

Anwendungen von AE-Sensoren basierend auf Piezokompositen in der Maschinendiagnose und Prozessüberwachung

Christian PROBST *, Peter HOLSTEIN *, Dominik SUREK **,
Andreas THARANDT ***, Hans-Joachim MÜNCH *

* SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH

c.probst@sonotec.de, 06112 Halle, Nauendorfer Str. 2

** An-Institut Fluid- und Pumpentechnik e.V. Merseburg

*** Steinbeis-Transferzentrum Technische Akustik und angewandte Numerik, Taucha

Kurzfassung. Verfahren der Schallemissionsanalyse gewinnen in der Maschinendiagnose zunehmend an Bedeutung und Akzeptanz. Beispiele hierfür sind die Lagerüberwachung an langsam laufenden Maschinen, die Erfassung von Reibungseffekten, die Prozessüberwachung an Werkzeugmaschinen oder die Bewertung von Kavitation in Pumpen. Die physikalischen Vorgänge überstreichen oft einen weiten Frequenzbereich, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, breitbandige Sensoren zu entwickeln. Ultraschallsensoren auf Basis von piezoelektrischen Kompositmaterialien werden in der Zerstörungsfreien Materialprüfung seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzt. Dagegen wird das Potenzial dieser Sensoren im Bereich der Akustischen Emissionsanalyse gegenwärtig noch unzureichend genutzt. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Herstellung und die Vorteile von Piezokompositmaterialien. Weiterhin werden neue miniaturisierte Sensoren sowie erste Messergebnisse vorgestellt.

1 Einführung

In der Maschinendiagnose und Instandhaltung haben akustische Verfahren eine enorme Bedeutung. Sowohl Luftschall als auch Körperschall bezogene Verfahren dienen der Bewertung von Zuständen in Maschinen und Anlagen sowie der Überwachung von Prozessen. Traditionell haben die akustischen Methoden, die sich auf den vom Prüfer hör- bzw. fühlbaren Frequenzbereich beziehen, für diese Anwendung den größten Marktanteil. Hierfür sind sowohl die Gerätetechnik, als auch die Sensorik entsprechend weit entwickelt. Eine Reihe von Phänomenen führt aber auch zu Vibrationen und Schallabstrahlungen in einem Frequenzbereich deutlich über 20 kHz. Ursache hierfür sind vor allem Prozesse wie Reibung, Rissvorgänge und Kavitation. Praktische Anwendungen, wie die Überwachung der Schmierung und der Funktion von Lagern bis hin zur Prognose sich anbahnender Lagerschäden, beruhen auf eben diesen Vorgängen. Solche Prozesse haben in der Regel transienten und stochastischen Charakter. Die Frequenzgänge von gängigen Mikrofonen und Schwingungssensoren erlauben die Erfassungen höherer Frequenzen aber nicht ohne Weiteres. In den letzten Jahren ist nun der Trend zu beobachten, dass vermehrt



Anwendungen für die Ausdehnung des Condition-Monitoring hin zu höheren Frequenzen erschlossen werden. Aufgrund der verfügbaren Rechenleistungen aktueller Systeme kann das gesamte zur Verfügung stehende akustische Signal aufgezeichnet bzw. auch in Echtzeit bewertet werden. Zunehmend werden auch in der Literatur Anwendungsbeispiele vorgestellt, bei denen Verfahren aus der Schallemissionsanalyse auf maschinenakustische Probleme übertragen werden. Auf das Potenzial der Ultraschallmethoden als komplementäre Technologie zur niederfrequenten Schwingungsbewertung wird dabei explizit hingewiesen. Die Anwendung von konventionellen Vibrationsmessmethoden bei der Überwachung von Gleitlagern und langsam laufenden Lagern gestaltet sich generell schwierig, da es hierbei zu extrem kleinen und somit schwer zu detektierenden Beschleunigungen kommt. In [1], [2], [3] und [4] werden Lösungsansätze mittels Schallemissionsverfahren beschrieben. Beispiele für die Anwendung im Condition-Monitoring der Schmierung von Lagern werden in [5] und [6] gegeben. [7] wendet die Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Hoch- und Herunterläufen an Generatoren und Gasturbinen an. AE-Untersuchungen sind besonders geeignet, um Elementarprozesse mit transientem Charakter in Lagern und Getrieben erfassen zu können und so konventionelle Schwingungsmessungen zu ergänzen [8], [9].

