Akustische Diagnose an Straßenbahnen

Maik Wolf[1], Peter Holstein[2], Johannes Köllner[3], Hans-Joachim Münch[2], Dominik Zschocke[3], Andreas Günther[3], Mathias Rudolph[1]

[1] *Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 04277 Leipzig, E-Mail: maik.wolf@htwk-leipzig.de*
[2] *SONOTEC GmbH, 06112 Halle, E-Mail: p.holstein@sonotec.de*
[3] *Schwingungs Diagnose Service GmbH, 04442 Zwenkau, E-Mail: info@sds-diagnose.de*

1. Motivation und Einleitung

Die Straßenbahn ist in großen Städten nicht zuletzt wegen der anhaltenden Trends Elektromobilität, Umweltschutz, Urbanisierung und Gesundheit das zentrale Element des öffentlichen Nahverkehrs. Mit der damit verbundenen steigenden Auslastung sind erhöhte Ansprüche an den technischen Betrieb und seine gewachsenen Strukturen gegeben. Dem kann mit einer zustandsabhängigen Instandhaltung auf Basis von akustischen Analysen (Luft- und Körperschallmessungen im Hörschall- und Ultraschallbereich) zur Erzeugung, Ausbreitung und Beeinflussung von Schall begleitend begegnet werden (vgl. [1]). So führen im Bereich des Rad-Schiene-Kontaktes unzulängliche Oberflächenveränderungen am Rad (bspw.: Polygon und Flachstelle) mehr oder weniger zu Lärm, dessen Ursachen unverzüglich zu beseitigen sind, um Folgeschäden am Gleiskörper und Lärm im städtischen Bereich auf ein Minimum zu reduzieren. Je genauer der technische Zustand einzelner Straßenbahnkomponenten vorhergesagt werden kann, desto besser können die Wartungsbetriebsstätten ausgelastet und die Verfügbarkeit der Straßenbahnen maximiert werden. Mit den hier vorgestellten Arbeiten wird das Ziel verfolgt, eine gesamte Straßenbahnflotte zu überwachen und um dem Betreiber Handlungsempfehlungen zur Instandhaltung zur Verfügung zu stellen, siehe auch [2]. Die Besonderheit des vorgestellten Verfahrens basiert auf der Messdatenanalyse von komplementärer und redundanter Sensorik (Vibration, Ultraschall, Luftschall). Insbesondere wird sich dabei der Ultraschallbereich des Körperschalls zunutze gemacht, der bereits frühzeitig oberflächenhafte Veränderungen tribologischer Komponenten aufzeigt [3]. Dabei bedingen sich der technische Zustand und die Betriebsgeräusche gegenseitig.

Die Arbeit untergliedert sich in 2 Teile. Im Abschnitt 2 wird der systematische Zugang zu straßenbahntypischen Fehlern über Modellversuche und über - zur Problemstellung angepasster - Verfahren zu Messmethoden und Signalauswertung (erweiterter Frequenzbereich) erreicht. Im Abschnitt 3 stellen die Autoren die durchgeführten Feldversuche an Straßenbahnen sowie entstandene Ergebnisse vor.

2. Systematischer Zugang über Modellversuche

2.1 Versuchsaufbau

Zur Erarbeitung einer methodischen Vorgehensweise wurden Versuchsstände entwickelt und systematische Tests daran durchgeführt. Dazu wurde zunächst der Aufbau von Straßenbahnen analysiert und typische tribologische Komponenten und deren Schadensbilder für die Modellversuche ausgewählt. Das Versagen von einzelnen Komponenten wird dabei durch Ermüdung (z. B. Grübchen oder Pitting) und Verschleiß (z. B. Lagerspielvergrößerung) sowie durch Mischformen bestimmt. Für die Früherkennung und Diagnosesicherheit müssen die Schädigungsprozesse und Wirkmechanismen entsprechend verstanden werden. Zur Untersuchung der Schadensmechanismen und Schädigungsprozesse wurde ein drehzahlregelbarer Prüfstand errichtet, der die Untersuchung von Lagern ermöglicht, die Schädigungen unterschiedlichen Grades besitzen (Abbildung 1).

