Predictive Maintenance am Beispiel Schienennahverkehr: Auswirkungen von Gleisfehlstellen auf die mechanischen Belastungen an Straßenbahnrädern und Konzept zur zustandsorientierten Instandhaltung von Gleisinfrastruktur

Noll, Martin-Christopher[1]

[1] Geschäftsführer, i4M technologies GmbH
Lochnerstraße 28, 52064 Aachen, Deutschland

Thematischer Schwerpunkt: Eisenbahninfrastrukturmanagement / Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Vortragssprache: Deutsch

Zusammenfassung

Öffentliche Nahverkehrsbetriebe müssen den sicheren und zuverlässigen Betrieb von Bahnsystemen gewährleisten. Die dazu notwendige Instandhaltung von Schienenfahrzeugen und -infrastruktur verursacht hohe Kosten, weshalb unter einem bestehenden Kostendruck eine signifikante Effizienz-steigerung erzielt werden muss.

Die Digitalisierung und insbesondere „Predictive Maintenance“ bieten große Potentiale zur Erreichung dieses Ziels durch die kontinuierliche, sensorbasierte Überwachung der Zustände von Maschinen und Infrastruktur sowie eine auf diesen Informationen basierende, zielgerichtete Wartung. Im Rahmen dieses Vortrags wird die Entwicklung eines Systems zur zustandsorientierten Instandhaltung von Gleisinfrastruktur von der ersten

messtechnischen Analyse bis zur letztendlichen Umsetzung in Hard- und Software beschrieben.

Die Bildung sogenannter Riffel und Wellen auf Schienen ist ein Beispiel für die Interaktion von Fahrzeug und Gleis. Bei Riffeln und Wellen handelt es sich um periodische Welligkeiten in der Schienenoberfläche, die insbesondere in Kurven und an Beschleunigungs- oder Verzögerungsstellen auftreten. Ihre Entstehung wird, obgleich nicht abschließend geklärt, auf die mechanische Interaktion zwischen Schienenfahrzeug und Gleis zurückgeführt.

Eine bekannte Auswirkung dieser Gleisfehlstellen bei der Überfahrt von Schienenfahrzeugen ist eine zusätzliche Belastung der Anwohner durch Schallemissionen und Boden-schwingungen. Daher werden solche Fehlstellen üblicherweise vom Nahverkehrsbetrieb nach Beschwerde durch Anwohner abgeschliffen. Weniger bekannt ist, dass diese Fehlstellen erhöhte mechanische Lasten insbesondere an gummigefederten Rädern der überfahrenden Schienenfahrzeuge verursachen können.

Im Rahmen dieses Vortrages wird zunächst basierend auf den Ergebnissen umfangreicher Betriebsmessungen aufgezeigt, dass die Überfahrt starker Wellen und Riffel bei bestimmten Geschwindigkeiten erhöhte Belastungen in Schraubverbindungen von gummigefederten Straßenbahnrädern verursachen kann. Hierzu werden mechanische Belastungen an den Schraubverbindungen innerhalb der Räder im Betrieb gemessen. Es kann ferner ein direkter Zusammenhang zwischen den Belastungen an den Rädern und Beschleunigungen an den Fahrzeugachsen hergestellt werden.

Im folgenden Schritt wird, aufbauend auf diesen Informationen, ein System zur kontinuierlichen Erfassung des lokalen Schienenzustands basierend auf Online-Beschleunigungsmessungen auf Schienenfahrzeugen abgeleitet und aufgebaut.

Den Abschluss des Vortrages bildet eine umfangreiche Analyse der bisher mit diesem System gewonnenen Messdaten. Hieraus werden Maßnahmen zur zukünftigen Berücksichtigung von Schienenfehlstellen bei der Auslegung von Schienenfahrzeugen sowie Handlungsempfehlungen für Betreiber von Straßenbahnen abgeleitet.

