

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

Optimierung der Instandhaltung von Straßenbahngleisen durch eine intelli- gente Überwachung mittels Smartphone- Sensorik

Leibner, Philipp¹; Stübinger, Lukas²; Hempel, Thomas²;
Wolf, Lothar³; Schindler, Christian¹

¹ Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme,
RWTH Aachen University

² Siemens Mobility GmbH

³ Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH

Thematischer Schwerpunkt: Eisenbahninfrastrukturmanagement: Fehlerana-
lyse und -vermeidung

Vortragssprache: Deutsch

Vortragende: Thomas Hempel und Philipp Leibner

Keywords: Data Analytics, Datafusion, Eisenbahninfrastruktur, Fahrgastkomfort, Gleis-
lagemessung, Mobile Anwendung, Monitoring, Smartphone-Sensorik, Track Monitoring

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

1 Einleitung

Durch den wachsenden Bedarf an Schienenverkehrsleistungen aufgrund der angestrebten Verkehrswende ist mit einer steigenden Belastung der Gleisinfrastrukturen und einem damit einhergehenden erhöhten Inspektions- und Instandhaltungsaufwand zu rechnen. Dezierte Maßnahmen zur Inspektion und Prüfung (z.B. visuelle Inspektion mittels Begehung, technische Inspektion mit manuellen Messgeräten oder mit speziellen Messfahrzeugen) stehen dabei oftmals im Konflikt zur Zielsetzung der Infrastrukturbetreiber: die Maximierung der Netzverfügbarkeit, um die größtmögliche Menge an Passagieren oder Fracht auf der vorhandenen Infrastruktur zu transportieren.

Bis dato werden Inspektionsdaten und generierte Messwerte häufig nur in längerfristigen Zyklen aktualisiert (bspw. zwei Mal im Jahr im Rahmen einer Regelinspektion). Gleichzeitig handelt es sich dabei oft um manuelle und langsame Prozesse. Potenziell gefährliche Zustände (z.B. Veränderungen in der Längshöhe) werden teilweise erst mit größerem Zeitversatz erkannt oder Anzeichen aufgrund fehlender Datenbasis übersehen [1]. Ferner wird durch eine gesonderte Inspektion oftmals die Verfügbarkeit der Strecke (planmäßig) reduziert (z.B. Langsamfahrstelle) oder zeitlich sehr begrenzte reguläre Sperrpausen (z.B. nachts) für Inspektion, statt für etwaige Instandsetzung genutzt.

Lösungen, basierend auf regelmäßigem Daten- und Informationsfluss zur systematischen, hochauflösenden Überwachung der Bahninfrastruktur vom Fahrzeug aus, können hier Abhilfe schaffen. Sie ermöglichen eine Überwachung mit Betriebsgeschwindigkeit, führen nicht zu Einbußen der Streckenverfügbarkeit, minimieren den Aufenthalt von Personal im Gleisbereich und bieten eine verbesserte, strukturierte Basis zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen.

Drei Partner, das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) der RWTH Aachen University, die Siemens Mobility GmbH, und die Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) bringen ihre vielfältigen Kompetenzen ein, um ein Konzept zur Optimierung der Instandhaltung von Gleisen durch eine intelligente Überwachung mittels Smartphone-Sensorik zu realisieren.

Im folgenden Beitrag wird detailliert auf den Ansatz an sich sowie die konkret erzielten Resultate eingegangen.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

2 Instandhaltungsprozesse im Straßen- und Stadtbahnbereich

Um Betreibern von Straßen- und Stadtbahnnetzen einen Mehrwert zu bieten, muss sich jede potenzielle Infrastrukturmonitoring-Lösung sinnvoll in den in Abbildung 1 gezeigten Instandhaltungsprozess nach der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) [2] eingliedern. Dieser sieht vorschriftsmäßig eine Gleislagemessung mindestens alle 5 Jahre sowie eine zusätzliche jährliche Streckenbesichtigung vor. Im Rahmen der Streckenbesichtigung werden dabei weitere Fehlertypen wie z.B. Schäden an Schienen, Schwellen oder Stößen aufgenommen. Die aufgenommenen Daten werden dabei oftmals in Geoinformationssysteme eingespielt und ggf. weiter zusammengefasst. Sobald Grenzwerte annähernd erreicht werden oder der Gesamtzustand als nicht ausreichend gut erachtet wird, werden entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen. Die Planung erweist sich dabei oftmals komplex, da Baumaßnahmen vorzugsweise gebündelt durchgeführt werden und oftmals eine Verzahnung der Strecken mit weiterer städtischer Infrastruktur vorliegt.



Abbildung 1: Bestehender Instandhaltungsprozess des Oberbaus im BOStrab-Bereich.

