

REVIEWED

Ermittlung von Inspektionsintervallen für Radsatzwellen – Ein Zielkonflikt?

Die Festlegung von zutreffenden Inspektionsintervallen für Radsatzwellen als zweite Sicherheitsebene stellt viele Betreiber/ECM, insbesondere die kleinerer Bestandsflotten, vor große Herausforderungen. LogoMotive hat zusammen mit der Süd-Thüringen-Bahn ein Verfahren entwickelt, welches den Zielkonflikt zwischen Aufwand für die Ermittlung der Instandhaltungsintervalle und Instandhaltungskosten auflöst.

1. Einführung

Im Rahmen von Zulassungsverfahren stellte das Eisenbahn-Bundesamt fest, dass der Festigkeitsnachweis für Radsatzwellen einer bestehenden Fahrzeugfamilie nicht belastbar nach dem aktuell gültigen Regelwerk vorliegt. Im Rahmen des aus dieser Feststellung resultierenden Aufsichtsverfahrens wurden Auskünfte von allen betroffenen Betreibern/ECM (für die Instandhaltung zuständige Stelle) eingeholt und schließlich neben anderen Maßnahmen verfügt, dass Grenzlaufleistung und Restlaufleistung für den Radsatz nachvollziehbar zu ermitteln sind.

Die Grenzlaufleistung ist dabei definiert als Laufleistung eines Radsatzes, innerhalb der nicht mit Ermüdungsanrissen zu rechnen ist. Sie ist das Ergebnis einer Betriebsfestigkeitsanalyse.

Als Restlaufleistung wird die Laufleistung bezeichnet, innerhalb der ein sicher erkennbarer Anriss bis zur instabilen Rissausbreitung und damit zum anschließenden Bruch der Welle wachsen kann.

Nachfolgend wird nur das Thema Restlaufleistung und die daraus abgeleiteten Inspektionsintervalle betrachtet.

Die zerstörungsfreie Prüfung von Radsatzwellen stellt eine wesentliche, sicherheitsrelevante Säule des Instandhaltungsprogramms von Schienenfahrzeugen dar. Bei der Erstellung des Instandhaltungsprogramms ist die Frage zu klären, in welchen Intervallen eine zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt werden muss, um ein Versagen der Welle (Bruch) im Betrieb auszuschließen. Um diese Frage zu beantworten, ist zu untersuchen, wie schnell sich ein Riss

in der Radsatzwelle ausbreitet, vom sicher erkennbaren Riss bis zur instabilen Rissausbreitung wächst.

2. Aufgabenstellung/Herausforderung

Die Rissausbreitung in einer Radsatzwelle ist von vielen Faktoren abhängig. Wichtige Einflussgrößen sind Werkstoffkennwerte, Fertigungsqualität, konstruktive Merkmale ebenso wie die betrieblichen Lasten auf die Welle bzw. den Radsatz.

Im Hinblick auf die betrieblichen Lasten war eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht, kostengünstig, beanspruchungsgerecht und konsistent Inspektionsintervalle für alle Fahrzeuge der betroffenen Baureihe und Betriebsbedingungen abzuleiten. Hierbei sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Die Fahrzeugbaureihe ist bei mehreren verschiedenen Betreibern, teils in unterschiedlichen Teilnetzen, im Einsatz.
- Es gibt eine Vielzahl von Bauzuständen des Fahrzeugs.
- Es werden unterschiedliche Radsatzkonstruktionen/Wellenkonstruktionen eingesetzt.
- Die Fahrzeuge sind mit unterschiedlichen Softwareständen und Systemarchitekturen der Antriebs- und Bremssteuerung ausgerüstet.

2.1. Lösungsmethode

Systemanalyse

Die Durchführung einer Systemanalyse bildet die Grundlage für alle weiteren Schritte.