Keywords: Predictive Maintenance, Monitoring, Digitalisierung, Schieneninfrastruktur, Riffelbildung, Nahverkehr, gummigefederte Straßenbahnräder

1 Einleitung

Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) unterliegen einem zunehmenden Kostendruck. Beim schienengebunden Nahverkehr sind innerbetrieblich die Zuständigkeiten für Fahrzeuge und Infrastruktur oft voneinander getrennt. Eine Folge des Kostendrucks auf diesen beiden Seiten sind Einsparungen, die der Tatsache widersprechen, dass es sich um ein Rad-Schiene-System handelt, dessen Komponenten starke Interaktionen aufweisen. Ein Beispiel für diese Interaktion ist die Bildung von periodischen Gleisfehlstellen. Diese verursachen nicht nur Lärmbelastungen bei Anwohnern, sondern können auch erhöhte mechanische Belastungen an den sie überfahrenden Fahrzeugen hervorrufen, weshalb ihre effiziente Beseitigung notwendig ist.

Im folgenden Beitrag wird aufgezeigt, wie die Digitalisierung, welche gegenwärtig zu oft als Selbstzweck gesehen und praktiziert wird, bei dieser Aufgabe sinnvoll eingesetzt werden kann: Aufbauend auf einer messtechnischen Ursachenanalyse wird ein System zum kontinuierlichen Monitoring des Gleisinfrastrukturzustandes entwickelt und implementiert. Abschließend werden Betriebserfahrungen mit dem System aufgezeigt sowie Schlüsse für die zukünftige Auslegung von Schienenfahrzeugen gezogen und Handlungsempfehlungen für Betreiber gegeben.

2 Periodische Gleisfehlstellen und ihre Auswirkungen

Es wird sich im Folgenden auf die besonders im öffentlichen Schienennahverkehr relevanten periodischen Gleisfehlstellen Wellen und Riffel konzentriert. In den folgenden Abbildungen sind Beispiele für deutlich ausgeprägte Wellen und Riffel dargestellt.

Abbildung 1: Gleisfehlstellen: Wellen (links), Riffel (rechts)

Die Entstehung von Wellen, auch Schlupfwellen genannt, wird auf Schlupf zwischen Rädern und Gleis bei Kurvenfahrten aber insbesondere auch an Beschleunigungs- und Bremsstellen zurückgeführt. Wellen haben eine Wellenlänge von 30 mm bis 300 mm und eine Fehleramplitude von 0,1 mm bis 1 mm [1]. Riffel sind ebenfalls regelmäßige, periodische Unebenheiten auf der Schienenoberfläche und gekennzeichnet durch aufeinanderfolgende glänzende Wellenberge und dunkle Wellentäler. Ihre Wellenlänge beträgt 30 mm bis 60 mm bei einer Fehleramplitude von 0,1 mm bis 0,4 mm. Die Wellenberge weisen eine höhere Härte auf [1, 2]. Zum Entstehungsmechanismus existieren einige Theorien, die überwiegend dynamische Interaktionen von Rad und Gleis in Verbindung mit Schlupf und Reibung als Ursache sehen. Beginnende Mikrorauhigkeiten auf Rad und Schiene sorgen für Schwingungsanregungen, die zu lokalen Verfestigungen führen und sich im Laufe der Zeit verstärken. Eine Diskussion der Theorien zur Riffelbildung an dieser Stelle ist nicht möglich, es sei an dieser Stelle auf die Zusammenfassung von Meywerk verwiesen [3].

Das Überrollen dieser periodischen Fehlstellen hat in Abhängigkeit von der Überrollgeschwindigkeit die Entstehung von Schwingungen zwischen Rad und Schiene zu Folge. Diese Schwingungen resultieren insbesondere bei Straßenbahnen in Belastungen von Anwohnern in Form von abgestrahltem Luftschall und Bodenschwingungen.

Ferner werden durch die entstehenden dynamischen Vertikalkräfte Zusatzbelastungen an Fahrzeug und Schiene hervorgerufen. Diese Belastungen verstärken bei der Schiene den Schadensfortschritt der Gleisfehlstelle. Hinsichtlich der Belastungen am Fahrzeug wurden von uns im Rahmen umfangreicher messtechnischer Analysen Belastungsmessungen

während der Fahrt durchgeführt. Es kann gezeigt werden, dass die Überfahrt von periodischen Gleisfehlstellen bei bestimmten Geschwindigkeiten zu hohen dynamischen Belastungen an Antriebskomponenten führt. Dieses Verhalten ist wahrscheinlich auf Anregungen in Systemresonanzen zurückzuführen. In folgender Abbildung ist die Belastung einer Radkomponente im Schienenfahrzeug bei Überfahrt einer Gleisfehlstelle dargestellt.

