Smart Bogie 4.0 – Fahrwerksdiagnose im Zeitalter des Internets der Dinge (IoT) und Artificial Intelligence (AI)

Moshammer, Thomas[1]

[1]Siemens Mobility GmbH, Bogie Engineering, Graz, Austria

Zusammenfassung

Einzelne Komponenten des Systems Bahn werden bereits mit modernster Sensorik überwacht und nach aktuellem Zustand gewartet. Die vorausschauende Instandhaltung, die den voraussichtlichen zukünftigen Zustand der Systeme (Restnutzungsdauer) beinhaltet, ist für die Bestimmung der optimalen Instandhaltungsstrategie für einzelne Komponenten unerlässlich. Eine deutliche Effizienzsteigerung für das System Bahn kann dann erreicht werden, wenn die Komponenten nicht nur einzeln betrachtet werden, sondern die Daten der Komponenten so miteinander verknüpft werden, dass auch Informationen über andere Komponenten daraus abgeleitet werden können.

Für das System Bahn ist eine effiziente, zustandsorientierte und vorausschauende Instandhaltung unerlässlich, um die Verfügbarkeit von Infrastruktur und Fahrzeugen zu maximieren. Neue Sensor- und Übertragungstechnologien sowie innovative Analysemethoden und Methoden des maschinellen Lernens aus dem Bereich der Artifical Intelligence (AI) ermöglichen eine neue ganzheitliche Art der Zustandsüberwachung und Planung von Instandhaltungsmaßnahmen. Dieser Artikel beschreibt, wie der Paradigmenwechsel aktiv vorangetrieben werden kann, um den ordnungsgemäßen Zustand von Gleisen und Fahrzeugen sicherzustellen.

Keywords: Digitalisierung, Smart Data, zustandsoriertierte Instandhaltung, Fahrwerksdiagonse, Fahrwegdiagnose , Artificial Intelligence, Machine Learning, Digital Twin

1 Einleitung

Die zustandsorientierte Instandhaltung hat Einzug in die Bahnindustrie gehalten. Die vorausschauende Instandhaltung, die den voraussichtlichen zukünftigen Zustand der Systeme vorausberechnet, ist unerlässlich bei der Festlegung der optimalen Instandhaltungsstrategie. Eine deutliche Effizienzsteigerung für das System Bahn kann erreicht werden, wenn die Komponenten nicht nur einzeln betrachtet werden, sondern die Daten der Komponenten so miteinander verknüpft werden, dass auch Informationen über andere Komponenten daraus abgeleitet werden können. In diesem Artikel wird anhand der Fahrwerksdiagnose veranschaulicht, wie mit neuen Sensortechnologien, Übertragungs- und Analysemethoden der Zustand der Fahrwerke bei gleichzeitiger Analyse des Gleiszustandes die Verfügbarkeit von Gleis und Fahrzeug maximiert werden kann.

2 Railigent® - Ganzheitlicher Open-Eco-System Ansatz für Bahnsysteme - Gleis- und Fahrzeuginstandhaltung im IoT und AI

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Systems Bahn müssen sowohl die Infrastruktur als auch das rollende Material berücksichtigt werden, insbesondere dem Bereich der Rad-Schiene-Interaktion ist spezielles Augenmerk zu geben. Die Integration innovativer Technologien aus dem Bereich der infrastrukturbasierten und fahrzeugseitigen Diagnosesysteme ermöglicht eine gegenseitige Beobachtung von Fahrzeug und Infrastruktur, z.B. bei Überfahrt des Fahrzeugs. Neben der Besonderheit des Systems Bahn auf dem sich die Fahrzeuge bewegen und nicht stationär diagnostiziert werden können, ist auch die Menge der erzeugten Daten ein herausforderndes Spezifikum. Ein einzelner Hochgeschwindigkeitszug beispielsweise sendet bis zu vier Milliarden Datenpunkte pro Jahr, eine moderne Lokomotive über 500 Millionen [3]. Dies führt zu enormen Anforderungen an die Datenspeicherung und -verarbeitung.

Die Fähigkeit, relevante Informationen aus der realen Welt mittels Sensorik automatisch zu erfassen und zu verknüpfen, wird mit dem Begriff Internet der Dinge (IoT) [1] gleichgesetzt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, hat Siemens Mobility das IoT-Betriebssystem MindSphere Railigent® (Abb. 1) speziell für den Schienenverkehr entwickelt. Diese Siemens Mobility Applikation wird nicht nur zur Datenspeicherung, sondern auch zur Datenauswertung eingesetzt und versorgt das Wartungspersonal mit den notwendigen Informationen. Eine solche Anwendungs-Suite ermöglicht die analytische Kombination von Daten aus Fahrzeug und Strecke. Eine Herausforderung hierbei ist die Synchronisation von Fahrzeugdaten (z.B. Fahrerbremsverhalten oder Radprofil) mit

Gleisdaten (z.B. Gleislagefehlern). Nur die Verschmelzung dieser Datenströme ermöglicht es zu verstehen, was an der Rad-Schiene-Schnittstelle passiert. Railigent ermöglicht es das Zusammenspiel von Fahrzeug und Gleis mit modernsten Datenanlyseverfahren (Schlagwörter: big data, machine learning, deep learning, neuronal network, …) zu analysieren, da alle Daten in einer Applikation zusammengeführt werden können.

