

Aktuelle Entwicklungsarbeiten zu aktiv angeregten geführten Wellen (Acousto-Ultrasonics) für SHM-Anwendungen

Lars SCHUBERT¹, Thomas KLESSE¹, Bianca WEIHNACHT¹, Eberhard SCHULZE¹,
Uwe LIESKE¹, Bernd FRANKENSTEIN¹

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Institutsteil
Materialdiagnostik (IKTS-MD), Dresden

Kurzfassung. Bei der Schallemissionsanalyse an Plattenstrukturen werden geführte elastische Wellen zur Schadensdetektion verwendet. Bei der aktiven Untersuchungsmethode, dem sogenannten Acousto-Ultrasonics-Verfahren können diese geführten Wellen durch piezoelektrische Aktoren angeregt werden. Die aktiv angeregten elastischen Wellen breiten sich in dünnwandigen Materialien aufgrund einer geringen geometrischen Dämpfung gut aus. Anwendungsgebiete sind breit gestreut (Rohrleitungen, Tanks oder Verbundwerkstoffe). Die Bauteilgeometrie verursacht die Aufspaltung in eine Vielzahl von Wellenmoden, von denen die meisten dispersiv sind, d.h. dass die Phasengeschwindigkeiten der Wellen von ihrer Frequenz abhängen. Für den Nachweis von Bauteilinhomogenitäten können spezifische Wellenmoden genutzt werden. Die Schadenswechselwirkung dieser Moden lässt Rückschlüsse auf Risse, Delaminationen und Korrosionen in Materialien zu. Die Schadenszustände können je nach messtechnischem Umfang global oder lokal aufgelöst werden. Eine permanent installierte SHM-Überwachungstechnik eignet sich bevorzugt dort, wo Überwachungsobjekte nur schwer zugänglich sind (z.B. Offshore-Windkraft-Anlagen, Erdleitungen, Gefahrenzonen oder ex-geschützte Bereiche).

Der Beitrag stellt den aktuellen Entwicklungsstand zum Monitoring mit geführten akustischen Wellen vor. Neben technischen Fragestellungen und Darstellung der Einsatzmöglichkeiten wird auf die aktuelle Richtlinienarbeit eingegangen, wie sie derzeit im Fachausschuss Zustandsüberwachung mit dem Merkblatt SHM 01 „Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls“ durchgeführt wird. Dieses Merkblatt des Fachausschusses SHM der DGZfP soll Kunden und Betreibern Sicherheit geben, um die neuen Monitoring-Lösungen zielgerichtet einsetzen zu können.

1. Einführung

Für die Überwachung von dünnwandigen Strukturen haben sich in der Vergangenheit geführte Wellen als ein geeignetes Mittel zur dauerhaften Überwachung erwiesen. Unter Structural Health Monitoring versteht man dabei eine Methode, die eine permanente Installation der Sensoren an der zu überwachenden Struktur vorsieht. Im Wesentlichen sind für den Einsatz folgende Gründe relevant:



1. Die Zugänglichkeit der zu überwachenden Komponenten spielt dabei eine besonders wichtige Rolle, da manche Stellen einer Anlage nur beim Aufbau erreicht werden können. Eine Nachinstallation ist nicht einfach möglich.
2. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist eine dauerhafte Überwachung notwendig, um ein Versagen der Struktur frühzeitig zu erkennen – unabhängig von den Wartungszeiträumen. Nur mit SHM ist es möglich, jederzeit eine Aussage über den Zustand der Anlage zu treffen.
3. Aus kostentechnischer Sicht ist ein Übergang zur zustandsabhängigen Wartung wünschenswert. Dieser wird mit Hilfe von SHM ermöglicht.

Geführte Wellen bieten für den Einsatz vielfältige Möglichkeiten. Die Auflösung ist im Vergleich zu konventioneller NDT-Prüfung geringer, dafür werden aber weniger Sensoren benötigt. Die kritischen Bereiche werden integral überwacht, so dass globalere Aussagen getroffen werden können und man von punktuellen Messungen, mit den damit verbundenen Fehlerauffindwahrscheinlichkeiten, unabhängig wird.

