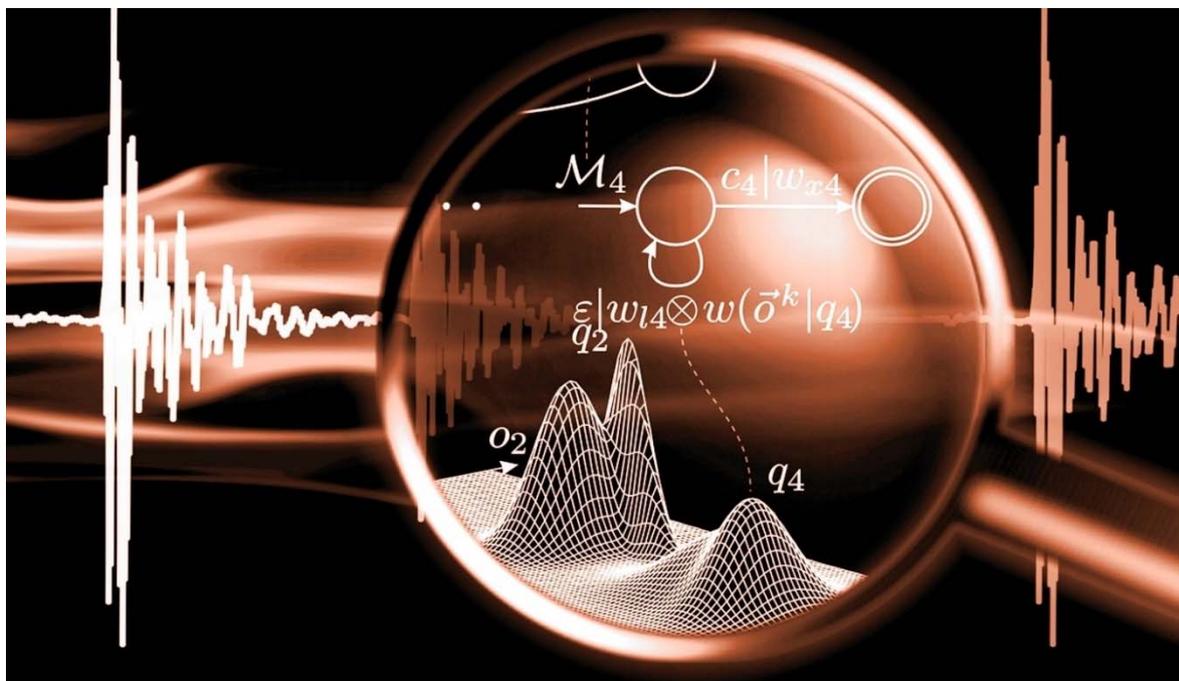


AKUSTISCHE MUSTERERKENNUNG

Qualitätskontrolle – Vorausschauende
Instandhaltung – Zustandsüberwachung



Mit wachsender Komplexität von Produkten sowie Fertigungs- und Betriebsprozessen steigt die Nachfrage nach wirtschaftlichen und zuverlässigen Ansätzen in Qualitätssicherung, Wartung und Instandhaltung. Verfahren der akustischen Diagnose ermöglichen eine Fehlerdetektion bereits mit geringem Aufwand. Am Fraunhofer IKTS wurden leicht integrierbare und kostengünstige Lösungen der akustischen Diagnose entwickelt, die in Kombination mit modernsten Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) entscheidende Optimierungspotenziale entlang des gesamten Produktlebenszyklus bieten.

AKUSTISCHE MUSTERERKENNUNG

Qualitätskontrolle – Vorausschauende Instandhaltung – Zustandsüberwachung

Constanze Tschöpe¹, Frank Duckhorn¹, Matthias Wolff²

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Maria-Reiche-Straße 2
01109 Dresden

Telefon 0351 88815-522
constanze.tschoepe@ikts.fraunhofer.de

² Lehrstuhl für Kommunikationstechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Inhalt

1. Hintergrund und Motivation	3	4. Anwendungen	5
2. Verfahren	3	Glossar	3
3. Leistungsspektrum der akustischen Mustererkennung am Fraunhofer IKTS.....	4	Literatur	6

1. Hintergrund und Motivation

Technische Anwendungen umfassen vielfältige und komplexe Aufgabenstellungen: von der Qualitätskontrolle in der prozessintegrierten zerstörungsfreien Prüfung über das Monitoring von Verschleißteilen bis zur Zustandsüberwachung. Sie gleichen sich allerdings oft darin, dass Signale aufgezeichnet werden und auf Grundlage dieser Daten eine Entscheidung getroffen werden muss. Neue Messverfahren und unterschiedliche Sensoren liefern immer größere Datenmengen, die oft nicht leicht interpretierbar sind.