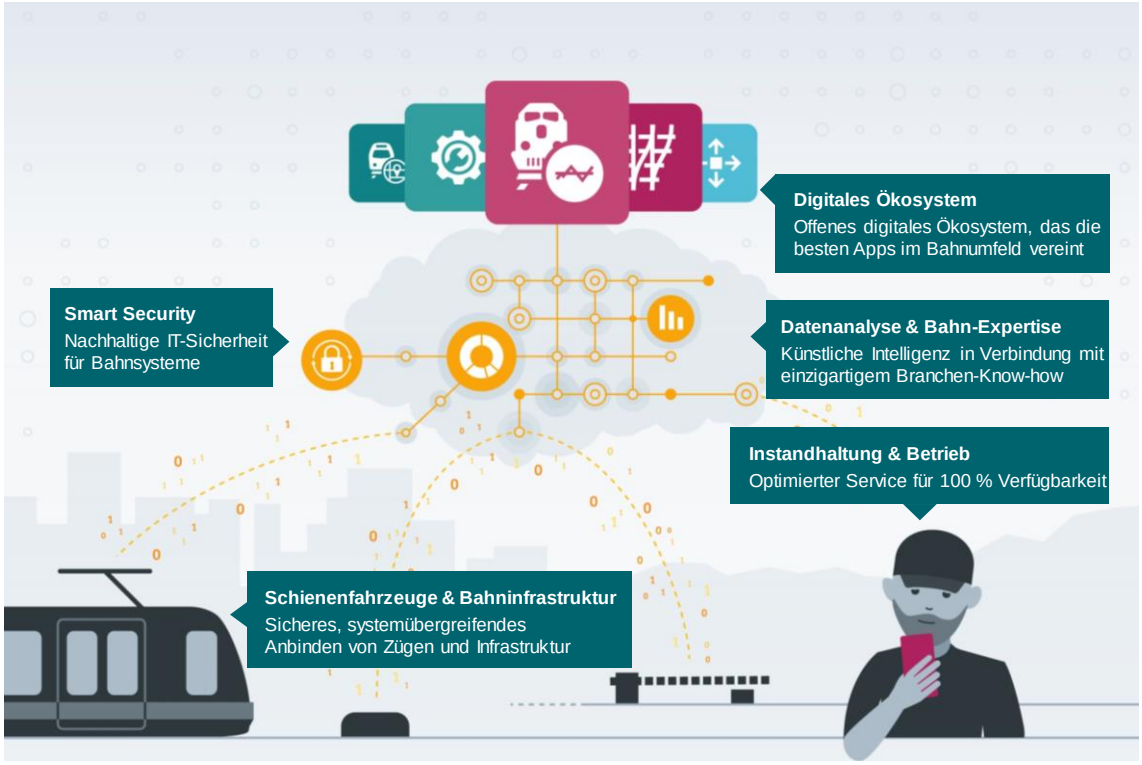

Abbildung 1: Railigent powered by MindSphere

Das Eisenbahnsystem mit seinen verschiedenen Komponenten wie Gleis und Fahrwerk unterscheidet sich von einem produzierenden Unternehmen mit seinen Maschinen und Anlagen dadurch, dass die Fahrzeuge nicht stationär sind und der Zugang zu Mobilfunknetzen aufgrund ihrer Lage manchmal nicht kontinuierlich ist. Darüber hinaus ermöglicht die Integration innovativer Technologien in infrastrukturbasierte und fahrzeugseitige Überwachungssysteme eine gegenseitige Überwachung des Fahrzeugs und der Infrastruktur im Vorbeifahren. Aufgrund dieser Besonderheiten wurde der eigene Begriff „Internet der Züge“ etabliert, um die Implementierung des Internet der Dinge für die Eisenbahnwelt zu beschreiben [2].

3 Fahrwerks-Diagnose

Siemens Mobility arbeitet seit vielen Jahren an Fahrwerksdiagnosesystemen, die das Fahrwerksverhalten über den Lebenszyklus des Drehgestells analysieren, um die War-

tungskosten zu optimieren. Zu diesem Zweck wird das Fahrwerk mit Elektronik und Sensoren ausgestattet, die Messdaten im Zug erfassen, analysieren und auf Anomalien im Betrieb auswerten.