Anwendungsgebiete sind alle rohrförmigen oder plattenartigen Strukturen aus verschiedenen Werkstoffen wie Stahl, CFK und GFK. Einsatzmöglichkeiten finden sich somit sowohl in der Windenergiebranche (Rotorblätter, Gründungsstrukturen, Türme) als auch in der Automobilindustrie oder im Luftfahrtbereich. Ebenfalls relevant sind Rohrstrukturen, wie sie in Kraftwerken, in der chemischen Industrie als auch bei Pipelines eingesetzt werden.

2. Verfahrensbeschreibung

Für die hier vorgestellten Arbeiten wurden geführte Wellen, sowohl passiv durch Anregung im Material (Schallemissionsanalyse) als auch im Rahmen aktiver Ultraschallverfahren (Acousto Ultrasonics) genutzt (s. Abbildung 1).

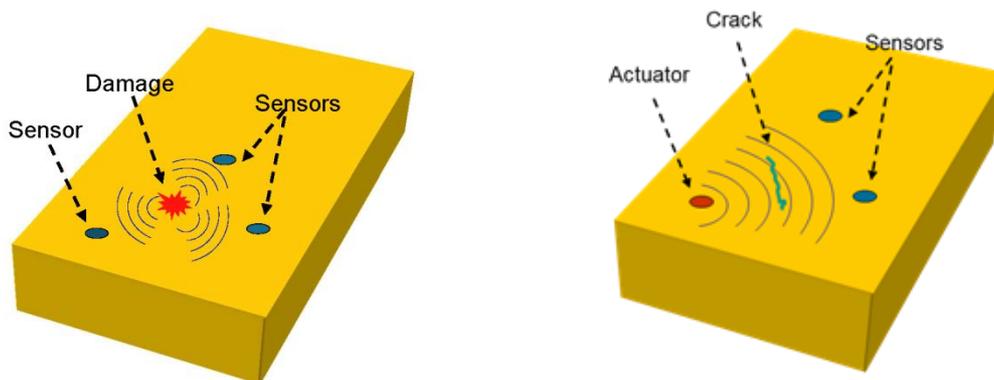


Abbildung 1: Geführte Wellen für SHM – links Schallemissionsanalyse, rechts Acousto Ultrasonics

Die Schallemissionsanalyse eignet sich für die Zustandsüberwachung, wenn im Material akustische Emissionen durch Schädigungen induziert werden. Die durch Sensoren an der Oberfläche des Bauteils zu detektierenden Wellen sind somit direkt Schädigungsmechanismen im Material zuordenbar. Der Emissionszeitpunkt ist unbekannt, was eine Auswertung der Daten auf der Basis von Laufzeitdifferenzen notwendig macht. Eine Auswertung erfolgt in der Regel nach Parametern wie Dauer, Stärke/Energie oder auch Amplituden-Maximum der Burstsignale.

Bei der Anwendung des Acousto-Ultrasonics Verfahrens werden aktiv Ultraschallwellen mittels Aktor ins Material eingebracht und mit Sensoren detektiert. Materialunterschiede wie Risse, Wandabtrag oder auch Korrosion zwischen Aktor und

Sensor haben Einfluss auf die das detektierte Signal. Auswerteparameter sind beispielsweise Laufzeit, Amplitude und Frequenzgehalt.

In Abbildung 2 wurde exemplarisch ein Dispersionsdiagramm für geführte Wellen darstellt. Es zeigt sich eine starke Frequenzabhängigkeit, die bei den Untersuchungen unbedingt berücksichtigt werden muss. Auf der X-Achse ist das Produkt von Frequenz und Plattendicke aufgetragen. Deswegen muss für jede Messkonfiguration ein Dispersionsdiagramm herangezogen werden, um die Bestimmung des ausbreitenden Wellenmodes und der damit erwarteten Wechselwirkung mit Fehlern gewährleisten zu können.