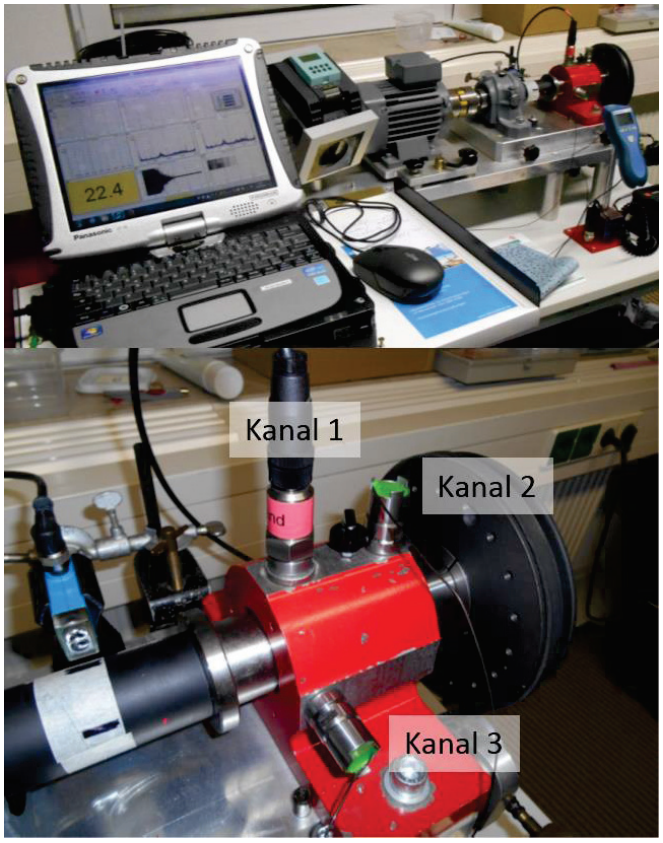

Abbildung 1: Modellprüfstand „Wälzlagerschäden“ zur Körper-schallanalyse typischer Schäden im Hör- und Ultraschallbereich

Zum prototypischen Test des Gesamtmesssystems (Datenerfassungsarchitektur, Messtechnikaufbau) und zur Entwicklung von Auswertealgorithmen wurde ein zweiter geschwindigkeitsvariabler, Prüfstand „Rad-Schiene“ errichtet (Abbildung 2). In Bezug auf die äußeren Abmaße (Achsabstand, Spurweite) und der variabel gestalteten Achsbelastung wurde ein Maßstab von 1:8 umgesetzt.

Ausgewählte und zuvor untersuchte Schadensmechanismen des Modellprüfstands „Wälzlagerschäden“ (Abbildung 1) wurden übertragen.

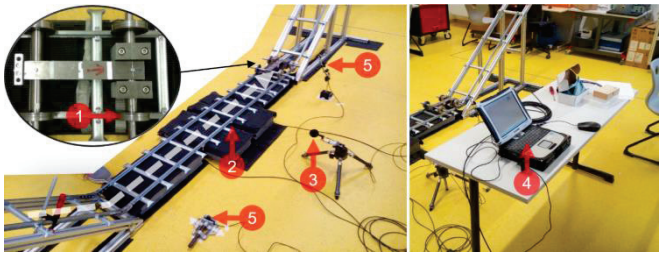

Abbildung 2: Modellprüfstand „Rad-Schiene“ für den prototypischen System-Gesamttest: 1 Modellwagen mit Schadlager, 2 Sensorapplikationsstelle, 3 Mikrofon, 4 mehrkanaliges und kanalsynchrones Datenerfassungsgerät, 5 optische Triggersensoren

In beiden Prüfständen wurden vertikal und horizontal angebrachte Beschleunigungssensoren (bis 10 kHz, Kanal 1 und 2 in Abbildung 1) und ein AE-Sensor (T10 von SONOTEC [3], bis 100 kHz, Kanal 3 in Abbildung 1) eingesetzt. Ergänzend dazu wurden am Prüfstand „Rad-Schiene“ der Wagen und Rad-Trigger sowie Luftschallsensorik (bis 100 kHz) eingesetzt.

2.2 Versuchsszenarien und Ergebnisse

Für einen systematischen Zugang zu typischen Schadensszenarien wurden Wälzlager (NU 307) zur Simulation eines fortschreitenden Ermüdungsschadens auf den Laufbahnen mittels Laserstrahlung geschädigt. Die simulierten Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen sowie deren Kombination wurden um verschmutztes Fett und nicht optimale Schmierungsbedingungen ergänzt. Diese Zustände können verallgemeinert und auf die entsprechenden Straßenbahnkomponenten übertragen werden.

