

# Digitales Radsatzmanagement: Die Digitalisierung macht den Radsatzverschleiß berechenbar

Damit Schienenfahrzeuge und Bahnanlagen jederzeit zuverlässig und sicher für den Betrieb verfügbar sind, müssen die richtigen Instandhaltungsmaßnahmen zum optimalen Zeitpunkt durchgeführt werden.

Die Ursachen für den Radsatzverschleiß liegen vor allem im Wirken von verschiedenen Kräften während des Rad-Schiene-Kontakts.

## Motivation

Die Fortschritte bei der Digitalisierung in der Bahnindustrie schaffen zahlreiche neue Möglichkeiten der Überwachung von Fahrzeugen, Anlagen und Bauteilen. Mit der Integration wirtschaftlich und technisch sinnvoller Diagnosefunktionen in die Anlagen und Prozesse werden heutzutage in vielen Bereichen aussagekräftige Ergebnisse erzielt. Dank einer immer besser ausgebauten IT-Infrastruktur und preiswerterer Sensortechnik können die Instandhalter auf riesige Mengen operationeller Daten zurückgreifen und diese für die Entscheidungsfindung nutzen.

Manuell bzw. mit IT-Insellösungen sind belastbare und fundierte Prognosen und Analysen schwer bzw. kaum zu realisieren. Dafür sind die erfassten und für eine aussagekräftige Prognose notwendigen Daten meist zu umfangreich. Bei der Auswertung der Vielzahl von Daten sowie bei der Integration der Analyseergebnisse in den komplexen Prozess des Instandhaltungsmanagements, kann ein digitales Asset Management System wie zedas®asset unterstützen. In ihm werden alle relevan-

ten Instandhaltungsvorgänge, wie korrektive und präventive Maßnahmen erfasst, dazu die Mess- und Betriebsdaten über Schnittstellen in das System geladen und anschließend fahrzeug- bzw. komponentenbezogen abgelegt. Mobile Apps, die eine on- und offline-Funktion bieten, ermöglichen die durchgängig digitale Erfassung sowohl für die Werkstattmitarbeiter als auch für mobile Service-Teams.

Bei der Analyse und Integration der Daten geht es speziell um:

- die automatisierte Bewertung und das Generieren aussagekräftiger Merkmale zu Zustand und Verschleiß,
- die Gewinnung von Merkmalen zur Fehlerdetektion und Zustandsprognose,
- die Optimierung der Instandhaltungsplanung auf Basis der gewonnenen Informationen über den Zustand der Fahrzeuge, Anlagen und Bauteile.

Gleiches gilt auch für die Prozesse der Instandsetzung und Instandhaltung von Radsätzen. Das regelmäßige automatisierte oder teilautomatisierte Vermessen und Begutachten der Radsätze bildet die Grundlage für neue Ansätze in der Datenauswertung mit dem Ziel, Instandhaltungsprozesse zu optimieren.

An diesem Punkt setzt die ZEDAS GmbH mit dem neuen Modul Wheelset Analyser zur Visualisierung und Prognose von Radsatzdaten an. Auf der Basis neuer innovativer Ansätze soll eine punktgenauere Planung der Radsatzaufarbeitung bzw. des Radsatzwechsels erreicht werden.