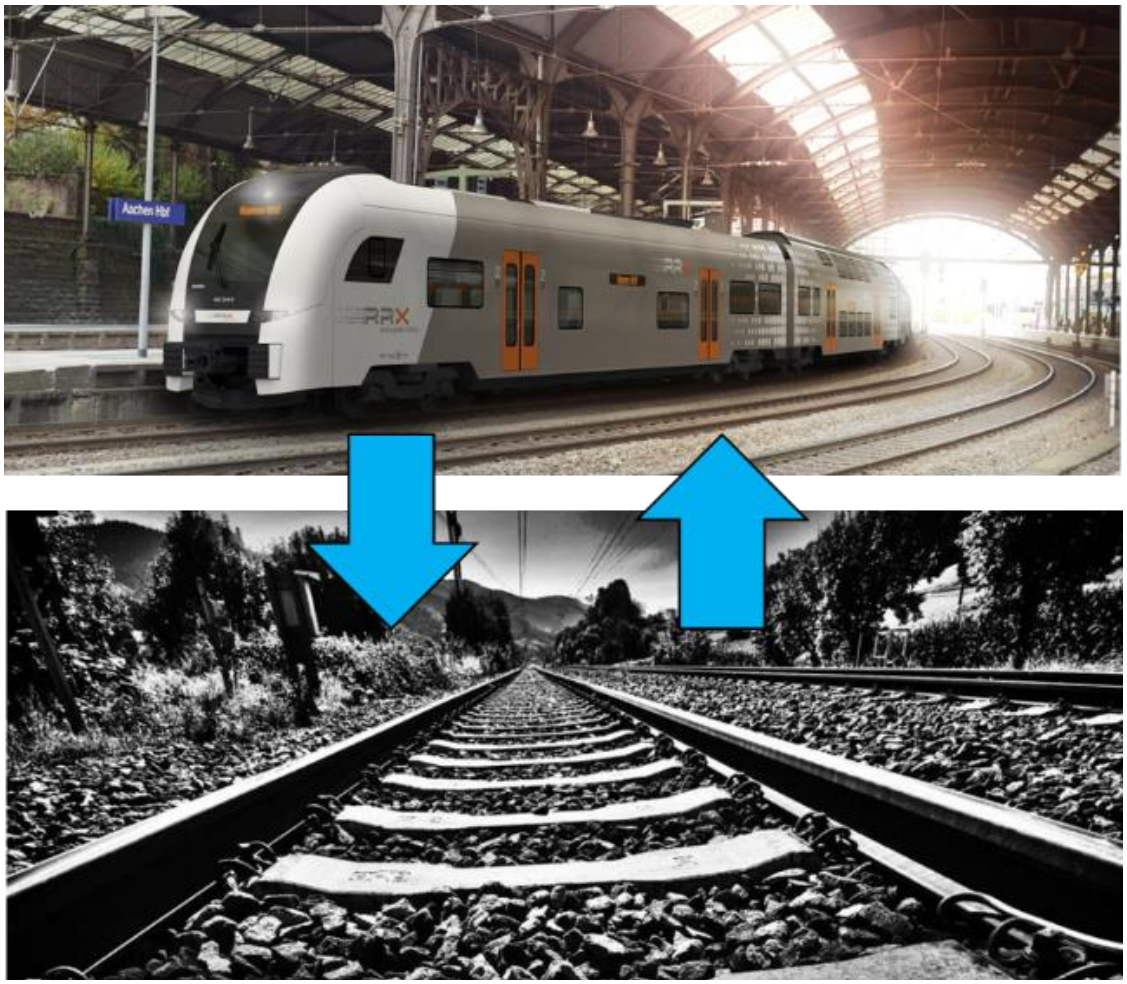

Abbildung 2: Interaktion Fahrzeug - Fahrweg

Die Intelligenz des Diagnosesystems muss unterscheiden können, ob festgestellte Abweichungen durch degradierte oder beschädigte Fahrwerkskomponenten oder Gleisfehler in der Schiene verursacht werden. Es geht daher immer darum, das Zusammenspiel zwischen Fahrzeug und Schiene zu bewerten und Anomalien zu identifizieren. (Abbildung 2)

Aus diesem Grund gibt es sowohl für die Strecke als auch für das Drehgestell Algorithmen, die den Einfluss der Strecke auf die Diagnosesignale des Fahrwerks herausfiltern können. Ziel der Fahrwerksdiagnose ist es, relevante Veränderungen im dynamischen Verhalten des Fahrwerks zu identifizieren. Die Informationen über den Fahrwerkszustand können in weiter Folge genutzt werden, um die traditionelle Art der Instandhaltung zu ändern. Der traditionelle Ansatz in der Instandhaltung ist zeitbasiert, d.h. Komponenten werden nach einer bestimmten Zeit t (z.B. 8 Jahre) oder nach einer Laufleistung von x (z.B. 3,2 Mio. km) ausgetauscht, unabhängig davon, ob die Teile defekt sind oder nicht.

Die Digitalisierung ermöglicht einen tiefen Einblick in den "Gesundheitszustand" (health state) des Fahrwerks, der durch charakteristische Parameter und modernen Analyse Methoden ermittelt werden kann. Das verwendete Diagnosesystem ist intelligent und innovativ. Es kombiniert spezifisches Fachwissen mit modernen Datenanalysemethoden (wie maschinellem Lernen, deep learning, künstlicher Intelligenz) und der Verknüpfung von verschiedenen Informationen aus dem Gleis, der Instandhaltung und der Umwelt (z.B. Wetter).

Alle verfügbaren Informationen müssen verwendet werden, um die folgenden Fragen beantworten zu können:

- Gibt es Probleme an meinem Fahrzeug?
- Welche Teile sind in meinem Fahrzeug verbaut?
- Wann wurden welche Teile gewartet?
- Wie wurden meine Bauteile belastet?
- Welche Teile aus dem Betrieb schädigt meine Bauteile?
- Wie lange halten meine Bauteile unter diesen Bedingungen?

Alle Informationen zum Fahrzeug werden über die Lebenszeit des Fahrzeugs im sogenannten Digitalen Zwilling gehalten. Alle Informationen aus dem Betrieb werden über Sensordaten und Prozessdaten ermittelt und aggregiert. Hierbei werden die direkt von Sensoren am Drehgestell gemessenen Signale sowie Prozessdaten aus der Fahrzeugsteuerung (z.B. GPS-Position, Temperatur, Antriebsmomente, ...) der OnBoard Signalverarbeitung oder Signalumwandlung zugeführt. Daraus werden charakteristische Parameter des Drehgestells (Merkmale, features) abgeleitet und in eine Anomalie- oder Fehlerbewertung eingespeist (anomality detection). Die Daten werden täglich an die Landseite des Instandhaltungssystems übertragen, wo weitere Verarbeitungsschritte wie z.B. der Zustand des Fahrwerks, Trendanalysen, Berechnung der Restlebensdauer von Komponenten (RUL … remaining useful lifetime) durchgeführt werden. (Abb. 3)

