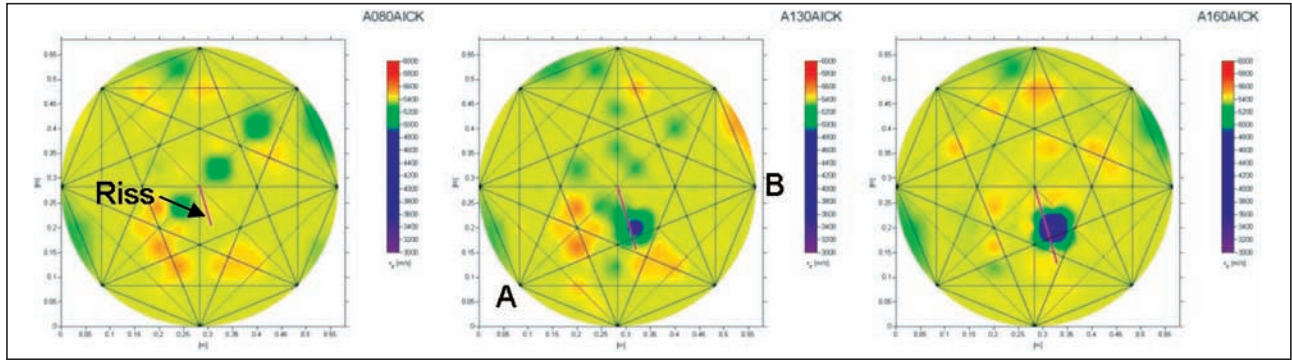


Abb. 9: Ergebnisse der traditionellen Laufzeittomographie an dem in Abb. 8 dargestellten Aluminium-Panel (E. Schulze, Fraunhofer IZFP Dresden). Erst wenn der nach unten wachsende Riss den Strahl AB schneidet, kommt es zu einer effektiven Erniedrigung der Schallgeschwindigkeit der geführten S0-Welle (blauer Bereich)

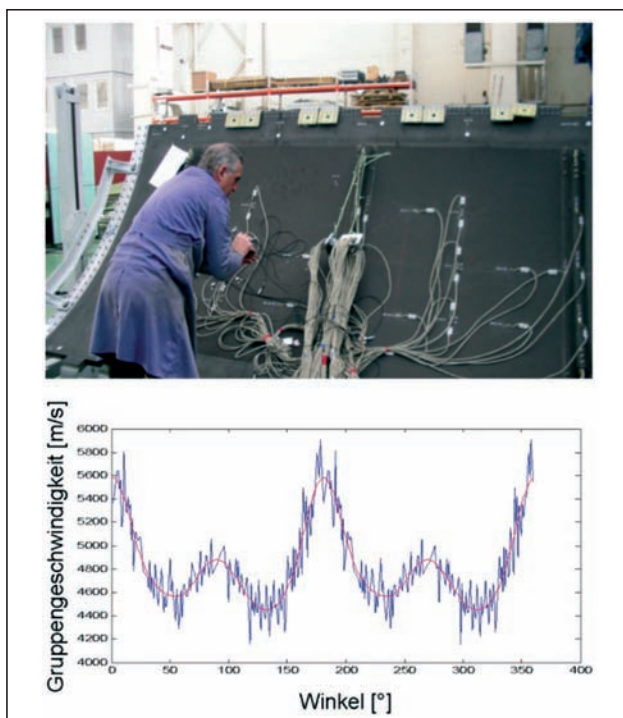


Abb. 10: Instrumentierte CFK-Rumpfschale (IMA GmbH Dresden, oben) und daran gemessene winkelabhängige Gruppengeschwindigkeit der S0-Welle (unten)