In dieser Arbeit wird ein repräsentativer Ausschnitt der verschiedenen und bekannten Schadensszenarien dargestellt:

- Szenario A – „Normallager“: Lager im Neuzustand mit Normalluft, keine Schädigung
- Szenario D1 – „Trockenlager“: Lager im Neuzustand mit Normalluft, keine Schädigung der Laufbahn, Trockenlauf (Lager mit Lösungsmittel gereinigt)
- Szenario E – „Sandstrahl-Lager“: Lager mit Schädigung auf Außenring durch eine um 30 Grad stark sandgestrahlte bzw. aufgeraute Oberfläche mit Normalluft, keine weitere Schädigung

In Abbildung 3 sind die Amplitudenspektren der drei beschriebenen Szenarien jeweils von Kanal 1 und Kanal 3 (s. Abbildung 1) dargestellt. Die Drehzahl wurde von 600 U/min bis 1500 U/min variiert.

Das „Normallager“ (A) wird von beiden Sensoren über alle Frequenzen mit ähnlichen Pegelwerten wiedergegeben. Das „Trockenlager“ (D1) weist unter Kanal 3 (AE-Sensor) deutlich größere Emissionen im höheren Frequenzbereich (Ultraschall) auf. Ein ähnliches Verhalten liegt beim „Sandstrahl-Lager“ (E) vor. Einerseits zeigt dieses Verhalten die Möglichkeit zur Schadens-Früherkennung, basierend auf hochfrequenten Emissionen, auf, die i. d. R. das Vorstadium niederfrequenter Emissionen, bspw. von Ermüdungsschäden bilden. Andererseits wird die Eignung des AE-Sensors gegenüber eines üblichen Beschleunigungssensors zur Früherkennung gezeigt.

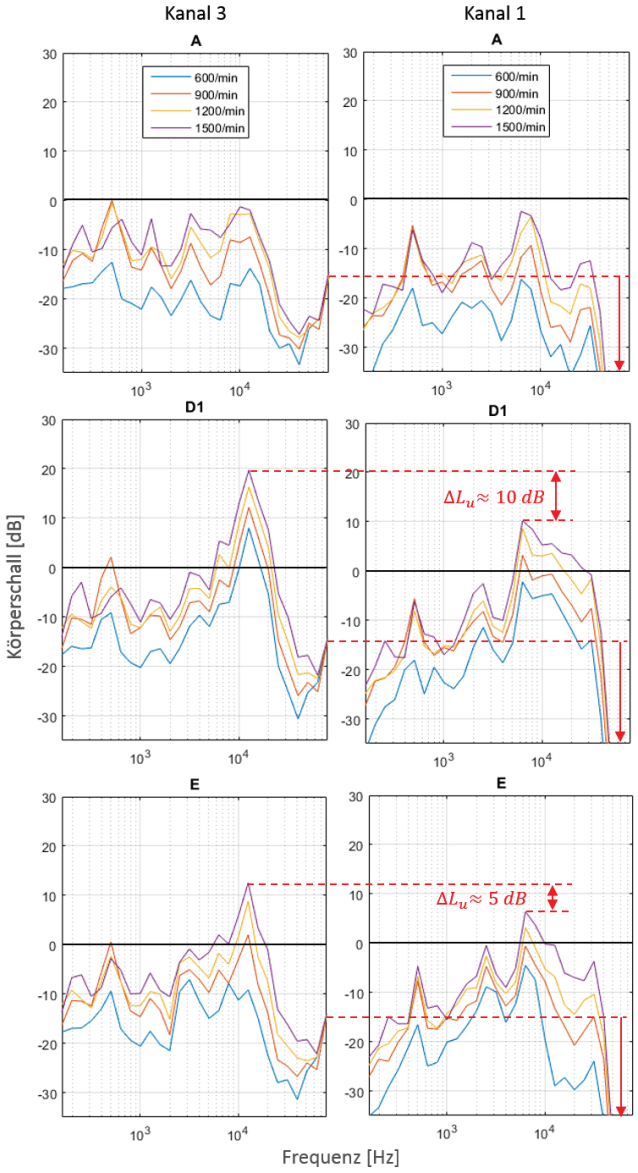

Abbildung 3: Spektren von unterschiedlich geschädigten Wälzlagern, erfasst durch einen herkömmlichen Beschleunigungssensor (Kanal 1) und einen AE-Sensor (Kanal 3) mit erweitertem Frequenzbereich zur Detektion hochfrequenter Emissionen: A Normallager, D1 Trockenlager, E Sandstrahl-Lager. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Daten auf einen internen Spannungsstandard bezogen.

