



Steinbeis

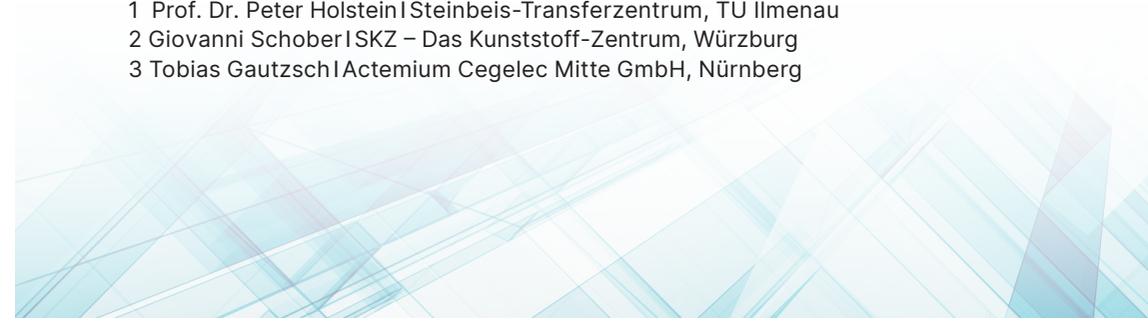
Materialprüfung mit Luftultraschall

Peter Holstein¹, Giovanni Schober²,

Tobias Gautzsch³

White Paper

Autoren

- 1 Prof. Dr. Peter Holstein | Steinbeis-Transferzentrum, TU Ilmenau
 - 2 Giovanni Schober | SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg
 - 3 Tobias Gautzsch | Actemium Cegelec Mitte GmbH, Nürnberg
- 



Prof. Dr. Peter Holstein

Steinbeis-Transferzentrum „Technische Akustik und angewandte Numerik“
An der Technischen Universität Ilmenau
Margarethenweg 9a, D-04425 Taucha

✉ peter.holstein@stw.de
☎ 0176 56780476

Das Steinbeis-Transferzentrum TAAN

Das Steinbeis-Transferzentrum „Technische Akustik und angewandte Numerik“ (STZ TAAN) stärkt als ingenieurwissenschaftliches Kompetenzzentrum die Verbindung zwischen Forschung und Industrie. Einhergehend mit der Modularisierung eines effektiven Technologietransfers ist die Kommerzialisierung von FuE-Lösungen und Ingenieur-Dienstleistungen unsere prioritäre Aufgabe.

Die Basis unserer Arbeit sind unsere Fähigkeiten und Kenntnisse in den klassischen Ingenieurwissenschaften, der Physik, der Industriemathematik und Numerik sowie der modernen Software-Programmierung / Messtechnik.

Der Schwerpunkt unserer Tätigkeit liegt auf den Gebieten der technischen Diagnose, insbesondere der technischen Akustik, der Schallemission, dem Ultraschall, der Werkstofftechnik und der meteorologischen Akustik und zunehmend der fortgeschrittenen Datenanalyse. Dies ist verbunden mit entsprechenden Entwicklungen von Messtechnik, Sensorik und spezifischen Messverfahren und – wie der Name es ausdrückt – besonders der Datenverarbeitung. Für die Bearbeitung von Aufträgen und Projekten durch das STZ TAAN werden ausgewiesene Experten einbezogen.

Eine besonders intensive Kooperation gibt es mit der TU Ilmenau und den dort angesiedelten Instituten, da bei diesen der Forschungstransfer zwischen den mittelständischen Industrie durch mehrere Steinbeis-Transferzentren einen hohen Stellenwert hat. Mit SONOTEC und dem SKZ gibt es seit einigen Jahren gemeinsame Interessen und Entwicklungen auf dem Gebiet des technischen Ultraschalls.

Motivation

Für die Anwendung von Ultraschall als Prüfmethode, egal ob im medizinischen Bereich, in der Materialprüfung oder bei der Durchflussmessung in Rohren oder Schläuchen ist es in der Regel notwendig, dass die Prüfköpfe Kontakt mit dem zu prüfenden Objekt haben.

Jeder, der schon einmal beim Arzt eine Ultraschalluntersuchung erfahren hat, wurde mit einem gelförmigen sogenannten Koppelmittel versehen, damit der Ultraschall effektiv in den Körper eingebracht und der im Körper reflektierte Ultraschalls auch wieder empfangen werden konnte.

Es gibt aber auch Anwendungsfälle, wo eine Untersuchung mit Ultraschall erschwert wird, da eine Kontamination mit einem Koppelmittel nicht erwünscht oder auch nicht möglich ist. Teilweise sind die Koppel- und Reinigungsprozeduren sehr aufwendig. Bei Klebstoffen oder Harzen im nicht ausgehärteten Zustand verbietet sich ein direkter Kontakt mit Sensoren, ebenso wie bei besonders heißen Prüfoberflächen. Wenn der Ultraschall über einen gewissen Abstand über eine Luftstrecke ein- und ausgekoppelt werden kann, würden auch Materialien untersucht werden können, für die bisher eine Prüfung mit Ultraschall nicht möglich oder schwierig ist. Eine mögliche Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit durch den Verzicht auf den direkten Kontakt klingt ebenfalls verlockend. Der Anwendung dieser Idee stehen jedoch einige physikalisch bedingte Herausforderungen und Schwierigkeiten entgegen. Der Text fasst wesentliche Anwendungsfelder zusammen und ist auch als Anregung gedacht, die Anwendbarkeit von kontaktfreier Ultraschallprüfung von Bauteilen oder in der Prozessüberwachung zu bewerten.