Das integrierte Dashboard für die Radsatzüberwachung bietet Funktionalitäten zur



**Dr.-Ing. Peter Engel**

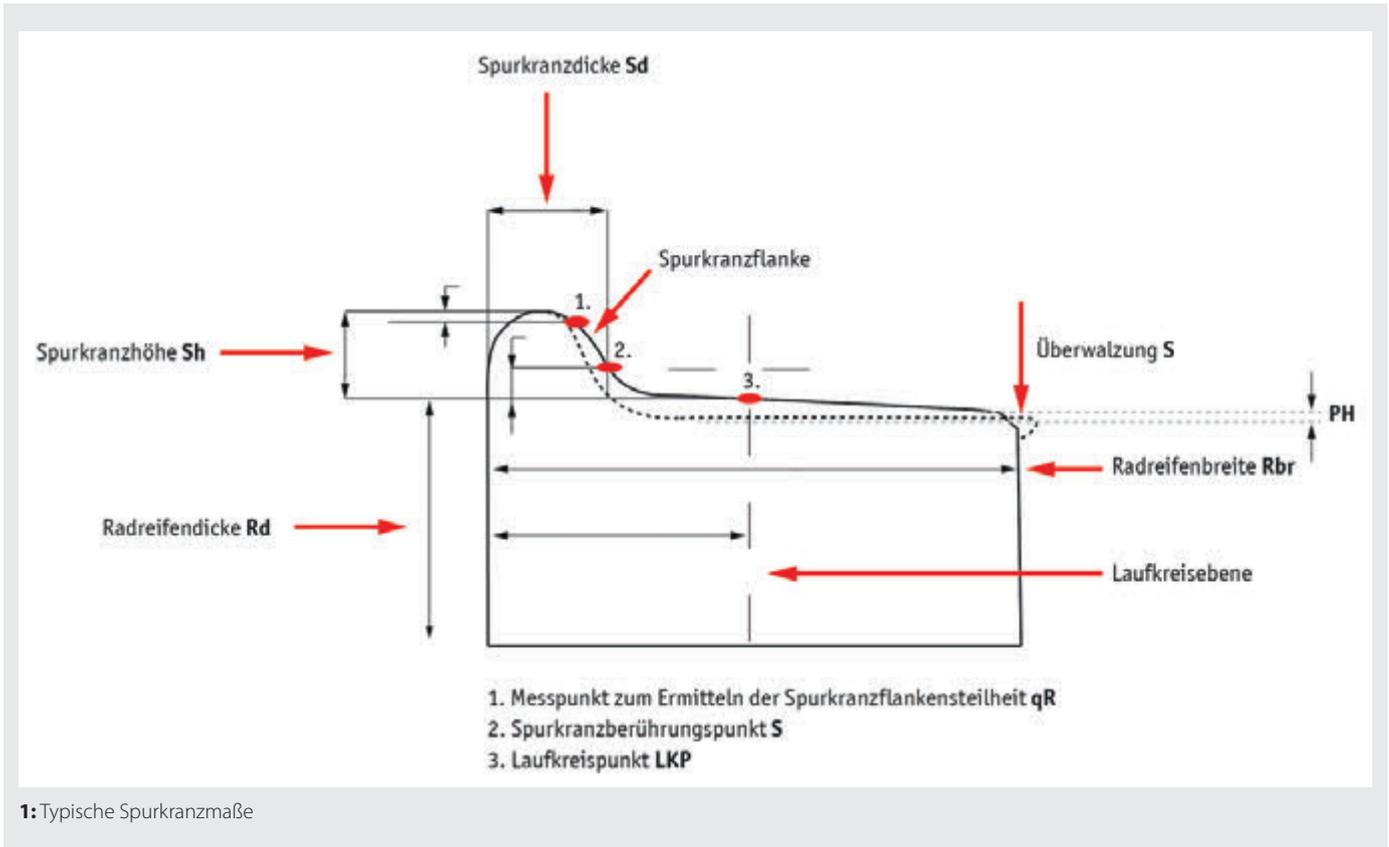
Konzeption und Entwicklung  
zedas®asset  
ZEDAS GmbH, Senftenberg  
pengel@zedas.com

- Visualisierung des Verschleißverlaufes an unterschiedlichen Messpunkten des Rades oder der Achse,
- Prognose des Zeitpunktes der Grenzmaßüber- oder -unterschreitung für den Laufkreisdurchmesser sowie weiterer Messgrößen,
- Ermittlung der Restnutzungsdauer und Restlaufleistung,
- automatisierten Übergabe der berechneten Daten an die Instandhaltungsplanung.

## Prozess

Die Ursachen für den Radsatzverschleiß liegen vor allem in dem Wirken von verschiedenen Kräften während des Rad-Schiene-Kontakts. In deren Folge treten nach einer bestimmten Belastungsdauer Schädstellen an den Rädern, speziell den Radreifen und Achsen auf. Einige typische Schadensbilder sind [1]:

- Flachstellen – lokaler Materialabtrag durch Verschleiß beim nicht rotierenden Rad, z.B. durch das Blockieren der Räder beim Bremsen,



1: Typische Spurkranzmaße

- Rissbildung,
- Ausbröckelung – Herauslösen von Materialstücken aus der Lauffläche,
- Polygonisierung – Unrundwerden der Räder,
- Überwälzungen – Materialversatz durch hohe mechanische Beanspruchung.

Stärke und Häufigkeit der Schädigungen am Rad hängen von mehreren Einflussfaktoren ab, wie z.B. von dem eingesetzten Radprofil, den Geschwindigkeiten während der Nutzung, den transportierten Lasten, den Außentemperaturen, den Schienenprofilen der überfahrenen Gleise und Weichen.

Des Weiteren führen infolge des intensiven Rad-Schiene-Kontaktes auch Gleislagefehler, Fehler in der Spurweite, der Richtung, der Längshöhe (z.B. Riffel) oder auch Querrhöhe zu erhöhtem Verschleiß und Schädigungen am Rad.