Von besonderer Bedeutung ist die Entwicklung angepasster numerischer Verfahren für die Extraktion relevanter Informationen aus den Messwerten. In einer Gegenüberstellung von FFT- und Wavelet-basierten Methoden für Getriebepfahrungen konnte gezeigt werden, dass mit komplementären Verfahren statische und stochastische Anteile simultan erfasst werden können [10], [11]. Aufgrund des stochastischen Charakters wird erwartet, dass für quantitative Bewertungen von Maschinenzuständen - insbesondere von Trends - Verfahren der Mustererkennung für automatisierbare Bewertungen adaptiert werden müssen [12]. Neuere Arbeiten von Albers et. Al. gehen auf elementare Ereignisse der Schallemission ein, die von Reibungsprozessen verursacht werden [13]. Es zeigt sich, dass zur sinnvollen Interpretation von Ursache-Wirkungszusammenhängen dieses Verständnis sehr wertvoll ist. Insbesondere die Feinstruktur der Oberflächen von Reibpartnern beeinflussen Mess- und Prüfergebnisse entscheidend.

Obwohl die entwickelten Sensoren auch für höhere Frequenzen geeignet sind, soll im Rahmen dieser Arbeit eine Beschränkung auf Anwendungen bis etwa 100 kHz erfolgen. Der Grund hierfür besteht darin, dass Ultraschallprüfgeräte in der Instandhaltung und vergleichbaren Anwendungen bis Frequenzen von etwa 100 kHz eingesetzt werden.

2 Messtechnik und Datenverarbeitung

Parallel zur Entwicklung der Sensorik wurde ein auf den letzten Kolloquia vorgestelltes Konzept der Messdatenerfassung und Bearbeitung weiterentwickelt. Es beruht auf einer modularen Struktur [14], [15]. Die Datenerfassung wird direkt in MATLAB durchgeführt. Dafür werden verschiedene Messkarten von National Instruments und DataTranslation verwendet, deren Treiber kompatibel zur MATLAB-Toolbox „DAQ“ von TheMathworks sind.

Datenflüsse und algorithmische Verknüpfungen sind von der eigentlichen Messhardware entkoppelt. Damit wird ermöglicht, (scheinbar) verschiedene Fragestellung mit einem einheitlichen modularen Ansatz bearbeitbar und beherrschbar zu halten. Die Software funktioniert unabhängig von Bit-Tiefen, Aufnahmezeiten und Kanalzahlen. Die Messhardware ist austausch- bzw. erweiterbar. Filter und Auswertalgorithmen sind direkt mit den Datenströmen verknüpfbar, so dass - natürlich abhängig von der Rechnerperformance - Berechnungen auch in Echtzeit möglich sind. Dies ist besonders für Langzeitmessungen und Überwachungen von Vorteil. Weiterhin entstand eine Bibliothek

von graphischen Bedienoberflächen (z.B. Abbildung 1) und Skripten für allgemeine und spezialisierte Auswertungen. Die Berechnungen erlauben alle in der Maschinenakustik üblichen Parameter, Spektren oder Schriebe. Da die Programme kompilierbar sind, sind kundenspezifische Stand-Alone-Lösungen denkbar.