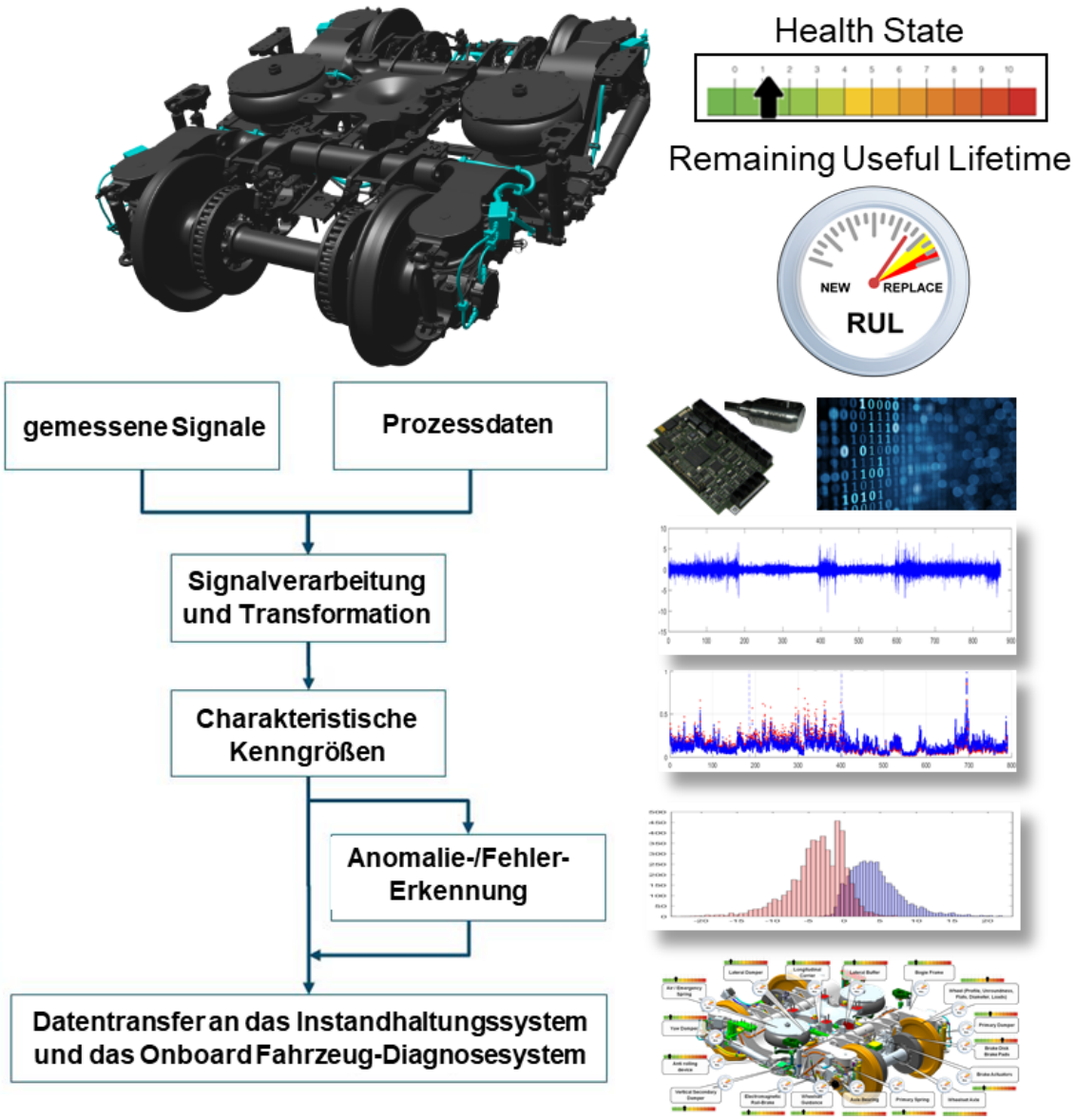

Abbildung 3: Signalverarbeitungskette vom Rohsignal zu Features, Health States und Remaining Useful Lifetime

Die Fahrwerksdiagnose ermöglicht es, Defekte im Drehgestell frühzeitig zu erkennen und so die Komponenten kostengünstig zu ersetzen oder Korrekturmaßnahmen zu planen. Ein optimiertes Instandhaltungskonzept reduziert die Lagerzeiten und erhöht die Fahrzeugverfügbarkeit. Die Investition in ein Diagnosesystem zahlt sich in vielerlei Hinsicht aus:

- Verlängerung der Prüfintervalle
- Ausnutzung der realen Lebensdauer von Komponenten
- Automatisierung von Dokumentationsaufgaben
- Vermeidung von ungeplanten Zugausfällen
- Erhöhte Verfügbarkeit

- Kürzere Depotaufenthalte
- Optimierte Beschaffung und Lagerunghaltung von Ersatzteilen

Ein modernes diagnosegestütztes Instandhaltungssystem wie Railigent ermöglicht den Wechsel von der zeitorientierten zur zustandsorientierten Instandhaltung (vgl. Abschnitt 2). Der Austausch von Komponenten erfolgt bedingt und nicht mehr wie bisher fristgerecht. Dies erfordert neben Diagnose- und Prognosemeldungen auch einen modifizierten Instandhaltungsprozess, der diesen Nutzen ebenfalls erhöhen kann. Nicht jeder Instandhaltungsprozess ist für diese Veränderung auch bereit und somit ist ein begleitender Change Prozess notwendig, um die Kostenpotentiale auch heben zu können.

Neben den eingesparten Kosten (Verlängerung der Prüfintervalle, Ausnutzung der realen Bauteillebensdauer) wird hier auch der Umweltschutz berücksichtigt, da über die Lebensdauer der Züge weniger Teile ausgetauscht und damit Ressourcen geschont werden. Korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen können geplant werden: Durch Trendanalysen und Restlebensdauerabschätzungen degradierender Komponenten werden Korrekturmaßnahmen geplant und beseitigt. Durch intensive Know-How-Entwicklung zu den Schadensmechanismen von Bauteilen können Aussagen über die Restlebensdauer auf Basis innovativer Lebensdauermodelle getroffen werden. Forschungskooperationen mit Universitäten und spezifische Lebensdauerprüfungen auf Prüfständen sind unerlässlich, um belastbare Prognosemodelle für Bauteile zu entwickeln. Nur durch die Kenntnis der Parameter, die ein Bauteil beschädigen, ist es möglich, die relevanten Parameter während des Betriebs zu erfassen und anschließend Restlebensdauermodelle auf der Landseite in Prognosemeldungen umzusetzen.

