

Online-Überwachung des Bauteilzustandes von Eisenbahn-Radsatzwellen mittels geführter Ultraschallwellen

Jens PRAGER¹, Mateusz GRZESZKOWSKI²

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

² Technische Universität Berlin, Institut für Energie und Automatisierungstechnik, Berlin

Kurzfassung

Online-Strukturüberwachungssysteme sind eine Möglichkeit, den Anforderungen hinsichtlich Leichtbau und Zuverlässigkeit gleichzeitig gerecht zu werden. Die Integration solcher Systeme liefert aktuelle Informationen über die Integrität der sicherheitsrelevanten Struktur, wodurch sich Aussagen über notwendige Instandhaltungsarbeiten und möglicherweise über die zu erwartende Restlebensdauer ableiten lassen. Der zielgerichtete Einsatz der Überwachungssysteme ermöglicht es somit, die benötigten Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung der Bauteile zu reduzieren und Wartungsintervalle zu verlängern. Dadurch können Kosten gesenkt werden, ohne die Zuverlässigkeit zu verringern.

Im Rahmen einer Studie zur Machbarkeit eines Online-Überwachungssystems für Eisenbahn-Radsatzwellen wurde der Einsatz geführter Ultraschallwellen, die von Sensoren an einer Stirnseite der Wellen angeregt werden, demonstriert. Aufgrund der Bauteilgeometrie und der dispersiven, multimodalen Wellenausbreitung stellt die Interpretation der Echosignale eine wesentliche Herausforderung dar. Basierend auf dem a-priori-Wissen über die Wellenausbreitung wurden in der Studie klassifizierende Auswertelgorithmen entwickelt und erfolgreich an maßstabsgetreuen Labormodellen getestet.

Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen:

- Strukturüberwachung des gesamten Bauteils von nur einer Sende- und Empfangsposition an einer Stirnfläche der Wellen mit Hilfe geführter Wellen bei Frequenzen um 100 kHz (im Modell bis 400 kHz)
- Generierung robuster Merkmale aus den gemessenen Echosignalen durch Anwendung des a-priori-Wissens über die physikalischen Zusammenhänge der Ultraschallausbreitung geführter Wellen im Bauteil
- Optimierung des Merkmalsraumes und Entwicklung eines k-nearest-neighbour-Klassifikators
- Durchführung der messtechnischen Untersuchungen an Modell-Radsatzwellen im Maßstab 1:4



- Künstlich eingebrachte Testfehler (Sägeschnitte) konnten unabhängig von ihrer Position detektiert werden, auch in Querschnittsübergängen
- Testfehler konnten im Modell ab einer Fehlertiefe von 1 mm (entspricht 4 mm Fehlertiefe am realen Bauteil) detektiert werden und der richtigen Klasse hinsichtlich Fehlertiefe und Fehlerposition zugeordnet werden
- Anlernen des Klassifikators mit einer Lernstichprobe und Bestimmung der Erkennungsrate mit einem Testdatensatz ergab Erkennungsraten von bis zu > 99 % in Abhängigkeit der gewählten Anregeparameter
- Klassifizierungsleistung bei Klassifizierung nach Fehlertiefe höher als bei Klassifizierung nach Fehlerposition

Ausblick

Ein System zur Online-Überwachung von Radsatzwellen mit einer Fehlerdetektionsschwelle von 4 mm (am realen Bauteil) konnte erfolgreich implementiert und an einer Modellradsatzwelle im Maßstab 1:4 getestet werden. Die Arbeit versteht sich als Vorstudie zur Machbarkeit eines Radsatzwellen-Überwachungssystems mit geführten Ultraschallwellen und einem klassifizierenden Signalverarbeitungsmechanismus. Das System wurde unter Berücksichtigung beschränkter Einbaubedingungen und von Fragen der Robustheit und Kosteneffizienz designed. Für den Einsatz unter realen Bedingungen sind umfangreiche weiterführende Untersuchungen erforderlich, u.a. auch zum Einfluss von Umweltbedingungen.

Online-Überwachung des Bauteilzustandes von Eisenbahn-Radsatzwellen mittels geführter Ultraschallwellen



Mateusz Grzeszkowski, Jens Prager
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

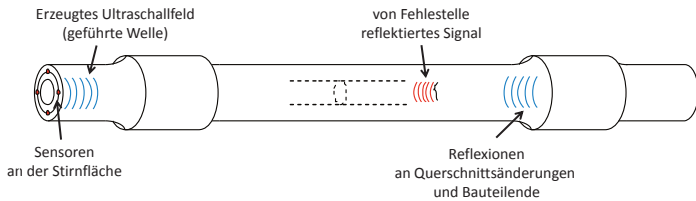
Zielstellung: Entwicklung eines robusten, wartungsfreien und preisgünstigen Strukturüberwachungssystems

Die Integration eines Online-Überwachungssystems in Hochgeschwindigkeitszüge aber auch in Güterwagen könnte zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und zu einer deutlichen Verringerung der Stillstandzeiten und der damit verbundenen Wartungskosten beitragen.