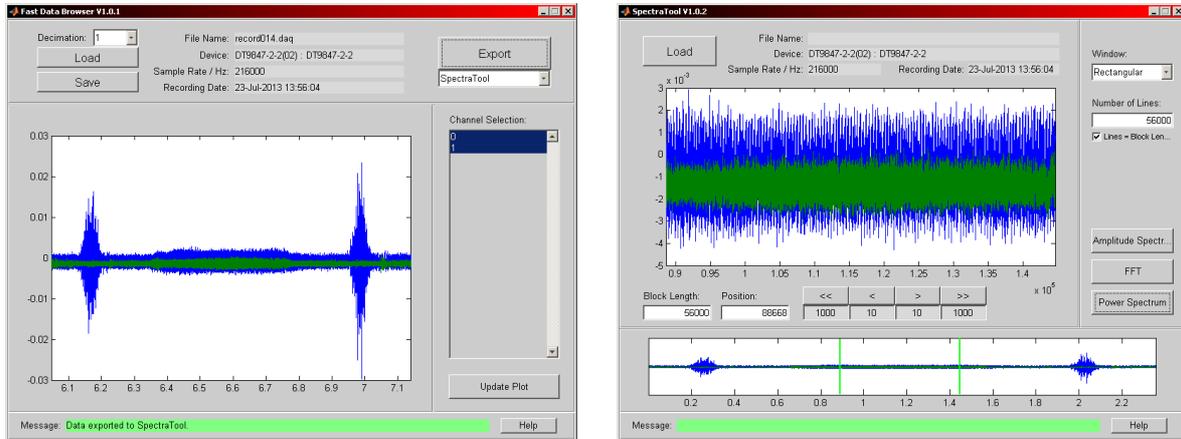


Abb. 1. Beispiel für GUI; Links Daten-Browser, Rechts Werkzeug für Frequenzspektrenerzeugung.

3 Sensorik

Auf der Basis von piezoelektrischen Kompositmaterialien wurden verschiedene Prüfköpfe und Sensoren konzipiert und aufgebaut. Vorrangig soll der Vorteil der Unterdrückung unerwünschter Nebenresonanzen durch den Einsatz von Piezokompositen genutzt werden. Allein die Impedanzverläufe in Abbildung 2 von zwei unterschiedlichen piezoelektrischen Kreisscheiben veranschaulichen den Unterschied zwischen Piezokeramik (blau) und Piezokomposit (rot). Bei der Piezokompositscheibe äußert sich die starke Unterdrückung von unerwünschten Nebenresonanzen in einem wesentlich „glatteren“ Kurvenverlauf dominiert von der Dickenresonanz - im Beispiel bei 500 kHz. Die Radialresonanz ist stark vermindert bei etwa 40 kHz noch zu erkennen. Die Vielfachen davon sind kaum mehr vorhanden. Im Gegensatz dazu weist die Piezokeramikscheibe zahlreiche ausgeprägte unerwünschte Nebenresonanzen der unterschiedlichsten Schwingungsmodi auf.

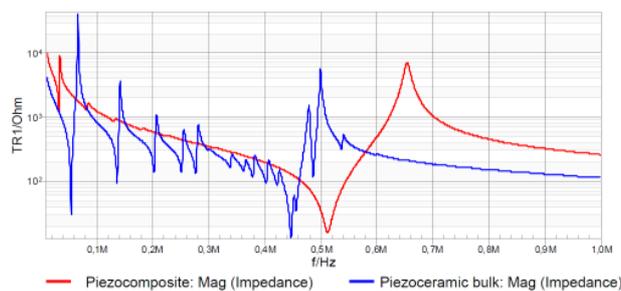


Abb. 2. Impedanzverläufe zweier Kreisscheiben D35 mm mit einer Dickenresonanz von 500 kHz.

Für die Sensoren der ersten Versuchsreihe wurden Piezokomposite mit einer Dickenresonanz von 1 MHz gewählt. Die Piezokomposite wurde im Dice-and-Fill-Verfahren hergestellt. Diese komplexe Herstellungstechnologie wird in der SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH beherrscht. Die folgende Abbildung 3 stellt die Dice-and-Fill-Technologie schematisch dar.

Eine Piezokeramikplatte zum Beispiel aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) wird in zwei Richtungen unter einem Winkel von 90° bis zu einer bestimmten Tiefe mittels Wafer-Sägemaschine fein strukturiert.

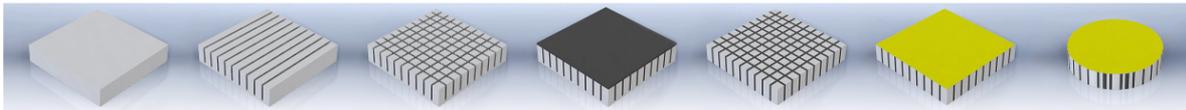


Abb. 3. Piezokeramikplatte, erster Schnitt, zweiter Schnitt, Einfüllen der Matrix, Schleifen auf Enddicke, Metallisieren und Polarisieren, Zuschnitt der Endgeometrie.