**Radsatzinstandhaltung – aktuelle Situation**

Für die Bewertung des Zustandes der Radsätze werden in der Regel festgelegte Parameter des Rades gemessen, wie sie beispielhaft in Bild 1 aufgeführt wurden.

Die Messungen erfolgen entweder zeitzyklisch oder laufleistungsabhängig. Die Ergebnisse werden anschließend mittels automatisierter Schnittstelle an das Instandhaltungsplanungssystem zedas®asset übergeben und komponentenbezogen abgelegt. Zusätzlich führt man Sichtbeurteilung des Zustandes z.B. hinsichtlich aufgetretener Risse, Ausbrüche oder Flachstellen durch, das aber in der Regel bei größeren Inspektionen, da diese mit größerem Zeitaufwand verbunden sind.

Die Einbauhistorien der Radsätze können sich stark unterscheiden, z.B. weil bestimmte Achsen aufgrund von Defekten vorzeitig getauscht werden mussten. Das hat zur Folge, dass jeder Radsatz separat bezüglich seiner zurückgelegten Laufleistung, der erfahrenen Schädigungen und der Messwertentwicklung zu überwachen ist.

Die Verwaltung der Radsatzdaten ist aufgrund der Menge der Daten und der besonderen Anforderungen ohne spezielle Softwareunterstützung recht aufwendig. Viele für die Planung verantwortliche Ingenieure führen Excel-Listen, in denen einerseits die Messwerte aufgelistet, andererseits die Fälligkeiten der Radrevisionen berechnet werden.

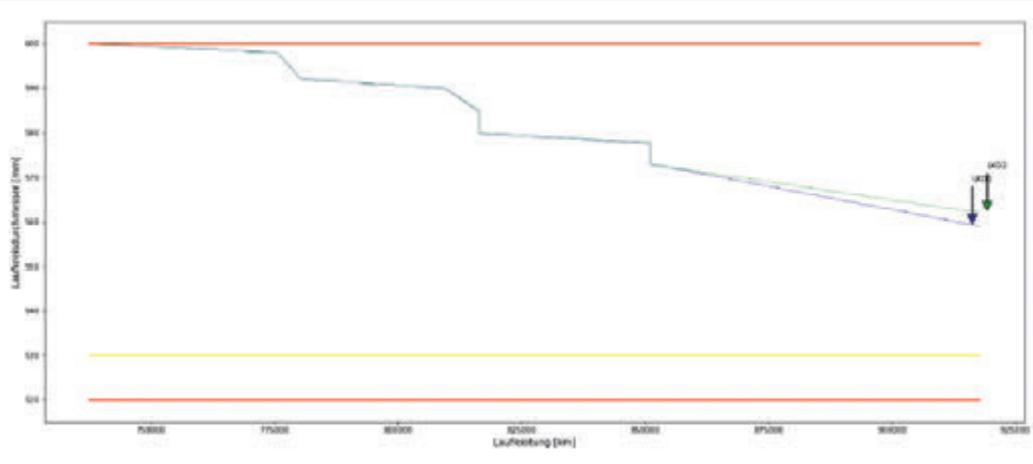
Bei der Bestimmung der Restnutzungsdauer (Restfahrleistung) sowie bei der Planung der Reprofilierungsmaßnahmen mithilfe der Excel-Listen werden eine Reihe von Parametern fest vorgegeben, bzw. auf der Basis von Erfahrungen angenommen, wie z.B.

- die Fahrleistung pro Monat in km,
- der Durchschnittverschleiß pro Monat,
- die Laufleistung bis zur nächsten Reprofilierungsmaßnahme,
- der Abtrag bei der nächsten Reprofilierungsmaßnahme.

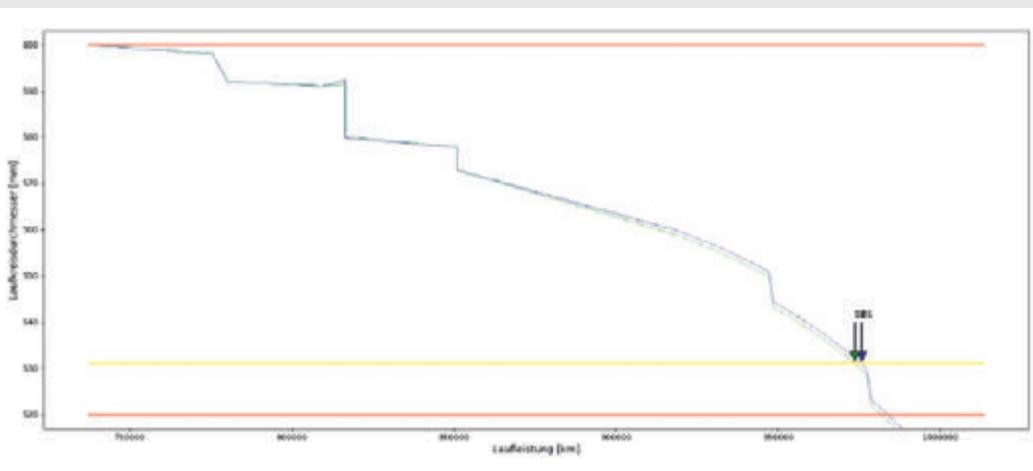
Mithilfe dieser Informationen, der vorgegebenen Grenzwerte, des zuletzt gemessenen Laufkreisdurchmessers und unter der Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Laufleistung und Verringerung des Raddurchmessers erfolgt die Berechnung der kleinsten Laufleistungsreserve über alle Radsätze des Fahrzeuges.