Zur Messdatenauswertung, bspw. über Methoden des maschinellen Lernens (ML) oder über einfache Grenzwerte, können geeignete Diagnoseparameter aus dem Zeit- und Frequenzbereich (z. B.: Effektiv- und Spitzenwerte, Kurtosisfaktor oder K(t)) extrahiert werden. Diese sind meist stark vom Schadensfortschritt und vom Untersuchungsgegenstand, aber auch von den

Betriebsbedingungen, abhängig. Dennoch sind sie auch bei höherfrequenten Emissionen einsetzbar - dort werden diese, je nach Lagerzustand, eine unterschiedliche Sensibilität besitzen.

3. Feldversuche

3.1 Messaufbau

Die Errichtung des Messaufbaus erfolgte an einem Gleis mit Schotterbett, was den genormten Prüfbedingungen [4] entspricht. Der Gleisabschnitt am Messort ist geradlinig und befindet sich in einem einwandfreien Zustand. Normale bzw. gleichbleibende Betriebsbedingungen sind somit gewährleistet. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Lage ruhig ist (wenig Fremdgeräusch, keine passierenden Lkw/Pkw) und ausreichend Platz bietet, um Sensorik im sicheren Abstand zur Straßenbahn und zum Gegengleis aufstellen zu können (großer Gleismittenabstand).

Die Messeinrichtung besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten (vgl. Abbildung 4). Die Hauptmikrofonhalterung beinhaltet das Dachmikrofon und das in Fahrtrichtung rechtsseitige Mikrofon (Typ MK 301 E, 10 Hz bis 100 kHz). Hier ist ein zusätzlicher Laser für die Bahndetektion montiert. Auf der Gegenseite wurden ein weiterer Mikrofonhalter für das linksseitige Mikrofon und der Reflektor des Bahndetektionslasers eingerichtet. Die dritte Komponente betrifft die Körperschallsensoren (Typ KS80D, bis 10 kHz) und die Sensoren zur Messung des Körperultraschalls (Typ T10, 10 Hz bis 100 kHz) im Gleisbereich. Neben den magnetisch adaptierten Gleissensoren ist ein Raddetektionslaser verbaut. Zwischen den Gleisen ist ein weiteres Mikrofon zur Erfassung der Drehgestell- und Unterbodengeräusche positioniert. Die vierte Komponente beinhaltet die kanalsynchrone Datenerfassungseinheit Soundbook_MK2 (max. Abtastrate 200 kHz pro Kanal).

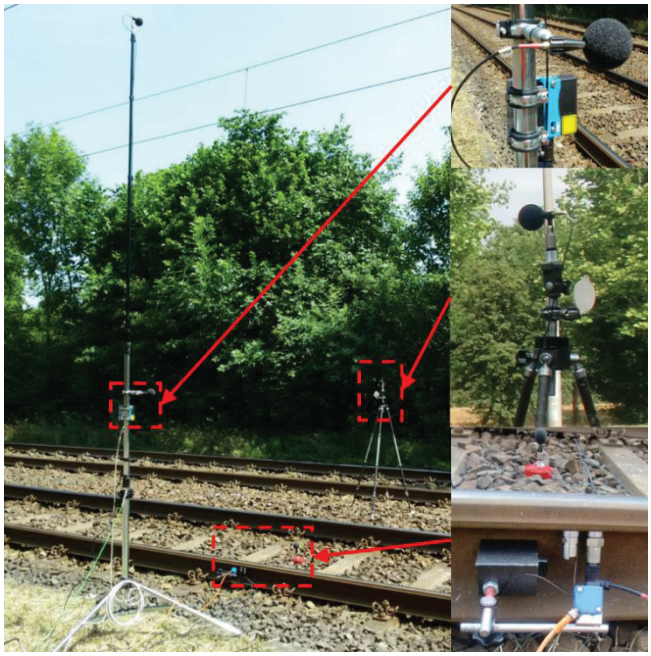

Abbildung 4: Prototypische Anwendung des Gesamtmesssystems im Feldversuch mit Körper(ultra-)schall- und Luftschallsensorik sowie Bahn- und Radtrigger

3.2 Messtechnische Untersuchungen und Ergebnisse

Auf der Basis von Informationen zum Streckennetz und Linienverkehr konnte, unter der Berücksichtigung von Bahntyp und -instandhaltungszustand (Laufzeit), eine entsprechende Planung der Messungen vorgenommen werden, da typabhängige Besonderheiten (bspw. wie Achslast und mechanischer Aufbau) zu berücksichtigen sind. Schließlich liegen je Straßenbahnvorbeifahrt 8 Spuren hochabgetastete Vibrations- und Luftschalldaten als Messdatenergebnis vor.