Thomas Benker, Dipl.-Math. (FH)
Geschäftsführender Gesellschafter
LogoMotive GmbH, Nürnberg
Thomas.benker@logomotive.eu



Tilo Josewsky, Dipl.-Ing. (FH)
Technischer Leiter
Süd-Thüringen-Bahn GmbH
Mitglied des DGZfP Fachausschuss Eisenbahn und im VDV Ausschuss für Eisenbahnfahrzeuge
Tilo.Josewsky@sued-thueringen-bahn.de

Die Systemanalyse untersucht im Rahmen einer strukturierten Erhebung, welche Größen und welche Variationen die Rissausbreitung beeinflussen. Die Einflussanalyse dieser Größen und Variationen auf die betrieblichen Lasten ist dabei eine wesentliche Säule (siehe Bild 1).

Auf Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Materialparameter konnte verzichtet werden, da alle Radsatzwellen der Flotte aus identischem Werkstoff gefertigt sind.

Anhand der Systemanalyse wurden baureihenbezogene Merkmalsklassen festgelegt, wie z.B. Bogenradienklassen, Streckensteigungsklassen, Klassen für die Radsatzposition, Zuladungsklassen). Wichtig zu erwähnen ist, dass sich sowohl die betrachteten Merkmale wie auch die gewählten Klassen nicht allgemeingültig festlegen lassen, sondern in Abhängigkeit der Fahrzeug- und Betriebsparameter und des ge-

wählten Sicherheitskonzeptes festzulegen sind. Ebenso können zwischen manchen Merkmalen Abhängigkeiten bestehen, so dass nicht alle Kombinationen von Merkmalsklassen möglich sind.

Des Weiteren wurde festgelegt an welchem Fahrzeug, mit welcher Wellenbauform Messungen durchzuführen sind, so dass bei der weiteren Bearbeitung möglichst alle Merkmalsklassen und damit Bauzustände (angemessen, konservativ) abgedeckt werden können. Schließlich wurden anhand der im Rahmen der Systemanalyse erhobenen Daten die Prüfstrecken festgelegt, die ebenso das gesamte Einsatzspektrum der Fahrzeuge abdecken.

