

Ultraschall in der Instandhaltung

Peter Holstein, Nicki Bader

SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 06112
Halle, E-Mail: peter.holstein@sonotec.de

Motivation

Ultraschallmethoden sind in der Instandhaltung seit langem etabliert. Insbesondere für qualitativ orientierte Bewertungen von Zuständen und Prozessen haben sich spezifische Anwendungen durchgesetzt. Die Verfahren beruhen weitgehend auf analogen Technologien. Im Beitrag werden die erweiterten Möglichkeiten einer konsequenten Digitalisierung vorgestellt. Das betrifft neben der Verfahrensentwicklung und Integration neuer Algorithmen in die Mess- und Prüftechnik auch die Entwicklung geeigneter Sensorik. Beispielhaft werden in diesem Kontext die Vorteile breitbandiger Sensoren für Körperschall an geeigneten Anwendungsbeispielen erläutert.

Eine wichtige Funktion der industriellen Anwendung von Ultraschall ist die Hörbarmachung der hochfrequenten Prozesse. Auch hier liefert die digitale Umsetzung neue Möglichkeiten.

Grundlagen und Einordnung

In der zerstörungsfreien Prüfung nehmen Ultraschallmethoden eine Schlüsselstellung ein. Grundsätzlich können methodisch und technologisch zwei Klassen unterschieden werden. Dies sind zum einen die Verfahren, die mit akustischen Send- und Empfangsimpulsen die Eigenschaften der zu bewertenden Bauteile, Anlagen und Systeme „abfragen“ können. Diese werden im Beitrag nicht näher behandelt. Die zweite Klasse von Methoden nutzt den durch die Betriebsbedingungen und Belastungen erzeugten Ultraschall. Bei den Verfahren der sogenannten akustischen Emission werden die akustischen Auswirkungen von Rissen, Mikroreibungsvorgänge u. a. erfasst. Die Leistungsfähigkeit zeigt sich insbesondere bei der Bauteilprüfung im Leichtbau oder auch bei der Behälterprüfung [1]. Es können Frequenzen bis zu einigen MHz auftreten. Aufgrund der hohen Frequenzen haben sich eine eigenständige Messtechnik und spezielle Auswertestrategien herausgebildet.

Im Beitrag wird die Nutzung des Ultraschalls in der Instandhaltung diskutiert. Im Bereich zwischen ca. 20 kHz und 100 kHz wird in vielen industriellen Prozessen Ultraschall freigesetzt. Damit liegt der Frequenzbereich zwischen den Technologien der *Technischen Akustik* und der *Akustischen Emission* (siehe auch Abb. 1). Auch hier haben sich ein eigenständiger Gerätepark und eine gewisse Anwendungsphilosophie etabliert, die zum großen Teil durch die technologische und technische Entwicklung begründet ist.

Der konventionelle - und immer noch sehr verbreitete - Zugang mittels analoger Schmalbandtechnologie beschränkt

die Anwendbarkeit auf einige (wichtige) industrielle Fälle, bei denen die Frequenzcharakteristik eine eher untergeordnete Rolle spielt. Der Empfangssensor/-kanal arbeitet beispielsweise in einem schmalen Frequenzband um 40 kHz. Grund für die Frequenzwahl ist die Verfügbarkeit preiswerter Sensoren.

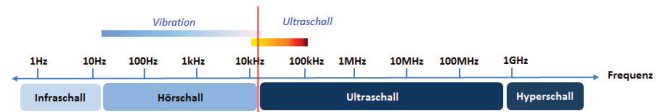


Abbildung 1, Einordnung der Methoden des Ultraschalls in der Instandhaltung. Die rote Linie steht für die Verwendung der Ultraschallverfahren in einem, engen Frequenzbereich (analoge Heterodyntechnologie). Damit ist nur eine sehr begrenzte Einsicht in die technologischen in die physikalischen und technischen Prozesse möglich. Die Grenzen zwischen Verfahren sind oft willkürlich. Der Balken zwischen 10 und 100 kHz steht für die im Beitrag beschriebene Technik.

Trotz des Nutzens, welchen Diagnosemethoden bei etwas höheren Frequenzen haben, werden diese nicht ihres Potenzials entsprechend genutzt.