Aufgrund des demografischen Wandels und allgemeinen Fachkräftemangels sowie dem Bestreben, mehr Verkehrsleistungen zu erbringen, wird es zunehmend herausfordernder für Betreiber, die geforderten Intervalle zur Streckenbesichtigung und Gleislagemessung einzuhalten. Dies gilt insbesondere für Betreiber großer Netze. Um die geforderte Oberbauqualität weiterhin halten zu können, muss aus Sicht der Autoren die Streckeninspektion schrittweise bspw. durch den Einsatz von Monitoring-Lösungen automatisiert werden. Dabei ist klar, dass ein Mehrwert nur gegeben ist, wenn durch den Einsatz einer Monitoring-Lösung schlussendlich weniger Inspektionspersonal bzw. Zeitaufwand für dieselben Prüfaspekte erforderlich ist oder mit dem bestehenden Personal eine höhere Oberbauqualität erreicht werden kann. Problematisch ist dabei, dass Monitoring-Lösungen oftmals nicht ganz an die Genauigkeit der Ergebnisse von geprüften Messmitteln (bspw. Gleismesszüge) herankommen, so dass Betreiber weiterhin zu vorliegenden Mitteln und Verfahren greifen, um den bestehenden Vorschriften zu entsprechen. Dies verkennt den Vorteil von Infrastrukturmonitoring-Lösungen, welche tagesaktuell ein Abbild des Zustands liefern können und so frühzeitig auftretende Schäden entdecken und ggf.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

prognostizieren können. Eine frühzeitige Schadenserkennung kann dabei zu niedrigeren Kosten zur Behebung des Schadens führen. Gleichzeitig kann vermieden werden, dass Streckenabschnitte, welche sich ohnehin in einem guten Zustand befinden, unnötig oft vermessen werden. Ein zukünftiger Instandhaltungsprozess könnte daher nach Meinung der Autoren wie in Abbildung 2 dargestellt aussehen. Hierbei wird das Netz kontinuierlich durch eine Monitoring-Lösung überwacht. Der Einsatz von Inspektionspersonal und Messmitteln findet nur noch punktuell, aber zielgerichtet, statt. Beispielsweise wenn die Monitoring-Lösung einen Schaden anzeigt, aber nicht detailliert vermessen kann. Außerdem wird es auch in Zukunft noch Schadenstypen geben, welche unter Umständen nur lokal mit bestimmten Messmitteln erfasst werden können, wie z.B. Risse in Schwellen.



Abbildung 2: Vorgeschlagener verbesserter Instandhaltungsprozess durch den Einsatz von Infrastrukturmonitoring-Lösungen.

Die Planung der Instandhaltungsmaßnahmen kann darauf aufbauend digital und optimiert ausgeführt werden, in dem die Monitoring-Lösung vorschlägt, in welchen Streckenabschnitten wann und welche Maßnahmen durchgeführt werden sollten.

3 Gleislagemessungen im Straßenbahnbereich

Laut BOStrab ist das Gleis stets in einem Zustand zu halten, in dem eine sichere Spurführung sowie größtmögliche Laufruhe gegeben ist. Insbesondere bedeutet dies, dass mitunter die Gleisanlagen mindestens alle fünf Jahre einer entsprechenden Inspektion zu unterziehen sind. Wobei auch häufigere Inspektionen bei größeren Belastungen vorzusehen sind. Eine Dokumentation über die durchgeführte Wartung muss vorgehalten werden. Dies muss bis zur nächsten Inspektion (oder mindestens drei Jahre) berücksichtigt werden. [2]

Die BOStrab schafft damit den Rahmen, in dem sich Straßenbahnbetreiber bewegen und ihre Instandhaltungsaktivitäten organisieren und durchführen. Das Gesetz lässt es jedoch offen, wie die Nachweiserbringung im Detail auszusehen hat. Aus diesem Grund greifen Betreiber häufig auf Normen (z.B. DIN EN 13848 [3]) oder eigens erstellte interne Richtlinien (z.B. DB Ril. 821 [4] oder die VDV-Schrift 600 [5]) zurück, die die wesentlichen Parameter des Gleises beschreiben und Eingriffsgrenzen definieren. Die gängigen

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

Prüfgrößen in Bezug auf die Gleisgeometrie sind dabei die Längshöhe, gegenseitige Höhenlage, Verwindung, Pfeilhöhe und Spurweite.

Bei der VGF wird die Inspektion der Gleise, insbesondere für die Gleislage, die ein wichtiger Parameter für den sicheren Betrieb ist, hauptsächlich manuell durchgeführt. Dabei werden die Strecken begangen und in etwa einmal jährlich auch mit einem Gleislagemesssystem aufgezeichnet. Das Messgerät wird dabei von zwei Personen über die Strecke geschoben, um die obigen genannten Prüfgrößen zu erfassen. Somit wird der Sicherheitsnachweis häufiger – als in der BOStrab gefordert – erbracht. Auf diese Weise kann die VGF frühzeitig Instandhaltungsbedarfe aufdecken, einplanen und durchführen.