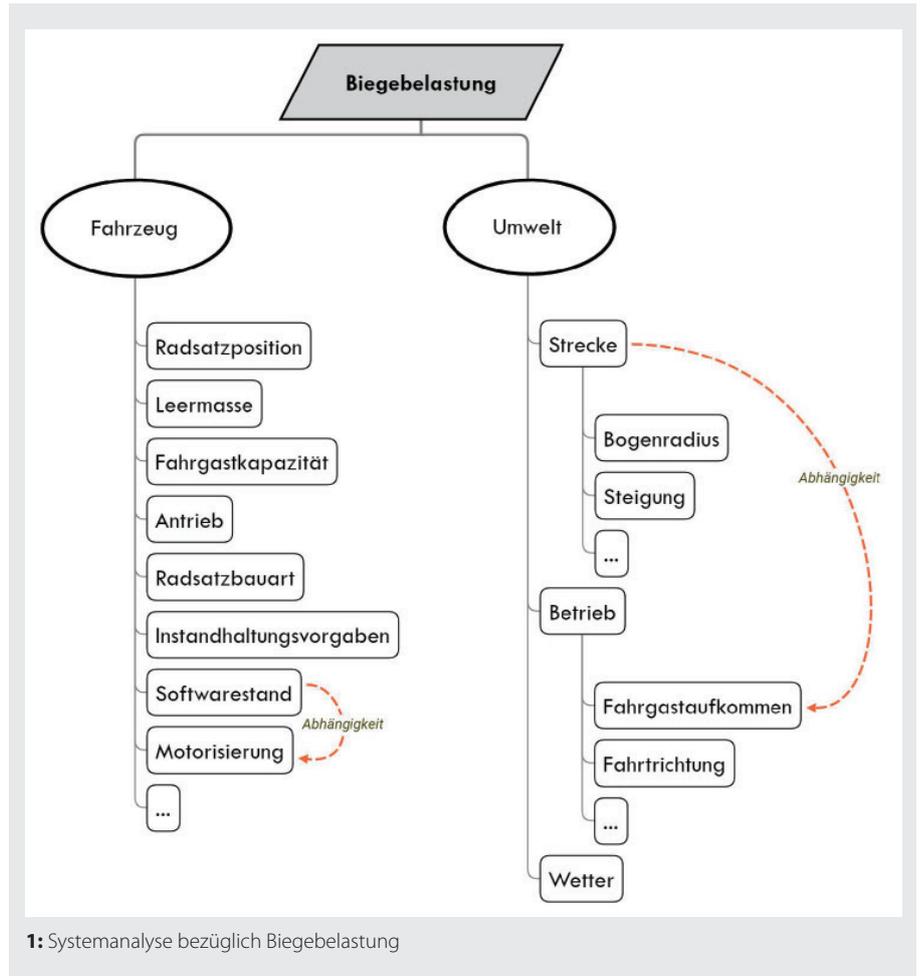
2.2. Datenerhebung

Im Anschluss an die Systemanalyse erfolgte die Datenerfassung, also die Messung. Der ausgewählte Prüfling wurde mit Messtechnik zur Erfassung der Belastungen (vgl. Bild 2), der Umweltgrößen und Randbedingungen ausgerüstet. Es wurden umfangreiche Messungen auf unterschiedlichen Strecken durchgeführt.

Bild 3 zeigt eine Übersicht der befahrenen Strecken, die unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Systemanalyse festgelegt wurden und entsprechende Bogenradien und Steigungen aufweisen.

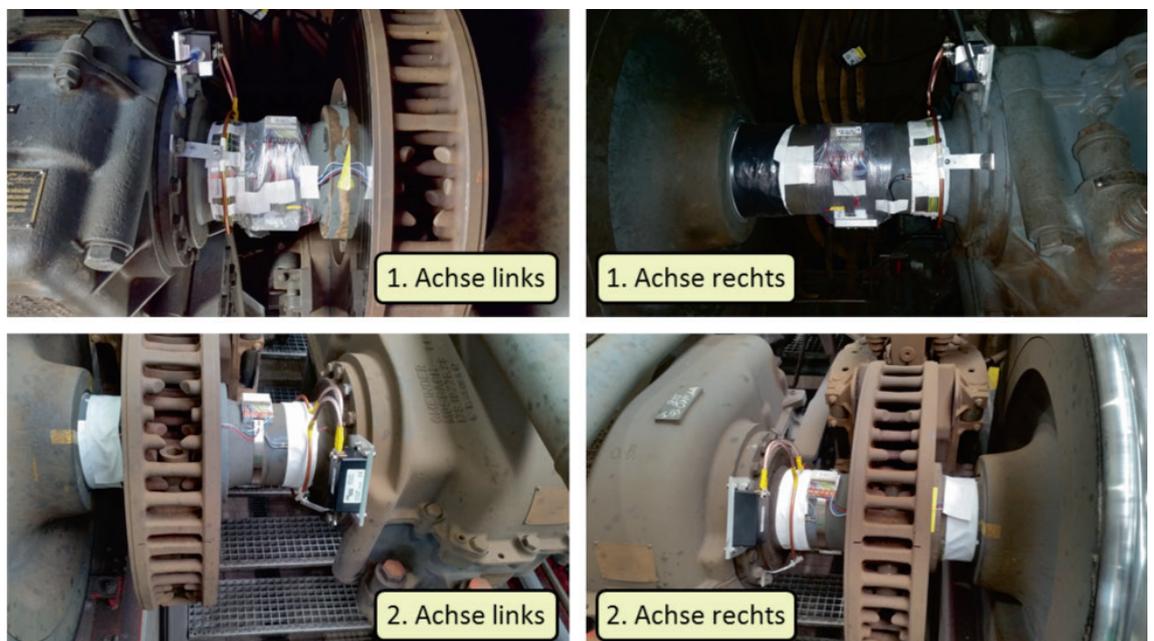
2.3. Datenanalyse

Die durchgeführte Datenanalyse bildet einen weiteren wichtigen Grundstein für die



