

# Schallemission in der Instandhaltung

Christian PROBST<sup>1</sup>, Peter HOLSTEIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle (Saale)  
c.probst@sonotec.de, 06112 Halle (Saale), Nauendorfer Str. 2

**Kurzfassung.** Akustische Mess- und Prüfverfahren sind in der industriellen Instandhaltung unverzichtbar. Seit langem sind Anwendungen bekannt, bei denen mit einfachen Verfahren Zustände von Maschinen, Anlagen und Vorgänge überwacht und bewertet werden. Der Einfachheit und Robustheit vieler Verfahren steht oft ein relativ geringer Aussagewert der Daten und Bewertungen gegenüber. Insbesondere durch die Integration von neuer Sensorik, Messtechnik und fortgeschrittener Datenverarbeitung können die Einsatzbereiche für Verfahren der Schallemission deutlich aufgewertet und neue Applikationsfelder generiert werden. Beispiele aus den Bereichen Maschinendiagnose und Energieeinsparung belegen dies.

## 1 Einleitung

Aufgabe der Instandhaltung ist es, für möglichst fehlerfreie Prozesse, Anlagen und Maschinen zu sorgen. Dabei ist es vorrangig von Interesse, Anlagenausfallzeiten zu minimieren sowie Anlagen und Maschinen auf dem aktuellen technischen Stand zu halten oder wieder zu bringen. Mithilfe der Instandhaltung kann die Produktion hinsichtlich Termintreue und Effizienz verbessert werden. Weniger Ausfallzeit sowie optimal laufende Prozesse können zudem erheblich zur Energieeinsparung beitragen. Nicht zuletzt führt die Instandhaltung durch sicher laufende Maschinen zur Erhöhung der Arbeitssicherheit für das Personal.

Verfahren der Schallemission finden sowohl in der Zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP) als auch in der Instandhaltung Anwendung. In der Instandhaltung werden jedoch Prozesse oder Vorgänge anstelle von Materialien auf Fehler überprüft. Trotz gewisser Überschneidungen unterscheiden sich Technik und Vorgehensweisen der ZfP und der Instandhaltung in vielen Punkten. Eine direkte Übertragung der Methoden ist meist nicht möglich. Seit einigen Jahren gibt es verstärkt Anstrengungen beispielsweise die Akustische Emission für die Instandhaltung verfügbar zu machen. Die Verfahren der Technischen Akustik sind inzwischen auch in Frequenzen über den Hörschallbereich hinaus verfügbar. Gleichzeitig gibt es einen sehr konventionell geprägten Anwendungsbereich von niederfrequentem Ultraschall in der Instandhaltung. In der gegenseitigen Durchdringung von Methoden wird ein erhebliches wissenschaftliches und wirtschaftliches Potenzial gesehen. Die Verfahrenserweiterungen werden von der Weiterentwicklung der Prüftechnik und Sensorik begleitet.

## 2 Strategien der Instandhaltung

Die Instandhaltung gewinnt zunehmend an Bedeutung, da die Automatisierung von Maschinen und Anlagen stetig ansteigt. Mit steigender Automatisierung erhöhen sich die Anlagenkomplexität, die technische und organisatorische Anlagenverketzung und damit auch die Ausfall- und Ausfallfolgekosten, was in erhöhten Verfügbarkeits- und Produktivitätsanforderungen mündet. Zudem wachsen die Anforderungen an Arbeitssicherheit und Umweltschutz gleichermaßen. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, haben sich gerade in den letzten Jahren verschiedene Strategien zur Instandhaltung entwickelt und etabliert.