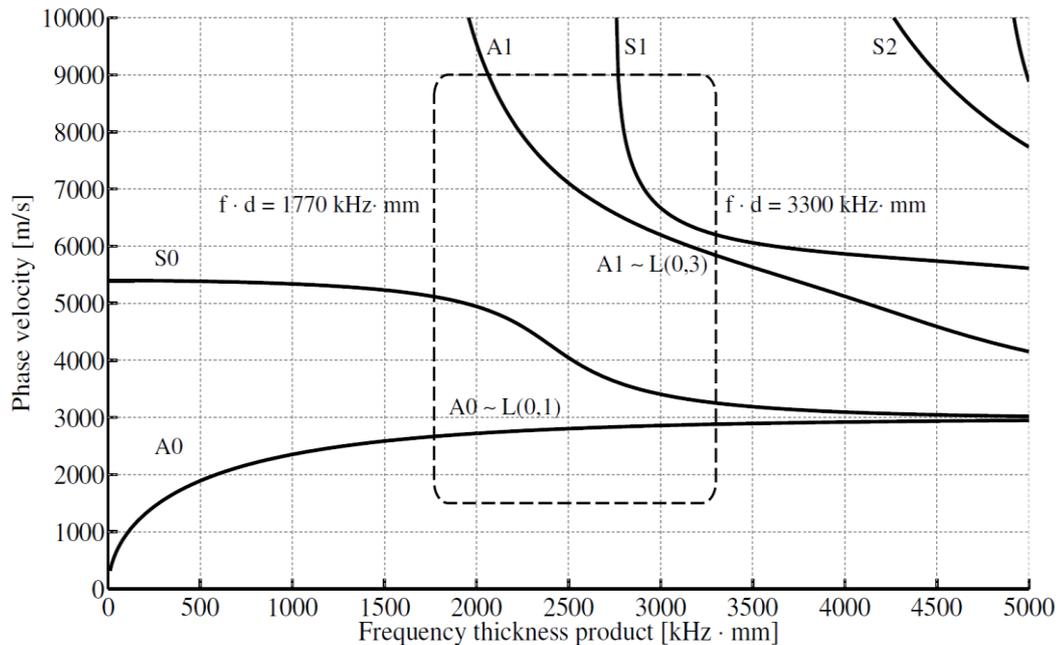


Abbildung 2: Typisches Dispersionsdiagramm für Plattenstrukturen

Für die Auswertung kommen im Allgemeinen Parameter wie Laufzeit und die damit verbundene Phasengeschwindigkeit oder aber die Änderung in reflektierten bzw. transmittierten Signalen (Amplitudenauswertung, Betrachtung der Frequenzverschiebung u. a.) in Frage.

3. Darstellung des Normenumfanges des Acousto-Ultrasonics-Verfahrens

Um den Eingang in Regelwerke zu ermöglichen, wurde im DGZfP-Fachausschuss „Zustandsüberwachung“ eine Normung angestrebt und ein Merkblatt bezüglich SHM erarbeitet. Die Inhalte sind wie folgt definiert:

„Das vorliegende Merkblatt beschreibt das Prinzip der Strukturüberwachung mittels geführter Wellen. Hierbei handelt es sich um ein aktives Ultrasonics-Verfahren. Auf der Strukturoberfläche sind permanent installierte Ultrasonics-Wandler aufgebracht, die an diesen Stellen Ultrasonics in die Struktur ein- bzw. auskoppeln. Die ausgekoppelten Ultrasonics-Signale werden bewertet und Signaländerungen mittels verschiedener Analysemethoden ermittelt, aus denen dann wiederum auf Strukturänderungen geschlossen werden kann. Dazu werden in das Überwachungsobjekt durch einen als Aktor fungierenden Ultrasonics-Wandler spezifisch Ultrasonics-Wellen eingebracht. Diese Wellen durchlaufen den

Prüfling und interagieren, je nach Wellenlänge und Wellenmode unterschiedlich stark mit der Fehlstelle und werden von den übrigen, als Sensoren genutzten Ultraschallwandlern empfangen. Die die Strukturzustände charakterisierenden Signale werden anschließend miteinander verglichen und Signaländerungen über Schadensindikatoren dargestellt. Dieses Verfahren wird auch als Signaturanalyseverfahren oder Lambwellenanalyse bezeichnet und ist im englischsprachigen Raum als Acousto Ultrasonics bekannt.“ Neben den physikalischen Grundlagen finden sich in diesem Dokument sowohl detaillierte Beschreibungen der einzelnen Verfahren (z.B. Phased Array, Pitch-Catch) als auch der Auswertemethoden (z.B. Time-Reversal-Methoden, Zeit-Frequenz-Analyse). Augenmerk wurde auch auf die modellbasierten Methoden sowie Visualisierungsmethoden gelegt.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Verfahren klassischer Ultraschall und aktiv angeregte geführte Wellen. Bereits Ende des 18. Jahrhundert wurden von Lord Rayleigh die Grundlagen für die klassische Ultraschallanwendung gelegt. Erste Ultraschallgeräte für Pulse-Echo-Verfahren waren bereits ab 1939 verfügbar. Krautkrämer legte 1959 wichtige Grundlagen für die Fehlerbestimmung mit AVG-Diagrammen. Seit den 1970er Jahren entstanden viele Ausschüsse, die sich mit Normungen für Verfahren, Testkörper, Prüftechnik und Ausbildung beschäftigen.