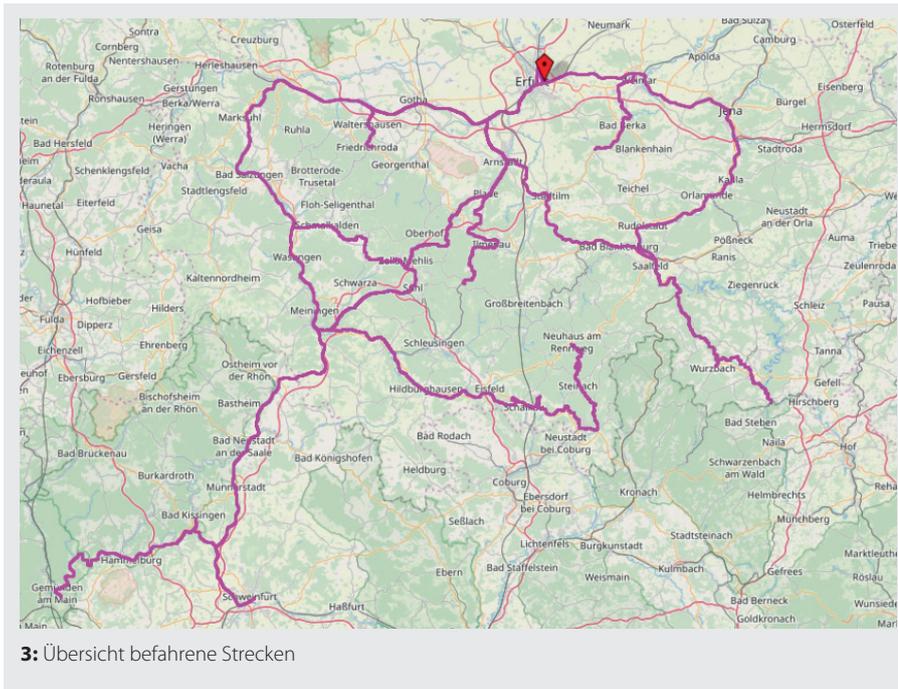
nachfolgenden Arbeiten. Zunächst werden die Messdaten für die Verarbeitung aufbereitet, indem sie entsprechend gefiltert werden,

eine Entstörung vorgenommen wird und eine Umrechnung auf die gewünschte Belastungsgröße erfolgt. Anschließend



2: Messradsätze zur Erfassung der Radsatzbelastungen

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für LogoMotive GmbH /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH



3: Übersicht befahrene Strecken

werden die Messdaten „zerschnitten“ und den im Rahmen der Systemanalyse definierten Merkmalsklassen zugeordnet. Die Daten jeder einzelnen Merkmalsklasse werden dann einer Rainflow-Zählung unterzogen und zusammengefasst, so dass man für jede Merkmalsklasse Teillastkollektive erhält, die für die weitere Verarbeitung grundlegend sind.