Die so hergestellten gitterförmig angeordneten Nuten oder auch Sägespalte werden mit einem Kunststoff gefüllt. Der so entstandene Verbundwerkstoff aus Piezokeramik und Kunststoff wird als Piezokomposit bezeichnet. Danach wird die Platte durch Schleifen von beiden Seiten auf ihre Enddicke gebracht. Durch die Dicke wird die Dickenresonanzfrequenz vorgegeben bzw. eingestellt.

Die hier beschriebene Fertigungstechnologie ist in ihrer praktischen Umsetzung ein komplexer Prozess mit verschiedenen Arbeitsschritten und unterschiedlichsten Schwierigkeiten. Gleichzeitig bieten diese Arbeitsschritte völlig neue Möglichkeiten zur Gestaltung der piezoelektrischen Eigenschaften des Piezokomposites. Die Variablen dabei sind zum Beispiel:

- Typ der Piezokeramik
- Typ der Kunststoffmatrix
- Pitch (Raster) der Piezokeramikstäbchen
- Anordnung der Piezokeramikstäbchen.

In den ersten AE-Sensor-Funktionsmustern wurden Piezokompositkreisscheiben mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet. Damit konnte die Unterdrückung unerwünschter Nebenresonanzen verifiziert werden. Als Ergebnis ist der Impedanzverlauf von zwei komplett aufgebauten Sensoren in Abbildung 4 dargestellt: links der des Sensors mit der Piezokeramik (blau), rechts der des Sensors mit Piezokomposit (rot).

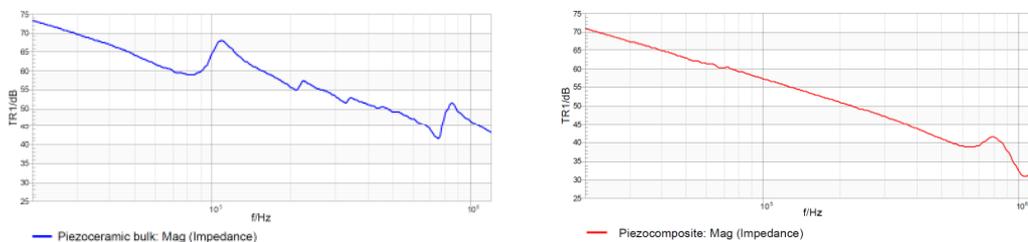


Abb. 4. Impedanzverlauf von AE-Sensoren mit Piezokeramik (links), mit Piezokomposit (rechts).

Im Vergleich zur Piezokeramik zeigt der Sensor mit Piezokomposit eine deutliche Unterdrückung von Radial- und Nebenresonanzen bis etwa 600 kHz. In einem nächsten Schritt wurden erste miniaturisierte AE-Sensoren für eine dauerhafte Maschinen- oder Prozessüberwachung entwickelt (Abbildung 5). Auch hier kommen Piezokomposite mit einer Dickenresonanzfrequenz von 1 MHz zum Einsatz. Diese wurden im nachfolgend beschriebenen Beispiel zur Prozessüberwachung eingesetzt.



Abb. 5. Neue AE-Sensoren basierend auf Piezokompositen.

4 Anwendungsbeispiel: Präzisionsbearbeitung von Keramikbauteilen mittels Wafer-Sägemaschine

Schleifprozesse sind typisch für die Erzeugung von Körperschall. Dieser kann verschiedene Ursachen haben. Aufgrund von erzwungenen Schwingungen werden viele Frequenzen des gesamten Systems angeregt - auch sehr hohe. Die Quelle kann sowohl die Maschine, das Werkzeug oder das zu bearbeitende Werkstücks sein. Üblicherweise werden Schallemissionssensoren zur Überwachung des Erstkontakts zwischen Werkzeug und Werkstück eingesetzt. Zunehmend ist aber auch der Schleifprozess selbst von Interesse. Bei der Feinbearbeitung ist es nicht möglich, mittels Schwingungssensor und Kraftaufnehmer den Prozess zu überwachen, weil die Signalintensität aufgrund der sehr kleinen Spannungsquerschnitte sehr gering ist [16]. Anwendungen von AE-Sensoren zur Überwachung von Schleifprozessen in Ultrapräzisionsverfahren wurden von Schäfer et al. [17] sowie zum Monitoring von Schneid- und Schleifprozessen von Li vorgestellt [18]. Die vorliegenden Ergebnisse wurde auch in [19] auf der AIA-DAGA 2013 vorgestellt.