Im Gegensatz dazu liegt das Verfahren der geführten Wellen im Entwicklungsstand zurück: Zwar wurden die Grundlagen von Lamb bereits 1916 formuliert und die Analyse des Gleichungssystems sowie der experimentelle Nachweis von Mindlin und Worlton in den 1960er Jahren gelegt, erste kommerzielle Messsysteme kamen aber erst nach der Jahrtausendwende auf den Markt.

Diese Betrachtungen zeigen, dass insbesondere im Bereich der Normungen für die aktiven Verfahren mit geführten Wellen noch große Defizite bestehen, die durch Arbeit in Gremien und Ausschüssen beseitigt werden müssen.

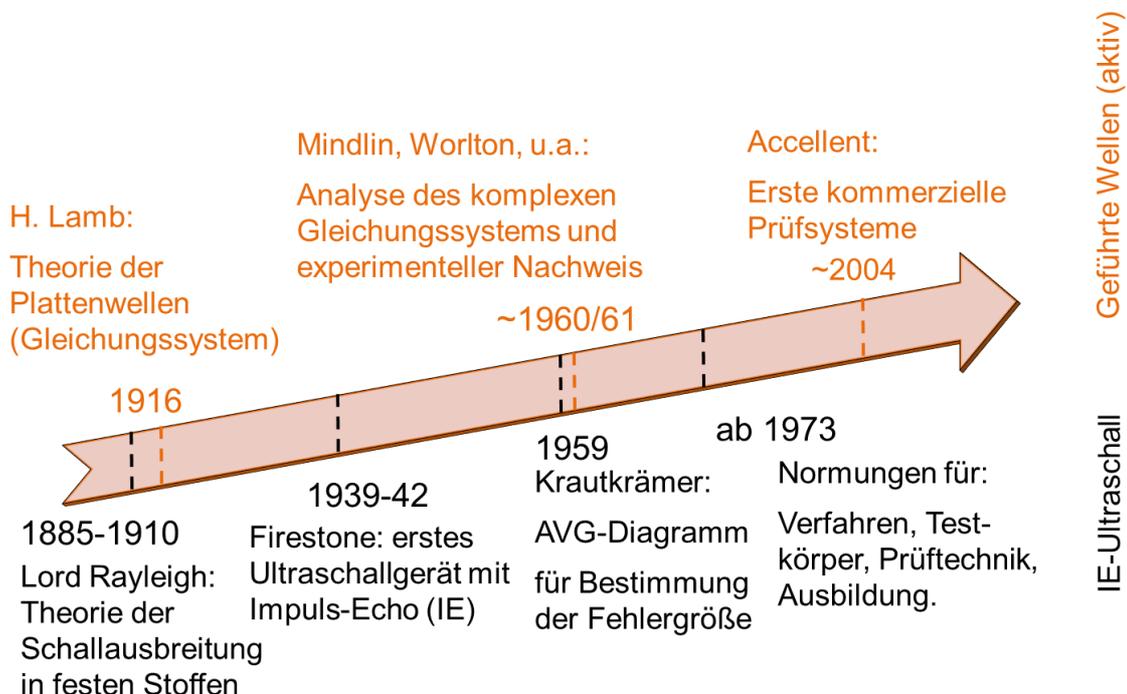


Abbildung 3: Vergleich von klassischem Ultraschall und geführten Wellen

4. Entwicklungsstand Monitoring mit geführten akustischen Wellen

Am Fraunhofer IKTS-MD wurden in den vergangenen Jahren drei Entwicklungen bzw. Arbeitsfelder mit geführten Wellen intensiv bearbeitet:

1. Monitoring der Wanddicke
2. Risserkennung mittels Sensormanschette
3. Kombinierte Behälterprüfung (aktiv und passiv) im ex-geschützten Bereich.