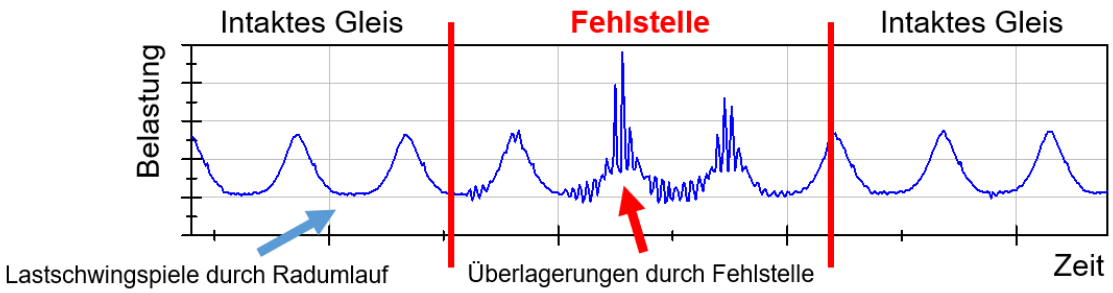

Abbildung 2: Belastung an Radkomponente bei Überfahrt einer periodischen Gleisfehlstelle

Während die Komponente auf dem intakten Gleis bereits pro Radumlauf eine periodische Belastung erfährt, wird bei Überfahrt der periodischen Gleisfehlstelle eine zusätzliche, höherfrequente Schwingung überlagert. Die Schwingungsamplituden während Überfahrt der Gleisfehlstelle steigen auf ca. das doppelte im Vergleich zum intakten Gleis an.

Die Entwicklung von periodischen Gleisfehlstellen findet in allen Gleisnetzen statt. Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, wird vom Verkehrsunternehmen Gleispflege betrieben. Dazu werden Schleiffahrzeuge eingesetzt, die die Welligkeiten im Gleis beseitigen.

Die Entstehung von Gleisfehlstellen findet lokal und zeitlich sehr unterschiedlich statt und konzentriert sich auf Problemstellen wie z.B. Kurvenfahrten und Beschleunigungs- und Verzögerungsstellen an Haltestellen und Ampeln. Da die Fehlstellen oft schon nach kurzer Zeit im Gleiswerkstoff „gespeichert“ sind, entwickeln sich diese nach kurzer Zeit neu und müssen wieder bearbeitet werden. Diese Entwicklungen finden innerhalb von Wochen statt.

Während gegenwärtig Gleispflege häufig am gesamten Gleisnetz durch regelmäßiges Schleifen gleichmäßig betrieben wird, bietet eine fokussierte Identifikation und Instandhaltung der Problemstellen deutliches Potential zur Kosteneinsparung.

3 Aufbau eines Systems zur kontinuierlichen Überwachung der Gleisinfrastruktur

Gemeinsam mit einem großen ÖPNV Unternehmen wurde von uns ein System entwickelt, welches eine fokussierte Instandhaltung der Gleisinfrastruktur ermöglicht. Ziel ist die kontinuierliche Ermittlung von periodischen Gleisfehlstellen (Wellen und Riffel) sowie Stoßstellen (z.B. an Weichen und Kreuzungen) im Netz des Kunden.

Dazu werden an einigen Fahrzeugen im normalen Fahrbetrieb laufend Beschleunigungssignale erfasst. Diese Daten werden in Echtzeit mittels Algorithmen bewertet, ausschließlich auf relevante Informationen reduziert, lokal im Zug zwischengespeichert, im Betriebshof auf einen Server übertragen und über eine Netzwerkschnittstelle aufbereitet dem zuständigen Personal bereitgestellt. Das System besteht aus einer zugseitigen und einer netzwerkseitigen Komponente.

Einen Überblick über die zugseitige Komponente ist folgender Abbildung zu entnehmen. Durch die Verwendung leistungsfähiger Hardware wird die Echtzeitauswertung der Daten ermöglicht. Durch dieses Edge-Computing direkt am Ort der Messdatenerfassung wird eine Datenreduzierung vom Vergleich zu Zeitrohdaten um den Faktor 10.000 und mehr erreicht. Ausschließlich relevante Daten werden zusammen mit Zeit-, Geschwindigkeits-, Kurs- und Ortsangaben (GPS und Fahrzeug-Bus) zwischengespeichert und im Betriebshof per WLAN oder alternativ per Mobilfunkverbindung in das Netzwerk des Kunden übertragen. Als Übertragungsprotokoll wird MQTT verwendet, welches einen sehr geringen Protokolloverhead aufweist und sich demnach für Datenübertragungen unter Bandbreiteneinschränkungen eignet.

