

Körperschallanalyse zur Fehlererkennung bei Fahrzeugkomponenten

Martin Bussas¹

¹Trout GmbH, Parkstraße 28, 34119 Kassel, Germany

Zusammenfassung

Rotierende und bewegliche Fahrzeugkomponenten wie Radlager oder Antriebswellen unterliegen im Betrieb hohen mechanischen Belastungen. Mit zunehmender Laufleistung können dadurch Verschleiß, Materialermüdung oder Mikrorisse entstehen, die – wenn sie unentdeckt bleiben – zu Funktionsstörungen oder gar Ausfällen führen können. Konventionelle Prüfmethode erkennen Schäden häufig erst in einem fortgeschrittenen Stadium oder erfordern aufwändige Demontagearbeiten. Eine frühe und nicht-invasive Detektion solcher Defekte stellt daher eine wesentliche Herausforderung im Bereich der Fahrzeugdiagnose und Zustandsüberwachung dar. Die Erfassung des strukturgetragenen Schalls (Körperschall) bietet hier einen vielversprechenden Ansatz: Durch die Analyse des Schallspektrums lassen sich charakteristische Anomalien oder Muster identifizieren, die auf beginnende Schäden hinweisen.

Keywords: Machine-Learning, Fahrzeugdiagnose, Frequenzspektrum, Körperschall, Instandhaltung

Körperschall

Körperschallsensoren, auch als Strukturschallsensoren bekannt, messen die durch mechanische Quellen in einem Material erzeugten Schwingungen. Diese Sensoren sind besonders nützlich für die Zustandsüberwachung und die vorbeugende Wartung von Maschinen und Fahrzeugen, einschließlich militärischer Radfahrzeuge. Sie werden hier verwendet, um Defekte an bewegten oder rotierenden Teilen zu detektieren, indem Veränderungen in den Schwingungsmustern erkannt werden, die auf Probleme wie Unwucht, Verschleiß, Risse oder andere Schäden hinweisen.



Abb. 1: Sensieren des Körperschalls mit zwei MEMS Mikrofonen.

Zwei Mikrofone erfassen kontinuierlich die durch die Fahrzeugkomponenten erzeugten und transmittierten Schwingungen, sowohl im Ruhezustand (Transport) als auch während der Fahrt.

Die Schallerfassung wird nach Geschwindigkeitsintervallen differenziert, und es wird zwischen Gelände und Straße unterschieden. Die aufgenommenen Daten werden einmal in Echtzeit analysiert und auch im Nachgang, um Muster oder Anomalien zu erkennen. Dies erfolgt durch fortgeschrittene Algorithmen aus dem Umfeld des maschinellen Lernens, um auch geringfügige Veränderungen zu identifizieren, die auf potenzielle Defekte hinweisen. Weitere Parameter aus Kinematik, Umwelt und Fahrzeugdaten aus CAN-Bus-Kommunikation werden parallel gespeichert und finden in die Auswertung Eingang.

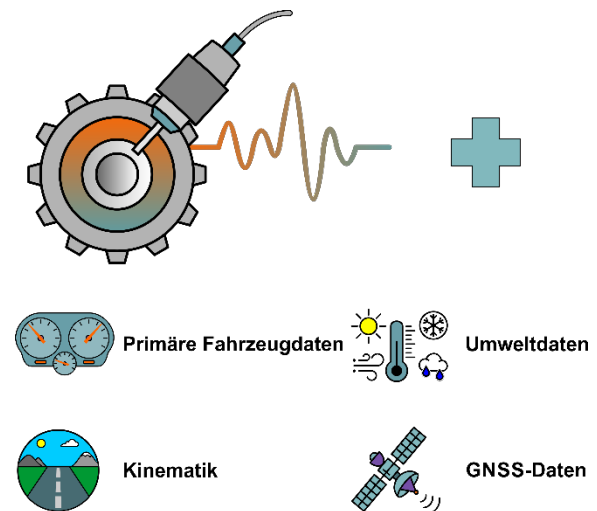


Abb. 2: Datenerfassung Schall mit Fahrzeugdaten, Umwelt, Kinematik und ggf. Position

Bei der Erkennung von Anomalien wird eine Benachrichtigungskette initiiert, um die spezifische Ursache zu identifizieren und vorbeugende Wartungsmaßnahmen durchzuführen, bevor ein schwerwiegender Ausfall auftritt.