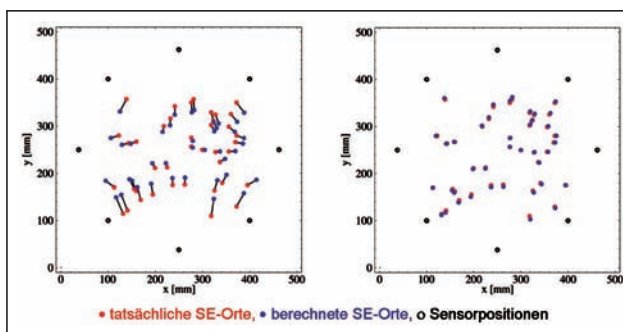


Abb. 11: Ortungsergebnisse für Schallemissionsquellen in einer triaxialen GFRK-Platte. Links: Ortung unter Verwendung eines isotropen Lokalisierungsalgorithmus, rechts: Ortung unter Verwendung des anisotropen Lokalisierungsalgorithmus basierend auf dem zugehörigen winkelabhängigen Gruppengeschwindigkeitsdiagramm

Aus Vergleichszwecken wurden auch Datensätze für die klassische Ultraschalllaufzeittomographie aufgenommen. Dazu wurden 8 gleichmäßig auf der Panel-Oberfläche platzierte Schallwandler als Aktoren (Mittelfrequenz 300 kHz) und Sensoren eingesetzt. Den zugehörigen Strahlenverlauf zeigt das linke Teilbild von Abb. 8. Die Auswertung der Laufzeittomographie ist in Abb. 9 dargestellt. Der Riss wurde in mehreren diskreten Stufen durch Sägen vergrößert. Für jeden Risszustand wurde eine Laufzeittomographie der S0-Plattenwelle auf der Basis des oben gezeigten Strahlenverlaufs durchgeführt. Drei ausgewählte Tomographiebilder zeigt Abb. 9.

Aufgrund der geringen Strahlüberdeckung findet erst dann eine signifikante Änderung des Tomographiebildes statt, wenn der schräg nach unten wachsende Riss den Strahl AB schneidet. In diesem Fall führt das Herumlaufen der Welle um den Riss zu einer effektiven Erniedrigung der Schallgeschwindigkeit (blauer Bereich in Abb. 9).

Um das Prinzip der Schallemissionstomographie experimentell zu verifizieren und mit dem Ergebnis der traditionellen Laufzeittomographie zu vergleichen, wurden in dem durch die 8 Wandler eingeschlossenen Bereich des Panels ca. 100 Schallemissionsquellen durch Bleistiftminenbrüche erzeugt und durch die 8 Sensoren aufgezeichnet. Ausgewertet wird die zuerst eintreffende Welle, d.h. der symmetrische Plattenmode S0. Insgesamt ergeben sich somit rund $100 \times 8 = 800$ Strahlen verglichen mit den lediglich $(8 \times 7)/2 = 28$ Strahlen bei der herkömmlichen Tomographie. Es wird daher erwartet, dass sich mit Hilfe der Schallemissionstomographie eine deutlich verbesserte Abbildungsqualität verbunden mit einer größeren Sensitivität auf das Risswachstum ergibt. Die Datenauswertung ist derzeit noch im Gange. Die Ergebnisse werden auf der ECNDT 2006 in Berlin vorgestellt.

3.2 Erweiterung auf anisotrope Verbundmaterialien

Das Endziel der Arbeiten besteht in der Erweiterung der Schallemissionstomographie auf anisotrope Verbundwerkstoffe wie z.B. CFK und GFRK, wie sie in der Luftfahrtindustrie oder bei Windkraftanlagen eingesetzt werden. Dazu müssen richtungsabhängige Gruppengeschwindigkeiten berücksichtigt werden, die sowohl den Lokalisierungs- wie auch den Tomographiealgorithmus beeinflussen. Abb. 10 zeigt eine instrumentierte CFK-Rumpfschale und die daran gemessene winkelabhängige Gruppengeschwindigkeit der S0-Welle.