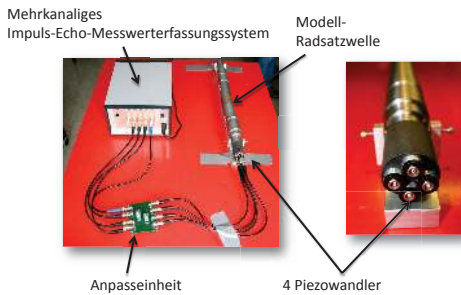
Lösungsansatz: Ultraschallprüfsystem mit geführten Wellen, Bewertung der Echosignale mit klassifizierenden Algorithmen

Der Einsatz geführter Ultraschallwellen ermöglicht die Prüfung des gesamten Bauteilvolumens ausgehend von Sensorpositionen an einer Stirnfläche der Radsatzwelle und wird so den Anforderungen an die begrenzte Zugänglichkeit gerecht. Für die Auswertung der komplexen Echosignale wurde der Einsetzbarkeit klassifizierender Auswerteverfahren evaluiert.

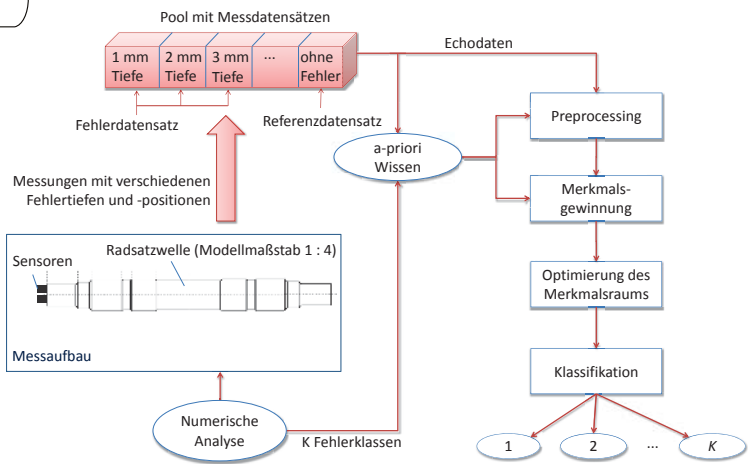
Prinzip der Verfahrens



Experimenteller Aufbau



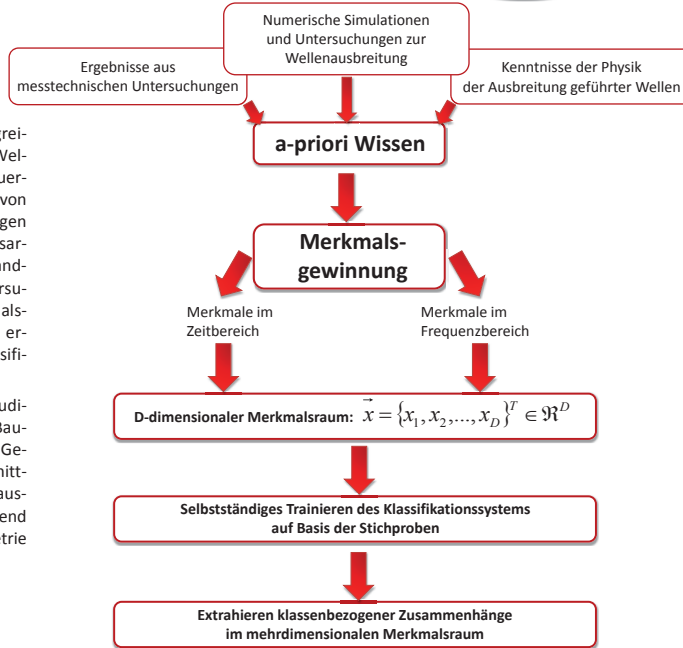
Entwicklung der klassifizierenden Signalverarbeitung und Fehlerbewertung (Training)



Voruntersuchungen zur Generierung des a-priori Wissens

Ziel der Voruntersuchungen war es, umfangreiches Wissen über die Ausbreitung geführter Wellen in Zylindern und Hohlzylindern mit Querschnittsübergängen zu sammeln. Mit Hilfe von numerischen und analytischen Betrachtungen wurde der Einfluss der Geometrie und der rissartigen Fehler auf Reflexion und Modenumwandlung studiert. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen bilden die Grundlage für die Merkmalsgewinnung. Die gezielte Merkmalsgewinnung erhöht die Effizienz und Zuverlässigkeit des Klassifikationssystems.

Eine Anregung mit axialsymmetrischen Longitudinalmoden wurde favorisiert. Im fehlerfreien Bauteil kann von streng rotationssymmetrischer Geometrie ausgegangen werden. An Querschnittsprüngen koppeln die symmetrischen Moden ausschließlich mit symmetrischen Moden, während an Fehlstellen aufgrund fehlender Axialsymmetrie auch Biegemoden entstehen können.



Gewinnung der Merkmale und Design des Klassifikators

Zur Merkmalsgewinnung im Zeitbereich wurden Amplituden- und Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Sensoren ausgewertet. Diese Merkmale enthalten Informationen über die axiale Position der Fehlstellen und die Risttiefe. Kumulative Amplitudenmerkmale erfassen die axiale Position der Fehlstellen. Im Frequenzbereich werden Histogramme, Wavelet- und Fourierdarstellungen ausgewertet. Diese Merkmale enthalten Informationen über die Modenkopplung und somit über die Risttiefe.

Anschließend wurden die besten Merkmale ausgewählt, dekorreliert und durch Merkmalsraumtransformationen optimal im Merkmalsraum abgebildet, um optimale Klassentrennbarkeit zu erzielen.

Der *K-nearest-neighbor*-Klassifikator wurde auf der Basis der experimentell gewonnenen Stichproben trainiert. Seine Erkennungsrate wurde mit Hilfe von Testdatensätzen validiert.

Ergebnisse des Klassifikationssystems

Klassenmodell 1: Fehlerposition

Klassenmodell 2: Fehlertiefe