4.1 Wanddickenmonitoring

Insbesondere bei stark korrosiven oder abrasiven Medien in Rohren, wie sie beispielsweise in der chemischen Industrie oder aber auch durch das Öl-Sand-Gemisch in der Erdölindustrie auftreten, ist die Restwandstärke von großem Interesse. Durch eine permanente Überwachung können Rohre vollständig in der Lebensdauer ausgenutzt und Havarien vermieden werden

Der am IKTS-MD entwickelte CoMoRanger® dient der Überwachung schwer zugänglicher Rohrleitungen und anderer korrosionsanfälliger Komponenten in Anlagen. Der Vorteil des Systems ist die kontinuierliche Bestimmung der Restwandstärke bei flächenhaft auftretender Korrosion durch Auswertung geführter akustischer Wellen. Die Installation der Sensoren ist einfach, da in der Regel keine Änderungen an der Anlage durchgeführt werden. Mittels Stahlband werden die Sensoren an das Rohr angepresst und verbleiben dann dauerhaft am Überwachungsobjekt (s. Abbildung 4). Je nach Umweltbedingungen und Anforderungen können unterschiedliche Sensoren verschiedener Temperaturklassen oder Sonderanfertigungen für explosionsgeschützte Bereiche angeschlossen werden. Zudem kann das Überwachungssystem jederzeit durch Vernetzung erweitert werden.

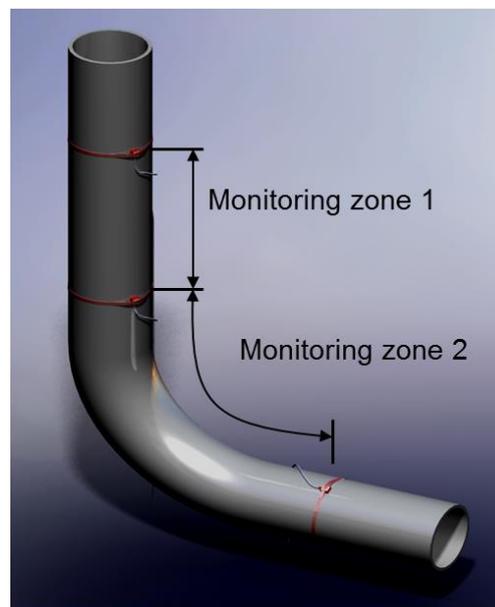


Abbildung 4: Monitoring Prinzip beim Messsystem CoMoRanger®

Das Messprinzip ist in Abbildung 5 dargestellt. Genutzt werden stark dispersive Grundmoden der Wellen, die besonders sensitiv auf Wanddickenänderungen reagieren (s. Dispersionsdiagramm Abbildung 2). Da die Moden im Signal nicht einfach getrennt

werden können (rechts), ist nur die Auswertung der Ersteinsatzsignale möglich. Diese werden mit Dispersionskurven des Modells verglichen und so die Restwandstärke ermittelt.