Für eine verlässliche Ortung der Schallemissionsquellen müssen solche Gruppengeschwindigkeitsdiagramme unbedingt berücksichtigt werden, wie Abb. 11 demonstriert. Nur dann lassen sich auch korrekte Strahlverläufe für die Schallemissionstomographie konstruieren.

Die in diesem Zusammenhang zu lösenden Probleme sind Gegenstand laufender Arbeiten in der Arbeitsgruppe Zustandsüberwachung des IZFP-Dresden. Die bislang erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Schallemissionstomographie großes Potential für künftige Anwendungen im Bereich des Structural Health Monitorings hat und der traditionellen Schallemissionsanalyse völlig neue Perspektiven eröffnen kann. Sollte es in Zukunft gelingen, zuverlässige bildgebende SHM-Verfahren zu entwickeln, könnte dies zu einer deutlich gesteigerten Akzeptanz derartiger Überwachungstechniken bei Anlagenherstellern und -betreibern führen. Vorbilder bei dieser Entwicklung sind die 3D-Röntgentomographie und die medizinischen Ultraschallverfahren, die erst nach Einführung schneller bildgebender Algorithmen ihren Siegeszug angetreten haben.

4. Literatur

1. Schubert, F., „Basic principles of acoustic emission tomography“, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 22, 147-158, 2004.
2. Geiger, L., „Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten“, *Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Vol. 4, 331-349, 1910.
3. Bancroft, S., „An algebraic solution of the GPS equations“, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 21 (7), 56-59, 1985.
4. Yang, M., and Chen, K.-H., „Performance Assessment of a Noniterative Algorithm for Global Positioning System (GPS) Absolute Positioning“, *Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A)*, Vol. 25, No. 2, 102-106, 2001.
5. Kurz, J.H., Grosse, C.U., and Reinhardt, H.-W., „Lokalisierungsverfahren in der Schallemissionsanalyse“, *DGZfP-Berichtsband 94-CD, Plakat 46, DGZfP-Jahrestagung 2005, 2.-4. Mai, Rostock*.
6. Kak, A.C., and Slaney, M., *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, New York, 1988.
7. Schechter, R.S., Mignogna, R.B., and Delsanto, P.P., „Ultrasonic tomography using curved ray paths obtained by wave propagation simulations on a massively parallel computer“, *J. Acoust. Soc. Am.* 100 (4), 2103-2111, 1996.
8. Mignogna, R.B., and Delsanto, P.P., „A parallel approach to acoustic tomography“, *J. Acoust. Soc. Am.* 99 (4), 2142-2147, 1996.
9. Fellinger, P., Marklein, R., Langenberg, K. J., and Klaholz, S., „Numerical modelling of elastic wave propagation and scattering with EFIT – Elastodynamic finite integration technique“, *Wave Motion* 21, 47-66, 1995.
10. Schubert, F., and Schechinger, B., „Numerical modelling of acoustic emission sources and wave propagation in concrete“, *NDTnet, the e-Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 7, No. 9, 2002 (<http://www.ndt.net/article/v07n09/07/07.htm>).

Über den Autor



Dr.-Ing. Frank Schubert, geboren 1966, studierte Physik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und promovierte an der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden über die Ultraschallausbreitung in Beton.

Seit 1999 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Dresden. Schwerpunkte seiner Arbeit sind akustische Methoden der ZfP und Zustandsüberwachung, numerische Schallfeldberechnungen und inverse bildgebende Verfahren. Dr. Schubert erhielt 1997 die Schiebold-Gedenkmünze der DGZfP für Untersuchungen zur Ausbreitung elastischer Wellen in heterogenen Medien mit Hilfe numerischer Simulationen und 2005 den Berthold-Preis der DGZfP für seine grundlegenden Arbeiten zur Schallemissionstomographie.

Dr. Schubert ist verheiratet, hat zwei Söhne im Alter von zwei und vier Jahren und lebt mit seiner Familie in Dresden. In seiner knappen Freizeit beschäftigt er sich mit allem, was mit Schach zu tun hat.