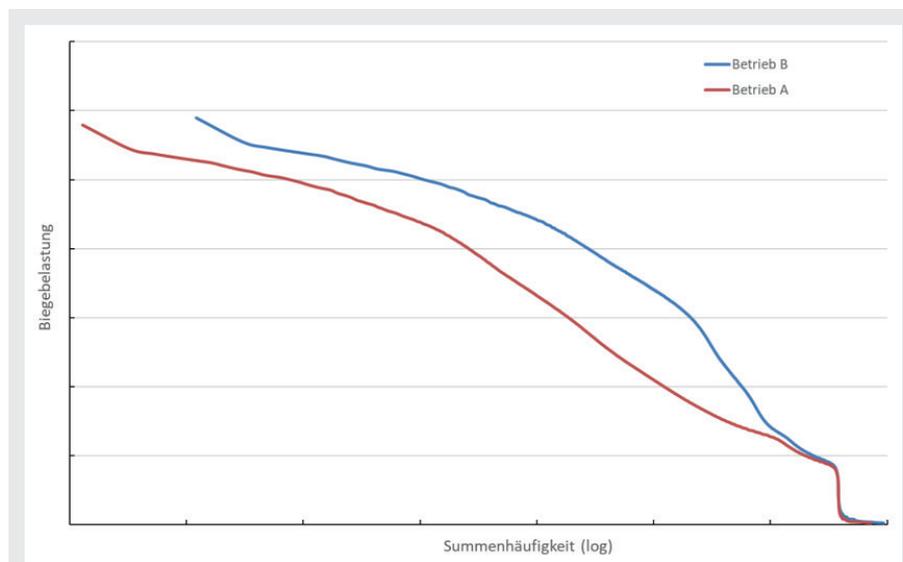
2.4. Synthese

Zum Erreichen der Projektziele ist es erforderlich, einsatzspezifisch die in der Da-

tenanalyse gewonnenen Teillastkollektive zu Bewertungskollektiven zusammenzustellen. Dies erfolgt auf Basis der für jeden Betrieb im Rahmen der Systemanalyse erfassten Daten durch Linearkombination der Teillastkollektive.

Bild 4 zeigt vergleichend zwei Bewertungskollektive für Betriebe mit stark unterschiedlichen Streckenparametern.

Das unterschiedliche Belastungsniveau der beiden Betriebe ist deutlich zu erkennen. Betrieb A zeichnet sich dadurch aus, dass vorwiegend gerade Streckenabschnitte befahren werden und es nur in wenigen



4: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Bewertungskollektive

Betriebsituationen zu einer Umverlagerung der Abstützkräfte kommt, während dem Betrieb B ein hoher Anteil von befahrenen engen Bögen zugrunde liegt, in denen eine Fahrzeugseite aufgrund der Wankkräfte (Umverlagerung) stärker belastet wird. Hinzu kommen sog. Spreizkräfte aus dem positiven Anlaufwinkel des Radsatzes.

2.5. Verifikation

Um die Qualität des Verfahrens und der entwickelten Software sicherzustellen, wurden unterschiedliche Verifikationsschritte durchgeführt. Ein wesentlicher Verifikationsschritt ist die Synthese tatsächlich gemessener Linien/Strecken aus allen gemessenen Teillastkollektiven. Bild 5 zeigt den Vergleich des so gewonnenen Biegelastkollektives mit den beiden aus den um 90° versetzten Biegemessbrücken erfassten Kollektiven.

Die beiden Biegelastkollektive aus den um 90° versetzten angeordneten Messbrücken zeigen sehr gute Übereinstimmung, was für eine hohe Güte der Messung spricht. Vergleicht man das synthetisierte Biegelastkollektiv mit den gemessenen Biegelastkollektiven, so ist auch hier eine überaus gute Übereinstimmung festzustellen. Kleine Abweichungen gibt es im Bereich geringer Lastspielzahlen. Hier liegt das synthetisierte Biegelastkollektiv geringfügig über den tatsächlich gemessenen Biegelastkollektiven und enthält auch höhere Amplituden bei geringen Lastwechselzahlen. Dies war aufgrund des größeren Stichprobenumfangs bei der gesamten Messung und der Linearkombination dieser „Messwerte“ zu erwarten. Sowohl die Vorgehensweise wie auch die dazu implementierte Software sind somit verifiziert.

2.6. Bewertung

Um eine abschließende Bewertung im Sinne der Ermittlung von Restlaufleistungen durchführen zu können, sind Finite-Element-Berechnungen erforderlich, aus denen die Spannungsverläufe in der Welle aus der Biegebeanspruchung und der Beanspruchung aus den Presssitz gewonnen werden.