Einordnung

In den letzten Jahren haben sich die Technologie und Methodik zur Anwendung von Luftultraschall als Prüfverfahren weiterentwickelt und stehen nicht mehr nur Spezialisten zur Verfügung. Die Qualität der Prüfköpfe (Konstruktion, Leistung, verfügbare Frequenzen), Messelektronik und Steuerung und nicht zuletzt auch die Verfahren selbst wurden entscheidend verbessert. Die Rechenleistungen der gegenwärtigen Systeme erlauben höhere Scangeschwindigkeiten, Auflösungen und weiterführende Algorithmen, die die Systeme praxistauglich machen. Das Steinbeis-Zentrum nutzt die Technologie, um zum einen spezielle Fragestellungen zu möglichen Material- und Bauteilfehlern zu bearbeiten und zum anderen, um methodische Beiträge zur Weiterentwicklung der Prüfverfahren zu leisten. Die von SONOTEC und deren Partnern entwickelte Prüfanlage **SONOAIR** bietet dafür günstige Voraussetzungen. Die Leistungsparameter bestimmen den Stand der Technik.

Die Komponenten sind modular konfigurierbar und die Experimente individuell über entsprechende Skripte steuerbar. Besonders interessant für die Applikationen im Steinbeis-Zentrum sind die offenen Schnittstellen für die Daten. Damit sind die anfallenden großen Datenmengen für die Aufbereitung für individuelle kundenspezifische Lösungen oder die Einbindung in Automatisierungslösungen, die das Hauptanliegen der Entwicklungen im Steinbeis-Transferzentrum sind, ideal. Anliegen des White Paper ist es, die prinzipiellen Anforderungen an die Anwendbarkeit der Ultraschallprüfung über eine Luftstrecke so zu erläutern, dass interessierte Anwender einen möglichen Einsatz der Methode für ihr Problem bewerten können. Für die Eignungsbewertung im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren und detailliertere Anwenderstudien stehen Partner wie das SKZ und die SONOTEC GmbH zur Verfügung.

Die Grundlagen

Ultraschall gibt es schon seit vielen Jahrzehnten in medizinischen Anwendungen und in der Materialprüfung. Im Folgenden soll kurz erläutert werden, warum die Anwendung von Luftultraschall immer noch herausfordernd ist und warum es aufgrund der Entwicklungen der letzten Jahre doch zum verstärkten Einsatz des Verfahrens gekommen ist und die Erschließung immer neuer Anwendungen gerade erst begonnen hat.

Ein wichtiger Vorteil der akustischen Methoden besteht in ihrer Flexibilität und Anpassbarkeit. Die physikalischen Eigenschaften hängen von der Frequenz der Schallwellen ab. In festen Materialien ist die Schallausbreitung komplizierter als in Luft, da neben den longitudinalen auch noch andere Wellenarten auftreten. Dies kann in dem Beitrag nicht näher erläutert werden. Hier sei auf weiterführende Fachliteratur verwiesen. Für die Anwendung der Methode ist dieses Detailwissen meist nicht notwendig, da die in der Prüftechnik integrierten Verfahren und die Auswertesoftware dies zum Teil berücksichtigen. Der Nutzer bekommt das Prüfergebnis in der Regel in Form von flächenbezogenen Bildern (sogenannten C-Scans), die auch sofort visuell oder automatisch bewertet werden können – doch dazu später. Damit kann die Nutzung der Prüfbilder ähnlich erfolgen wie beispielsweise bei Thermografieaufnahmen. Das Verfahren beruht auf der Bewertung von Veränderungen der (Ultra-)

Schallwellen.

Die wichtigsten physikalischen Größen zum Verständnis des Verfahrens sind:

- die Schallgeschwindigkeit c ,
- die Frequenz bzw. die Wellenlänge f, λ ($c = f \times \lambda$)
- die Dämpfung der Intensität,
- die Impedanzverhältnisse zwischen der Luft, den Bauteilmaterialien und den Fehlern.

Die Schallgeschwindigkeit ist eine Materialgröße. Sie unterscheidet sich für Luft und die verschiedenen Materialien. Variationen in den Materialeigenschaften beeinflussen die Schallgeschwindigkeit. Die Frequenz wird durch die Arbeitsfrequenzen der Ultraschalltechnik (die Sensoren haben bestimmte feste (und optimierte) Frequenzbereiche) bestimmt. Die Wahl der Arbeitsfrequenzen hängt von Fragestellungen wie Auflösung von Fehlern, der Durchdringbarkeit der Prüfobjekte und natürlich von der verfügbaren Prüftechnik ab.