Der konventionelle - und immer noch sehr verbreitete - Zugang mittels analoger Schmalbandtechnologie beschränkt die Anwendbarkeit auf einige (wichtige) industrielle Fälle, bei denen die Frequenzcharakteristik eine eher untergeordnete Rolle spielt. Der Empfangssensor/-kanal arbeitet beispielsweise in einem schmalen Frequenzband um 40 kHz. Grund für die Frequenzwahl ist die Verfügbarkeit preiswerter Sensoren. Dies ist in einigen speziellen Anwendungsfällen ausreichend um qualitative Fragestellungen mit ausreichender Sicherheit zu beantworten [2]. Ein wichtiges Argument für den Einsatz der Ultraschalltechnik liegt darin, dass sich durch Reibung verursachte Störungen oft etwas eher über die Ultraschallfrequenzen identifizieren lassen. Ein Beispiel ist die Unterscheidung geschmierter und ungeschmierter Zustände in Lagern. Ein anderes wichtiges Anwendungsfeld ist die Suche von Druckluftlecks – ein wichtiges Thema bei der Verbesserung der Energieeffizienz.

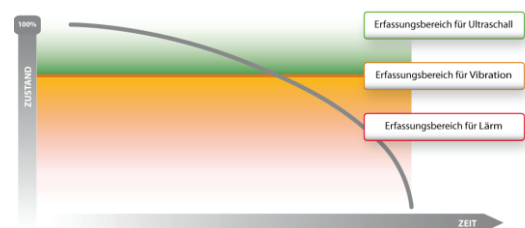


Abbildung 2, Generell verringert sich Leistungsfähigkeit und die Restnutzungsdauer industrieller Ausrüstungen mit der Betriebszeit. Maschinenfehler kündigen sich in der Regel lange vor dem eigentlichen Ausfall an. Standardmethoden der Akustik und Vibration sind deshalb in der Instandhaltung unverzichtbar. Aufgrund seiner physikalischen Ursachen, erlaubt Ultraschall oft einen früheren Zugriff auf sich anbahnende Fehler. Eine komplementäre Nutzung von Vibration und Ultraschall liegt nahe.

Die eigentliche diagnostische Information kommt dabei aus der zeitlichen Fluktuation des heruntergemischten Zeitsignals. Dieses Signal liegt im hörbaren Bereich und

kann wie ein herkömmliches Zeitsignal mit den Mitteln der Signalverarbeitung ausgewertet werden. Die eigentliche Trägerfrequenz kann aber im Nachgang nicht mehr beeinflusst werden. Das „Hören“ des Ultraschalls spielt bei der Anwendung der Methode in der Instandhaltung eine zentrale Rolle. Hier wird auf den Artikel von N. Bader im Tagungsband verwiesen [3].

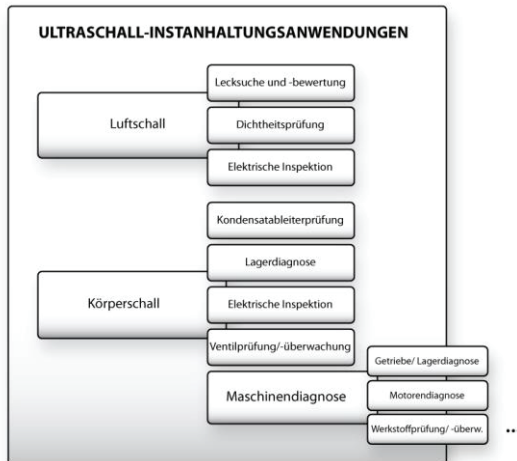


Abbildung 3, Überblick über wichtige und mögliche Anwendungen von Ultraschall in der Instandhaltung. Die Unterscheidung wurde bezüglich Luft- und Körperschallanwendungen vorgenommen

Wie erwähnt, hat sich die Struktur der Ultraschallprüfung auf den vor einigen Dekaden vorhandenen technologischen Möglichkeiten aufgebaut. Dies betrifft neben der Gerätetechnik auch das Gerüst der Normen und Vorschriften [4].

Spektroskopischer Zugang

Die im Artikel formulierten Argumente postulieren, dass die gegenwärtig akzeptierten Ultraschallmethoden in der Instandhaltungsprüftechnik eine deutliche Aufwertung erfahren könnten, wenn Frequenzbewertungen, welche die „Physik“ der Vorgänge komplett erfassen, einbezogen werden.

Über zwei Thesen soll dieser Ansatz hinterfragt werden:

- Würde ein „tieferes Hineinsehen“ in den Ultraschallbereich von 20 bis 100 kHz ein „Mehr“ an diagnostischer Information für die Instandhaltung liefern?
- Würden geeignete breitbandige (möglichst lineare) Sensoren einen spektroskopischen Echtzeitzugriff über einen größeren Frequenzbereich zulassen?