4.1 Der Bearbeitungsprozess

Das Sägen von Wafern zum Beispiel in der Halbleiter- und Mikroelektronikindustrie ist ein lange bekanntes und weit verbreitetes Verfahren. Der umgangssprachlich mit „Sägen“ bezeichnete Zerspanungsprozess ist technisch exakt als Tiefschleifen, eine Spezialform des Schleifens, zu bezeichnen. Das Besondere beim Tiefschleifen ist, dass eine extrem dicke Materialschicht oder sehr tiefe Nut in nur einem Arbeitsgang abgetragen wird. Besonderes Augenmerk beim Tiefschleifen muss auf eine ausreichende Kühlung gelegt werden. Die Gefahr von Schleifbrand, der thermischen Zerstörung der Schleifscheibe, sowie vom Zusetzen der Spanräume ist um einiges größer. Eine Prozessoptimierung führt beim Tiefschleifen direkt zu betriebswirtschaftlichen Vorteilen, wie kürzerer Prozesszeit und somit mehr Durchsatz sowie längerer Werkzeugstandzeit und somit weniger Werkzeugkosten pro Werkstück.

In dieser Arbeit soll das Potential der Anwendung von neuen AE-Sensoren am Beispiel eines Präzisionsbearbeitungsprozesses veranschaulicht werden. Es werden erste experimentelle Untersuchungen zur Prozessüberwachung während der Bearbeitung von Keramikbauteilen vorgestellt. Genauer wird das Präzisionstiefschleifen zur Feinstrukturierung von Piezokeramiken, wie zuvor beschrieben, als Teilschritt der Dice-and-Fill-Technologie untersucht. Da zur Feinstrukturierung eines Bauteils unter Umständen mehrere Hundert Nuten mit extrem niedrigem Vorschub einzubringen sind, ergibt sich die Motivation für eine Prozessoptimierung vor allem mit dem benannten Vorteil einer deutlichen Prozesszeitreduzierung. Neben der rein wirtschaftlichen Optimierung resultieren auch Wünsche nach einer erhöhten Prozesssicherheit zum Beispiel beim Bearbeiten von sehr kostbaren Halbzeugen oder generell schwer zu bearbeitenden Materialien - sogenannten „Hard-to-cut-Materials“ - in einer Notwendigkeit der Prozessüberwachung und/oder -optimierung.

4.2 Die Messtechnik

Für die ersten Versuche wurden zwei der neuen AE-Sensoren, basierend auf Piezokompositmaterial, an der Antriebsspindel der Wafer-Sägemaschine appliziert. Die Sensoren sind mittels Koppelwachs am Spindelgehäuse fixiert. Die Hauptresonanzfrequenz der Sensoren liegt für die Dickenschwingung bei 1 MHz. Alle anderen Schwingungsmoden und damit Nebenresonanzen sind wie zuvor beschrieben stark unterdrückt. Die Messwerte wurden mit der Messkarte DT 9847-2-2 von Data Translation aufgezeichnet und in Matlab

weiterverarbeitet und ausgewertet. Für die Messwertaufnahme der Analogsignale kann bei dieser Messkarte eine Abtastfrequenz von bis zu 216 kHz bei 24 Bit verwendet werden. Abbildung 6 zeigt die Wafer-Sägemaschine und die Messtechnik.