Die einerseits komponentenbezogene Datenauswertung erfolgt durch die Wagen- und Radtrigger, die eine entsprechende Signalsegmentierung ermöglichen. Andererseits kann der Straßenbahnverbund über Ganglinien nach Auffälligkeiten untersucht werden, s. Abbildung 5. Die Straßenbahngeschwindigkeit ist ein wesentlicher Einflussparameter auf die Messwerte und wurde durch eine Laserpistole erfasst.

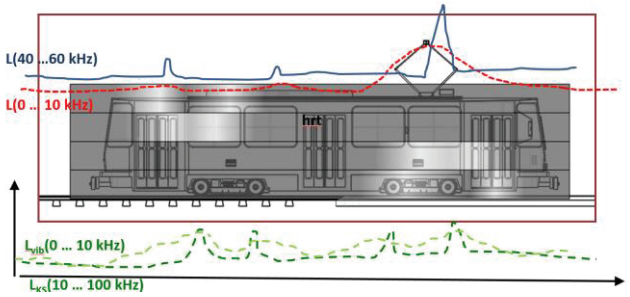

Abbildung 5: Illustration zum Mehrwert des Forschungsansatzes zur Verwendung komplementärer Sensorik (Hör- und Ultraschall) am Beispiel einer Straßenbahnvorbeifahrt.

Abbildung 5 illustriert eine Straßenbahnvorbeifahrt und die Variation der akustischen Parameter für verschiedene Sensoren bzw. Messkanäle. In Summe bilden diese eine Aussage, die ähnlich einem „Fingerprint“ zur Abschätzung der Wartungsbedürftigkeit der lokalen Komponenten ist.

Zusätzliche Informationen zu den untersuchten Straßenbahnen wurden von der Polygonmessanlage des assoziierten Verkehrsunternehmens gewonnen. Sie erfasst die Rundlaufabweichung der Räderoberflächen (Referenzmessdaten). Das sogenannte Polygon ist eine oberflächenhafte Veränderung des Radrundlaufs, wobei die typische „Ecken“-Anzahl des Polygons 12 bis 18 beträgt [5]. Die Detektion eines polygonalen Rades mittels Vibrationsdaten kann bei ausreichender Mittelung der Messergebnisse aus mehreren Vorbeifahrten über den Polygonindikator erfolgen [5]. Im vorliegenden Fall wurde sich dafür entschieden, mit mehreren Kenngrößen ein Polygon-Klassifikationsmodell zu bilden. Dabei besteht der Vorteil einerseits darin, auf Basis weniger Vorbeifahrten zuverlässige und zeitnahe Klassifikationsergebnisse zu erzielen und andererseits in der möglichen Beherrschung störender Einflussgrößen durch eine mehrdimensionale Beschreibung der Objekte (Räder).

Die Abbildung 6 zeigt die Vorgehensweise, wie Zustandsinformationen, bestehend aus den Kenngrößen eines Beschleunigungssignals, verdichtet und einer Methode zur überwachten Klassifikation (Stützvektormethode) zugeführt werden. Hierbei werden stark korrelierende Kenngrößen als ähnlich betrachtet und entfallen daher für die folgenden Schritte der Datenauswertung. Es wurden demnach nur diejenigen Kenngrößen extrahiert, die am geringsten korrelieren. Die Objekte (Räder), welche durch die Kenngrößen „Spitzenwert“ und „Polygonindikator“ repräsentiert werden, wurden schließlich der Stützvektormethode (SVM – support vector machine) zugeführt. Auf Basis der Radinformationen (Referenzmessdaten) der Polygonmessanlagen wurde ein Klassifikationsmodell entwickelt, auf dessen Basis eine überwachte Klassifikation durchgeführt werden kann. Die grüne Beschriftungsfarbe der Objekte stellt Räder im „Gut“-Zustand und gelb im „Schlecht“-Zustand dar. Die blaue Fläche bildet die „Gut“-Klasse („i. O. Klasse“) und die violette Fläche die „Schlecht“-Klasse („n. I. O. Klasse“) des Klassifikationsmodells dar. Das entwickelte Modell steht nun zur Klassifikation weiterer Messdaten mit unbekannten (Räder-) Zuständen zur Verfügung.