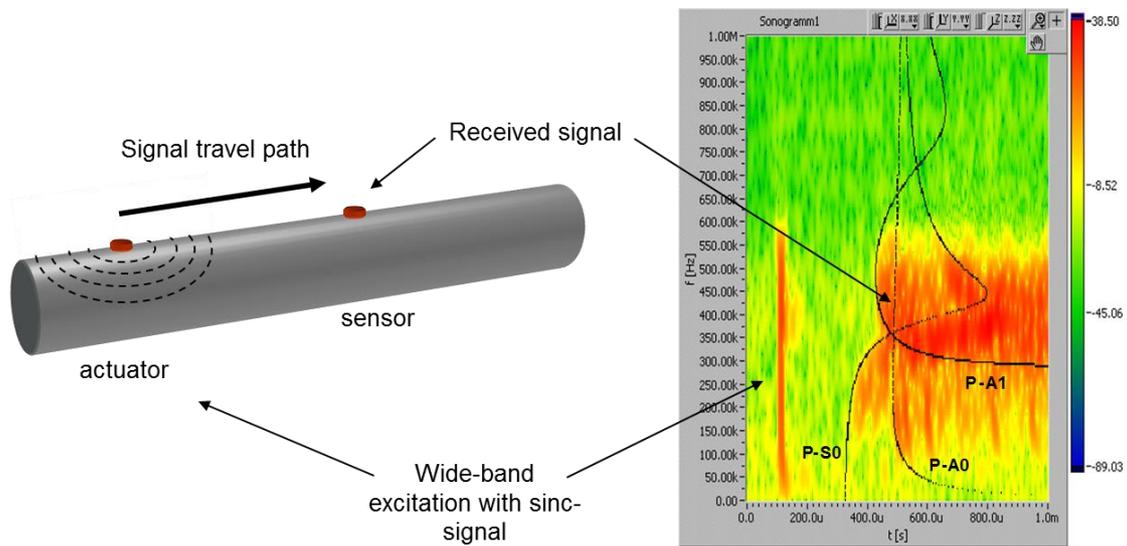


Abbildung 5: Messprinzip der Wanddickenüberwachung

4.2 Risserkennung mittels Sensormanschette

Für die Überwachung von schwer zugänglichen Schweißnähten, wie in spitz zulaufenden Strukturen z.B. Offshore-Gründungsstrukturen, sind spezielle Überwachungstechniken notwendig. Wie in Abbildung 6 dargestellt, werden dafür zwei Sensormanschetten am Messobjekt angebracht und Wellen zwischen beiden gesendet und empfangen. An fehlerhaften Schweißnähten, z.B. durch Flankenfehler, wird ein Teil der Energie reflektiert und das detektierte Signal verändert. Dadurch sind Aussagen zum Schädigungsgrad möglich.

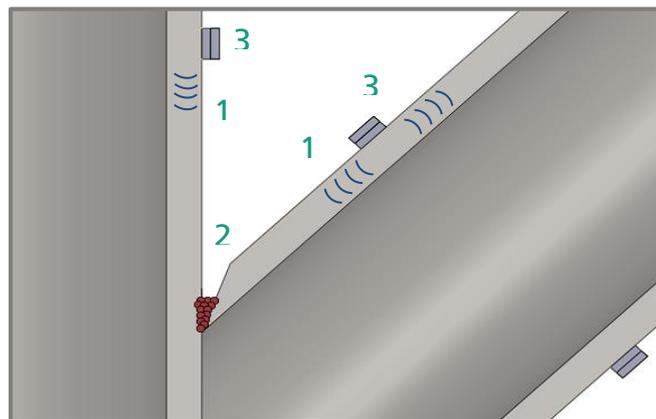


Abbildung 6: Überwachung von Schweißnähten mittels Sensormanschette

Es wurde ein Bussystem entwickelt, welches aus einzelnen Sensorknoten besteht, wie er in Abbildung 7 zu sehen ist. Die Platine gewährleistet eine Adressierung des Wandlers als Aktor und Transmitter. Es können Tomographiemessungen durchgeführt werden.

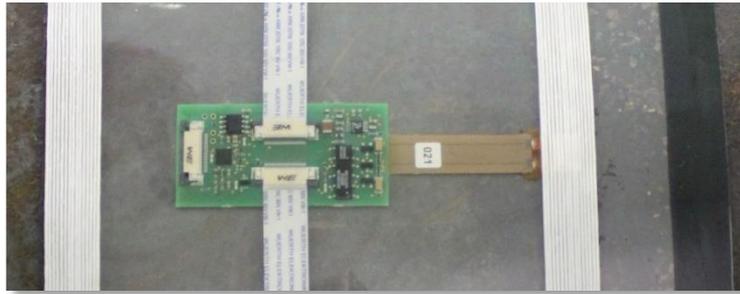


Abbildung 7: Sensorknoten der Sensormanschette

In Abbildung 8 ist die am Rohr angebrachte Manschette zu sehen. Im rechten Teil der Abbildung ist ein speziell entwickeltes Befestigungsband zu erkennen, das auch unter widrigen Offshore-Bedingungen dauerhaft an einer Gründungsstruktur verbleiben kann.



Abbildung 8: Am Rohr angelegte Sensormanschette; links ohne Befestigungsband, rechts mit Befestigungsband

4.3 Kombinierte Behälterprüfung (aktiv und passiv) im ex-geschützten Bereich

Das System CoMoDetect dient der permanenten Überwachung schwer zugänglicher Behälter und anderer korrosionsanfälliger Komponenten im explosionsgeschützten Bereich von Industrieanlagen. Das System ermöglicht ein Monitoring von Anlagen während der Produktion mit geführten akustischen Wellen. Es besteht aus einem Netz verteilter Sensoren und einem elektronischen Datenerfassungsgerät. Der Überwachungsbereich wird dabei durch den Abstand der Sensoren zueinander definiert. Mehrere Sensoren können zu Clustern zusammengeschaltet werden, um die Ortsauflösung in kritischen Bereichen zu erhöhen.

