

Schwingungsbasierte Schadensdetektion an Eisenbahnradreifen

Robin Pianowski^{1*} Robert Kamenzky¹ und Peter Blaschke¹

¹ Technische Hochschule Wildau

* Korrespondenz: robin.pianowski@th-wildau.de

Kurzfassung. Die Verkehrswende bedingt einen Ausbau des Schienen-Personenverkehrs. Eine in situ Schadenserkenkung während des Betriebs kann einen Beitrag zur Kapazitätserhöhung und Sicherheit im Schienenverkehr liefern. Im Vortrag werden Forschungen bezüglich einer schwingungsbasierten, zerstörungsfreien Methode zur Detektion von Radreifenschäden vorgestellt. Über eine Transferpfadanalyse wird auf den Körperschall jedes Rades während der Überfahrt rückberechnet. Mit dem synthetisierten Körperschall wird mittels des akustischen Resonanztests die Schadensidentifikation durchgeführt.

1. Einleitung

Radreifen von Schienenfahrzeugen weisen im Betrieb verschiedene Fehlstellen auf, die den reibungslosen Betrieb stören oder zu einem Fahrzeugausfall führen können.

Das Maschinendynamiklabor der TH Wildau forscht zum Thema der prädiktiven Schadenserkenkung an Radreifen, die während der Überfahrt des Schienenfahrzeugs über eine Messstelle erfolgt. Als grundlegende Methode dient der Akustische-Resonanztest (ART), umgangssprachlich Klangprobe. Die Klangprobe ist als subjektives Prüfverfahren in der Industrie verbreitet, in dem Werkstücke von einem Prüfer angeschlagen und abgehört werden. Anhand des Klangs des Werkstücks kann ein erfahrener Prüfer auf den Zustand schließen [1].

Im wissenschaftlichen Sinne lässt sich daraus schlussfolgern, dass die modalen Eigenschaften von intakten und schadhaften Bauteilen voneinander abweichen. Der spektrale Unterschied lässt eine Aussage zum Zustand des betrachteten Werkstücks zu [1].

Im Normalfall werden die Bauteile bei der ART frei aufgehängt, um die Schwingantwort zu erfassen. Das Team der TH Wildau verwendet die Transferpfadanalyse und -synthese, um das Körperschallsignal des Radreifens bei Überfahrt aus dem Signal der Schiene zu extrahieren.

2. Radreifen Aufnahmevorrichtung

Für reproduzierbare Labor- und Feldversuche wurde eine eigens entwickelte Aufnahmevorrichtung für Straßenbahn-Radreifen im Labor konstruiert und gefertigt. Die Aufnahmevorrichtung ist modular gestaltet und kann für Versuche auf Normal- und Meterspur verwendet werden. Es können Radreifen mit verschiedenen Durchmessern eingespannt und aufgrund der rotatorisch gelagerten Welle auf der Schiene bewegt werden.

Die Aufnahme eines Radreifens erfolgt über eine radiale Einspannung von der Innenseite. Ein vierarmiger Stern mit Auslegern wird an den Innendurchmesser des Radreifens angepasst. Die Einspannung folgt kraftschlüssig durch acht Schubhebelspanner. Der Kontakt zum Radreifen erfolgt zwecks einer Entkopplung über Gummipuffer.

Die Radreifenaufnahme wird mit einer Welle und zwei Stehlagern am Grundgestell befestigt. Das Grundgestell ist aus Aluminium-Strangpressprofilen verschraubt und mit zwei Bockrollen versehen. Die Bockrollen besitzen ein Gummiprofil. Dies sichert bei akustischen Messungen zum einen, dass nur der Schallbeitrag der Radreifen gemessen wird und zum anderen eine Entkopplung von Grundgestell und Schiene.