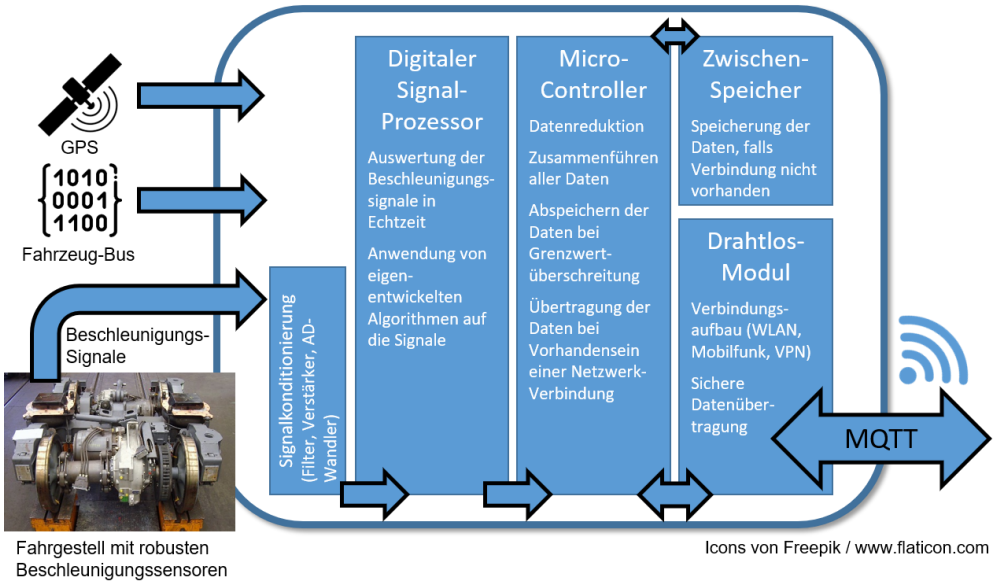

Abbildung 3: Die zugseitige Komponente des Systems zur Infrastrukturüberwachung

Der Überblick über die netzwerkseitige Komponente ist in folgender Abbildung zu entnehmen.

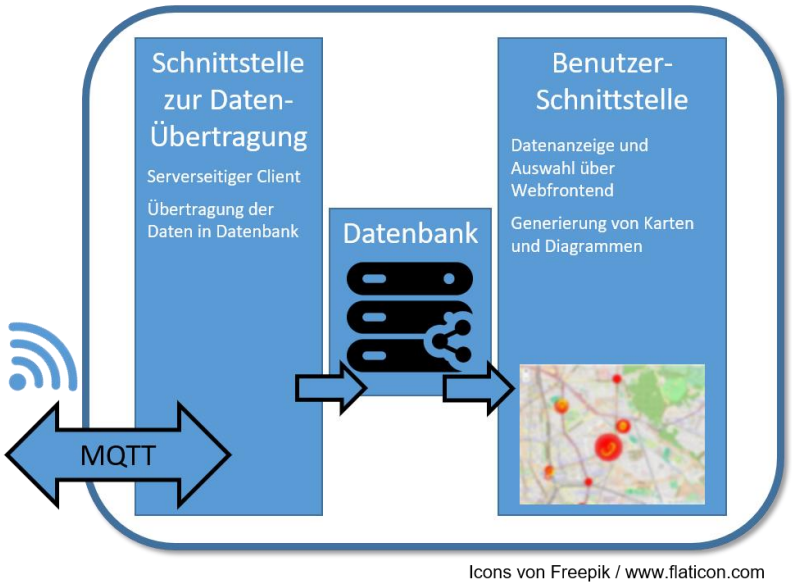

Abbildung 4: Die netzwerkseitige Komponente des Systems zur Infrastrukturüberwachung

Die netzwerkseitige Komponente empfängt die von den Zügen ermittelten Daten, speichert diese in einer Datenbank ab und ermöglicht Benutzern den Zugriff auf die Daten. Diese werden über Karten-, Diagramm- und Tabellendarstellungen angezeigt.