Abbildung 4: Schädigungsmodellentwicklung für Komponenten zur Berechnung der Restlebensdauer unter Betriebsbelastungen

Am Beispiel einer Luftfeder werden theoretische Schadenshypothesen aufgestellt und verschiedene Versagensmodi der Luftfeder mit der Finite-Elemente-Methode simuliert. Diese Modelle werden durch Labortests (z.B. auf dem HEXAMOVE-Prüfstand) getestet und validiert. (Abb. 4) Dieses Verfahren macht es möglich, den Grad der Schädigung von Bauteilen (z.B. Gummi-Metall-Teile) abzuschätzen und den Austausch des Bauteils auf der Grundlage des Anwendungsprofils vorherzusagen oder zu planen.

Um die Instandhaltung des Drehgestells so effizient wie möglich gestalten zu können, ist es notwendig, für alle relevanten Komponenten eine Analyse hinsichtlich des "Zustands" durchzuführen oder eine Restlebensdauerprognose zu erstellen. Die folgende Abbildung veranschaulicht den Umfang des Diagnosesystems für Drehgestelle. (Abbildung 5)

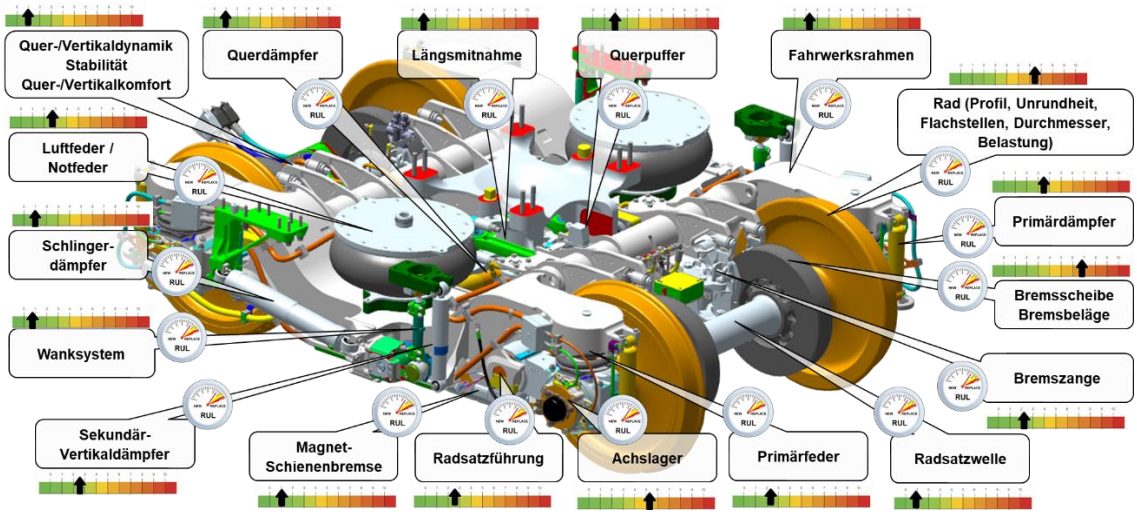

Abbildung 5: Vollumfängliche Diagnosefunktionen am Beispiel eines Lauffahrwerks

Im Internet der Dinge (vgl. Abschnitt 2) ist es nun möglich, Messwerte von Sensoren aus dem Betrieb von Fahrzeugen mit modernen Analysemethoden mittels charakteristischen Kenngrößen (Features) zu Informationen zu verarbeiten und auf die Landseite zu übertragen. Diese Informationen (z.B. "Wie wurde meine Komponente im Betrieb belastet?") müssen durch konsequente Verknüpfung der Konfigurationsdaten und Wartungsdaten (z.B. "Welche Teile sind in meinem Zug verbaut?“ bzw. „Wann wurden sie gewartet?") zu einer Prognose weiterverarbeitet werden (z.B. "Welche Teile aus dem Betrieb beschädigen meine Komponente? und wie lange hält meine Komponente unter diesen Bedingungen?").

Im sogenannten digitalen Zwilling der sich im Betrieb befindlichen Fahrzeuge werden alle relevanten Informationen zusammengeführt. Der digitale Zwilling der Fahrzeuge ermöglicht eine konsistente Nutzung von Informationen aus dem Betrieb (Diagnose- und Betriebsdaten), Konfigurationsmanagement und Wartungsdaten. Schadens- und Prognosemodelle ermöglichen es, Instandhaltungsprozesse zu optimieren. Die Anwendungssuite zur Verknüpfung der vorhandenen Daten mit einem digitalen Zwilling (Digital Twin) wird in Railigent® durchgeführt. (Abbildung 6)