Die Schallwellen werden bei der Ausbreitung gedämpft. Obwohl die Prüfköpfe nur wenige cm von den zu prüfenden Bauteilen entfernt sind, macht sich die Dämpfung von Ultraschall in Luft bereits bemerkbar. Die Dämpfung ist umso stärker je höher die Frequenz ist. Höhere Frequenzen sind für die Materialprüfung eigentlich günstig, können aber bei größeren Abständen

nicht mehr übertragen werden. Ein Ausweg sind hier niedrigere Frequenzen und sind hier niedrigere Frequenzen, deshalb kommt die kontaktlose Prüfung nicht in Frage. Diese haben aber größere Wellenlängen. Damit werden Fehler schlechter abbildbar. Für die Luftultraschallprüfung müssen daher geeignete Kompromisse bei der Wahl der experimentellen Parameter gewählt werden. Der luftgekoppelten Ultraschallprüfung kommt hier entgegen, dass die Prüfobjekte im Allgemeinen dünn im Vergleich zur Wellenlänge sind und daher die Wellenlänge im Koppelmedium die detektierbare Fehlergröße bestimmt.

Die Dämpfung in Materialien ist ebenfalls abhängig von der Frequenz der Schallwellen. Gerade die modernen Kompositwerkstoffe auf Kunststoffbasis, die beispielsweise im Flugzeug- und Fahrzeugbau eingesetzt werden, dämpfen Ultraschall wesentlich stärker als metallische Werkstoffe. Gleichzeitig weisen Kunststoffe jedoch geringere Reflexionsverluste beim Eindringen des Schalls in das zu prüfende Bauteil auf, wodurch beide Materialklassen gleichermaßen prüfbar werden.

Die Schlussfolgerungen aus diesen Rahmenbedingungen sollen genutzt werden, um anhand der Anwendungsbeispiele die Einsatzbreite der Methode aber auch ihre Beschränkungen zu verstehen.

Die im Folgenden vorgestellten Studien an verschiedenen Materialklassen sollen dies exemplarisch verdeutlichen. Die Schallgeschwindigkeiten in

Luft und Materialien (Flüssigkeiten und Festkörpern) unterscheiden sich stark. Der größte Teil der Schallenergie an Grenzflächen wird reflektiert und kann daher nicht in das Untersuchungsmaterial eintreten. Da bei der berührungsfreien Methode mehrere Grenzflächen kaskadiert vorkommen, summiert sich der Intensitätsverlust. Der erste Impedanz-(Dichte-)Sprung entsteht an der Grenzfläche des Ultraschallwandlers zur Luft [1].

Signalverlust durch Reflexion

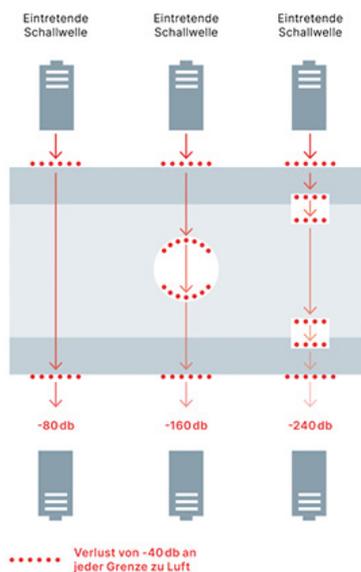


Abb. 1, Verdeutlichung der Intensitätsverluste infolge unterschiedlicher (akustischer) Materialeigenschaften.

Die Dämpfung durch die Übertragung in Luft sei hier vernachlässigt (was insbesondere bei höheren Frequenzen nicht korrekt ist). Beim Eindringen und Verlassen des Prüflings gibt es zwei weitere Impedanzsprünge und damit reflexionsbedingte Intensitätsverluste. Analog zum Verlust beim Senden gibt es

dann einen weiteren Impedanzsprung an der Grenzfläche Luft-Empfänger-Sensor.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Transmissions- und Reflexionseigenschaften der Materialien im Detail genauere Betrachtungen erfordern können. [1]

SONOAIR

Warum wird spezielle Ultraschall-Technik benötigt?

Die Luftultraschall-Prüfanlage besteht im Prinzip aus den gleichen Komponenten wie Standard-Prüftechnik mit den wesentlichen Baugruppen wie Sender, Empfänger, Anrege- und Auswertelektronik usw. Die Spezifik aufgrund der physikalischen Rahmenbedingungen erfordert jedoch speziell angepasste elektronische Baugruppen wie leistungsfähige Sender und Verstärker, die den Impedanz bedingten Intensitätsverlust durch die Materialübergänge „ausgleichen

können“. Eine spezielle Bedeutung haben die Prüfköpfe. Hier ist ein Kompromiss zwischen Sendeleistung, Bandbreite, Ausschwingverhalten und Schallfeldgeometrie zu finden.