Diese Herangehensweise hat diverse Nachteile. Zunächst einmal ist das Verschleißverhalten nicht linear, sondern verläuft in den meisten Fällen exponentiell zuzüglich der Abträge durch Maßnahmen zur Überarbeitung der Radprofile (Reprofilierungen). Die Faktoren, welche die Stärke

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ZEDAS GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group, 2019



**2:** Typischer Messdatenverlauf für den Laufkreisdurchmesser der beiden Räder eines Radsatzes mit Warnschwelle und Grenzwert inkl. der typischen Reprofilierungssprünge



**3:** Anzeige und Prognose (gepunktete Abschnitte) des Laufkreisdurchmessers linkes und rechtes Rad eines Radsatzes inkl. Reprofilierungsmaßnahmen

des Verschleißes bestimmen, wie z.B. Fahrleistung, Witterung, Streckenprofil, Last können sich spontan oder auch zyklisch ändern (bspw. Fahrplan, Jahreszeit). Die Stärke des Abtrags bei der Reprofilierung hängt ebenfalls von einer Vielzahl von Verschleißparametern ab und kann folglich stark variieren. Diese Einflüsse werden in den Excel-Berechnungen selten berücksichtigt.

Mit einem verbesserten Ansatz soll der prognostizierte Verschleißverlauf an das tatsächliche Verschleißverhalten maximal angenähert werden. Ziel ist es, den Verschleiß auf Basis historischer Messdaten, berechenbar zu machen.

### Prognoseansatz

Zunächst musste ein geeignetes nichtlineares Regressionsmodell gefunden werden, welches den Zusammenhang zwischen Verringerung des Raddurchmessers auf der Basis von Verschleiß und der erfahrenen

Laufleistung beschreibt unter Beachtung des Umstandes, dass die Radsatzmessungen nur eine verhältnismäßig kleine Stichprobenmenge darstellt. Bei einer größeren Anzahl von Radsatzmessungen können auch andere Ansätze zur Anwendung kommen.

Das integrierte Regressionsmodell basiert auf der Funktion:

$$d(s) = d_0 + \alpha e^{\beta s}$$

mit  $d(s)$  als ermittelter Raddurchmesser,  $d_0$  dem Ausgangsdurchmesser zum Zeitpunkt des Einbaus,  $s$  dem zurückgelegten Weg sowie  $\alpha, \beta$  als Parameter der Funktion. Diese Funktion erklärt das Verhalten in vielen Details. Ist beispielsweise der Ausgangsraddurchmesser nach der Aufarbeitung etwas geringer, so hat das ein Verschieben der gesamten Verschleißfunktion nach links und somit ein wesentlich früheres Erreichen der Eingriffsschwelle für Instandhaltungsmaßnahmen zur Folge.

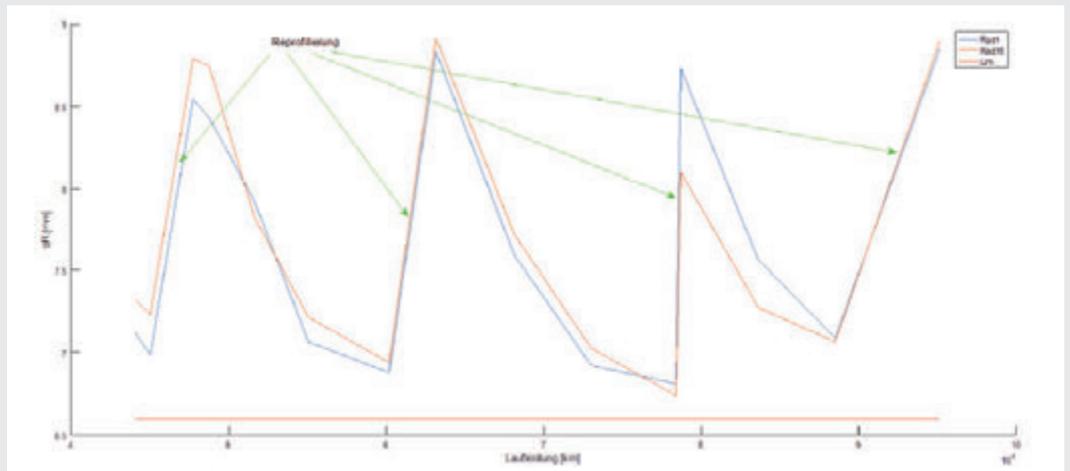
Wie stark die Funktion mit zunehmender Wegstrecke abfällt, wird von den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  bestimmt.