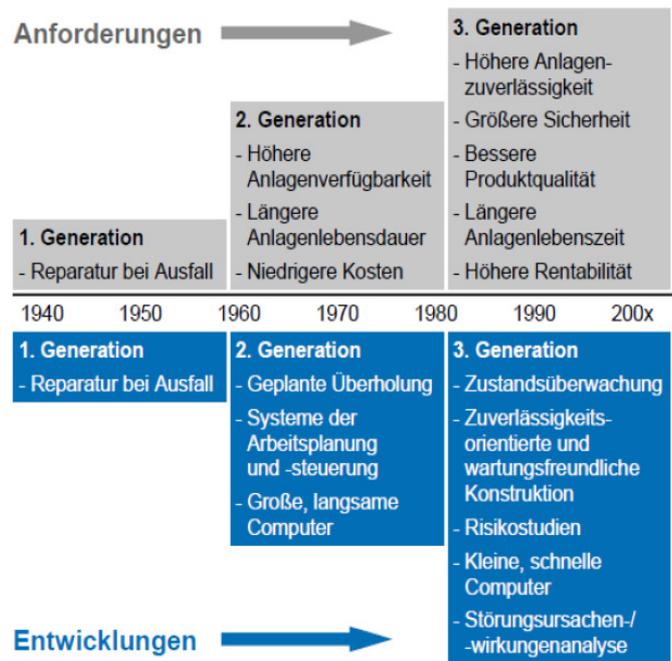


Abb. 1. Historische Entwicklung der Instandhaltung [1], [2].

In der ersten Generation der Instandhaltung fand lediglich die Reparatur bei Ausfall statt. Stillstandszeiten waren unproblematisch und die Maschinen einfach aufgebaut, oft sogar überdimensioniert. Bereits in der zweiten Generation stiegen die Anforderungen an die Anlagenverfügbarkeit sowie die Komplexität der Maschinen. Dies führte zur Einführung der geplanten zeitgesteuerten Instandhaltung. Ab der dritten Generation sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit die wichtigsten Schlüsselfaktoren, hinzu kommt ein enormer Kostendruck. Dieser Kostendruck zwingt den Anlagenbetreiber dazu, nicht nur die Produktionskosten sondern auch die Instandhaltungskosten zu optimieren. Das hat zur Einführung der Zustandsorientierten Instandhaltung geführt, um Reparaturen nur dann ausführen zu müssen, wenn der Zustand der Anlage es tatsächlich erfordert [1], [2].

### 2.1 Zustandsbasierte Instandhaltung

Die Zustandsbasierte, auch prädiktive, Instandhaltung (engl. Predictive Maintenance - PdM) ist eine der modernsten Formen der Instandhaltung, deren Aufgabe es ist, Instandhaltungsmaßnahmen rechtzeitig einzuleiten. Rechtzeitig bedeutet, früh genug, um den Instandhaltungsaufwand so gering wie möglich zu halten, bevor größere Schäden einen höheren Aufwand erforderlich machen. Rechtzeitig bedeutet aber auch, so spät wie möglich, um die Ausfallzeiten zu minimieren und die Lebensdauer der verwendeten

Bauteile möglichst maximal auszunutzen. Den letzteren Zustand sicher einzustellen, stellt eine große Herausforderung dar, deshalb wird in der Praxis oft auf die zuvor beschriebene Strategie gesetzt. Ziel ist es also, mit Hilfe der Zustandsorientierten Instandhaltung die Kosten für die Instandhaltung durch frühzeitige Fehlererkennung und -abstellung zu minimieren [3]. Abbildung 2 veranschaulicht ein typisches Verhalten bei einem Systemausfall einer Anlage oder Maschine. Deutlich zu erkennen sind die steigenden Reparaturkosten über den Fortschritt der Schädigung. Die Zustandsorientierte Instandhaltung (PdM) verfolgt das Ziel, die Schädigung bereits in einem frühen Stadium zu erkennen. Die frühe Identifikation sich andeutender Fehler ist die wesentliche Aufgabe von Ultraschall basierten Diagnoseverfahren.