Für fast alle der in Abbildung 3 aufgeführten Anwendungen lässt sich die erste These eindeutig mit vielen Fallstudien belegen. Beispielsweise ist der durch Druckluftlecks entstehende Ultraschall in starkem Maße frequenzabhängig. Die breitbandigen Spektren enthalten wichtige Information über Ausströmgeschwindigkeit der Druckluft, Leckgröße

und –form sowie die Verlustmenge. Frequenzmaxima verschieben sich. Die Zusammenhänge sind viel komplexer als dass sie mit einem einfachen (schmalbandigen) Intensitätswert ausreichend beschreiben werden können [5]. Voraussetzung für die Nutzung ist das Vorhandensein entsprechender Sensorik. (Hochfrequenz-) Messmikrophone sind für den Industrieinsatz zu teuer. Aus diesem Grund wurden Ultraschall-geeignete Luftschallsensoren entwickelt, die im erforderlichen Bereich ausreichend empfindlich sind und in ihrer Frequenzcharakteristik entsprechend linearisierbar sind. Damit können die gleichen Bezugswerte wie in der Technischen Akustik für eine objektive Kalibrierung verwendet werden.

Da wesentlich mehr und komplexere Daten anfallen als bei den Schmalbandverfahren, muss auch entsprechend leistungsfähige und signalverarbeitungstechnisch flexible Prüftechnik bereitgestellt werden [6].

Das gleiche betrifft auch die Körperschallanwendungen. Es wurden technologisch neuartige breitbandige Festkörpersensoren auf der Basis von piezoelektrischen Kompositen entwickelt, die einen wesentlich besseren Einblick in detektierbare Vorgänge ermöglichen [7].

Von Bedeutung ist, dass die Sensorik zum Teil auch im Bereich der Schwingung und des hörbaren Schalls eingesetzt werden können. Damit sind komplementäre Aussagen möglich. Die Trennung der Methoden der Technischen Akustik und des Ultraschalls wird so zum Teil aufgehoben.

Die (verfügbare) Abtastung der realisierten Prüftechnik beträgt 256 kHz. Aufgrund des komplett digitalen Zugriffs auf die Daten sind alle üblichen (oder auch neue) Signalverarbeitungsoptionen bei Bedarf in Echtzeit oder im Post-Processing möglich. Dies war in der Instandhaltung bisher nicht üblich. Zum einen können (auch Bandpass bezogene) Standardparameter wie *Crest*- und *Kurtosis*-faktoren, aber auch beliebige Pegelwerte berechnet werden. Alle Anwendungen können durch angepasste Signalverarbeitung deutlich aufgewertet werden. Die Wertigkeit und Sicherheit der Prüfaussagen erhöht sich. Neu in der Instandhaltung ist die Echtzeitnutzung von Zeit-Frequenz-Methoden (z. B. Spektrogrammdarstellungen und –auswertungen). Interessanterweise sind die komplexeren Datendarstellungen wie Spektrogramm („-Bilder“) von „untrainierten“ Prüfern viel leichter zu interpretieren als scheinbar einfache Kennwerte. Methoden des maschinellen Lernens (neuronale Netze und vergleichbare Technologien) werden damit für die Ultraschallprüftechnologien erschließbar [8].

Dadurch entsteht in einigen Fällen ein völlig neuer Blick auf die Anwendbarkeit der Ultraschallmethode. Aus Sicht des Anwenders ist es bedeutsam, dass die aus den Daten getroffenen Aussagen über einzuleitende Instandhaltungsmaßnahmen sicherer sind und eventuell auch schon früher zur Verfügung stehen.

Anwendungsbeispiele

Im Folgenden sind einige typische und wichtige Einsatzfelder für Ultraschallprüfungen in der Instandhaltung zusammengestellt [9, 10]. Der Weg zur Erschließung neuer Anwendungen geht zunächst über die physikalische Analyse der Ultraschall-erzeugenden Prozesse. Einige grundlegende Mechanismen sind in verschiedenen Kombinationen, Auswirkungen und Skalierungen für die spezifische Schallabstrahlung verantwortlich. Die Analyse typischer systembedingter Eigenschaften erleichtert zielgerichtete Prognosen für die Erwartungswerte der zeitlichen und spektralen Antwort. Die Übertragungsfunktionen des Schalls vom Entstehungsort zum Sensor sind bedeutsam für die Anpassung des Messverfahrens, die Auswahl und Positionierung der Sensorik. Die aufgeführten Beispiele sind repräsentativ für grundlegende Effekte wie