Um eine möglichst hohe Übertragungseffektivität zu gewährleisten, werden Sende- und Empfangsprüfköpfe paarweise geeignet zusammengestellt, da bereits geringe Abweichungen in den Sende- und Empfangscharakteristika die Übertragung ungünstig beeinflussen.

Experimentelle Ergebnisse und Fallbeispiele

Für alle Messungen wurde die Prüfanlage SONOAIR von SONOTEC eingesetzt. Diese verfügt über einige innovative Leistungsmerkmale und Features, die

die Erschließung neuer Anwendungen aber auch den sicheren Routineeinsatz – beispielsweise in der produktionsnahen Qualitätssicherung - ermöglichen.

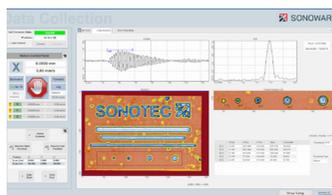


Abb. 2, Wesentliche Komponenten der SONOAIR Technik sind der Pulser (links) und die Mess- und Auswertsoftware (rechts: Bedienoberfläche).

Detektierbare Fehlertypen

Am Beispiel einer typischen Sandwichstruktur werden mit Hilfe der folgenden Abbildung einige wichtige detektierbare Fehler illustriert. Zwischen dem Volumengebiet des Fehlers und dem umgebenden Materials muss ein „akustischer“ Kontrast existieren und der abzubildende Fehler oder die Struktur muss in Relation zur Wellenlänge und/oder Schallfeldfokussierung einen ausreichenden Wirkungsquerschnitt besitzen. Dies ist ähnlich wie eine

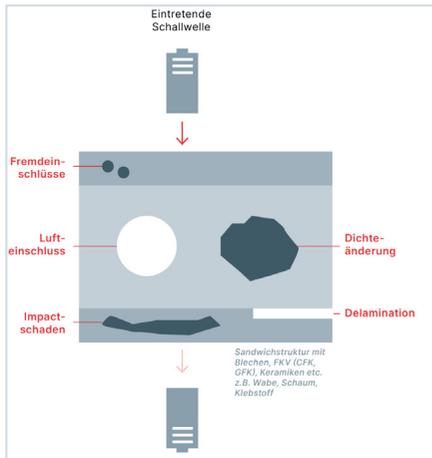


Abb. 3, Detektierbarkeit möglicher Fehler mit Luftultraschall in Transmissionsanordnung

Beispiele demonstrieren die Anwendungsbreite

Im Folgenden werden weitere Beispiele zusammengestellt, die zeigen sollen, wie flexibel die Methode an die verschiedensten Anwendungen und Anforderungen angepasst werden kann. Die Zusammenstellung kann an dieser Stelle

Abbildung in der Optik, nur das beim Luftultraschall die akustische Impedanz die kontrasterzeugende physikalische Größe darstellt. Natürlich spielt für die Abbildung auch die Größe der „Fehlers“ und dessen relative geometrische Lage zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle eine Rolle. Der Anwendung der Methode kommt entgegen, dass in vielen praktischen Fällen (Delamination, Verklebungen, ...) die Fehler senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegen.

In die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler sicher gefunden und interpretiert werden kann, gehen weiterhin die experimentellen Parameter wie die Wellenlänge, die Geometrie des Schallfeldes (beruhend auf den Eigenschaften der Prüfköpfe) ein [2] und die generelle Struktur des zu prüfenden Bauteils („Prüfbarkeit“).

Im Rahmen eines kurzen Beitrags können jedoch nicht alle Einflüsse tiefergehend beschrieben werden. Hier sei auf weiterführende Literatur [1] verwiesen.

nicht vollständig sein. Es kommen ständig neue Anwendungsbeispiele hinzu. Das ist zum einen durch die Verbesserung der Methode möglich, aber auch, weil immer mehr neue Materialien (insbesondere Verbundmaterialien

im Leichtbau) eingesetzt werden. Es lohnt sich jeweils zu hinterfragen, ob nicht eine kontaktfreie Prüfung mit Ultraschall wertvolle Informationen über den Zustand von Bauteilen oder auch Produktionsabläufen liefert und andere Methoden ersetzen oder ergänzen kann. Die folgende Fragenliste soll dabei als eine Art Checkliste dienen:

- Ist das Bauteil durchschallbar?
- In welcher Relation stehen Dicke und Dämpfung des Bauteils?
- Wie heterogen ist das Material (Treten zusätzliche Streueffekte auf?)
- Gibt es im Bauteil Ablösungen (flächenhaft)?
- Gibt es Fugstellen, die im Fehlerfall zu einer Ablösung führen?
- Gibt es Einschlüsse (Luft, Flüssigkeiten), die aufgrund der internen Reflexion gefunden werden können?

physikalische Größen wie Wellenlänge bzw. die Schallgeschwindigkeiten des Ultraschalls (in Luft und im Material) abzuschätzen, um die geeigneten Prüfkopfpaare auszuwählen.

In den meisten Fällen sind die Fragen nur durch eine Testmessung zu beantworten.