Auf Basis der angezeigten Daten können Informationen über den aktuellen Infrastrukturzustand abgeleitet und Instandhaltungsaufgaben geplant werden.

4 Ergebnisse aus drei Jahren Betriebserfahrung

Die zugseitigen Systeme liefern seit zwei Jahren Informationen über lokale periodische Gleisfehlstellen (Wellen, Riffel), Stoßstellen (Weichen, Kreuzungen) sowie akustische Emissionen. Durch die regelmäßige Überfahrt dieser Stellen im normalen Fahrbetrieb können zeitlich aktuelle und statistisch abgesicherte Informationen abgeleitet werden. Bei einzelnen Messfahrten führt der aktuelle Straßenverkehr bei Überfahrt der Fehlstellen zu einer großen Streuung der Messwerte, da von ihm die Überfahrtgeschwindigkeiten beeinflusst werden. Durch die hohe Anzahl an Datensätzen kann dagegen mittels der kontinuierlichen Überwachung sichtbar gemacht werden, dass einige Fehlstellen an Bedarfsampeln tagsüber nicht relevant sind, nachts jedoch mit höheren Geschwindigkeiten überfahren werden und starke Beschleunigungen hervorrufen.

Im Folgenden werden die Datenpunkte eines zusammengehörigen Datenclusters auf einem Luftbild dargestellt. Es handelt sich hierbei um Riffel an einer Brems- und Beschleunigungsstelle auf einer Brücke.

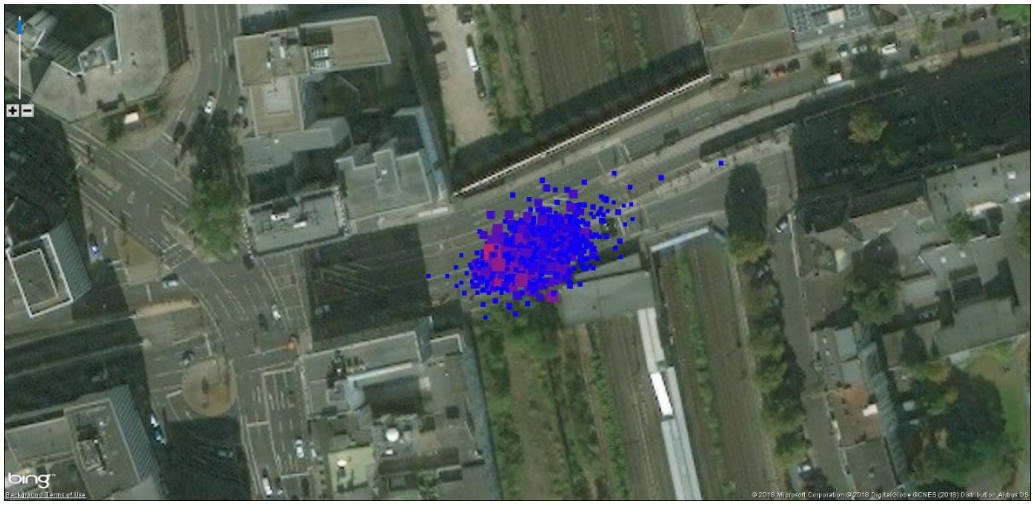

Abbildung 5: Datencluster einer Riffelstelle

Blaue, kleine Punkte entsprechen niedrigen, rote, große Punkte starken Fehlstellen. Lokale Abweichungen resultieren aus unterschiedlichen Überfahrtgeschwindigkeiten. Eine Lokalisierung der Fehlstellen ist reproduzierbar möglich, die Anzahl der im Laufe der zwei Jahre gesammelten Datenpunkte beträgt hier über 4500. Die Zusammenfassung zu Datenclustern erfolgt im System automatisch. Somit können zeitliche Trends der Entwicklung innerhalb dieser Cluster sichtbar gemacht werden. Den zeitlichen Trend innerhalb dieses Clusters zeigt folgende Abbildung.