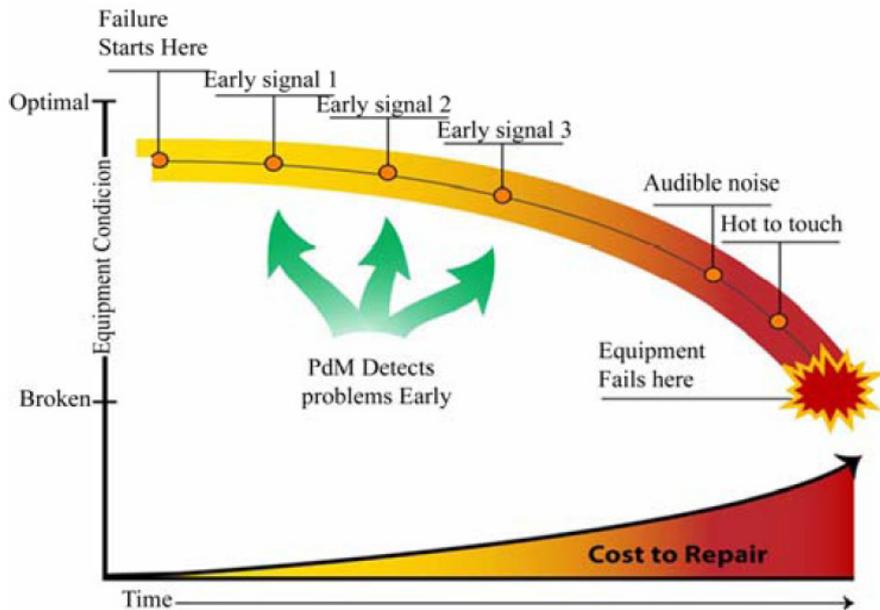


Abb. 2. Typisches Verhalten eines sich verschlechternden Systems [3].

## 2.2 Condition Monitoring als Werkzeug der Prädiktiven Instandhaltung

Die Zustandsorientierte Instandhaltung bietet die meisten Vorteile und ist somit erste Wahl bei der Entscheidung für eine Instandhaltungsstrategie. Um diese Strategie umsetzen zu können, bedarf es einiger Voraussetzungen. Neben einem Managementsystem für die Instandhaltung sind vor allem Werkzeuge zur aussagekräftigen Zustandsüberwachung an Anlagen und Maschinen notwendig. Zu diesen Werkzeugen gehören geeignete Sensorik genauso wie schnelle Rechentechnik, mit der komplexe Auswertelgorithmen möglichst online gerechnet werden können. Durch die Anwendung eben jener Werkzeuge sollen dem Instandhalter im Ergebnis möglichst Entscheidungshilfen für die Planung und Durchführung entsprechender Instandhaltungsmaßnahmen gegeben werden.

Die Zustandsüberwachung – Condition Monitoring – ist allgemein definiert als die Nutzung geeigneter Technologien, um den aktuellen Betriebszustand einer Maschine feststellen zu können. Der Betriebszustand ist dabei eine Überlagerung von Prozess- und Maschinenzustand. Condition Monitoring wurde früher vom Bediener oder Instandhalter mit den eigenen Sinnen, wie Hören, Sehen oder Fühlen, durchgeführt. Heute ist dafür Technik nötig, da viele Maschinen und Prozesse unbemannt laufen und Anlagen immer komplexer werden. Zudem bietet die Technik viele neue Möglichkeiten, Parameter ohne Unterbrechung 24 Stunden zu überwachen. Unbemannte Maschinen und Anlagen können somit problemlos fern überwacht werden, was im Zuge der steigenden Automatisierung gerade durch die Entwicklungen zur Industrie 4.0 rasant an Wichtigkeit gewinnt [3].

Um den Betriebszustand einer Maschine zu erfassen, können verschiedenste Parameter, wie in Tabelle 1 beispielhaft von Ugechi et al. [3] dargestellt, überwacht werden. Die aufgezeigten Parameter können durch weitere, wie die Antriebsspindelstrom- oder Kraftmessung, ergänzt werden. Die beiden letztgenannten Parameter werden dem Bediener von Werkzeugmaschinen heute oft an der Maschine ab Werk zur Verfügung gestellt.