Mit Hilfe von Rissfortschrittsberechnungen werden unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse und den ermittelten einsatzspezifischen Kollektiven die Restlaufleistungen ermittelt, die dann wiederum die Grundlage für die Festlegung von Inspektionsintervallen bilden.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für LogoMotive GmbH /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

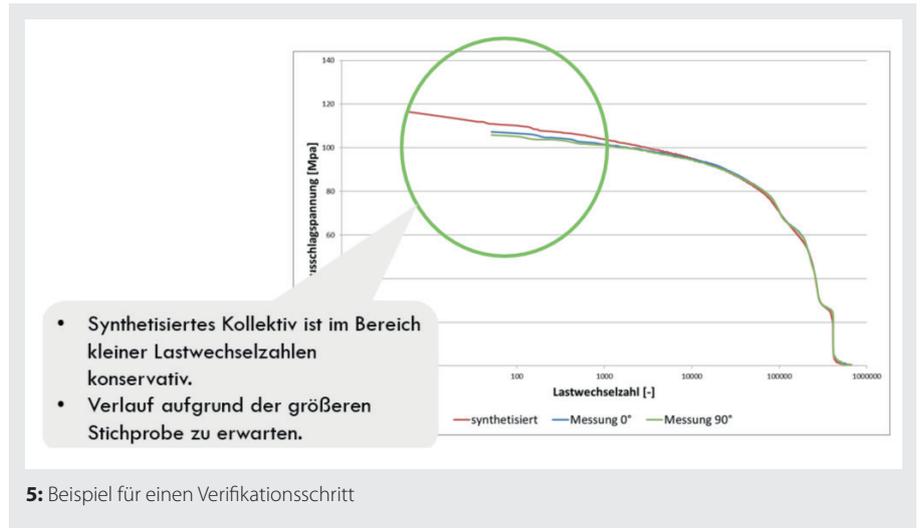
Die Ermittlung der Restlaufleistungen erfolgte mit dem Programm NASGRO unter Anwendung konservativer bruchmechanischer Kennwerte für den Werkstoff EA4T. Hierbei werden Risserschließeffekte und Reihenfolgeeffekte nicht berücksichtigt.

3. Ergebnisse

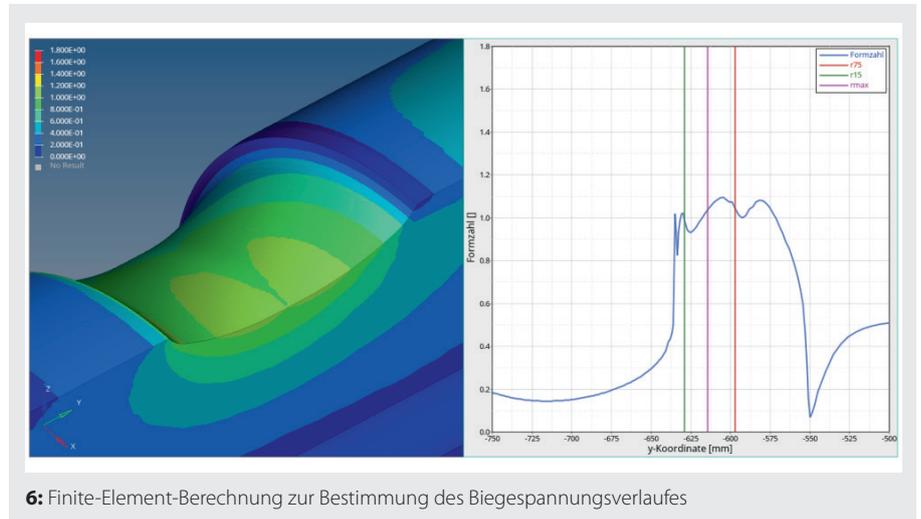
Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Grafik (Bild 7, links) für 21 Einsatzfälle dargestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse für den führenden und für den nachlaufenden Radsatz des Fahrwerks unterschieden. In der Grafik (Bild 7, rechts) sind nur die Fälle dargestellt, bei denen eine häufig eingesetzte Wellenbauform verwendet wird.