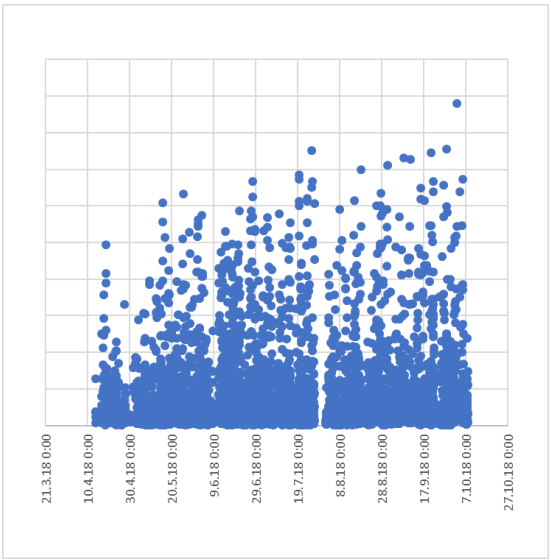

Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Fehlstellenstärke über die Zeit

Die hier dargestellte Fehlstelle wurde über die Zeit nicht bearbeitet, da die Grenzwerte zur Pflege nicht überschritten wurden. Es ist ein negativer Trend über den Zeitraum von sechs Monaten erkennbar, die Wartung kann somit eingeplant werden.

Die ermittelten Daten können zur Überprüfung vorhandener Auslegungsrichtlinien herangezogen werden. In der Schrift des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Nr. 152 – „Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen nach BOStrab“ (Jahr 1992) werden anzunehmende Beschleunigungswerte für verschiedene Komponenten von Stadt- und U-Bahnen angegeben [4]. Diese Daten basieren auf Messfahrten im Netz mehrerer deutscher Verkehrsunternehmen und sollen hier als Referenzwerte dienen.

Tabelle 6: Vergleich maximal gemessener Beschleunigungsamplituden

Maximale Beschleunigungsamplitude (Radsatz [m/s²])			
	Stadtbahn (VDV)	U-Bahn (VDV)	Gemessen (i4M)
Kreuzungsfahrt	87,2 bei 30 km/h	82,9 bei 30 km/h	1028 bei 24 km/h
Weichenfahrt	67,5 bei 50 km/h	89,9 bei 60 km/h	
Rollvorgang	29,1 bei 50 km/h	27,0 bei 60 km/h	591 bei 26 km/h

Die über einen Zeitraum von zwei Jahren gemessenen Ereignisse mit maximalen Beschleunigungen gemessen am Radsatz übersteigen die im Jahr 1992 veröffentlichten Werte bei Kreuzungs- und Weichenfahrt um mehr als das Zehnfache, beim Rollvorgang (über Gleisfehlstellen) um mehr als das Zwanzigfache. Ein Kollektiv der maximalen Beschleunigungen ist in folgender Abbildung dargestellt.

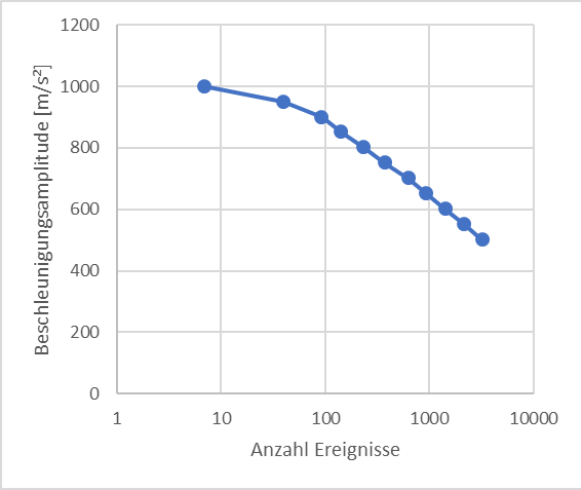

Abbildung 7: Kollektiv der gemessenen Ereignisse mit Beschleunigungsamplituden über 500 m/s²

Im Vergleich zur VDV Schrift sechsfach höhere Werte wurden im Messzeitraum von zwei Jahren mehr als zweitausendmal gemessen. Diese immensen Unterschiede zwischen den Messungen im Jahr 1992 und den aktuellen Messungen mit unserem System können folgende Gründe haben:

- Installation des Systems an modernen Niederflurfahrzeugen (Stadt- und Stra-ßenbahn) im Vergleich zu den Messungen an hochflurigen Fahrzeugen (Stadt- und U-Bahn) im Jahr 1992
- Deutlich bessere Gleispflege im Jahr 1992, Installation unseres Systems nach jahrelangen Einsparungen bei der Gleispflege
- Deutlich längerer Messzeitraum im Vergleich zu den Messungen im Jahr 1992 und dadurch geringere statistische Unsicherheit bei der Aufnahme von Ereignissen der täglichen Praxis

Da diese hohen Werte reproduzierbar gemessen wurden, ist eine Anpassung der Auslegungsvorschriften (VDV) anzuraten. Zusätzlich sollten explizit die bei der Überrollung von Gleisfehlstellen hervorgerufenen Beschleunigungen mit in die Vorschriften aufgenommen werden, da diese Ereignisse in der Praxis häufig anzutreffen sind.