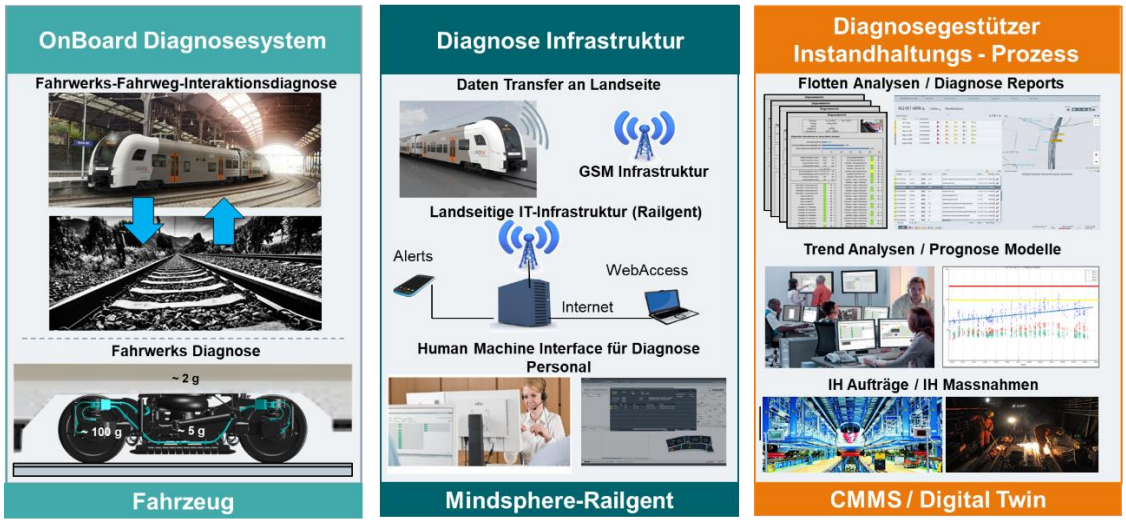

Abbildung 6: Vernetzte IT-Integration der Diagnose Daten in das Instandhaltungs-System ermöglicht die Umsetzung eines modernen Instandhaltungs-Prozesses

Die Auswirkungen all dieser Maßnahmen in der Fahrwerksinstandhaltung sind eine höhere Verfügbarkeit der Züge, ein geringeres Investitionsvolumen in Fahrzeuge (da weniger Züge für die gleiche Transportleistung benötigt werden) und geringere Instandhaltungskosten über den Lebenszyklus der Fahrzeuge. (Abb. 7)

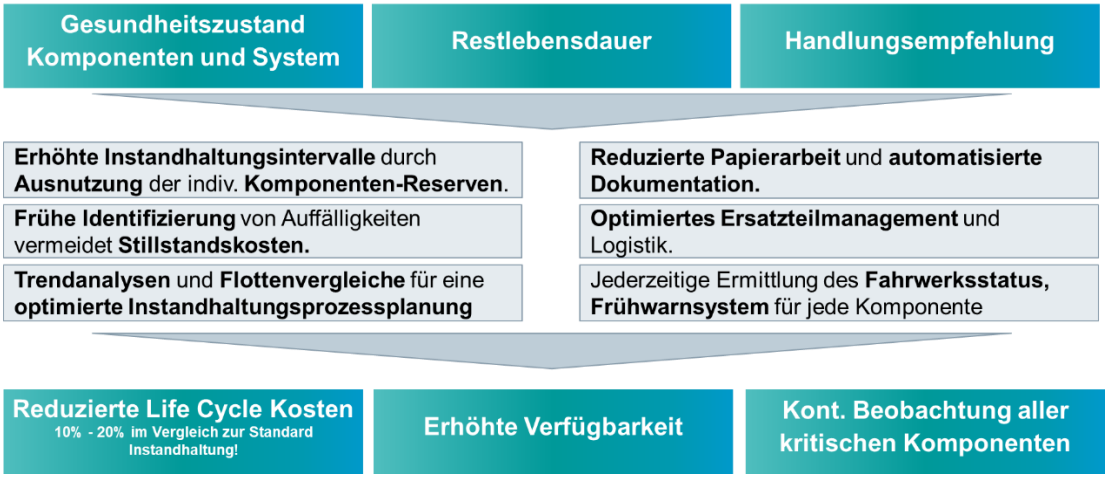

Abbildung 7: Einsparung in Lebenszykluskosten durch zustands-orientierte Instandhaltung, erhöhte Verfügbarkeit durch optimierte Prozesse

Als Hersteller der Züge erhält Siemens Mobility auch wertvolle Rückmeldungen über die Leistung des Drehgestells im Feld und kann diese Daten bei der Entwicklung von neuen Produkten für die Verbesserung der nächsten Fahrwerks-Generationen nutzen.

Der digitale Wandel in der Fahrwerksinstandhaltung hat längst Einzug in Siemens Mobility gehalten und bringt weitreichende Veränderungen in der Verfügbarkeit von Zügen und ist ein wertvolles Werkzeug für das Engineering als Feedback zur Performance der

Fahrwerke im Betrieb um für zukünftige Fahrwerks-Entwicklungen maßgebliche Verbesserungspotentiale ableiten zu können [6].

4 Fahrweg-Diagnose

Üblicherweise misst ein Gleismesswagen eine Vielzahl von Signalen, welche die Gleislage, die Strecke oder die Gleislagefehler beschreiben und auf Basis derer Instandhaltungsmaßnahmen an der Schiene ausgelöst werden, die der Betriebssicherheit dienen sollen. Für Gleisfehlergrößen gibt es vorgeschriebene Wartungsgrenzmaße, die überprüft werden und bei Überschreitung zu einer Instandhaltungsmaßnahme führen. In der Regel wird alle 3-12 Monate jede Linie vermessen.

Das Fahrwerksdiagnosesystem kann neben der Diagnose des Fahrwerks (Abschnitt 3) auch „hörend“ auf der Schiene lauschen und kann je nach Schienenzustand eine Vielzahl von Informationen wie Höhenfehler oder Welligkeiten diagnostizieren. Der Vorteil einer kombinierten Betrachtung von Zug und Schiene besteht darin, dass einerseits bestimmte Parameter für den Gleisinstandhaltung direkt abgeleitet werden können und andererseits permanente Daten der Strecke zur Verfügung stehen, wenn der Zug auf der Strecke ist. Dies bedeutet, dass eine kontinuierliche Diagnose des Gleises als auch des Fahrwerks durchgeführt werden kann. Es ist möglich, zeitliche Veränderungen auf der Strecke zu diagnostizieren und in die Zukunft zu extrapolieren. Neben der Diagnose des Gleises wird auch die Reaktion des Fahrzeugs auf Störungen auf dem Gleis aufgezeichnet. Diese „Vehicle-Track-Interaction“ (VTI-Diagnose) gibt somit Aufschluss darüber, welche Störungen auf der Strecke tatsächlich eine negative Reaktion (hohe Kräfte, hohe Beschleunigungen, Instabilitäten, Vibrationen oder Geräusche durch Welligkeit) am Fahrzeug auslösen.