Durch das Entfernen der durch Reprofilierungsmaßnahmen verursachten Anteile an der Verringerung des Laufkreisdurchmessers aus den Messdaten erhält man die Verschleißkurve für den Laufkreisdurchmesser.

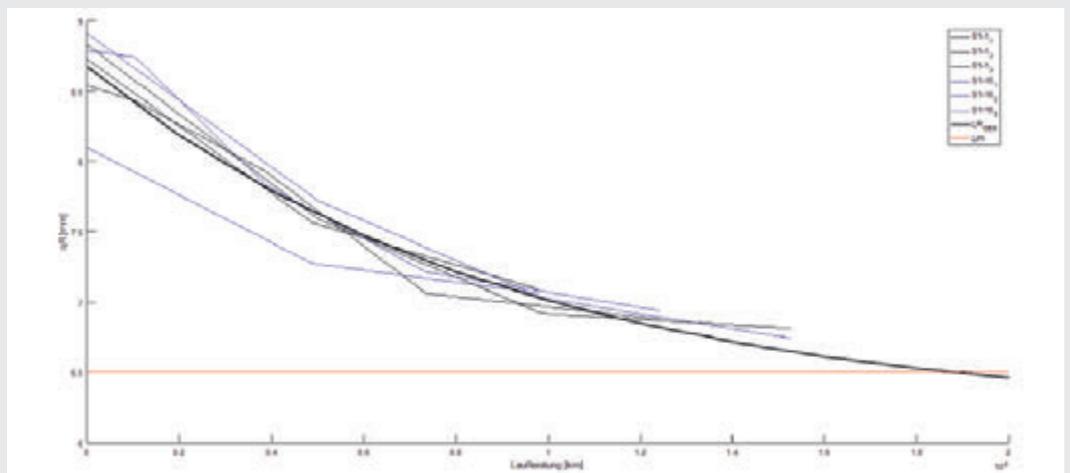
Mit der Gauss-Newton-Approximationsmethode sollen anschließend die Parameter  $\alpha, \beta$  auf der Basis der historischen Messungen optimal an das reale Verschleißverhalten angepasst werden. Diese Methode ist geeignet, um „nichtlineare kleinste Quadrate Probleme“ zu lösen und unsere gesuchten Parameter passend zu schätzen. Für die Anwendung der Methode benötigt man die partiellen Ableitungen der Funktion nach den zu schätzenden Parametern und auf deren Basis die aufgestellte Jacobi-Matrix  $\nabla f(s)^T$  [2].

Hat man die gesuchten Parameter ermittelt, ist mit dem oben aufgeführten Re-

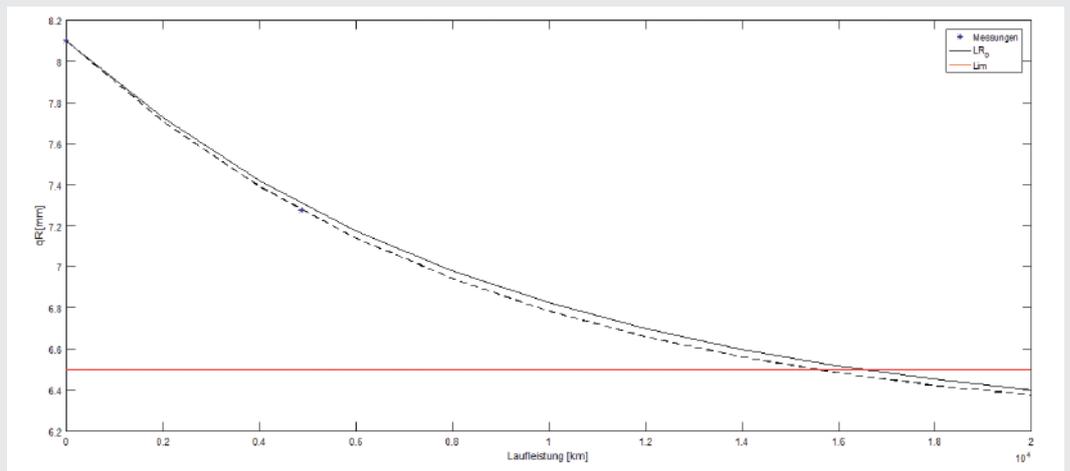
**4:** Typische qR-Maß Historie inkl. Reprofilierungen von zwei Rädern einer Straßenbahn