Abbildung 1 links und Mitte: Vorrichtung zur Radreifenaufnahme mit gummigepufferten Schubstangenspannern. Ermöglicht Rotation und Verfahren auf der Schiene.; rechts: Grundgestell mit montierter Radreifenaufnahme. Überfahrt einer einzelnen Schiene oder Gleis in Normal- oder Meterspur durch spurgehaltene Bockrollen möglich

3. Transferpfadanalyse (TPA) und -synthese (TPS)

Die TPA/TPS ist ein zweistufiger Prozess. In der Transferpfadanalyse wird das schwingfähige System auf dessen Übertragungseigenschaften von einem definiertem Punkt A zu Punkt B analysiert. Hierbei werden Transferpfade mit zugehörigen Übertragungsfunktionen gebildet. Die Funktionen werden darauffolgend an einem Versuchsaufbau gemessen. Anschließend werden die Übertragungsfunktionen zu Transferpfaden zusammengesetzt. Es kann mit einem Input-Signal aus Punkt A mittels Transferpfadsynthese ein Output-Signal im Punkt B synthetisiert werden.

Im Projekt wird zunächst ein Proof of Concept zur Transferpfadanalyse und -synthese durchgeführt. Hierbei soll aus einem Beschleunigungssignal aus der Schiene, aufgenommen mit einem Piezo-Beschleunigungssensor, das Gesamtschallspektrum der Überfahrt eines Radreifens über die Schiene synthetisiert werden.

Für den Versuch wurde die entwickelte Radreifenaufnahme und eine zwei Meter lange S49 Schiene verwendet. Der Aufbau und die Messungen wurden im Halbfreifeldraum des Maschinendynamiklabors durchgeführt. Nach der Messung der Übertragungsfunktionen können diese zu oben erklärtem Modell zusammengesetzt werden. Es ist jetzt möglich, dass Überfahrtgeräusch des Radreifens aus dem Schwingungssignal der Schiene zu synthetisieren.

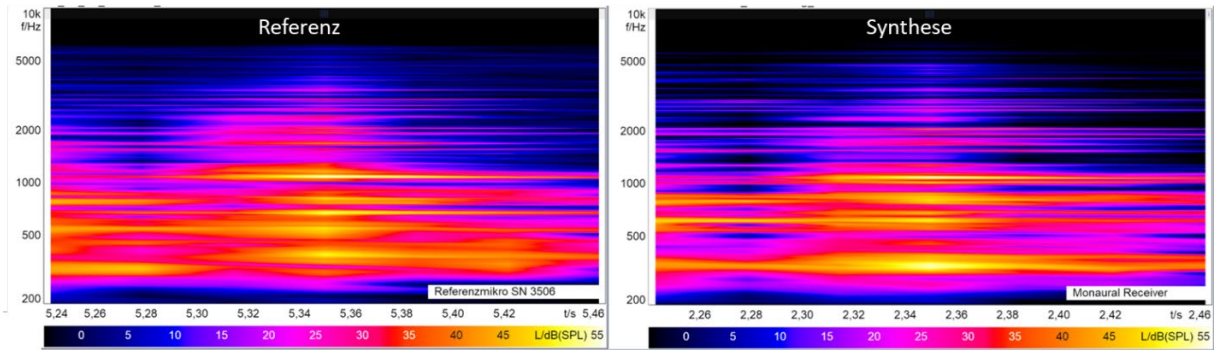


Abbildung 2 Spektraler Vergleich der synthetisierten Schienenüberfahrt des Radreifens gegenüber einer Referenz-Mikrofonmessung

Ein Vergleich zwischen Synthesesignal und einer Mikrofon-Referenzmessung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Summenschallpegel der Synthese und des Referenzsignals weichen weniger als einen dB voneinander ab. Die Übertragungsfunktionen mussten manuell nachbearbeitet werden, um dieses Ergebnis zu erreichen.

Im Spektralen vergleich zeigen sich jedoch Unterschiede. Im Bereich von 600 Hz bis 1400 Hz herrscht eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Referenz und Synthese. Im darunterliegenden Frequenzbereich, besonders bei 500 Hz, fehlen jedoch Frequenzbestandteile in der Synthese.

Für den Proof of Concept zur Adaptierung der TPA/TPS an eine Radreifenüberfahrt sind die Ergebnisse vielversprechend. Mit dem Ziel der späteren Rückrechnung auf das Körperschallsignal des Radreifens ist eine spektrale Abweichung zwischen Referenz und Synthese suboptimal. Die Schadenserkennung basiert auf der Untersuchung des Frequenzspektrums, welches präzise aus der Überfahrt extrahiert werden muss.