- Turbulenz (Strömungsakustik)
- Reibung (Rauigkeit von Materialpaarungen)
- Mikrorisse und Rissfortschritt
- Kavitation
- Entladungen
- Impulskontakte (lose Bauteile ...)
- Eigenschwingungen kleiner Strukturen

Bezüglich der Signalverfahren ist es wichtig, den Prozess als stochastisch oder determiniert zu verstehen. In der Regel geht es nicht um die Bewertung eines Zustandes zu einem bestimmten Zeitpunkt sondern um gemittelte Werte, wobei die Mittelung bezüglich der jeweiligen Fragestellung optimiert werden muss.

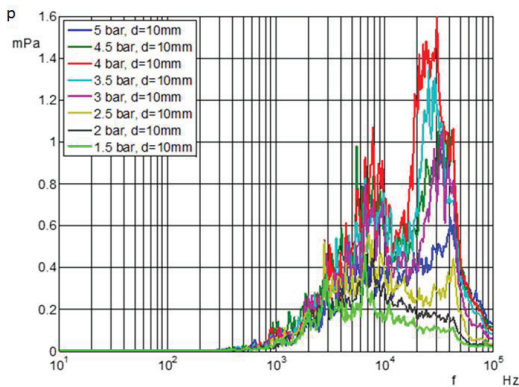


Abbildung 4, Variation des Schalldrucks an einem Druckluftleck. Der Schallpegel ist kein eindeutiges Indiz für die Rückverfolgung der Ausströmbedingungen. Für die Prüfung mit Ultraschall sind die Frequenzen ab 10 kHz relevant. In „leisen“ Umgebungen, könnte auch hörbarer Schall genutzt werden, dies ist aber in den meisten Fällen nicht praktikabel.

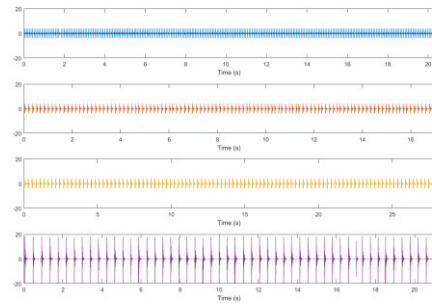


Abbildung 5, Die Überwachung von verschiedenen Typen elektrischer Entladungen ist ein typisches Einsatzgebiet der Ultraschalltechnik.

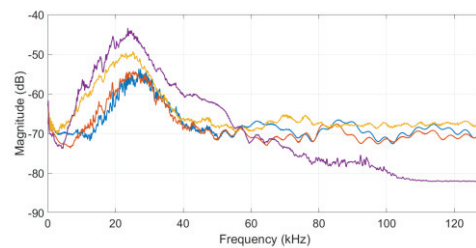


Abbildung 6, Spektren der elektrischen Entladung. Die Spektren sind eher unspezifisch. Bewertet wird eher die zeitliche Charakteristik der transienten Signale. Die Muster sind typisch für bestimmte Fehler.

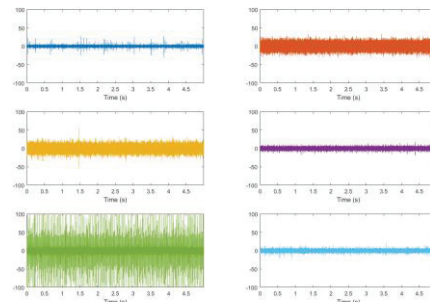


Abbildung 7, Zeitsignale von Körperschallsensoren an unterschiedlich geschädigten Kugellagern unter gleichen Betriebsbedingungen.

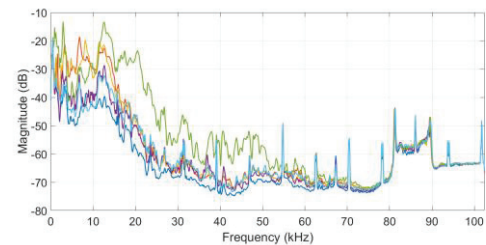


Abbildung 8, Spektren derselben Kugellager – Kennzeichnung wie in Abbildung 8. Hier zeigt sich besonders deutlich, dass eine schmalbandige willkürliche Auswahl der Prüffrequenzen sogar falsche Aussagen liefern kann.