Im Gegensatz zu anderen Diagnosemethoden, die direkten Zugang zu den zu überwachenden Teilen erfordern, können Körperschallsensoren Messungen durchführen, ohne in den Betrieb des Fahrzeugs einzugreifen.

Zustandsdiagnose

Fahrzeuge erzeugen während ihres gesamten Betriebs kontinuierlich mechanische, akustische und dynamische Signale. Vibrationen, Körperschall und Geräusche spiegeln dabei den aktuellen Zustand einzelner Komponenten und Systeme wider. Die zentrale Herausforderung besteht jedoch darin, diese komplexen Signale nicht nur zu erfassen, sondern sie auch zuverlässig zu interpretieren und in belastbare diagnostische Erkenntnisse zu überführen.

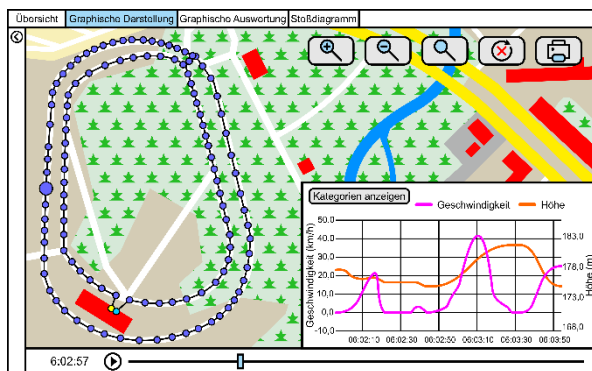


Abb. 3: Fahrzeugdatengewinnung auf der Teststrecke

Mit dem Vehicle-Data-Analysis-System VeDAS wurde ein kompaktes, autarkes Diagnosesystem entwickelt, das speziell für den Einsatz auf gepanzerten Radfahrzeugen konzipiert ist. Das System ermöglicht die kontinuierliche Erfassung und Speicherung hochauflösender Betriebsdaten unter realen Einsatzbedingungen. Ein besonderer Vorteil des Systems besteht darin, dass dank eines leistungsstarken Akkus die Datenerfassung unabhängig vom Betriebszustand des Fahrzeugs erfolgen kann. Dadurch lassen sich beispielsweise während Transportphasen relevante Zustandsinformationen gewinnen. Diese kontinuierliche und betriebsnahe Datenerhebung schafft die Grundlage für ein unverfälschtes Bild des tatsächlichen Fahrzeugverhaltens unter realen Belastungs- und Umweltbedingungen. Im Gegensatz zu

Labor- oder Prüfstandsdaten spiegeln die erfassten Informationen die tatsächlichen Einsatzszenarien wider und ermöglichen dadurch eine deutlich realitätsnähere Zustandsbewertung.



Abb. 4: Aufnahmebox für Schall, Kinematik, Umwelt- und Fahrzeugdaten

Körperschall entsteht durch mechanische Wechselwirkungen innerhalb des Fahrzeugs und breitet sich über die Fahrzeugstruktur aus. Verschleißerscheinungen, Materialermüdung, Lagerdefekte oder strukturelle Schäden erzeugen charakteristische Frequenzmuster, die sich häufig bereits in frühen Entstehungsphasen nachweisen lassen. Das System „hört“ somit direkt in die Fahrzeugstruktur hinein und erfasst Veränderungen, bevor diese zu sichtbaren Fehlfunktionen oder kritischen Ausfällen führen. Zur Auswertung dieser Signale werden akustische und schwingungsbasierte Rohdaten zunächst in spektrale und frequenzbasierte Merkmalsräume transformiert.