Der überaus große Einfluss der Randbedingungen, wie Streckenführung, Radsatzkonstruktion und Radsatzlast wird in der linken Grafik sehr deutlich. Die rechte Grafik zeigt, wie groß die Einflüsse aus Streckenführung und Radsatzlast sind, wobei hier nur ein Radsatztyp dargestellt ist. Allein aus den Betriebsbedingungen ergibt sich eine zehnfache Restlaufleistung für den günstigsten Fall im Vergleich zum ungünstigsten Fall. (Hinweis: Die großen Werte sind in der Grafik abgeschnitten, da der derzeitige Diskussionsstand im entsprechend durch den LK Fahrzeuge beauftragten Arbeitskreis davon ausgeht, dass ein Maximalwert von ca. 400 Tkm für das Inspektionsintervall – entspricht einer Restlaufleistung von ca. 1.2 Mio. km bei üblichem Abschlagsfaktor 3 – zu wählen ist.)

Wie oben dargestellt konnten mit dem entwickelten Verfahren für eine große Anzahl von Anwendungsfällen Restlauf-



5: Beispiel für einen Verifikationsschritt



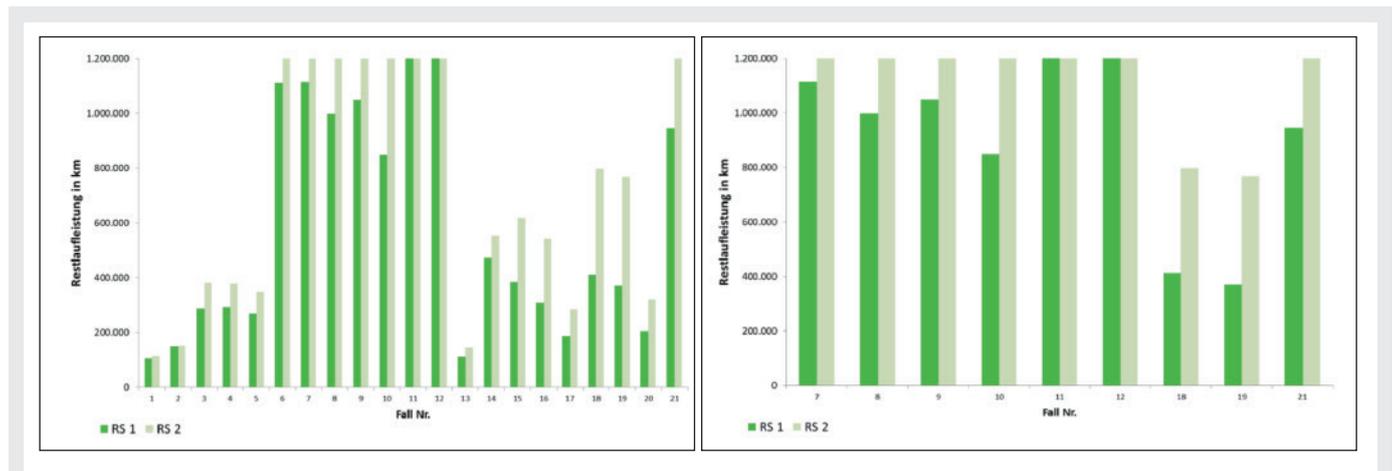
6: Finite-Element-Berechnung zur Bestimmung des Biegespannungsverlaufes

leistungen bestimmt werden, wobei der messtechnische Aufwand nur unwesentlich höher war als der Aufwand, der für einen der Betreiber, ohne Anwendung des

Verfahrens, erforderlich gewesen wäre. Die Kosten für jeden einzelnen Anwendungsfall waren damit auf einem vertretbaren Niveau.