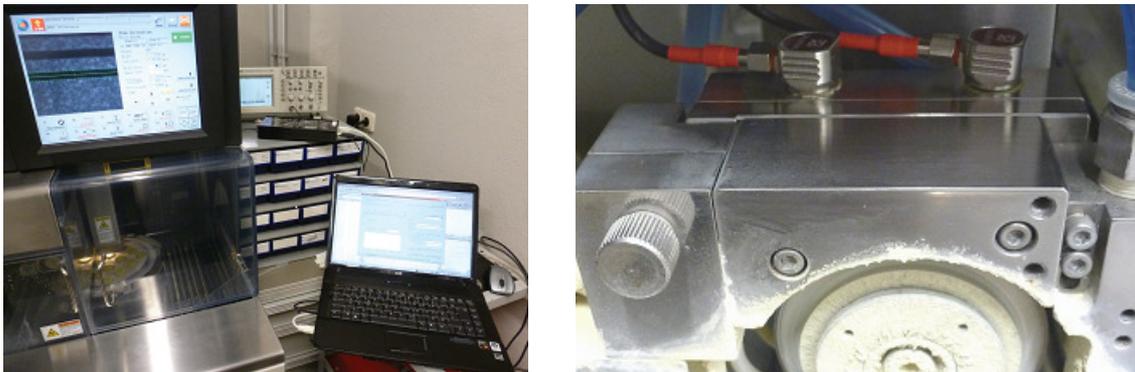


Abb. 6. Links: Wafer-Sägemaschine und Messtechnik, Rechts: AE-Sensoren auf der Antriebsspindel.

Die Anwendung der Prozessüberwachung an der eingesetzten Wafer-Sägemaschine stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, da hier als Antrieb eine Hochgeschwindigkeits-spindel mit Drehzahlen von bis zu 60000 Umdrehungen pro Minute und Luftlagerung zum Einsatz kommt. Somit besteht keine direkte mechanische Kopplung zwischen rotierender Welle mit Werkzeug und dem Spindelgehäuse, an dem die Sensoren appliziert werden. Weiterhin wird die Messung dadurch erschwert, dass die Luftlagerung zu einer permanenten akustischen Emission aufgrund von ausströmender Druckluft führt.

Zunächst wurde ein Sägeprozess von 3 Keramikkreisscheiben mit Standardparametern durchgeführt, um zu testen, welche Art von Signalen überhaupt zu erwarten ist. Abbildung 7 zeigt ein Schema des Prozesses. Die Gesamtdauer eines Schnittes inklusive Zustellen, Abheben und Zurückfahren dauert wenige Sekunden. Zuerst stellt die Z-Achse auf die gewünschte Schnitttiefe zu. Danach läuft der eigentliche Zerspanungsprozess ab. Anschließend wird das Werkzeug angehoben und das Werkstück zur Startposition zurückgefahren. Die Schritte 1, 3 und 4 laufen in erhöhter Verfahrensgeschwindigkeit ab. Der Zerspanungsprozess wird um ein Vielfaches langsamer durchgeführt. Deshalb ist die erwähnte Optimierung der Vorschubgeschwindigkeit die effektivste Möglichkeit, die Prozesszeit wirksam zu verkürzen.

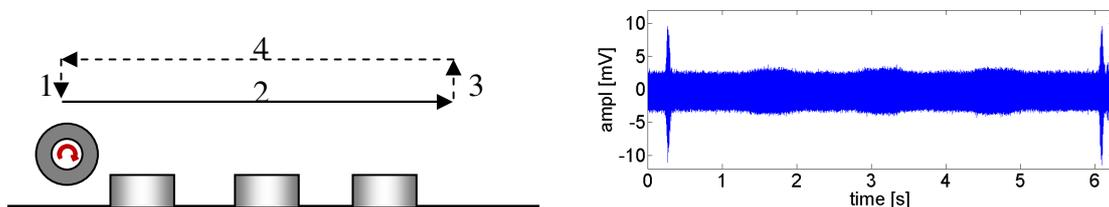


Abb. 7. Links: Schema des Sägeprozesses von 3 Scheiben, Rechts: Zeitsignal des Sägeprozesses.

4.3 Die Ergebnisse

Die unterschiedlichen Prozessphasen sind bereits anhand der Intensitäten des Zeitsignals erkennbar. In einem ersten Schritt wurden die Amplitudenspektren betrachtet. In Abbildung 8 ist das Spektrum, während sich das Sägeblatt nicht im Werkstück im Eingriff befindet, rot dargestellt. Blau dargestellt ist das Spektrum während des Zerspanens - also Werkzeug im Eingriff. Anhand der beiden Spektren ist eine eindeutige Auswertung der Ergebnisse kaum möglich, weshalb eine Weiterverarbeitung der Rohdaten notwendig ist.