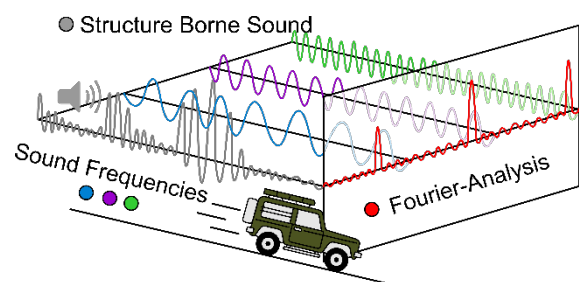


Abb. 5: Vom Geräusch zum Frequenzspektrum mit Fast-Fourier-Transformation

Anschließend kommen Verfahren des maschinellen Lernens zum Einsatz, um charakteristische Signaturen für Verschleiß, Schwachstellen und Defekte zu identifizieren. Ziel ist die Entwicklung robuster Modelle, die in der Lage sind, wiederkehrende Muster zuverlässig von betriebsbedingten Variationen und Umwelteinflüssen zu unterscheiden. Die Herausforderung liegt dabei in der hohen

Komplexität realer Einsatzdaten. Im praktischen Betrieb sind die Sensorsignale zahlreichen Störeinflüssen ausgesetzt. Unterschiedliche Fahrbahn- und Geländebeschaffenheiten oder Umweltbedingungen führen zu stark variierenden Signalcharakteristika. Zusätzlich steht die Entwicklung datengetriebener Diagnosemodelle vor dem Problem begrenzter gelabelter Datensätze. Kritische Fehlerzustände treten vergleichsweise selten auf, wodurch nur wenige eindeutig annotierte Beispiele verfügbar sind. Um trotzdem aus Schwingungen und Körperschall verwertbares Wissen zu generieren und damit Schall in belastbare Erkenntnisse zu transformieren, müssen folgende Hürden genommen werden.

- Entwicklung robuster Lernverfahren zur Mustererkennung unter eingeschränkter Datenverfügbarkeit
- Multimodale Sensorfusion, Kombination und Synchronisierung heterogener Datenquellen wie Kinematik, Körperschall, Umgebungsdaten und CAN-Bus-Informationen.

Datenreduktion

Zur effizienten und zielgerichteten Erfassung des Strukturschalls wird ein segmentiertes Messverfahren angewendet, das auf die charakteristischen Frequenzbereiche der verschiedenen Schadensarten abgestimmt ist. Die aufgenommenen Schallsignale werden einer Fast-Fourier-Transformation unterzogen, auf einer internen SD-Karte gespeichert und anschließend über ein Machine-Learning-Verfahren miteinander verglichen: Ein- und Ausgangsfahrt, verschiedene Drehzahlen, unterschiedliche Lastzustände.

Die kontinuierliche und vollständige Erfassung des gesamten Frequenzbereichs würde zu sehr großen Datenmengen und damit zu hohen Anforderungen an Speicherung und Auswertung führen. Aus diesem Grund werden die Messungen in vier Teilbereiche, die für eine individuelle Abstimmung auf einen bestimmten Fahrzeugtyp weiter differenziert werden können, unterteilt:

- Niedrige Frequenzen (6 Hz – 512 Hz): Lange Messzeiten erforderlich, Erkennung von Unwuchten oder großflächigen Strukturveränderungen.
- Mittlere Frequenzen (512 Hz – 1536 Hz): Typische Anzeichen für beginnende Lager- oder Getriebebeschäden.
- Hohe Frequenzen (1536 Hz – 4608 Hz): Empfindlich gegenüber Materialermüdung und beginnendem Versagen. Kürzere Messzeiten ausreichend.

- Höchste Frequenzen (4608 Hz – 13824 Hz): Empfindlich gegenüber Mikrorissen. Kürzeste Messzeiten ausreichend.