Vor diesem Hintergrund wächst der Bedarf an einem universell einsetzbaren Verfahren, das in der Lage ist, die **Bedeutung** der in Form von akustischen Signalen vorliegenden Daten zu erkennen. Beispiele für Bedeutungen sind

- In der Qualitätskontrolle: Bauteil ist »gut« oder »schlecht« (häufiger Kundenwunsch: Rot/Grün-Ampel),
- Beim Verschleißmonitoring: Verschleißteil ist »neuwertig«, »abgenutzt« oder »verschlissen« oder spezieller »Das Teil hat 20 % seiner Lebenszeit erreicht.«,
- In der Zustandsüberwachung: Material oder Bauelement ist »intakt« oder durch Riss oder Einschlag »beschädigt«.

Das Verfahren muss unabhängig vom Messprinzip, von der Art der Anregung sowie der Art und der Anzahl der Sensoren einsetzbar sein und auch sehr große Datenmengen verarbeiten können.

2. Verfahren

Verfahren der künstlichen Intelligenz sind der Lage, komplexen Messwerten eine Bedeutung zuzuordnen und Gesamtsituationen einzuschätzen.

Das Fraunhofer IKTS bietet ein umfangreiches Leistungsspektrum an modernsten Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zur automatischen Bewertung technischer und nichttechnischer Prozesse. Bild 1 zeigt die Funktionsweise eines solchen Systems. Mit Hilfe von Verfahren zur Signalanalyse, Mustererkennung und zum Maschinenlernen können Sensorsignale automatisch interpretiert und in deren

Glossar

Deep Learning: ► Maschinenlernverfahren für tiefe neuronale Netze

Deep Neural Network (DNN): Künstliches neuronales Netz mit vielen versteckten Schichten, ► Mustererkenner für ► Merkmalvektor(folgen)

EM-Algorithmus: ► Maschinenlernverfahren für ► Gaussian-Mixture-Modelle und ► Hidden-Markov-Modelle

Folgenklassifikator: ► Mustererkenner für eine Folge von ► Merkmalvektoren

Gaussian-Mixture-Modell (GMM): Statistisches ► Modell zur ► Mustererkennung in ► Merkmalvektoren basierend auf Gaußschen Mischverteilungsdichten

Hidden-Markov-Modell (HMM): Statistisches ► Modell zur ► Mustererkennung in ► Merkmalvektorfolgen basierend auf einem Markov-Prozess, z. B. GMM-HMM, DNN-HMM

Klassifikationsverfahren: Siehe ► Mustererkennung

Maschinelernen: Automatische Verfahren zur Bildung von ► Modellen für ► Mustererkennung und Entscheidungsprozesse

Modell: hier: rechen-technische Repräsentation von Wissen

Merkmalanalyse: Verfahren zur Berechnung von ► Merkmalvektor(folgen) aus Messsignalen

Merkmalvektor(folge): Satz von ► klassifikationsrelevanten numerischen Parametern, ggf. als zeitliche Folge

Mustererkennung: Verfahren zur Unterscheidung in vorgegebene Klassen, z. B. basierend auf ► DNN, ► GMM, ► HMM, ► SVM

Primäranalyse: Erster Schritt der ► Merkmalanalyse (Signalverarbeitung, z. B. Filterbänke, FFT, STFT, DWT, Cepstrum, LPC, Wigner-Ville-Verteilung etc.)

Sekundäranalyse: Zweiter Schritt der ► Merkmalanalyse (Statistik, Datenkompression, z. B. Quantile, Momente, Differenzen, Filterung, PCA, LDA, ICA, JFA etc.)