**Tabelle 1.** Parameter zur Zustandsüberwachung an Maschinen [3].

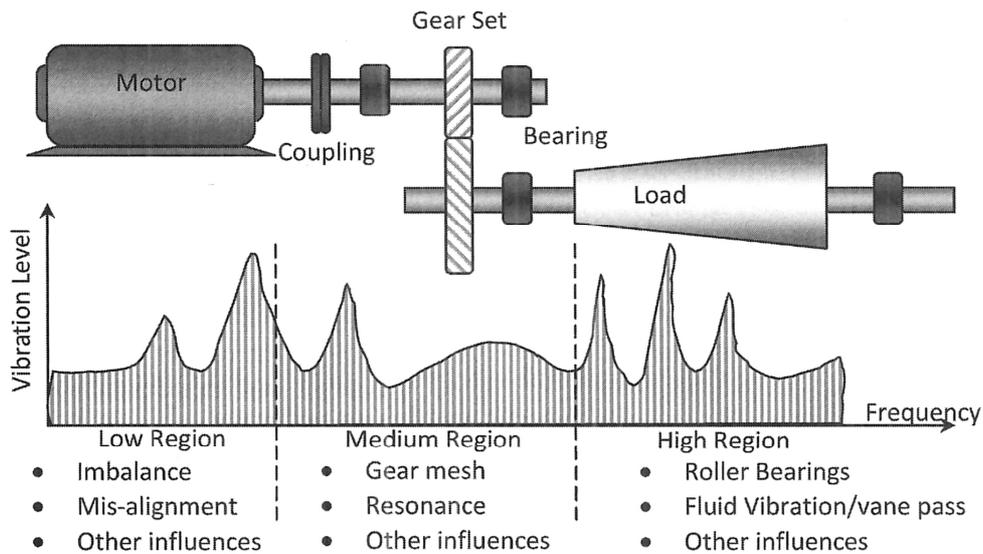
PARAMETER MEASURED DETECTED CONDITION	TEMPERATURE OF MACHINE	PRESSURE OF PROCESS FLUID	FLOW OF FLUID	OIL ANALYSIS	SPIKE ENERGY OF BEARING	VIBRATION OF MACHINE
OUT- OF - BALANCE						X
MISALIGNMENT	X					X
BENT SHAFT	X					X
BALL-BEARING DAMAGE	X			X	X	X
JOURNAL-BEARING DAMAGE	X	X	X	X		X
GEAR DAMAGE				X		X
MECHANICAL LOOSENESS						X
MECHANICAL RUBBING					X	X
NOISE						X
CRACKING						X

Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, führen die meisten Fehler an Maschinen mit rotierenden Teilen zu Vibrationen. Deshalb können durch Condition Monitoring mittels Vibrationsmessung im Allgemeinen die meisten Informationen über den Maschinenzustand (Machine's Health) sowie simultan dazu über die Prozessparameter (Operating Characteristics) gewonnen werden [3]. Das bietet die Möglichkeit, mit nur einer Technologie den Maschinenzustand als auch den Prozess überwachen zu können. Durch diese Möglichkeit zur gleichzeitigen Optimierung von Produktivität und Instandhaltung kann die Gesamteffizienz von Anlagen deutlich verbessert werden.

### 3 Schallemission in der Instandhaltung

Aufgrund der zuvor beschriebenen Vorteile ist die Vibrationsmessung in der Praxis das erste Mittel der Wahl zur Überwachung von Maschinen mit rotierenden Teilen. Zur Messung von Vibrationen werden typischerweise Schwingungssensoren mit linearem Frequenzgang bis 20 kHz eingesetzt. Da die akustischen Vorgänge, die für die Instandhaltung genutzt werden können, einen weiteren Frequenzbereich bis etwa 1 MHz überdecken, sind spezielle Sensoren nötig. Diese Ultraschallsensoren kommen dann zum Einsatz, wenn die zu prüfenden Frequenzen zu hoch, aber auch wenn die Auslenkungen für Schwingungssensoren zu klein sind. Perez [4] ordnet die Schädigungen nach Abbildung 3 den Frequenzbereichen niedrig, mittel und hoch zu. Weiterhin bietet die Analyse im Ultraschallbereich den Vorteil, dass die Vielzahl der Maschinengeräusche im Hörschallbereich die Messung nicht stört.

Eine Herausforderung bei der Erschließung der höheren Frequenzen besteht in der Entwicklung geeigneter Sensorik. Interessante Entwicklungen gibt es hier auf Basis der MEMS-Technologie (MikroElektroMechanische Systeme) sowohl für Körperschall- als auch Luftschallaufnehmer. Da die verfügbaren Sensoren aber meist für Konsumgüter der Kommunikationstechnologien entwickelt wurden, ist die Entwicklung für spezifische Anwendungen aufgrund der aufwendigen Herstellungstechnologie noch nicht realistisch. Die wichtigsten Anforderungen an die Sensorik sind große Bandbreite, ausreichende Empfindlichkeit sowie lineare bzw. korrigierbare Frequenzgänge.