Diese Aufteilung reduziert das Datenvolumen erheblich und ermöglicht gleichzeitig eine detaillierte Analyse in allen relevanten Frequenzbereichen.

Signalverarbeitung

Die über die Zeit erfassten akustischen Signale werden mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt. So lassen sich die spektralen Komponenten des Körperschalls präzise darstellen und charakteristische Frequenzen von Defekten (z.B. harmonische Schwingungen beschädigter Lager) identifizieren.

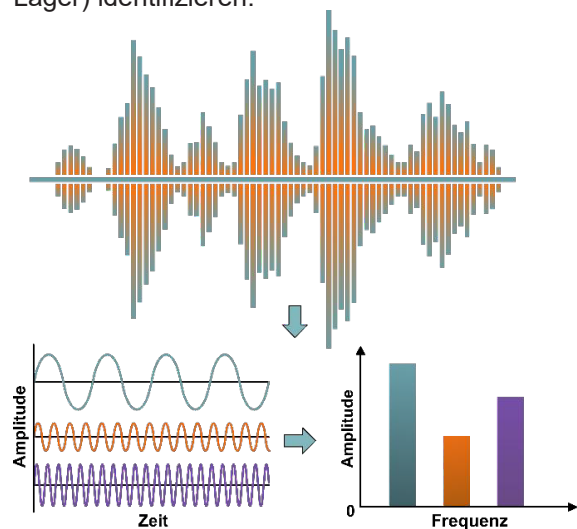


Abb. 5: Überführung akustischer Signale in ein Frequenzspektrum

Defekterkennung durch Musteranalyse

Ein zentraler Bestandteil der datenbasierten Zustandsüberwachung ist die automatisierte Defekterkennung durch Musteranalyse. Hierbei werden aktuelle Messdaten kontinuierlich mit zuvor definierten Referenzzuständen verglichen, die das charakteristische Schwingungs- und Körperschallverhalten eines technisch intakten Fahrzeugs beschreiben.

Mechanische Defekte, Verschleißerscheinungen oder strukturelle Veränderungen führen häufig zu charakteristischen Veränderungen innerhalb dieser Spektren. Dazu zählen unter anderem erhöhte Amplituden einzelner Frequenzbereiche, neu auftretende Resonanzen, harmonische Überlagerungen oder Verschiebungen dominanter Frequenzanteile. Solche Veränderungen entstehen beispielsweise durch Unwuchten, Lagerschäden, Materialermüdung oder veränderte Kopplungsverhältnisse innerhalb der Fahrzeugstruktur.

Im Rahmen der Musteranalyse werden diese spektralen Veränderungen automatisiert identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Verfahren des maschinellen Lernens ermöglichen dabei die Erkennung komplexer Zusammenhänge und wiederkehrender Signurmuster, die sich einer rein manuellen Analyse häufig entziehen. Die systematische Analyse und der Vergleich dieser Datenmengen übersteigen die Möglichkeiten einer rein menschlichen Auswertung deutlich und erfordern automatisierte, datengetriebene Analyseverfahren.