Semantikverarbeitung: Rechen-technische Verarbeitung von Bedeutung (z. B. von Messsignalen)

Signalanalyse: siehe ► Primäranalyse

Supportvektormaschine (SVM): ► Mustererkenner für ► Merkmalvektoren

Trainingsverfahren: siehe ► Maschinelernen

Vektorklassifikator: ► Mustererkenner für einen ► Merkmalvektor

Bedeutung erkannt werden. Im Zeitalter von Industrie 4.0 übernimmt der Mensch nicht mehr die Aufgabe, Messgeräteanzeigen zu interpretieren. Vielmehr interagiert er mit KI-Systemen und überwacht diese.

KI-basierte Mess- und Prüfsysteme erlernen vor der Inbetriebnahme aus Beispielen den prinzipiellen Zusammenhang zwischen **Sensorsignalen** und deren **Bedeutung** für ihre individuelle Prüfaufgabe. Später können sie vom Menschen »belehrt« und korrigiert werden und sich damit im laufenden Betrieb selbst anpassen und verbessern. Diese Technologie ist wesentlich flexibler und leistungsfähiger als traditionelle Prüfverfahren.

Neben den eigentlichen KI-Komponenten nutzt das IKTS bewährte Signalanalysetechnologien. Die **Primäranalyse** basiert im Wesentlichen auf Verfahren der Signalverarbeitung, u. a. Zeit-Frequenz-Transformationen (STFT, Wavelettransformation etc.), Digitalfilter und Filterbänke, Signalmodellierung (z. B. mit Optimalfiltern) und KI-basierte Signalanalyse (z. B. CNNs). Die **Sekundäranalyse** hat die Aufgabe, die für die Mustererkennung relevanten Informationen aus den Primärmerkmalen zu extrahieren, z. B. durch Hauptkomponentenanalyse (PCA) oder lineare Diskriminanzanalyse (LDA).

Die **Mustererkennung** wird z. B. durch tiefe neuronale Netze (DNN), Gaussian-Mixture-Modelle (GMM), Hidden-Markov-Modelle (HMM) oder Supportvektormaschine (SVM) umgesetzt und schließt auch die Interpretation der Erkennungsergebnisse ein. Die hierfür notwendigen **Klassenmodelle** werden durch spezielle Maschinenlernverfahren,

beispielsweise Deep Learning (DNN), EM-Algorithmus (GMM, HMM) und konvexe Optimierung (SVM), gebildet. Dazu werden dem System in einer Anlernphase Sensorsignale mit bekannter Bedeutung (z. B. »Prüfling ist gut«, »Prüfling ist schlecht«), auch Lernstichprobe genannt, zugeführt. Modelle können bei Bedarf später während des Betriebs weitergelernt (adaptiert) werden, um das KI-System zu verbessern oder an veränderte Aufgaben anzupassen. In bestimmten Konfigurationen tiefer neuronaler Netze übernimmt der Mustererkenner die Aufgabe der Sekundäranalyse, teilweise auch der Primäranalyse, mit.

3. Leistungsspektrum der akustischen Mustererkennung am Fraunhofer IKTS

Die akustische Mustererkennung ist flexibel, selbst lernend und ermöglicht eine Kombination vieler Sensordaten. Das prädestiniert sie für einen Einsatz bei häufig auftretenden technischen Problemstellungen. Darüber hinaus werden neue (nichttechnische) Einsatzgebiete erschlossen. Beispiele sind:

- Erkennen von Rissen, Einschlüssen, Einschlägen, Abnutzung
- Überwachung von Produktionsprozessen
- Überwachung der Verschleißzustände von Maschinen
- Zustandsüberwachung von Bauteilen, Materialien, Maschinen und ganzer Anlagen
- Auswertung nichttechnischer Signale (Sprache, Musik, Biosignale etc.)