**Abb. 3.** Bereiche der Schwingungsfrequenzen und Ursachen an rotierenden Maschinen [4].

### 3.1 Stand der Technik

Nahezu alle kommerziellen Anwendungen von Ultraschallprüftechnik in der Instandhaltung verwenden einfache Resonanzsensoren, meist mit einer Resonanzfrequenz von 40 kHz. Da die Prüftechnik zum großen Teil noch auf analoger Basis arbeitet, beschränkt dies die Möglichkeiten der Verfahrenserweiterung erheblich. Der Zugang zum Ultraschallfrequenzbereich ist damit zwar gegeben, jedoch nur mit einer Bandbreite von ca. 2 kHz. Frequenzinhalte können mit dieser Technik nicht bewertet werden und der Zugang zu elementaren mikroskopischen Prozessen geht verloren. Dass diese Verfahren trotzdem große Verbreitung gefunden haben, liegt unter anderem im schnellen praktischen Zugang ohne Messvorbereitung. Allerdings bleibt das Anwendungsspektrum doch beschränkt und die Dateninterpretation oft schwierig. Unter bestimmten vereinfachenden Annahmen – auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann – ist es aber möglich, wertvolle Informationen für die Instandhaltung und die Technische Diagnose zu gewinnen. Da die Messungen schmalbandig erfolgen, kann die zeitliche Modulation mittels Heterodynverfahren in den Hörbereich transformiert werden. Der Prüfer kann mit diesen technischen Hilfsmitteln und seinen Sinnen arbeiten, was einen zweiten wichtigen Grund für die Akzeptanz und Verbreitung dieser Verfahren in der Instandhaltung darstellt.

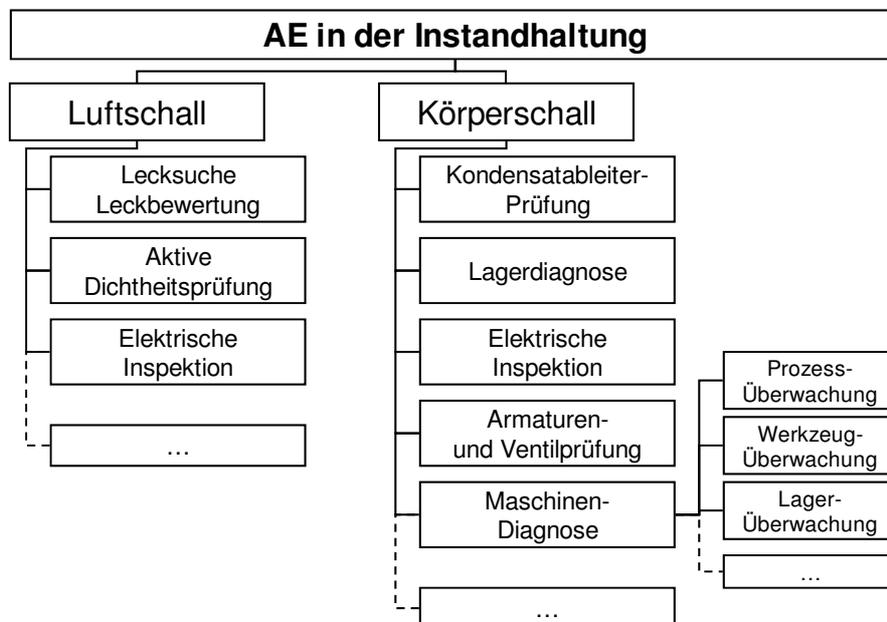
Ähnlich der Rolle des Schallpegels in der Technischen Akustik werden einfache Pegelberechnungen, die zum großen Teil auf analogen Verfahren beruhen, angewandt, um den stochastischen Charakter der Vorgänge auch mit einfacher und preiswerter Prüftechnik und Sensorik bewertbar machen zu können. Dabei muss dem Anwender klar sein, dass mit diesen schmalbandigen Verfahren die „Physik“ der verursachenden Vorgänge nicht korrekt abgebildet werden kann.