Als nächster Schritt wird im Halbfreifeldraum ein realitätsnaher Gleisaufbau von vier Metern Länge aufgebaut. Dieser Enthält ein Gleis mit einem Gewicht von 25 Kg pro Meter sowie Holzschwellen und den Oberbau K. Bei der TPA und TPS wird in folgenden Versuchen die Bildung der Übertragungsfunktionen priorisiert. Übergeordnet ist die Reduzierung der spektralen Abweichung zwischen Referenz und Synthese.

4. Schadenserkennung

In der Schadenserkennung an Radreifen sollen Fehlstellen anhand spektraler Unterschiede zu Gutteilen identifiziert werden. Hierfür werden die Parameter Eigenfrequenz, Dämpfung und Amplitude herangezogen. Weiterhin wird eine Modenkopplung der Schäden untersucht.

Zu jeder Eigenfrequenz existiert eine dedizierte Schwingform. Es soll untersucht werden, ob eine definierte Schädigung einen Einfluss auf eine bestimmte Schwingform oder ihre höheren Ordnungen hat. Ziel ist eine Eingrenzung der Schadensart anhand der beeinflussten Eigenfrequenz und Schwingungsform.

Zur Untersuchung der modalen Eigenschaften werden experimentelle Modalanalysen an zwei Arten von Radreifen der Straßenbahn durchgeführt. Untersucht wurden drei Radreifen eines Typs A und zwei Radreifen eines Typs B. Die Radreifentypen unterscheiden sich in der Geometrie und alle Testobjekte sind gebraucht. Die Radreifen werden an einer Traverse mit einem Riemen aufgehängt, um eine möglichst Frei-Frei Lagerung zu erhalten. Die Kraftanregung erfolgt auf der Lauffläche Die Schwingantwort der Radreifen wird mit einem 3D Laser-Doppler-Vibrometer aufgenommen. Parallel zu der experimentellen Modalanalyse werden die Radreifen numerisch mit der FEM untersucht.

Die Messergebnisse und die Simulationsergebnisse zeigen identische Schwingformen innerhalb einer Gruppe und ähnliche Formen zwischen den Radreifengruppen A und B. Hieraus ist ableitbar, dass die Schwingform durch die Ringförmigkeit der Radreifen dominiert wird. Die Schwingformen können nach dem Schema der chladnischen Klangfiguren nach Knotenlinien und Knotenringen eingeteilt und benannt werden.

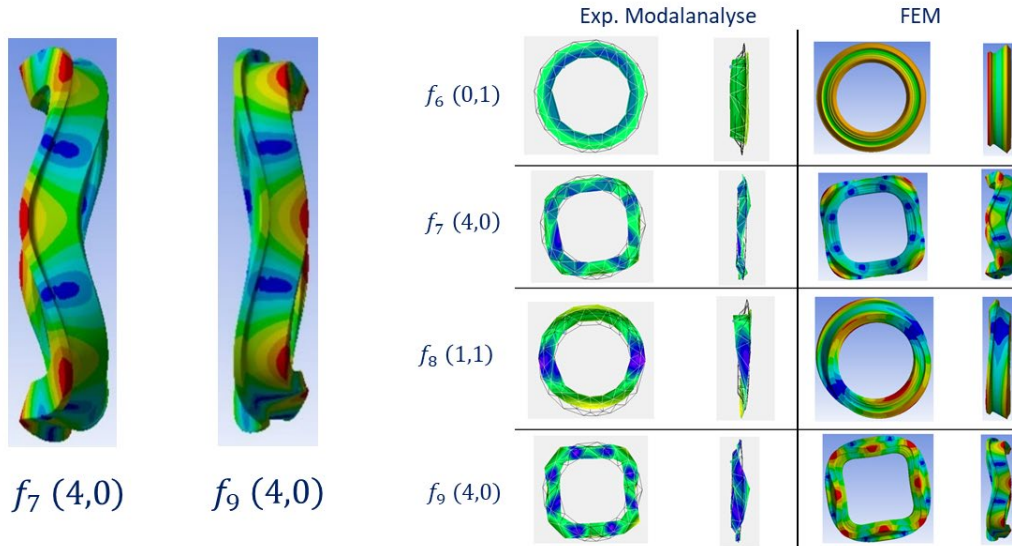


Abbildung 3 rechts: Beispielhafte Schwingformen der Radreifen (Typ A) aus der FEM Modalanalyse. Einteilung der Schwingformen nach chladnischen Klangfiguren in Knotenlinien und Knotenringe. Links: Unterschied der zwei Arten von Biegeschwingungen mit ausschließlich Knotenlinien am Beispiel der Moden f_7 und f_9 . Maxima der Beschleunigung am Spurkranz (f_7) und an der Lauffläche (f_9)