Die folgende Aufzählung kann nur ansatzweise verdeutlichen, wie flexibel die Methode eingesetzt werden kann. Erfolgreiche Prüfungsbeispiele lassen sich für nahezu alle Materialien wie Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere, Keramiken, Holz und Betone finden. Die Anwendungen gehen dabei weit über die Charakterisierung von Schäumen, geklebten Bauteilen, Vernetzungs- und Aushärtereaktionen, biologischen Prozessen, berührungsempfindlichen (d. h. klebrigen oder heißen) Oberflächen und deren Profile, Anisotropien (auch unter Deckschichten), pharmazeutischen Materialien, Bremscheiben, Farbschichten und sogar Möbeln sowie die Detektion von Fehlstellen wie Einschlüssen, Poren, Lunkern, Delaminationen, Ondulationen u. v. m. hinaus.



Abb. 4, Quelle: SONOTEC GmbH: Ultraschallwandler der SONOSCAN-Serie

Die erreichbaren Auflösungen soll die folgende Abbildung verdeutlichen:

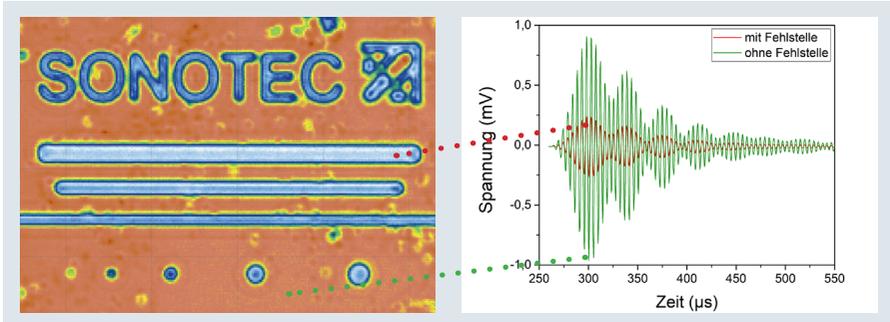


Abb. 5, Quelle: SONOTEC GmbH, Testplatte 2 verklebte Kunststoff-Platten, CF400 ca. 2 mm Löcher (Luft einschlüsse und unvollständige Verklebung, Aufnahmebedingungen: $1 \times 1 \text{ mm}^2$ Auflösung, Prüfgeschwindigkeit 100 mm/s

Mit der Auflösung im Bereich von ca. 1 mm werden auch konstruktionsbedingte Variationen und Toleranzen erfasst, die in der Regel keine Auswirkungen auf den Einsatz und die Sicherheit haben.

Darstellungsarten der Messungen

Die Prüfergebnisse werden als Bild zur Verfügung gestellt, die der Geometrie der Bauteile (aus der Prüfrichtung) entsprechen. Jedem Prüfpunkt entspricht ein A-Scan (siehe Abb. 5).

Das aus den maximalen Amplituden der einzelnen A-Scans zusammengesetzte Bild wird als C-Scan bezeichnet. Die Intensitäten der A-Scans sind farbcodiert den jeweiligen Scan-Positionen zugeordnet. Das Bild enthält keine Information über die Tiefe eines Fehlers. Dazu müsste die Laufzeit des Signals gemessen werden können. Die Laufzeitunterschiede sind aber zu gering, um sicher detektiert und für eine bildliche Darstellung genutzt werden zu können.



Abb. 6, Einrichten der Prüfanlage zur Messung der Verleimungsqualität der Furnierschicht an einem hochwertigen Möbel. Das Messergebnis gab eindeutige Hinweise für die Restaurierung.

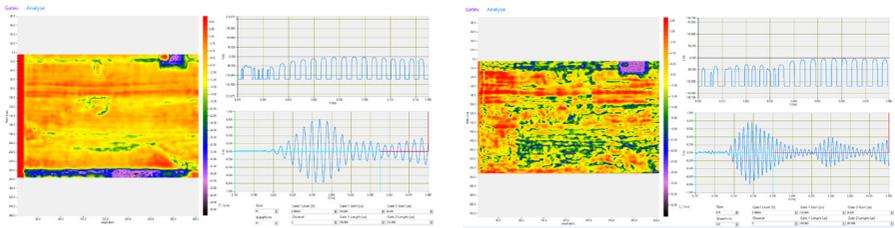


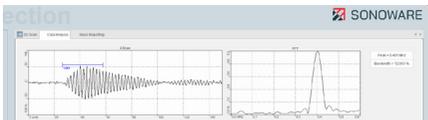
Abb. 7, C-Bild Darstellung der Messung mit 125 kHz – Prüfkopf CF125 (links) und der Messung mit 230 kHz – Prüfkopf CF230 (rechts)

Software

Für die Messungen und Auswertung steht eine Prüfsoftware SONOWARE zur Verfügung. Diese ist für Anwendungen zur Luftultraschallprüfung optimiert und eignet sich sowohl für Forschungs- und entwicklungsorientierte Untersuchungen in Laboren als auch für einfache Prüfanlagen in Industrieumgebung. SONOWARE Basic ist intuitiv bedienbar und damit für schnelle Testmessungen im Labor geeignet. Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt die Parametrisierung von Messungen und automatisierte Ergebnisdarstellung. Mit der Ausbaustufe SONOWARE Advanced können eigene spezifische

Prüfverfahren und Auswertemethoden entwickelt werden.