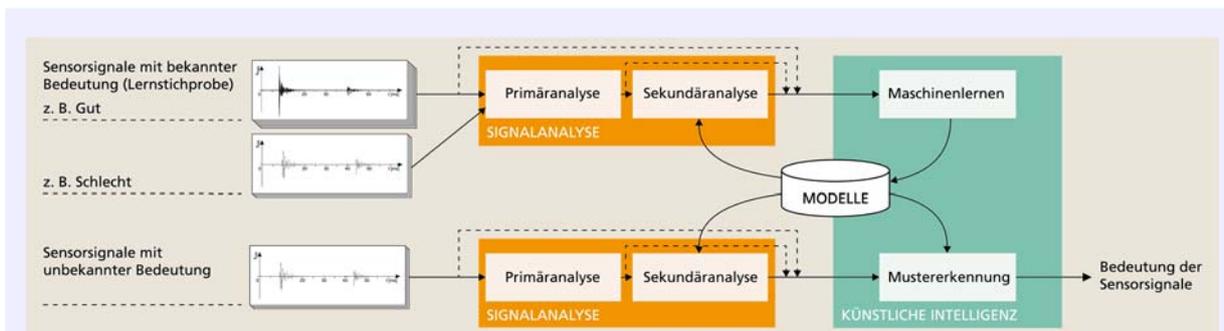


Bild 1

Aufbau eines akustischen Mustererkennungssystems zur automatischen Bewertung technischer und nichttechnischer Prozesse. Aus der Kenntnis von Sensorsignalen mit bekannter Bedeutung kann das System eigenständig Sensorsignale mit unbekannter Bedeutung interpretieren und damit deren Bedeutung ermitteln.

4. Anwendungen

Mit Methoden der akustischen Diagnose können Produkte unterschiedlichster Materialien (u. a. Eisen, Aluminium, Glas, Faserverbundwerkstoffe, Papier) analysiert und bewertet werden. Akustische Diagnose kann während und nach der Fertigung sowie zur Zustandsüberwachung von Verschleißteilen oder Bauteilen eingesetzt werden, z. B. für

- Qualitätskontrolle von Zahnrädern für den Automobilbau [1][2], praktisches Ergebnis siehe Bild 2
- Ermittlung der Restlebensdauer von Magnetventilen [3], praktisches Ergebnis siehe Bild 2
- Riss- und Impakterkennung in Flugzeugmaterialien [4]
- Fehlerfrüherkennung an Walzen und Lagern in Spinnmaschinen [5]
- Nichtinvasive Blutdruckmessung [6]
- Sprachsteuerung für Mess- und Prüfgeräte [7]
- Automatisierte Weichheitsprüfung von Papier [8]
- Klangprüfung an keramischen Hohlkörpern [9]
- Automatische Schädlingserkennung [10]

Interessant für

Industrielle Fertigung und Zustandsüberwachung (Maschinenbau, Automobilindustrie/Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrtindustrie, Uhrenindustrie, Glasindustrie, Kunststoffindustrie, Papierindustrie, Lebensmittelindustrie, Textilindustrie)

Kundenspezifische Entwicklungen

Das Fraunhofer IKTS bietet kundenspezifische Systemlösungen aus einer Hand an. Auf Basis von Kundenanforderungen wird ein Konzept für ein System (bestehend aus Sensorik, Elektronik, Hard- und Software) erarbeitet und am IKTS umgesetzt. Die Systeme können in Messstrecken eingebaut werden und als inlinefähige Prüfsysteme fungieren.

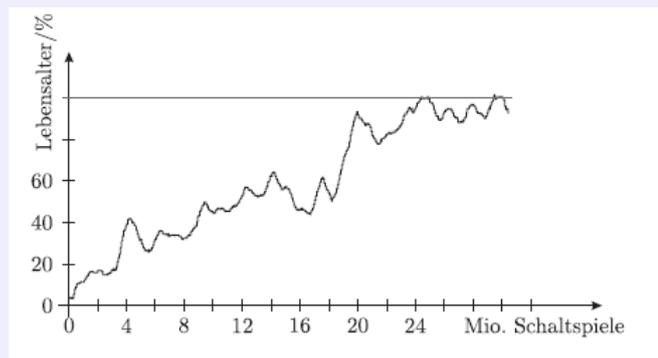
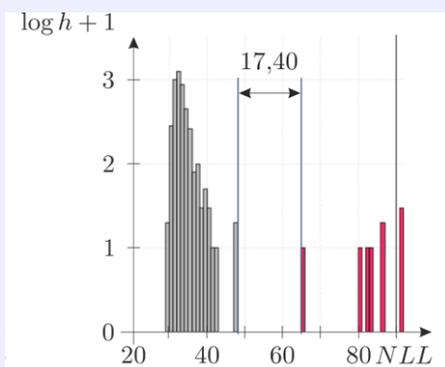


Bild 2

Links: Ergebnis der Qualitätskontrolle von Zahnrädern auf Basis der Ähnlichkeit (NLL; negative logarithmierte Wahrscheinlichkeit) zu einem gelernten Gutmodell. Gute (grau; linke Balkengruppe) und schlechte (rot; rechte Balkengruppe) Zahnräder können eindeutig (mit einer großen Trennschärfe) unterschieden werden.