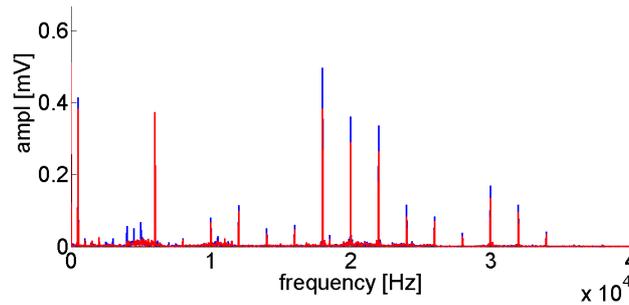


Abb. 8. Amplitudenspektren.

Ergebnis der Weiterverarbeitung kann ein Spektrogramm sein, welches sehr gut geeignet ist, die zeitliche Veränderung eines Systems übersichtlich darzustellen. Abbildung 9 zeigt ein Spektrogramm eines kompletten Sägeprozesses mit allen Phasen. Zu Beginn und zum Ende des Prozesses (Schritt 1 und 3) führen die starken Beschleunigungen der Z-Achse beim Zustellen und Abheben zu hohen Amplituden über einen weiten Frequenzbereich mit dem Maximum um etwa 5 kHz. Während der Zerspanung können reproduzierbar Änderungen im Frequenzspektrum nachgewiesen werden. Es entstehen deutliche diskrete Maxima bei unterschiedlichen Frequenzen im Bereich um 20 kHz.

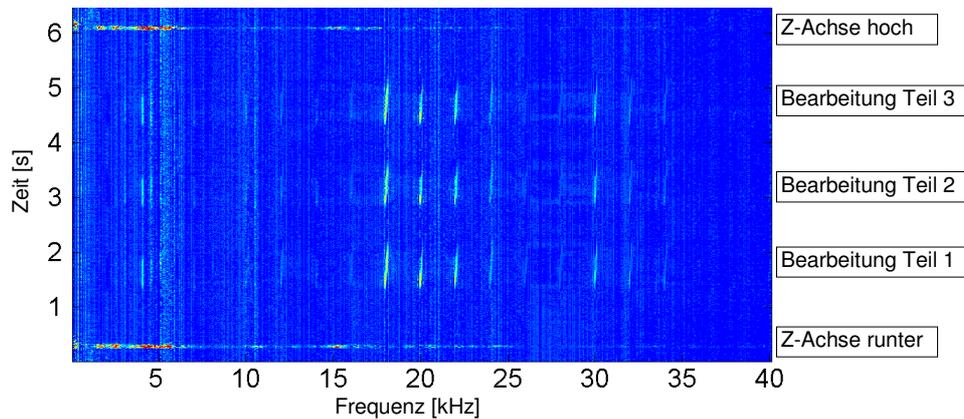


Abb. 9. Spektrogramm eines Sägeprozesses von 3 Kreisscheiben.

Der Zerspanungsprozess kann somit eindeutig abgebildet und die Einzelphasen eindeutig unterschieden werden. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass zum einen mit den entwickelten Sensoren und der verwendeten Gerätetechnik sowie Datenverarbeitung Ergebnisse im Sinne einer Prozessüberwachung erzielt werden können und zum anderen, dass eine Prozessüberwachung an einer Wafer-Sägemaschine mit all ihren Schwierigkeiten dennoch möglich ist. Die Interpretation der in dieser Arbeit vorgestellten ersten Ergebnisse ist Bestandteil der weiterführenden Aktivitäten.

5 Zusammenfassung

In der Maschinendiagnose und Prozessüberwachung sind breitbandige Schallemissionsensoren für eine sinnvolle Interpretation physikalischer Zusammenhänge eine wertvolle Ergänzung. Neue AE-Sensoren, basierend auf Piezokompositmaterialien, besitzen ein großes Potenzial eine deutliche Verbesserung der Signalqualität zu erreichen. Zudem werden neue Anwendungen mit solchen Sensoren ermöglicht. Zunächst sollen die neuen AE-Sensoren komplementär zur Schwingungsmessung verwendet werden. Ein Ersatz von Schwingungssensoren ist in speziellen Fällen denkbar. Langfristiges Ziel ist es automatisierbare Bewertungen für spezielle Anwendungen zu entwickeln.