Die Version bietet vollen Zugang zu den Roh-Daten in einem binären Format, welche für die Weiterverarbeitung in geeigneten Programmen exportiert werden kann. Zusätzlich steht eine Toolbox mit Filtern und algorithmischen Werkzeugen bereit, um die Messergebnisse zu optimieren. Dieser Ansatz dürfte für forschungs- und entwicklungsorientierte Anwender interessant sein, um beispielsweise Verfahren der automatischen Fehlerklassifikation in die Prüfung zu integrieren.



Mithilfe der Toolbox können die Messergebnisse im Zeit- und Frequenzbereich in Form von Spektren optimiert werden.

Abb. 8, A-Bild-Darstellung (links) und Spektrum (rechts) in SONOWARE

Eine Methode nur für Experten?

Obwohl insbesondere für methodische Entwicklungen – und z. T. auch für die erstmalige Messung an neuen Materialien und Bauteilformen – Expertenwissen sehr hilfreich ist, so ist die Methode keinesfalls nur von Experten nutzbar. Die Aufbereitung der Daten, die die physikalische oder werkstoffliche Information in eine bildlich lesbare Form bringt, ist wesentlicher Teil der Verfahrensphilosophie. Im Idealfall werden

durch geeignete Filter nur die Anteile im Bauteil hervorgehoben, die mit einem Fehler behaftet sind. Wenn es sich um Fehler handelt, die wiederholt vorkommen können (z. B. im Produktionsprozess), dann ist auch eine automatische Fehlererkennung oder Bewertung möglich. Methoden der Mustererkennung [3] lassen sich erfolgreich auch auf Fragestellungen des luftgekoppelten Ultraschalls anwenden.

Einseitig

„Einseitigkeit“ kann auch etwas sehr Erstrebenswertes sein. Die Luftultraschallmessung in Transmission ist in einigen Fällen – meist wegen fehlender Zugänglichkeit – nicht möglich.

Der Ultraschall wird an einem Bauteil aufgrund des großen Impedanzunterschieds zwischen Bauteil und Luft von der Oberfläche reflektiert, ohne dass er eine Wechselwirkung mit dem Material des Bauteils erfahren hat. Ein kleiner Anteil des Ultraschalls dringt aber doch ein und wird an der nächsten Grenzfläche ebenfalls reflektiert. Die damit

verbundene geringe Intensität des von inneren Reflexionen aus dem Material herrührenden Signals erfordert andere Prüfkopfanzordnungen und konstruktive Lösungen wie z. B. Schrägeinschalungen. Außerdem ist es eine große Herausforderung, das aus dem Prüfling stammende vom direkten Reflexionssignal an der Oberfläche (auf der Senderseite) zu unterscheiden. Damit können die üblichen Impuls-Sende-Empfangs-Methoden nicht angewandt werden. Hier sei auf weiterführende Literatur verwiesen.

Anwendungsbeispiel Prozesskontrolle

Die Methode des luftgekoppelten Ultraschalls ist auch dafür prädestiniert, zeitveränderliche Materialgrößen zu überwachen. Solche Materialveränderungen treten etwa bei Aggregatzustandsänderungen auf und kommen in der Industrie z. B. im Rahmen von Aushärtereaktionen vor. Diese sind in der Regel Teil des Herstellungsprozesses.

Für das Einbringen von Dichtmassen, Klebungen, Härten von Harzen und Farbkomponenten ist es von Bedeutung zu wissen, wann der richtige Zeitpunkt gekommen ist, um für die endgültige Anwendung die richtigen mechanischen Eigenschaften aufzuweisen. Da dies in der Regel auch flächenhafte Auftragungen im Kontakt mit Träger-

[3] M. Tiitta, V. Tiitta, M., Gaal, J., Heikkinen, R., Lappalainen, L. Tomppo, Air-coupled ultrasound detection of natural defect in wood using ferroelectret and piezoelectric sensors, Wood Science and Technology, <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01189-y>

oder weiteren Materialien betrifft, kann gleichzeitig auch noch die Qualität der Klebung bzw. Kontaktierung (im Sinne der im vorherigen Text beschriebenen Anwendungen) bewertet werden. Als repräsentatives Beispiel dient im Folgenden die Aushärtung von chemisch aushärtenden Kleb- und Dichtmassen [4]. Die gezeigten Beispiele sind in Transmissionsanordnung aufgenommen, wobei eine einseitige Prüfung ebenfalls möglich ist. Ein wichtiger Vorteil der Ultraschallverfahren besteht darin, dass die akustischen und mechanischen Eigenschaften in einem direkten Zusammenhang stehen und nicht nur

der Klebstoff an sich, wie bei vielen analytischen Messmethoden, sondern der in einem Verbund applizierte Klebstoff untersucht werden kann. Grundlage der Verfahrensidee ist es, dass sich der Zusammenhang zwischen den Messgrößen und interessierenden Materialparametern über eine eindeutige Korrelation beschreiben lässt. Die Laufzeit im Material hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit von der Steifigkeit (E-Modul) bzw. der Dichte der Dichtmasse ab. Die Dichte und der E-Modul verändern sich wiederum während der Aushärtung systematisch.