**5:** Angelernte qR-Verschleißkurve (schwarz) aus der in Abbildung 4 abgebildeten Historie



**6:** Prognose der nächsten Reprofilierung mit dem Ausgangswert direkt nach der Reprofilierung (durchgehende Linie) und Feinkorrektur der Prognose nach der ersten Messung (gestrichelte Linie)



gressionsmodell der weitere Verschleißverlauf zu berechnen.

Nach jeder neu durchgeführten Vermessung des Radsatzes besteht die Möglichkeit, die Berechnung mit den neuen Werten zu aktualisieren und die Prognosewerte feinzustimmen.

Anschließend sind die aus der Historie angelernten Werte für den durchschnittlichen Abtrag bei einer Reprofilierung bzw. die durchschnittliche Laufleistung zwischen den Reprofilierungsmaßnahmen in die Messkurve zu integrieren.

Im Zusammenspiel mit den Grenz- und Warnwerten erhält man die gewünschte Information zur Laufleistungsreserve (siehe Bild 3).

Wie man den Messverläufen zum Laufkreisdurchmesser entnehmen kann, hat die Häufigkeit und Intensität der durch-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ZEDAS GmbH /  
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten  
genehmigt von DW Media Group, 2019

geführten Reprofilierungen einen großen Einfluss auf die Laufleistungsreserve eines Radsatzes. Hier bietet sich ein zusätzlicher Ansatz zur weiteren Erhöhung der Prognosegenauigkeit. Wenn man das Verhalten der Parameter, welche häufige Auslöser für die Reprofilierung sind, z.B. Spurkranzdicke, Spurkranzhöhe oder Spurkranzflankensteilheit, ebenfalls anlernt und in die Prognose einbezieht, erzielt man auch Vorhersageergebnisse bezüglich der Zeitpunkte der Reprofilierungen sowie der Abtragsstärke, die notwendig sind, um zum Zeitpunkt der Reprofilierung ein vorgegebenes Spurkranzprofil herzustellen. Die Bilder 4 bis 6 zeigen den Messdatenverlauf, die angelernte Verschleißkurve sowie auf deren Basis die Vorhersage der Laufleistung bis zum Erreichen des nächsten Grenzmaßes für die Spurkranzflankensteilheit (qR).

Analog zu dem Beispiel der Spurflankensteilheit ist die Analyse aus der Datenhistorie und Prognose weiterer Parameter des Spurkranzes möglich, wenn diese die Reprofilierungszeitpunkte beeinflussen. Vorher fest angenommene Werte für den Reprofilierungszeitpunkt und für die Verringerung des Laufkreisdurchmessers wer-

den nun aus der Historie gelernt und durch prognostizierte Werte ersetzt.