Aufgrund negativer Erfahrungen der Betreiber mit einem erhöhten Wartungsbedarf schnell alternder Fahrzeuge werden gegenwärtig vermehrt umfangreiche und langandauernde Messfahrten im Erwerbsprozess von Neufahrzeugen gefordert, die zu einer faktischen Abänderung der Auslegungsvorschriften für jeden einzelnen Kunden führen.

5 Zusammenfassung

Es wird ein Beispiel für den sinnvollen Einsatz der Digitalisierung im Bereich des schienengebundenen Nahverkehrs geliefert: Die kontinuierliche Überwachung des Gleiszustandes mittels Beschleunigungsanalyse an mehreren im Normalbetrieb befindlichen Fahrzeugen. Mittels dieses Überwachungssystems ist die fokussierte Instandhaltung der Gleisinfrastruktur möglich: Sich entwickelnde Gleisfehlstellen werden identifiziert und können vor einer Grenzwerte überschreitenden Belastung von Anwohnern und Fahrzeugen beseitigt werden. Das teure, prophylaktische Schleifen des gesamten Gleisnetzes wird vermieden, Kosten werden eingespart.

Die Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb des Systems zeigen, dass die gemessenen Beschleunigungen mehrfach über den in einschlägiger Literatur zur Auslegung von Fahrzeugen des Schienennahverkehrs angegebenen Werten liegen. Es ist zu empfehlen, die Auslegungsrichtlinien an aktuell verwendete Fahrzeuge und in deutschen Nahverkehrsgleisnetzen übliche Infrastrukturzustände anzupassen. Den Betreibern wird empfohlen, Neufahrzeuge nur nach Messfahrten im eigenen Gleisnetz und Einbringung der gemessenen Werte in das Lastenheft zu erwerben.

Literatur

[1] Fendrich, L.: *Handbuch der Eisenbahninfrastruktur*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007

[2] Lichtberger, B.: *Handbuch Gleis - Unterbau; Oberbau; Instandhaltung; Wirtschaftlichkeit,* DVV Media Group GmbH I Eurailpress, Hamburg, 2010

[3] Meywerk, M.: *Riffelbildung auf Schienen mit orts- und zeitabhängigen Verschleißkoeffizienten,* In: Technische Mechanik, Band 18, S. 95 – 105, Magdeburger Verein für Technische Mechanik e.V., Magdeburg, 1998

[4] Bugarcic, H.: *Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen nach BOStrab,* Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln, 1992

Autoren

Noll, Martin-Christopher

Martin-Christopher Noll ist Gründer und geschäftsführender Gesellschafter der i4M technologies GmbH.

Nach einem Maschinenbau-Diplomstudium an der RWTH Aachen mit Auslandsaufenthalt an der University of Delaware, USA begann er 2013 eine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen (IME). Dort bearbeitete er zahlreiche Projekte mit messtechnischem Hintergrund, z.B. zum Einsatz neuer Sensoren in Condition-Monitoring-Systemen (CMS) von Windenergieanlagen sowie zur Betriebslastmessung an Bahnsystemen. Von 2015 bis 2017 war er Mitarbeiter am neu gegründeten Chair for Wind Power Drives der RWTH Aachen (CWD) und beschäftigte sich dort mit antriebstechnischen Fragestellungen im Bereich der Windenergieforschung.

Durch seine Tätigkeiten erwarb er vertiefte Kenntnisse der Schwingungsmesstechnik, der experimentellen Spannungsanalyse, der Signalübertragung und -Wandlung sowie der zielgerichteten Analyse großer Messdatenmengen.

Im Jahr 2016 gründete er gemeinsam mit Teilen der Institutsleitung von IME und CWD die i4M technologies GmbH.