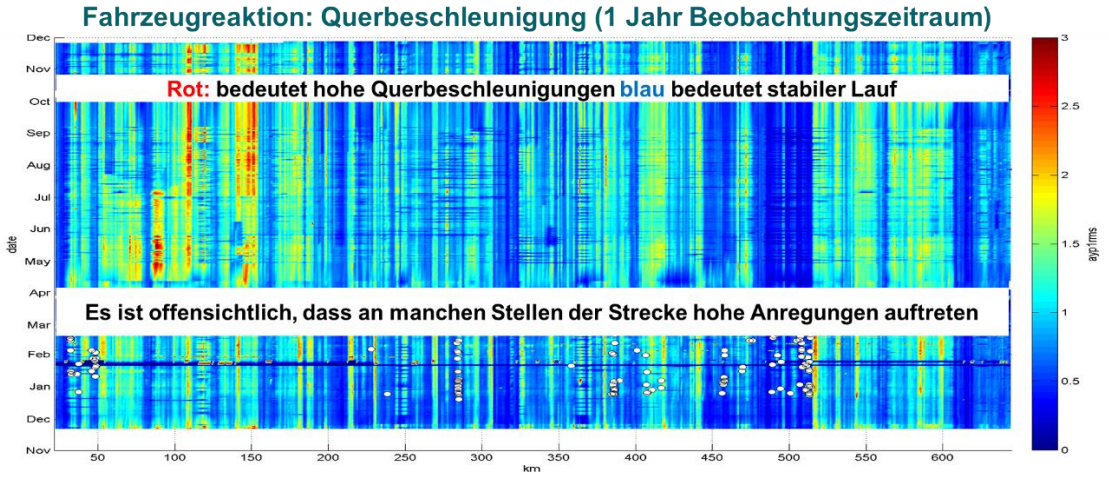

Abbildung 8: Veränderung der Fahrzeug-Reaktion auf der Strecke über die Zeit aufgrund Veränderungen an der Strecke

Abbildung 8 zeigt die Überfahrt auf der gleichen Strecke über einen Zeitraum von einem Jahr. Die Farben zeigen eine Reaktion des Fahrzeugs auf die Route an. Blau bedeutet gute Distanz, rot bedeutet Positionen in der Entfernung, in der das Fahrzeug beginnt, instabilen Lauf zu diagnostizieren. (Abb. 8) Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bestimmte Positionen negativ entwickeln und eine Prognose abgeleitet werden kann, wenn sie repariert werden müssen.

Ziel des Fahrzeug-Fahrweg-Interaktionssystems ist es jedoch nicht, Gleismessfahrzeuge zu ersetzen, sondern permanente Informationen über bestimmte Instandhaltungsparameter zu erhalten. Die Reaktion des Fahrzeugs auf Störungen im Gleis ist eine sehr wertvolle Information.

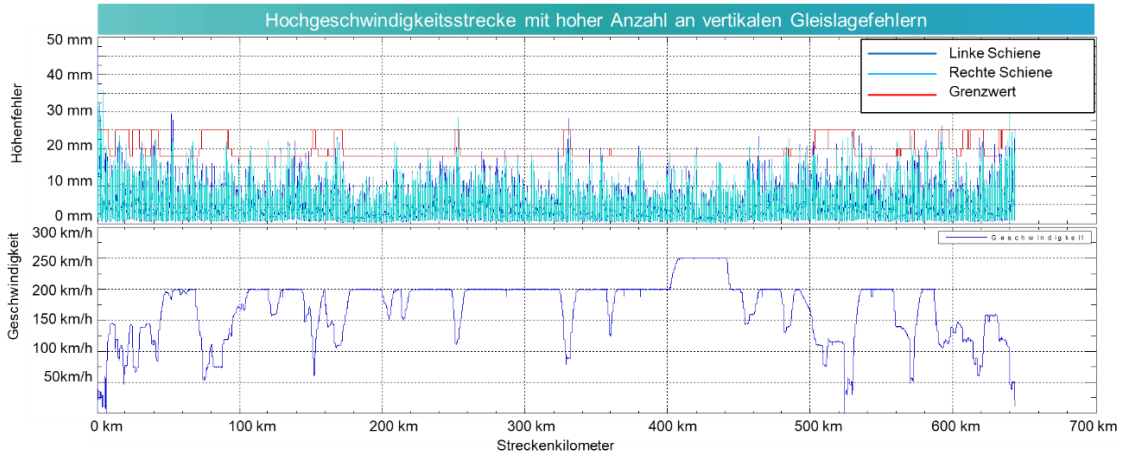

Abbildung 9: Hochgeschwindigkeitsstrecke mit hoher Anzahl an Vertikalen Gleislagefehler