### Anwendung und Ergebnisse

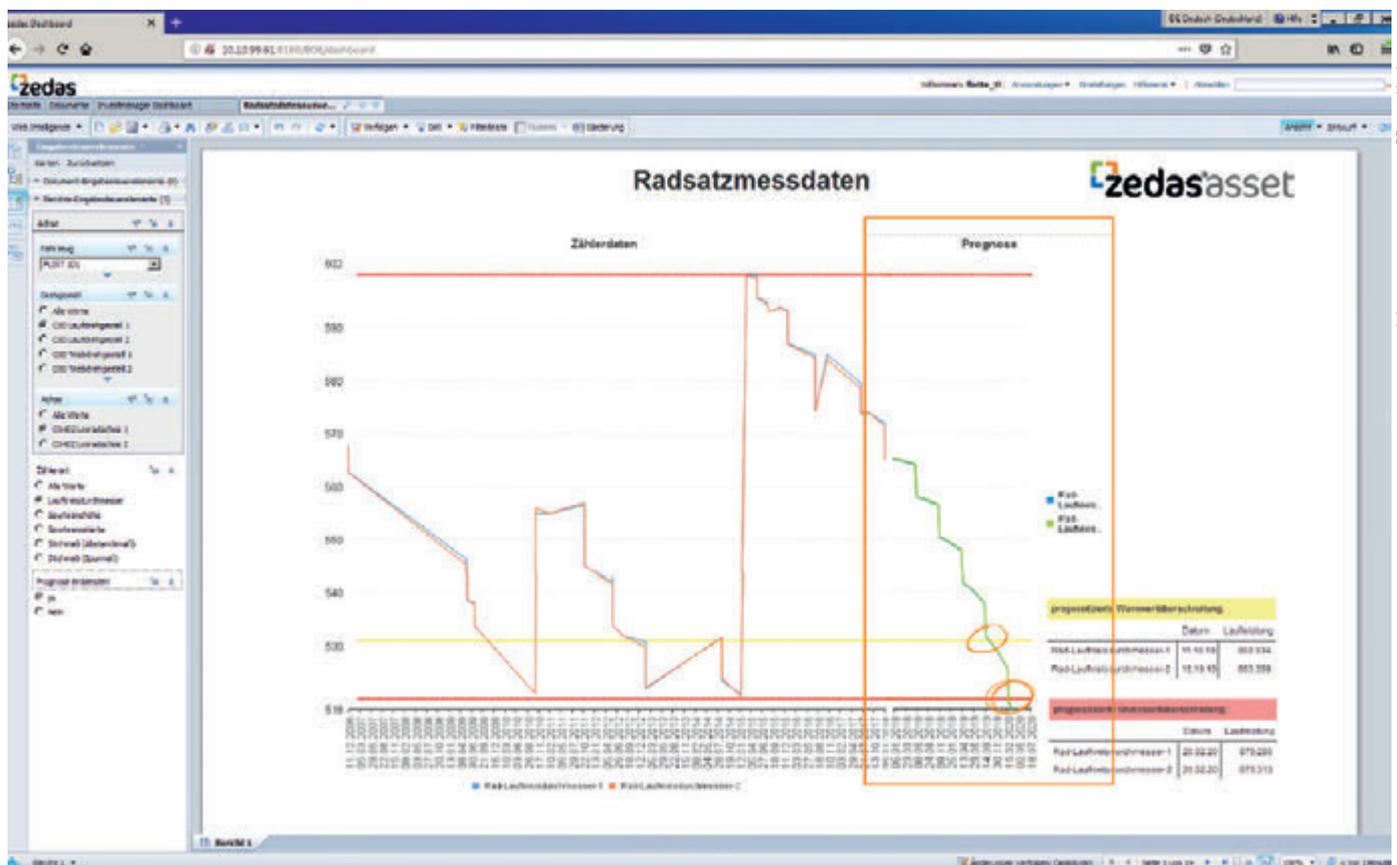
Das neue zedas®asset Modul zur Radsatzdiagnose hilft dem Instandhaltungskordinator, die richtigen Investitions/Reinvestitionsentscheidungen auf der Basis der Parameter aller Radsätze des Fahrzeugs zu treffen. Im integrierten Dashboard kann der Anwender über variable Filter den relevanten Radsatz wählen, um sich graphisch den Verlauf der unterschiedlichen Spurkranzmessdaten, bezogen auf Laufleistung oder Zeit, anzeigen zu lassen.

Mit der Anwahl der Prognosefunktion zeigt der grüne Graph (siehe Bild 7) den vorausberechneten Verlauf des Radsatzverschleißes, den Kilometerstand und das Datum des zu erwartenden Unterschreitens der Warnschwelle sowie des Grenzwertes. Die Aktualisierung der Prognosewerte erfolgt zeitzyklisch und wird für die Berechnung der Fälligkeiten ereignisbedingter Fristen genutzt. Die Planung der Instandhaltungsmaßnahmen und Komponentenwechsel erfolgt nun auf der Basis der aktuellen Prognosewerte.