Bei Betrachtung der Abbildung 3 zeigen sich zwei ähnliche Modenformen f_7 und f_9 , die vier Knotenlinien und keine Knotenringe aufweisen. Die Geometrie der Radreifen ist radial symmetrisch, jedoch nicht axial. Daher prägen sich zwei Arten von Biegemoden mit ausschließlich Knotenlinien aus. Die Maxima der Schwingform liegen bei der f_7 am Spurkranz. In der f_9 liegen die Maxima auf der Lauffläche. Demnach lassen sich diese Biegemodengruppen als laufflächen- und spurkranzseitig definieren.

In Abbildung 4 ist die Abweichung der Eigenfrequenzen von zwei Radreifen des Typs B dargestellt. Die horizontale Achse stellt die identifizierten Modenformen dar. Auf der vertikalen Achse sind die prozentualen Abweichungen der Eigenfrequenzen aufgetragen.

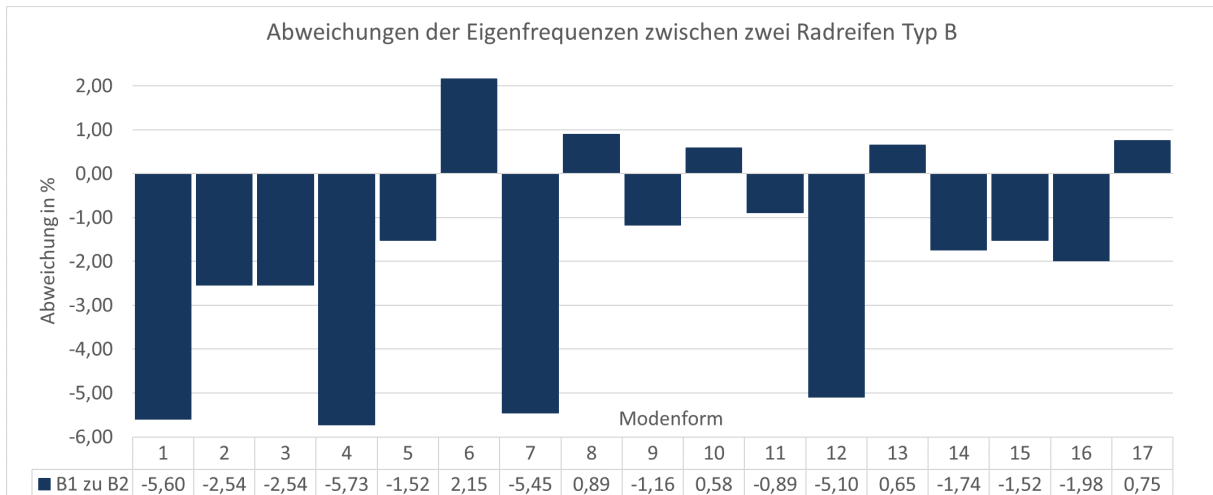


Abbildung 4 Prozentuale Abweichung der Eigenfrequenzen von zwei verschlissenen Radreifen des Typ B. auffällige Abweichung bei f_1 , f_4 , f_7 , f_{12}

Die Abweichung zwischen den beiden Radreifen pendeln zwischen $\pm 2\%$. Deutliche Ausreißer existieren bei den Moden f_1 , f_4 , f_7 und f_{12} . Hier liegt die Abweichung bei über 5%.

Bei Betrachtung der Moden mit hoher Abweichung lässt sich feststellen, dass diese zur gleichen Gruppe von Schwingungsmoden gehören. Alle vier weisen ausschließlich Knotenlinien auf und haben ihre Maxima am Spurkranz, wie in Abbildung 5 dargestellt.