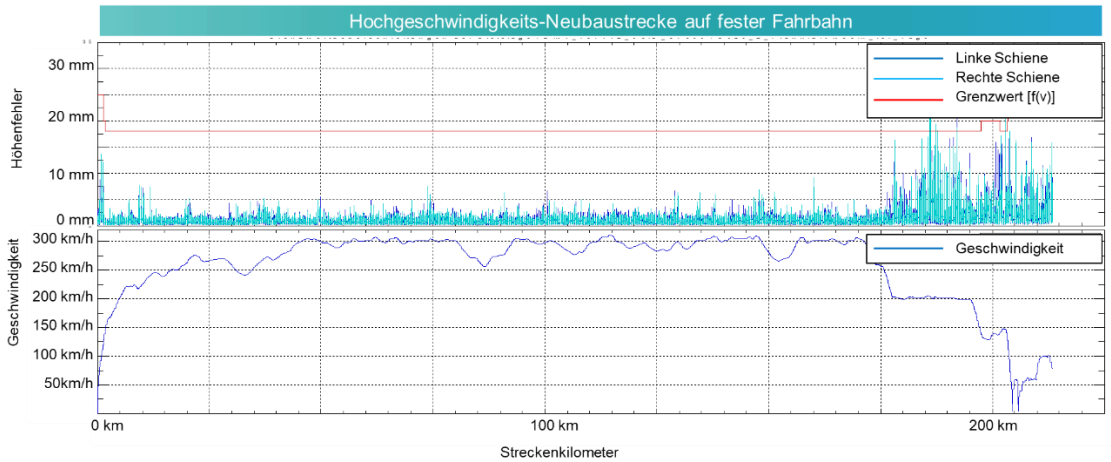

Abbildung 10: Hochgeschwindigkeits-Neubaustrecke auf fester Fahrbahn

Die beiden Bilder einer Hochgeschwindigkeitsstrecke zeigen deutlich den Unterschied zwischen einer Neubaustrecke auf einer Feste Fahrbahn und einer Strecke, die im Mischbetrieb eingesetzt wird. Die rote Linie zeigt notwendige Einschränkungen bezüglich der Geschwindigkeit des Fahrzeugs an, d.h. wenn die Fehler größer sind, muss das Fahrzeug langsamer fahren und umgekehrt. (Abb. 9 & 10) Die Änderung der Messwerte kann zum einen dazu genutzt werden, Triebfahrzeugführer anzuweisen, die Fahrzeuggeschwindigkeit bei größeren Störungen kurzfristig zu reduzieren oder Änderungen auf der Strecke durch Instandhaltungsmaßnahmen gezielt zu beheben, um die Geschwindigkeit nicht reduzieren zu müssen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit dem Fahrwerksdiagnosesystem möglich ist, charakteristische Streckenparameter aufzuzeichnen. Der Unterschied zu herkömmlichen Gleismesssystemen besteht darin, dass auch die Reaktionen des realen Fahrzeugs auf Störungen auf dem Gleis erfasst und ausgewertet werden.

Durch die Analyse der Fahrzeugreaktionen im Zeitablauf bei gleichzeitiger Zuordnung zu Streckenabschnitten wird eine differenzierte Gleisinstandhaltung möglich, nämlich dort, wo die Fahrzeugreaktionen (hohe Kräfte oder Beschleunigungen, Instabilitäten, Anregung durch Welligkeit) heftig sind [5].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Internet der Dinge wird es möglich, Daten von Sensoren im Betrieb mit modernen Analysemethoden zu Informationen zu verarbeiten. In Railigent werden alle relevanten Informationen im sogenannten „Digital Twin“ auf der Landseite zusammengeführt. Der digitale Zwilling ermöglicht die konsistente Nutzung relevanter Informationen aus Betrieb, dem Konfigurationsmanagement (CMMS) und der Instandhaltungsdaten mit dem Ziel, die Instandhaltungsprozesse zu optimieren. Smart Bogie 4.0 ist zusätzlich ein wertvolles Werkzeug für das Engineering um die Performance der Fahrwerke unter Betriebsbedingungen zu spiegeln und entsprechend den sich daraus ergebenden Anforderungen zu verbessern.

Das System Bahn erfordert eine effiziente, zustandsorientierte und vorausschauende Instandhaltung, um die Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur und des rollenden Materials zu maximieren. Die aktive Gestaltung des Paradigmenwechsels zur effizienten Sicherstellung eines einwandfreien Zustands von Infrastruktur und Fahrzeugen erfordert die kontinuierliche Zusammenarbeit von Komponentenlieferanten, (Gesamt-) Systemanbietern und Betreibern im Internet der Dinge. Lösungen wie Railigent werden als zentrale Hebel dienen, um völlig neue Geschäftsmodelle und Wartungskonzepte der Zukunft zu realisieren.

Railigent ist eine eingetragene Marke der Siemens AG.

Literatur

[1] *Fleisch, E.; Christ, O.; Dierkes, M.*: Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: Elgar Fleisch (Hg.): Internet der Dinge. Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Berlin: Springer, 2005, S. 3–37.

[2] *Kohli, S.; Kumar A.V.S.; Easton, J.M.; Roberts, C.:* Innovative Applications of Big Data in the Railway Industry. IGI Global, 2017, S.82-83

[3] *Kress, G.*: Daten treiben Züge an, Handelsblatt 10/2016.

[4] *Haertel, R.; Schierhorn, D.; Jakob, C.:* Einsatz von Smart Data Services in Stellwerken, SIGNAL+DRAHT (110) 4/2018, S.57-64

[5] T. Moshammer: "Vehicle Track Interaction Monitoring System", Intelligent Rail Summit, November 2016, Naples, Italy

[6] K. Wöls, T. Moshammer: "The Digital Shift in Bogie Service", RAILCONTACT 18, Mai 2018, Graz, Österreich

Autoren

Moshammer, Thomas

Studium Allgemeiner Maschinenbau an der Technischen Universität Wien, Promotion an der Technischen Universität Graz bis 1998, Dr.-Ing., Sabbatical bei NASA Langeley in Virginia. Seit 2007 bei der Siemens Mobility GmbH, Mobilität, im Bereich Bogie Engineering für die technischen Themen Fahrtechnik, Akustik, Konstruktion von Strukturkomponenten, Lastannahmen, Festigkeitsberechnung, Laboversuche, Streckenversuche und Algorithmenentwicklung für Drehgestelldiagnosesysteme, seit 2016 Leiter der Abteilung Struktur, Simulation, Validierung.
Adresse: Siemens Mobility GmbH, MO RS SC BG EN SSV, Eggenberger Str. 31, 8020 Graz, Österreich.
E-Mail: thomas.moshammer@siemens.com.