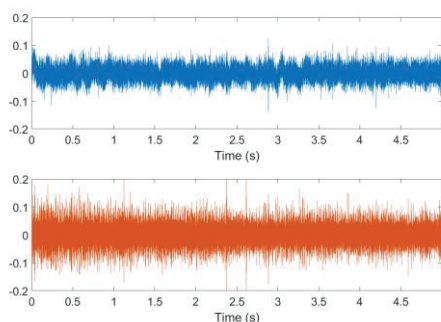


Abbildung 19, Körperschall-Zeitsignal an einer Pumpe bei zwei Betriebszuständen. Die höhere Drehzahl ist – wie zu erwarten – in der Amplitude sichtbar. Dies entspricht der traditionellen Vorgehensweise.

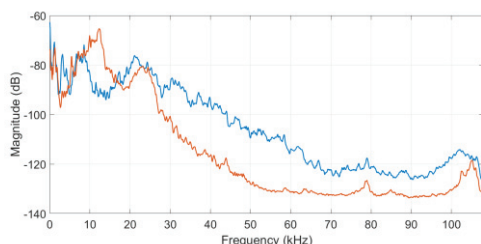


Abbildung 11, Die spektrale Darstellung der Pumpensignale zeigt, dass sich die spektrale Differenzierung im Ultraschallbereich lohnt. Weiterhin wird sichtbar, dass der simultan erfasste Vibrationsbereich (bis 20 kHz) nicht in gleicher Weise zur Differenzierung geeignet ist.

Nicht zuletzt zeigt die Integration neuer Sensorik und zeitgemäßer Prüftechnik und IT, dass damit tiefgehende und nutzbringende Einblicke in technologische Prozesse der Industrie möglich sind.

Zusammenfassung

Ultraschallverfahren sind in der Instandhaltung zunehmend unverzichtbar. Durch die Einführung breitbandiger Sensorik und digitaler Prüftechnik können existierende Anwendungen einer Revision bezüglich ihrer physikalischen Aussagen unterzogen werden. Insbesondere ermöglicht die Einbeziehung von Signalverarbeitungsverfahren die Erschließung neuer Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten für die Ultraschallprüfung.

Danksagung

Teile der Arbeit wurden durch das Projekt sUse des BMWi (ZF4327503PO8) gefördert.

Literatur

- [1] C. U. Grosse, M. Otsu (Eds.), Acoustic Emission Testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-69895-1
- [2] T. J. Murphy, A. A. Rienstra

Hear More - A Guide to Using Ultrasound for Leak Detection and Condition Monitoring
Reliabilityweb.com; Auflage: 1st (25. März 2010), ISBN-10: 0982516339

- [3] N. Bader, P. Holstein, A. Tharandt, S. Uziel, T. Hutschenreuther, Nutzung der Hörbarmachung von Ultraschallsignalen zur (werkstofflichen) Zustandsbewertung von Maschinen- und Bauteilen, DAGA2019, Rostock 18.-21.03.2019
- [4] ASTM E1002, Standard Practice for Leaks using Ultrasonics
ISO 29821-1 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Ultraschall - Teil 1: Allgemeine Anleitungen
- [5] P. Holstein, M. Barth, C. Probst, Acoustic methods for leak detection and tightness testing, Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016; 13 - 17 June 2016 in Munich, Germany
- [6] <https://www.sonotec.de/produkte/vorbeugende-instandhaltung/produkte/sonaphone/>
- [7] C. Probst, P. Holstein, Application of Ultrasound Technology in Condition Monitoring, Condition Monitor, 372(2018)5-10
C. Probst, P. Holstein, Application of Ultrasound Technology in Condition Monitoring, Proceedings, 1st World Congress on Condition Monitoring, WCCM-2017, London, 13-16.06.2017
- [6] S. Seitz, S. Seitz R. Wittig, J. Müller, P. Holstein, R. Tetzlaff, Neuronale Netze zur Klassifikation von Ultraschalldaten bei elektrischen Entladevorgängen, DAGA 2017, Kiel : 06.-09. 03 2017 : 43.
Jahrestagung für Akustik, ISBN 978-3-939296-12-6
- [9] P. Holstein, N. Bader, H.-J. Münch, S. zur Horst-Meyer, Ultrasound revisited, 25th Int. Congress on Sound and Vibration, 8-12.July 2018, Hiroshima, Japan
- [10] P. Holstein, C. Probst, A. Tharandt, G. Werner, T. Werner, Condition Monitoring with Ultrasound – new Approaches, 3rd International Rotating Equipment Conference (IREC), Pumps, Compressors and Vacuum Technology, Düsseldorf, 14 – 15 September 2016, ISBN- 978-3-8163-0697-9