### 3.2 Einordnung bisheriger Arbeiten und Stand von Forschung und Entwicklung

Die Kritik an den weit verbreiteten schmalbandigen Verfahren wurde in Beiträgen dieser Kolloquiumsreihe bereits begründet. Gleichzeitig wurden Alternativen vorgeschlagen. Diese Ideen wurden weiterentwickelt und bilden die Grundlage für eine neue Geräte- und Verfahrensgeneration von Ultraschallprüftechnik für die Instandhaltung [5], [6].

Der Begriff Schallemission wird sowohl für die Akustische Emission in der ZfP aber auch in der Instandhaltung und Technischen Akustik verwendet. Die Anforderungen und Normen sind dabei durchaus unterschiedlich. Dies hat vor allem „historische“ Gründe. Es gibt aber auch Gemeinsamkeiten. Die Übertragung von Methoden der Akustischen Emission auf Fragestellungen der Instandhaltung und umgekehrt die Übertragung von Methoden der Technischen Akustik auf bestimmte Aspekte der Akustischen Emission sind durchaus möglich. Die Anwendung von Ultraschallsensoren für Condition Monitoring wird zunehmend in wissenschaftlichen Veröffentlichungen wie z.B. [7], [8] und [9] vorgestellt, wo neben den „einfachen“ Anwendungen auch Beispiele und Methodenentwicklungen zu komplexeren Anwendungen mit quantitativ belastbaren Aussagen gezeigt werden. Das Spektrum wurde dabei erheblich erweitert. Hierzu zählen Lebensdaueranalyse, Trendanalyse, Health Monitoring sowie Warnung vor Materialbruch. Neben den erwähnten eher qualitativ orientierten Methoden wurden aufgrund neuer messtechnischer Möglichkeiten Anwendungen erschlossen, die deutlich über die bisherigen Felder hinausgehen.

Die Anwendung von Schallemissionsverfahren wird von den Autoren als komplementärer Ansatz zur Vibrationsanalyse eingestuft. Die Ursachen für die Entstehung von Schallemission unterscheiden sich von denen für die Entstehung von Vibrationen. Die wichtigsten Auswirkungen, die in der Instandhaltung erfasst werden müssen, beruhen letztendlich auf Reibung. Solche Vorgänge sind z.B. Schmierungskontrolle bzw. Trockenlauf, Leckströmungen, technische Reibungsvorgänge an Gleitlagern oder Bremsen. Aber auch andere Ursachen für Schallemission wie Turbulenzen, Kavitation oder Entladungsvorgänge erweitern den Anwendungsbereich auf Prozesse und Vorgänge, die nicht von Maschinen mit rotierenden Teilen ausgehen. Bei all diesen Ursachen soll der Vorteil genutzt werden, eine Schädigung oder Prozessveränderung mittels Schallemissionsverfahren möglichst frühzeitig detektieren zu können. Die Art der Signalaufnahme und damit die Anwendung von Schallemission in der Instandhaltung lassen sich nach Abbildung 4 in die zwei Kategorien Luftschall und Körperschall unterteilen.



**Abb. 4.** Einteilung der AE-Anwendungen in der Instandhaltung

Beim Luftschall sind Anwendungen wie Lecksuche an Druckluftanlagen, aktive Dichtheitsprüfung an Kabinen und Containern oder die Detektion von Teilentladungen aus der Entfernung bereits bekannt. Körperschallanwendungen wie Kondensatableiterprüfung, Lagerdiagnose oder auch die Armaturen- und Ventilprüfung sind bereits etabliert. Für

Körperschallanwendungen zur Prozessüberwachung wurden Ultraschallsensoren auf Basis von piezoelektrischen Kompositmaterialien entwickelt und verwendet. Damit konnten Frequenzgänge und Empfindlichkeiten erreicht werden, die für breitbandige Anwendungen geeignet sind [10], [11].