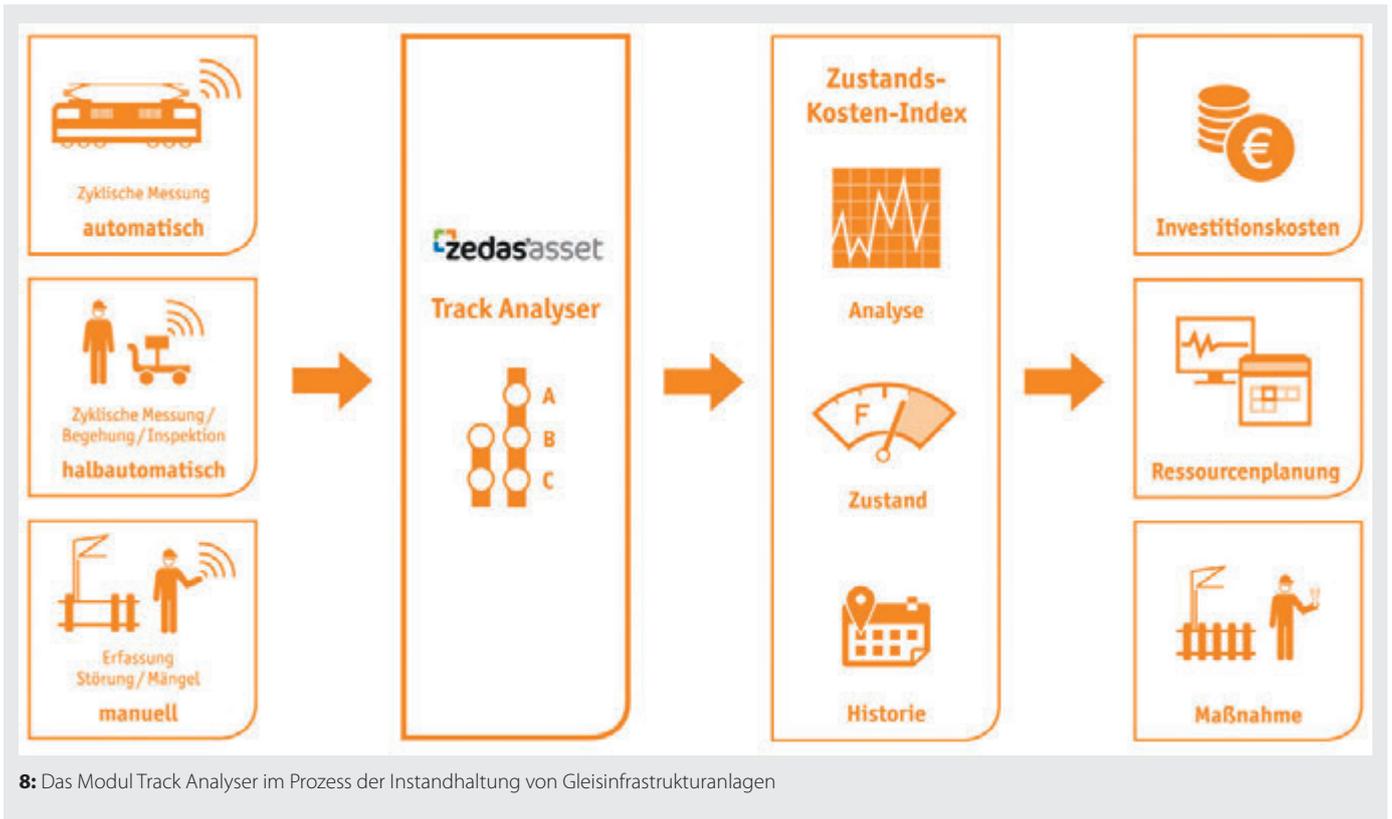
### Ausblick

Wie bereits beschrieben, hat der Rad-Schiene-Kontakt einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Verschleißverhalten der Radsätze. Mit dem Modul zedas®asset Track Analyser steht dem Nutzer ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem Messdaten und Zustandsbewertungen von Gleisen und Weichen erfasst und zur Prognose aussagekräftiger Gleisparameter genutzt werden können (Bild 8).

Auf der Basis der Analyse- und Prognoseergebnisse des Wheelset- und des Track Analyzers besteht zukünftig die Möglichkeit, Korrelationen zwischen Gleiszustand und Radsatzverschleiß zu finden.



7: zedas® Dashboard mit dem Modul Wheelset Analyser



8: Das Modul Track Analyser im Prozess der Instandhaltung von Gleisinfrastrukturanlagen

Auf der Basis der Analyse- und Prognoseergebnisse des Wheelset- und des Track Analysers besteht zukünftig die Möglichkeit, Korrelationen zwischen Gleiszustand und Radsatzverschleiß zu finden. •

Literatur

[1] Wild, E.: Beanspruchungsbedingte Gefügeänderungen von ferritisch-perlitischen Stählen am Beispiel des Rad-Schiene-Kontaktes. Dissertation, Technische Universität Berlin 2007  
 [2] Wolfgang Dahmen, Arnold Reusken: Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer (2006)

Summary

Digital wheel set management: Digitization makes wheel set abrasion predictable

The wheel-track contact has a not insignificant influence on the wear behavior of the wheel set. The user available module zedas®asset Track Analyser is able to record measurement data and condition assessment of tracks and switches and to forecast significant track parameters. Based on the analysis and forecast results by the wheelset and the Track Analyser, it is possible to detect correlations between track condition and wheel set abrasion.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für ZEDAS GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group, 2019