Homepageöffentlichung unbefristet genehmigt für LogoMotive GmbH /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Die Schiene ist das Rückgrat der Mobilität von morgen. Profitieren Sie von unseren 30 Jahren Erfahrung und bringen wir gemeinsam die Züge ins Rollen.
cideon engineering - die Möglichmacher.



7: Ergebnisse der Berechnung für die Restlaufleistung (links: alle Fälle, rechts: Fälle mit häufig verbauter Radsatzwelle)

4. Umsetzung und Optionen/Optimierungsmöglichkeiten beim Betreiber

Die Ergebnisse wurden für unterschiedliche Einsatzfälle, Fahrzeuge, Radsatzpositionen getrennt berechnet, so dass der Betreiber/ die ECM die Möglichkeit hat, die Instandhaltung entsprechend zu differenzieren oder zusammenzufassen. Im Rahmen der Einsatzplanung können auch Maßnahmen getroffen werden, um den Gesamtaufwand der Rissfreiheitsprüfung zu optimieren. Die erarbeitete Methode ist geeignet alle betrieblichen und instandhaltungstechnischen Varianten zu untersuchen und kann damit wichtige Informationen als Entscheidungsgrundlage für Optimierungen bereitstellen.

5. Zusammenfassung

Im hier beschriebenen Projekt wurde ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, kostenoptimiert, beanspruchungsgerecht und konsistent Inspektionsintervalle für eine weit verbreitete Fahrzeugbaureihe abzuleiten, da das Vorgehen alle relevanten Einflüsse berücksichtigt und die messtechnischen Untersuchungen auf das Notwendige begrenzt. Damit ist eine Methode verfügbar, die es ermöglicht, kostengünstig belastbare Inspektionsintervalle für die Rissfreiheitsprüfung an Radsatzwellen, insbesondere für verbreitet eingesetzte Baureihen, abzuleiten.

Die Ergebnisse der konkreten Anwendung an einer Baureihe stellen zudem eine sichere Entscheidungsgrundlage für die Festlegung des Instandhaltungspro-

gramms durch die verantwortlichen Betreiber/ECM dar.

Es konnten für alle Betreiber zu vertretbaren Kosten technisch nachvollziehbare Restlaufleistungen bestimmt werden, die zum einen noch auf der konservativen Seite liegen und zum anderen vertretbare Instandhaltungsintervalle ermöglichen. Aus Sicht der Autoren ist somit der Zielkonflikt zwischen Aufwand für die Ermittlung der Instandhaltungsintervalle einerseits und Instandhaltungskosten/Inspektionskosten andererseits deutlich entschärft worden.

6. Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Berechnungen mit dem Programm NASGRO unter Anwendung der Werkstoffkennwerte, die im Rahmen der Untersuchungen zum ICE 3 bestimmt wurden.

Sie beinhalten damit nicht die aktuell auf Grund der Ergebnisse des Forschungsvorhabens EBFW3 [1] diskutierten Effekte aus Kurzrisswachstum und Reihenfolge. Erste Untersuchungen, die diese Effekte berücksichtigen, zeigen in Summe Restlebensdauer verlängernde Einflüsse.

Die entwickelte Methode ist grundsätzlich geeignet, auch diese Effekte zu berücksichtigen und kann somit auch bei Anwendung der neuesten Erkenntnisse den oben beschriebenen Zielkonflikt lösen.

Literatur

[1] H.-P. Gänser, K. Kunter, F.-J. Weber: Eisenbahnfahrwerke-3 – Final Report, Revision 1 vom 30.07.2021

Summary

Determination for the inspection of wheelset shafts – a conflict of objects?

Fixing appropriate inspection intervals of wheelset shafts as a second safety level is a major challenge for operators/ECMs, especially those of smaller existing fleets. LogoMotive, together with the Süd-Thüringen-Bahn, has developed a procedure that dissolves the conflict of objects between the effort required to determine inspection intervals and maintenance costs.