Trotz der vielen wissenschaftlichen Beiträge gibt es im Bereich der Technischen Diagnose kaum industrielle Anwendungen moderner Verfahren. Da zunehmend preiswerte und leistungsfähige Rechentechnik zur Verfügung steht, sind die Rahmenbedingungen für die Implementierung von Verfahren der Klassifikation und Mustererkennung auch in mobiler Mess- und Prüftechnik prinzipiell gegeben. Neben der kontinuierlichen Bearbeitung der (Streaming) Messdaten, beispielsweise mit Filtern, Spektren, Korrelation, Wavelets usw. rücken zunehmend mathematische Verfahren in den Fokus, die dem speziellen stochastischen und oft auch nicht eindeutigen Charakter der Daten Rechnung tragen können. Verfahren zur Mustererkennung sind aus vielen Bereichen der Technik nicht mehr wegzudenken und werden in Zukunft sicher auch in der Instandhaltung auf Schallemissionsverfahren Anwendung finden.

#### **4 Zusammenfassung**

Die Übertragung von Methoden der Akustischen Emission auf die Anforderungen moderner Instandhaltung erfordert eine Adaption bei der Sensorik, der Messtechnik sowie der Verfahrensentwicklung. Gleichzeitig ermöglicht die komplementäre Integration von Methoden der Technischen Akustik hin zu höheren Frequenzen neue Möglichkeiten für die Anwendung von Ultraschallverfahren in der Instandhaltung. Die Weiterentwicklung im Bereich des Instandhaltungsmanagements bereitet zusätzlich den Weg für neue Lösungen. Dennoch erweist sich der Wunsch, Fehler und Maschinezustände anhand der Messdaten zu klassifizieren bis hin zur Ausgabe von Handlungsempfehlungen, als besonders herausfordernd. Hier muss die entsprechende Erfahrung gerade im Ultraschallbereich in den folgenden Jahren erarbeitet werden.

#### **5 Referenzen**

- [1] [http://www.ba-leipzig.de/fileadmin/upload\\_ba/allgemein/Antrittsvorlesung\\_Morning\\_110629.pdf](http://www.ba-leipzig.de/fileadmin/upload_ba/allgemein/Antrittsvorlesung_Morning_110629.pdf), 27.04.2015
- [2] Moubray, J., Reliability-Centered Maintenance, Second Edition, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-3358-1, 1997
- [3] Ugechi, C., Ogbonnaya, E., Lilly, M., Ogaji, S., Probert, S.: Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery, Engineering, Vol. 1 No. 3, Seite 177-187, doi: 10.4236/eng.2009.13021., 2009
- [4] Perez, R. X., Conkey, A. P.: Is My Machine OK? - A Field Guide to Assessing Process Machinery, Industrial Press, ISBN 978-083113440-2, 2012
- [5] Holstein, P., Tharandt, A., Münch, H.-J.: Handling großer Datenmengen - ein Beitrag zur Algorithmenentwicklung, Berichtsband DGZfP 17. Kolloquium Schallemission, 2009
- [6] Probst, C., Holstein, P., Surek, D., Tharandt, A.: Acoustic Emission Sensors based on Piezo-Composites for Machinery Engineering Applications, Berichtsband International Conference on Acoustics AIA-DAGA, Meran, ISBN 978-3-939296-05-8, 2013
- [7] Zuluaga-Giraldo, C., Mba, D., Smart, M.: Acoustic Emission during run-up and run-down of a power generation turbine, Tribology International, 37 (5), Seite 415-422, 2004
- [8] Miettinen, J., Pataniiti, P.: Acoustic Emission in Monitoring Extremely Slowly Rotating Rolling Bearing., Berichtsband COMADEM 1999 Oxford, Coxmoor Publishing Company, Seite 289-297, ISBN 1-901892-13-1, 1999

- [9] Li, X.: A brief review: Acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, Seite 157-165, 2002
- [10] Holstein, P., Probst, C., Münch, H.-J., Klepel, A., Tharandt, A.: Application of Acoustic Emission in Machinery and Process Monitoring, *Berichtsband 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE) - Poster 5*, 2014
- [11] Holstein, P.: *Maschinendiagnose mit Ultraschall, Tagungsband 11. Tagung Technische Diagnostik 2014*, ISBN 978-3-942703-26-0, 2014