Die Installation der Sensoren ist einfach: In wenigen Arbeitsschritten erfolgt die Fixierung am Behälter durch etablierte Schweißverfahren. Dadurch werden die Sensoren, die für verschiedene Temperaturbereiche im Ex-Bereich zertifiziert sind, dauerhaft mit dem Behälter verbunden. Das Überwachungssystem kann jederzeit erweitert werden. Aus den gewonnenen Daten wird der Zustand der Anlage bestimmt und für den Anlagenbetreiber visualisiert.

Abbildung 9 zeigt einen solchen verwendeten Sensor, der sowohl für die aktiven als auch die passiven Messungen verwendet werden kann. Typisches Anwendungsbeispiel sind z.B. große Tanks der chemischen Industrie.

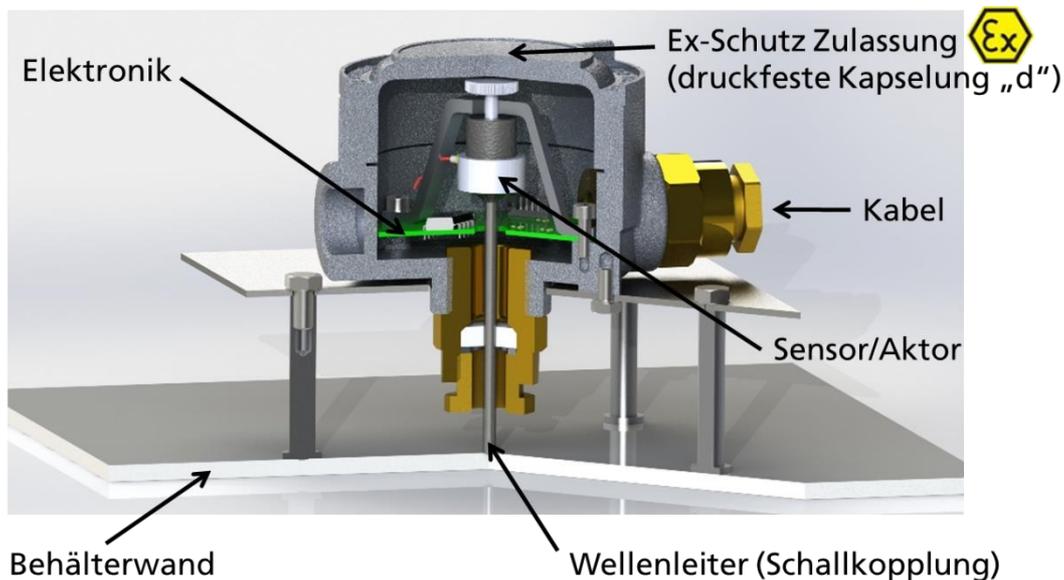


Abbildung 9: Für Überwachung von Stahlstrukturen entwickelter und zertifizierter Schallemissions- und Ultraschallsensor

5. Zusammenfassung

Durch die Kombination beider akustischer Verfahren mit geführten Wellen, sowohl mit passiver als auch aktiver Anregung, kann die Aussagekraft der Einzelmethoden signifikant erhöht werden. Man ist durch eine verfahrensübergreifende Interpretation in der Lage, Fehlalarme zu vermeiden und die Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlern zu erhöhen.

Für die Akzeptanz bei den Anwendern ist es notwendig, dass die aktiven Verfahren Eingang in die Regelwerke finden. Daran wird im DGZfP-Fachausschuss „Zustandsüberwachung“ gearbeitet.

Trotz der großen Fortschritte erfordert die Auswertung des Acousto-Ultrasonics-Verfahrens bisher noch „Expertenwissen“, da einfache Schädigungsindikatoren bisher nicht zur Verfügung stehen. Es ist zukünftig notwendig, ähnlich zu den im klassischen Ultraschall verwendeten Kreisscheibenreflektoren, vereinfachte Interpretationsmöglichkeiten zu schaffen.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern am DGZfP Merkblatt „Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls“, das im Fachausschuss Zustandsüberwachung entstanden ist.

Referenzen

[1] DGZfP Merkblatt SHM 01: „Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls“, erschienen im Dezember 2014