Rechts: Lebensdaueranalyse von zyklisch geschalteten Magnetventilen. Durch akustische Mustererkennung geschätztes Lebensalter (in Prozent; 0 % = neuwertig, 100 % = Ausfall) eines unbekanntes Magnetventils auf Basis des Schaltgeräusches bekannter Ventile, bezogen auf die Anzahl der Schaltspiele. Ein Austausch ist nach ca. 24 Mio. Schaltspielen notwendig (Hersteller garantiert eine Lebensdauer von rund 10 Mio. Schaltspielen). Die Graphik verdeutlicht, dass mit akustischer Mustererkennung das Lebensalter von Ventilen geschätzt werden kann.

Literatur

- [1] C. Tschöpe, D. Hentschel, M. Wolff, M. Eichner, R. Hoffmann: Classification of non-speech acoustic signals using structure models. In: Proc. IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), vol. V, Montreal, QC, Canada, May 17–21 2004, pp. 653–656.
- [2] C. Tschöpe, M. Wolff: Zahnradprüfung mit statistischen Klassifikatoren. DGZFP-Jahrestagung 2013, Dresden, 06.-08.05.2013.
- [3] C. Tschöpe, M. Wolff: Statistical Classifiers for Structural Health Monitoring. In: IEEE Sensors Journal, Volume 9, No. 11, Nov. 2009, Page(s): 1567–1576.
- [4] M. Wolff, R. Schubert, R. Hoffmann, C. Tschöpe, E. Schulze, H. Neunübel: Experiments in acoustic structural health monitoring of airplane parts. In: Proc. IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Las Vegas, NV, USA, March 30–April 4 2008, pp. 2037–2040, ISBN 978-1-4244-1483-3.
- [5] T. Pusch, C. Cherif, A. Farooq, S. Wittenberg, R. Hoffmann, C. Tschöpe: Early fault detection at textile machines with the help of structure-borne sound analysis. In: Melliand English, vol. 11–12/2008, pp. E144–E145, 2008.
- [6] M. Wolff, U. Kordon, H. Hussein, M. Eichner, C. Tschöpe, R. Hoffmann: Auscultatory blood pressure measurement using HMMs. In: Proc. IEEE Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), vol. I, Honolulu, HI, USA, April 15–20 2007, pp. 405–408.
- [7] C. Tschöpe, D. Joneit, F. Duckhorn, G. Strecha, R. Hoffmann, M. Wolff: Voice control for measurement devices. AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics, Merano, 18.-21.03.2013.
- [8] C. Tschöpe, M. Wolff, G. Strecha, F. Duckhorn, T. Fehér, R. Hoffmann: Automatisierte Weichheitsprüfung von Papier. DACH-Jahrestagung 2012, Graz, 17.-19.09.2012.
- [9] M. Barth, F. Duckhorn, K. Tschöke, C. Tschöpe, B. Köhler: Testing of Ceramics by Ultrasound Microscopy and Vibration Analysis. 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), Munich, 13.-17.06.2016.
- [10] C. Tschöpe, F. Duckhorn, A. Pietzsch, U. Lieske: Akustische Mustererkennung zur automatischen Schädlingserkennung. DACH-Jahrestagung 2015, Salzburg, 11.-13.05.2015.

Das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS betreibt anwendungsorientierte Forschung für Hochleistungskeramik. Die drei Standorte in Dresden und Hermsdorf (Thüringen) formen gemeinsam das größte Keramikforschungsinstitut Europas.

Als Forschungs- und Technologiedienstleister entwickelt das Fraunhofer IKTS moderne keramische Hochleistungswerkstoffe, industrierelevante Herstellungsverfahren sowie prototypische Bauteile und Systeme in vollständigen Fertigungslinien bis in den Pilotmaßstab. Darüber hinaus umfasst das Forschungsportfolio die Kompetenzen Werkstoffdiagnose und -prüfung. Die Prüfverfahren aus den Bereichen Akustik, Elektromagnetik, Optik, Mikroskopie und Strahltechnik tragen maßgeblich zur Qualitätssicherung von Produkten und Anlagen bei.

www.ikts.fraunhofer.de