6 Danksagung

Die Arbeiten wurden teilweise durch das AiF ZIM-Projekt „Neue Generation von Schallemissionssensoren für den speziellen Einsatz an KFT-Prüfständen“ (Förderkennzeichen KF2266003AB1) gefördert. Das Steinbeis-Transferzentrum „Technische Akustik und angewandte Numerik“ unterstützte die Arbeiten zur Entwicklung und Anwendung der Software.

7 Referenzen

- [1] Miettinen, J., Pataniity, 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
- [2] Kim, Y.-H., Tan, A. C. C., Mathew, J., Yang, B.-S.: Condition Monitoring of low Speed Bearings: A comparative Study of the Ultrasound Technique versus Vibration Measurements, WCEAM Bericht 029 Seite 1, 2006
- [3] Fritz, M., Burger, W., Albers, A.: Schadensfrüherkennung an geschmierten Gleitkontakten mittels Schallemissionsanalyse, http://www.ipek.uni-karlsruhe.de/medien/veroeffentlichungen/010926_GFT/010820_MOF_GfT_Schallemissionsanalyse_V3.pdf, 2001
- [4] Ziegler, B., Schwalbe, H.-J., Miszczak, A.: Nachweis des Reibzustandes in Gleitlagern mit Hilfe der Schallemission, DGZFP 16. Kolloquium Schallemission Vortrag 17, 2007
- [5] Lees, A. W., Quiney, Z.: The Use of Acoustic Emission for Bearing Condition Monitoring, Journal of Physics Conference Series 305 012074, 2011
- [6] Sigurdsson, S., Pontoppidan, N. H., Larsen, J.: Supervised and unsupervised condition monitoring of non-stationary acoustic emission signals, Berichtsband COMADEM 2005, Cranfield University Press, Seite 535-541, 2005
- [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] Price, E. D., Lees, A. W., Friswell, M. I., Roylance, B. J.: Online detection of subsurface distress by acoustic emissions, Key Engineering Materials Vols 245-246 Seite 451-460, 2003
- [9] Gu, D. S., Choi, B. K.: Machinery Faults Detection Using Acoustic Emission Signal, Acoustic Waves – From Microdevices to Helioseismology, Prof. Marco G. Beghi (Ed.), ISBN: 978-953-307-572-3, InTech, verfügbar von: www.intechopen.com, 2011
- [10] Holstein, P., Koch, M., Hirschfeld, D., Hoffmann, R., Bader, D., Augsburg, K.: Signal recognition under adverse conditions, Berichtsband Internoise, Korea, 2003
- [11] Bader D., Holstein, P., Mackenzie, D., Marx, H., Holinski, O., Augsburg, K.: Real-Time Realization for non-stationary Gear Noise on Automotive Tooth Gears, Berichtsband Internoise, Prag, Seite 416-423, 2004
- [12] El-Ghamry, M. H., Reuben, R. L., Steel, J. A.: The Development Of Automated Pattern Recognition And Statistical Feature Isolation Techniques For The Diagnosis Of Reciprocating Machinery Faults Using Acoustic Emission, Mechanical Systems and Signal Processing (2003) 17(4), Seite 805-823, 2003
- [13] Kelemen, S. G., Potentiale der Schallemissionsanalyse zur Charakterisierung von trockenlaufenden Friktionssystemen, Dissertation, IPEK Forschungsberichte Band 56, Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers, ISSN 1615-8113, 2012
- [14] Holstein, P., Tharandt, A., Münch, H.-J.: Handling großer Datenmengen – ein Beitrag zur Algorithmenentwicklung, Berichtsband DGZfp 17. Kolloquium Schallemission, 2009
- [15] Holstein, P., Surek, D., Tharandt, A., Probst, C.: Schallemission in der Maschinendiagnose, Berichtsband Tagung Technische Diagnose, Merseburg, 2012
- [16] Hoffmeister, H.-W., Muckli, J., Illenseer, S.: Prozessüberwachung in der Feinbearbeitung, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren 62. Auflage, Vulkan Verlag, ISBN: 3-8027-2934-X, 2005
- [17] Schäfer, C., Brecher, C., Wenzel, C., Merz, A.: Körperschallanalyse zur Überwachung von Präzisions- und Ultrapräzisionsfertungsverfahren, Berichtsband DGZFP 16. Kolloquium Schallemission, Vortrag 09, 2007
- [18] 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
- [19] 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