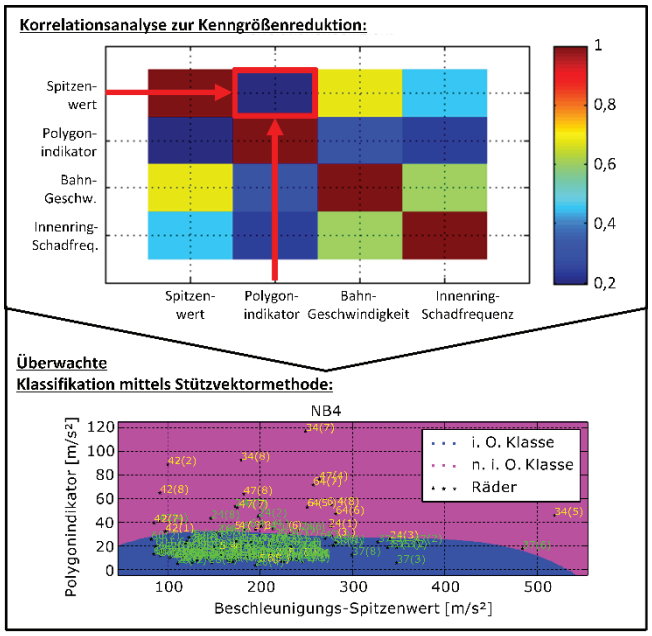

Abbildung 6: Reduktion redundanter Kenngrößen mittels einer Korrelationsanalyse (oben) für eine überwachte Klassifikation der Schwingungskennwerte „Spitzenwert“ und „Polygonindikator“ zur Erkennung der Polygonhaltigkeit, basierend auf der Stützvektormethode.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Verfolgung einer zustandsabhängigen Instandhaltungsstrategie von Straßenbahnen wurde ein gleisgebundenes, messtechnologisches Konzept entwickelt und präsentiert. Auf Basis von redundanter und komplementärer Ultraschall- und Schwingungssensorik kann somit eine frühzeitige (im Sinne des Schadensfortschritts) und komponentengebundene Schadensdetektion erreicht werden. Am Beispiel der Polygonhaltigkeit von Straßenbahnrädern wurden, mit Methoden des maschinellen Lernens, erste Ergebnisse des Messsystems präsentiert. Dabei gehen sowohl der technische Zustand als auch der Lärm von Straßenbahnkomponenten einher. Die nächsten Schritte werden Langzeituntersuchungen, auf Basis einer quasistationären Messeinrichtung, für eine langfristige Datenbasis beinhalten, um weitere Schadenszustände zu erfassen und um Umwelteinflüsse (z. B. Witterung und Jahreszeiten) in die Zustandsdiagnose einbeziehen zu können. Generell hat sich die Klassifizierungsstrategie als leistungsfähiger Ansatz zur Bewertung des technischen Zustands und der akustischen Auffälligkeit von Straßenbahnen erwiesen.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des ZIM-Kooperationsprojektes “SmartTram” (Förderkennzeichen: ZF 4327502GR6, ZF 4364401GR6 und ZF 4362901GR6) durchgeführt. Dieses Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns bedanken. Im gleichen Maße danken wir dem assoziierten Partner Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH für die Möglichkeit zur Durchführung der applikationsbezogenen Untersuchungen.

Literatur

[1] DIN 45635:1985-06, Geräuschmessung an Maschinen - Luftemission, Körperschallmessung - Teil 8: Rahmenverfahren

[2] Vágner, J., Zelenka, J., Hába, A., Kohout, M., Havlíček, P.: Failures of Railway vehicles measurable on track. In: Zolotarev, I., Radolf, 22nd International Conference Engineering Mechanics 2016, Proceedings Vol. 22, Svratka, Czech Republic 2016, S. 566 - 569

[3] Probst, C., Holstein, P., Surek, D. und Tharandt, A.: Anwendungen von AE-Sensoren basierend auf Piezokompositen in der Maschinendiagnose und Prozessüberwachung. In: Tagungsband zum 19. Kolloquium Schallemission – Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallanalyse. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., Augsburg 2013, S. 1 – 8

[4] DIN EN ISO 3095 : 2013, Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen

[5] Thümmel, T., Mayr, G., Waubke, H., Breindl, C.: Detektion unrunder Räder an Straßenbahnen mit einer Gleismessstelle. In: Verein Deutscher Ingenieure, Dynamik von Fahrzeug und Fahrweg, VDI, Kassel, Deutschland 2000, S. 367 – 386