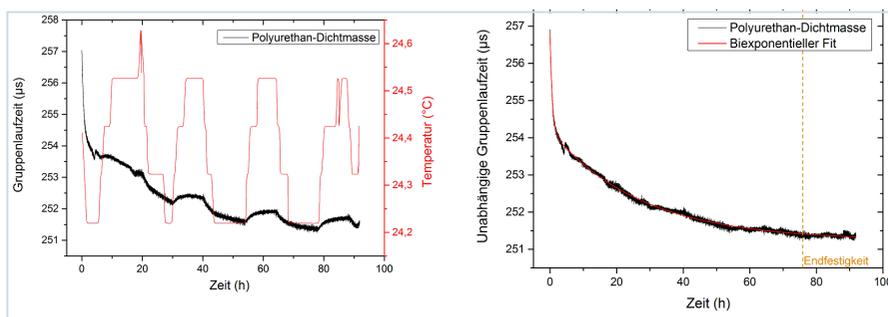


Abb. 9, Berührungslose Messung der Aushärtung einer Dichtmasse mit Luftultraschall

Die Veränderung der Laufzeit während der Aushärtung der Dichtmasse ist hier exemplarisch an einem einkomponentigen Polyurethan-System (PUR, Marke: DELO-PUR SJ9456, Hersteller: Delo Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA) dargestellt. Dafür wurde die sogenannte Gruppenlaufzeit, die die frequenzunabhängige Laufzeit des gesamten Empfangssignals beschreibt, ausgewertet. Zur Erstellung der Graphen wurden Messungen

im Intervall von 20s durchgeführt, wobei sich jedes Messsignal aus einer Mittelung von 120 Einzelmessungen zusammensetzt. Dabei fällt auf, dass die Änderung der Laufzeit sowohl auf eine variierende Umgebungstemperatur als auch die Aushärtereaktion an sich zurückgeführt werden kann (Abbildung 9, links), wie simultane Temperaturmessungen belegen. Durch eine entsprechende Temperaturkompensation kann auf den

reinen Aushärteverlauf geschlossen werden (Abbildung 9, rechts). Die Endfestigkeit der feuchtigkeits-aushärtenden Dichtmasse ist laut Herstellerangaben bei einer Tiefe von 6,3 mm nach ungefähr 80 Stunden erreicht. Das Aushärteverhalten kann anhand des Signalverlaufs durch einen biexponentiellen Fit sehr gut beschrieben werden. Der zunächst starke Abfall der Gruppenlaufzeit des Luftultraschall-Signals resultiert aus der Aushärtung oberflächennaher Bereiche, die in direktem Kontakt zur Luft stehen. Dabei steigen der Impedanzunterschied und damit der Reflexionsfaktor an der Oberfläche stark an. Aushärtevorgänge im Inneren der Dichtmasse können erst nach Diffusion der Feuchtigkeit in das Material stattfinden und erzeugen demnach einen flacheren Abfall der Laufzeit, wie die Messdaten zeigen. Das unterschiedlich ausgeprägte Abklingverhalten deutet an, dass sich mechanische Eigenschaften stärker als optische Eigenschaften während des Aushärtevorgangs verändern. Das kann zudem mit den unterschiedlichen Signalformen begründet werden. Bei der Berechnung der US-Gruppenlaufzeit findet die Integration über ein größeres Intervall des Signals statt. Gegenwärtig wird am SKZ an der Übertragbarkeit des beschriebenen Verfahrens auf verschiedene Materialklassen wie andere aushärtende Dichtmassen, Klebstoffe, erstarrende Thermoplaste oder vernetzende Duroplaste gearbeitet. Aufgrund der guten Integrierbarkeit in den Prozess, den geringen

Systemkosten und der ausgeprägten Robustheit der Systemtechnik infolge des Fehlens optischer und damit zumeist empfindlicher Komponenten erfährt das SKZ regelmäßig eine hohe Akzeptanz der Industrie für diesen neuen Messansatz.

Inlinefähigkeit: Wissenschaftliche Fragestellungen und Schnittstellen

Die Weiterentwicklung von Verfahren und Technologien hängt auch davon ab, ob Anlagen, Sensoren, Softwarekomponenten modular angepasst werden können. Die für die Messungen verwendete Anlage SONOAIR kann für viele Fragestellungen modifiziert und skaliert werden. Für den Nutzer gibt es bei Bedarf viele Eingriffsmöglichkeiten. Neben den in den Parametereinstellungen der Prüftechnik variierbaren Größen wie Messfrequenz, Scaneinstellungen u. a. lassen sich in der Software spezifische Auswertefahren integrieren. Dies ist sowohl auf der direkten Messebene (Echtzeitdaten) als auch in der nachfolgenden Anwendung auf alle Daten möglich. Damit lassen sich die Auswertefahren anpassen oder gegebenenfalls auch weiterentwickeln. Insbesondere für den wissenschaftlichen Bereich interessant ist die Möglichkeit die Daten in MATLAB oder vergleichbare Programme zu übergeben und somit effektiv eigene Algorithmen zu entwickeln und anzuwenden.