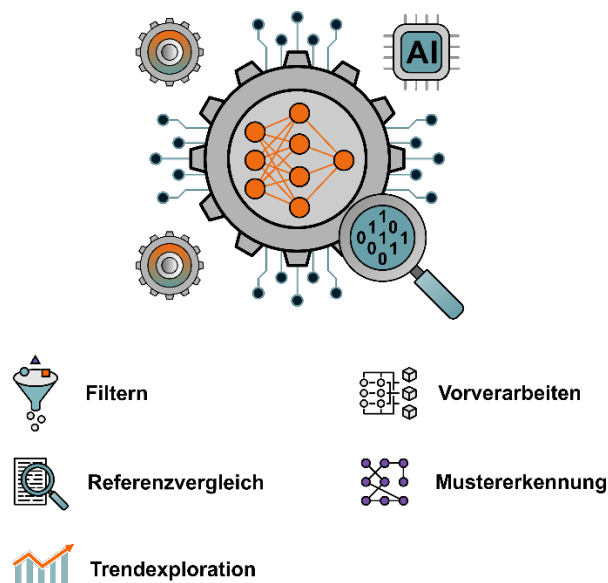


Abb. 6: Defekterkennung durch Musteranalyse

Vorausschauende Wartung

Die nachfolgend dargestellten Spektren zeigen exemplarisch den Vergleich zwischen einer Eingangsfahrt eines defekten Fahrzeugs und einer Ausgangsfahrt nach erfolgter Reparatur. Im Frequenzspektrum der Eingangsfahrt sind deutliche Auffälligkeiten sichtbar. Mehrere Frequenzbereiche weisen stark erhöhte Amplituden auf, die auf zusätzliche mechanische Schwingungsanteile und strukturelle Anregungen hindeuten. Darüber hinaus zeigen sich Verschiebungen charakteristischer Frequenzanteile gegenüber dem Referenzzustand. Sie wurden rot umringt. Im dargestellten Beispiel sind die Unterschiede zwischen beiden Spektren bereits visuell gut erkennbar. In realen Einsatzszenarien fallen solche Abweichungen jedoch häufig deutlich geringer aus und verteilen sich über zahlreiche Frequenzbereiche sowie unterschiedliche Betriebszustände.

Darüber hinaus ist die Anzahl der Spektren aus verschiedenen Fahrten, die miteinander verglichen werden, erheblich. Eine zuverlässige Bewertung dieser Datenmengen ist daher ohne automatisierte Analyseverfahren kaum realisierbar. Genau an dieser Stelle entfalten datengetriebene Methoden und maschinelles Lernen ihren entscheidenden Vorteil. Sie ermöglichen die systematische Erkennung selbst kleinster Musterabweichungen und schaffen damit die Grundlage für eine skalierbare, reproduzierbare und belastbare Zustandsdiagnose.

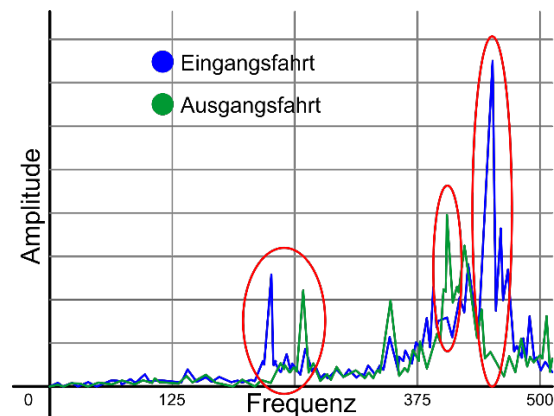


Abb. 7: Identifizierte Frequenzanomalien zwischen Ein- und Ausgangsfahrt

Fazit

Die Analyse des strukturgetragenen Schalls stellt ein leistungsfähiges Werkzeug zur frühen Erkennung von Schäden an rotierenden Komponenten dar. Durch die Kombination aus segmentierter Messung, FFT-Auswertung und vergleichender Musteranalyse entsteht ein Verfahren, das sowohl technisch effizient als auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Es ermöglicht nicht nur rechtzeitige Reparaturen, sondern auch die Implementierung moderner, zustandsbasierter Wartungskonzepte im Fahrzeugbereich.

Literaturnachweis

- [1] Vehicle-Data-Analysis-System (VeDAS) ein erster Schritt hin zur Planung und Vorbereitung bedarfsorientierter Wartung, CPM Forum für Rüstung und Sicherheit Heft 4 | 2023 Seite 66ff
- [2] Michael Möser, Wolfgang Kropp, Körperschall Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, 2010 ISBN: 978-3-540-49048-7
- [3] Michael Möser, Körperschall-Messtechnik, 2018 ISBN: 978-3-662-56621-3
- [4] Bernd Orend & Ingo Meyer Schadensfrüherkennung mittels Körperschall, 2009 MTZ – Motortechnische Zeitschrift Volume 70, Seiten 386 - 391