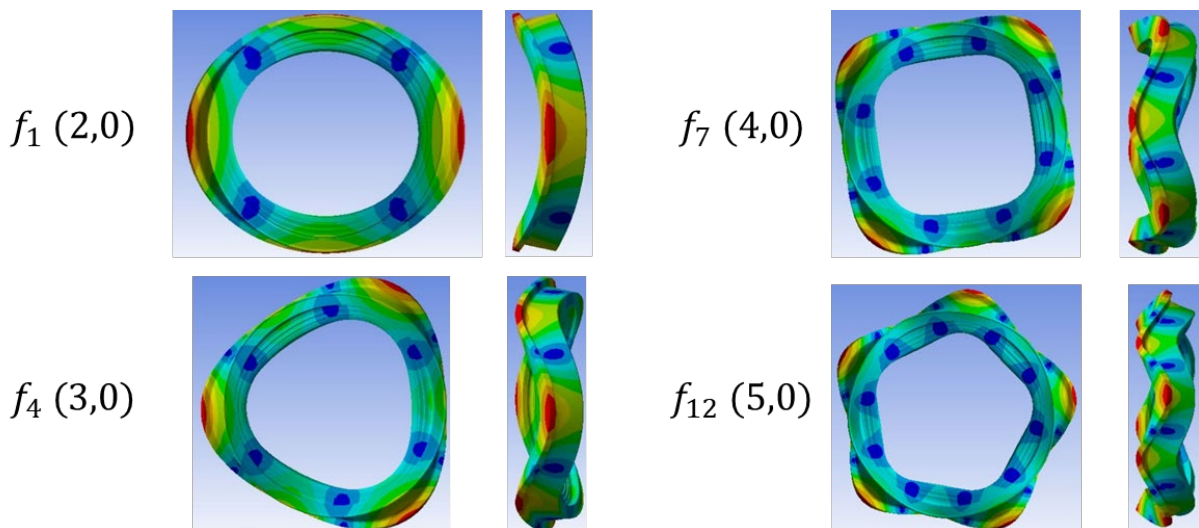


Abbildung 5 Modenformen f_1 , f_4 , f_7 und f_{12} mit hohen Abweichungen der Eigenfrequenz zweier Radreifen Typ B gehören alle zur Gruppe der Moden mit ausschließlich Knotenlinien und Maxima auf dem Spurkranz

Dies lässt die Vermutung zu, dass einer der Radreifen einen Defekt oder einen Verschleiß am Spurkranz aufweist. Eine geometrische Änderung, wie bspw. ein durch mechanischen Abrieb schmalerer Spurkranz ist denkbar.

In folgenden Untersuchungen werden die beiden Radreifen präzise geometrisch vermessen. Des Weiteren wird eine Prüfung auf äußerliche und innerliche Schäden durchgeführt. Die weiteren Parameter Amplitude und Dämpfung werden mit einbezogen.

Im Verlauf der Forschung wird ebenfalls der Einfluss der Aufnahmevorrichtung untersucht. Die experimentellen Modalanalysen wurden Frei-Frei durchgeführt. Dabei können Abweichungen in den Eigenfrequenzen festgestellt werden. In Zukunft werden weitere Modalanalysen vollzogen. Der Radreifen wird im eingespannten Zustand in der Vorrichtung untersucht und eingespannt auf der Schiene stehend. Dies wird eine Erkenntnis liefern, ob die modalen Unterschiede im eingespannten Zustand und mit Kontakt zur Schiene detektiert werden können.

Ebenfalls sind A/B Vergleiche zwischen neuen Radreifen und definiert geschädigten Radreifen geplant, um die Charakteristika von Schäden zu ergründen. Parallel wird ein digitaler Zwilling eines neuen Radreifens gebildet. Mit diesem lassen sich Schäden numerisch in der FEM-Modalanalyse simulieren und ihre Auswirkungen approximieren.

Datenverfügbarkeit

Die der Veröffentlichung zugrundeliegenden Daten können auf Anfrage herausgegeben werden.

Interessenskonflikte

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Förderung

Das Forschungsvorhaben wird durch Drittmittel des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert.

Literaturverzeichnis

1. Hertlin, Ingolf (2003): „Riss- und Gefügeprüfung mit akustischer Resonanzanalyse im Schall- und Ultraschallbereich für Kfz-Sicherheitsteile“. DGZfP-Jahrestagung 2003
URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v18/v18.htm> [23.05.2022]