Arrays auch für Luftultraschall

Phased-Arrays sind aus der Materialprüfung und im Medizinischen Bereich nicht mehr wegzudenken. Die richtungsabhängige Steuerung des Aussendens und Empfangens von Ultraschallfeldern hat die Anwendbarkeit des Ultraschalls für diagnostische Zwecke revolutioniert. Obwohl die Methode technologisch sehr anspruchsvoll ist und hohe Anforderungen an die Messtechnik und Rechenleistung stellt, ist die Interpretierbarkeit aufgrund der „Übersetzung“ in eine geeignete bildliche Darstellung für den Nutzer oft viel leichter und eindeutiger. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen mechanisch scannenden Verfahren, zeichnen sich die Array-Verfahren dadurch aus, dass die Schallfeldgenerierung und der Empfang elektronisch gesteuert sind. Dazu müssen eine Vielzahl synchron arbeitender Elemente in einem Array-Kopf zusammengeschaltet werden. Es wäre faszinierend, wenn diese Technologie auch ohne Ankopplung

funktionieren könnte. Die Übertragung der bekannten Phased-Array-Technik über eine Luftstrecke stößt wegen der anfangs beschriebenen großen Impedanzunterschiede zwischen Luft und den Prüfbauteilen auf große Schwierigkeiten. Wie realistisch ist es, Array-Technologie für Luft übertragende Anwendungen trotzdem zu nutzen?

Es sei darauf hingewiesen, dass es auch erste Lösungen für die Übertragung der Phased-Array-Technik auf die Luftultraschallprüfung gibt. Dies betrifft insbesondere die Schallfeldmanipulation zur Erhöhung des erreichbaren Signal-Rausch-Verhältnisses und der Variation des Einstrahlungswinkels. Die Anwendungsmöglichkeiten der Methode und der Prüfanlage sind bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Neueste Entwicklungen schließen Arraytechnik ein. Damit wird das System sowohl für kontaktfreie tomografische (HOL04) als auch für Phased-Array-Anwendungen interessant.

Fazit

Luftultraschall lässt sich für viele Prüfaufgaben einsetzen. Wenn Bauteile, individuell oder im Herstellungsprozess eingebunden über Luft mit Ultraschall angeregt werden können, sind diese für die Prüfung mit Luftultraschall interessant. Eine wichtige Voraussetzung ist, dass das Prüfproblem mit einem geeigneten akustischen, respektive dichte-seitigen, Kontrast verbunden ist. Es können zwar nicht alle Formen von Bauteilen geprüft werden, trotzdem ist die Anwendung von Luftultraschall für viele Fragestellungen interessant. Natürlich kommt die besondere Stärke der Methode dort zum Tragen, wo ein Kontakt zum Prüfling vermieden werden muss. Durch die Kontaktfreiheit kann das Verfahren auch für schnell zu scannende Prüfaufgaben eingesetzt werden. Der Nachteil der im Vergleich zu anderen Verfahren geringeren Empfindlichkeit und Auflösung bleibt bestehen. Allerdings gibt es hier durch die Einführung neuer Verfahren und Prüfköpfe bis hin zu Phased-Arrays Verbesserungsmöglichkeiten. Damit werden weitere interessante

Anwendungen möglich.

Der wichtigste Anwendungsbereich liegt in der Detektion von fehlenden Verbindungen in Bauteilen, die sich konstruktiv negativ auswirken können. Wichtige Beispiele ist die Überprüfung auf unerwünschte Delaminationen oder fehlende Verklebungen – vor allem bei Leichtbau und Verbundwerkstoffen. In diese Fehlerkategorie fallen auch die im Artikel beschriebenen Anwendungen an wertvollen alten Möbeln.

Ein großes Potenzial liegt in der Anwendung von neuen Methoden der Datenverarbeitung. Hier ist noch viel Potential erschließbar. Insbesondere Techniken zum Handling großer Datenmengen und der Einsatz von künstlicher Intelligenz können die Einsatzbereiche vor allem in Hinblick auf die automatisierte Einbindung in Produktionsprozesse beschleunigen. Im STZ Technische Akustik und angewandte Numerik nehmen deshalb die Arbeiten zu den datenbezogenen Verbesserungen einen breiten Raum an, da diese ein zentraler Aspekt der Entwicklungen und Dienstleistungen des Transferzentrums sind.

Steinbeis-Transferzentrum „Technische Akustik und angewandte Numerik“
An der Technischen Universität Ilmenau
Margarethenweg 9a, D-04425 Taucha

 peter.holstein@stw.de

 0176 56780476