Bisher kommt eine qualitative Bewertung des Zustandes gemäß der DIN EN 13848-6 [6] oder durch ein Schulnotensystem bei der VGF noch nicht zum Einsatz. Dieser Bewertungsansatz könnte aber eine weitere Möglichkeit der Überwachung darstellen. Dies könnte die Erstellung eines detaillierten Arbeitsplans für die Gleisinstandhaltung ermöglichen. Eine weitere Größe, welche auch mit in eine qualitative und fortgeschrittene Betrachtung einfließen kann, ist der Schwingkomfort für Passagiere, dessen Bewertung normativ in der DIN EN 12299 [7] definiert ist. Dieser ist zwar nicht allein bestimmend für die Gleislagequalität, jedoch kann der Schwingkomfort als zusätzliche notenbasierte Indikation dienen. Das Wohlbefinden der Passagiere kann durch die Berücksichtigung des Schwingkomforts bei der Planung der Instandhaltungsaktivitäten mit einfließen und somit die Attraktivität des Nahverkehrs noch weiter steigern.

Um die Größen aus den vorgestellten Richtlinien und Normen möglichst nahe an der Betriebssituation zu bestimmen und mögliche Sperrzeiten für die manuelle Inspektion zu vermeiden, verfolgt der nachfolgende Ansatz mittels Smartphone-Messung eine Aufnahme von Daten in einem Regelfahrzeug. Dies ermöglicht es, das reale Fahrzeugverhalten und -belastung mit in die Messung einzubeziehen. Es wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, innerhalb der gesetzlichen Fristen auf eine kontinuierliche Überwachung überzugehen, die keinen Einfluss auf den Betrieb hat und zudem das Gleis in einem belasteten Zustand vermisst. Auch die internen Richtlinien können dadurch zum einen qualitativ verbessert und zum anderen bezüglich möglicher Fristenstreckung überprüft werden, damit der manuelle Aufwand reduziert wird. Folglich sind Messungen mit speziellen Geräten nur noch bedarfsorientiert durchzuführen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Kombination der Ergebnisse genauso verlässlich ist, wie die Empfehlungen des konventionellen Gleislagemesssystems.

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

4 Gleislagemonitoring via Smartphone App

In den letzten Jahren gab es im Bahnumfeld einige Versuche, Beschleunigungssensoren von Smartphones zur Zustandsüberwachung im Bahnumfeld zu befähigen [8, 9]. Auch Siemens Mobility hat in diesem Bereich eine Lösung entwickelt. Mit der Track Monitoring Smartphone App wurde ein einfacher Ansatz zur Datenaufzeichnung und -auswertung entwickelt [10]. Die App kann dabei vom Fahrpersonal vor Fahrtantritt mit nur wenigen Klicks initialisiert werden und zeichnet während des regulären Betriebs im Fahrerstand Daten auf. Somit werden keine zusätzlichen Trassenkapazitäten gebunden.

Die Weiterentwicklung der Track Monitoring Smartphone-App zielt daher darauf ab, einen kontinuierlichen Einblick in die Infrastruktur hinsichtlich der Gleislage zu ermöglichen, so dass das Inspektionspersonal nur noch punktuell Messungen durchführen muss und sich auf andere Aspekte der Streckenbegehung fokussieren kann. Hierzu wird zunächst nur der Längshöhenfehler betrachtet, da dieser maßgeblich ist für einen sicheren Betrieb. Zudem lässt sich dieser Parameter auch verglichen mit den anderen Gleislagefehlern am einfachsten aus den Smartphone-Messdaten bestimmen. Mittels der bereits bestehenden Fahrkomfortanalyse kann darüber hinaus noch die Effektivität einer Instandhaltungsmaßnahme hinsichtlich des Schwingkomforts durch einen Vorher-Nachher-Vergleich bewertet werden.

Ebenfalls in diesem Umfeld hat das IFS die Nutzbarkeit der Smartphone-Sensorik demonstriert. Im Rahmen des mFUND Projekts Smartphone-based Rail Data Acquisition (SPRaDA) wurde gezeigt, dass die Sensoren im nötigen Frequenzbereich zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefern, sodass diese für die Bewertung des Gleiszustandes herangezogen werden können. [11]

Als nächsten Schritt zur Bestimmung des Zustandes der Gleise wurden noch weitere Untersuchungen durch die Siemens Mobility und das IFS durchgeführt. Dabei wurde die Machbarkeit zur Ermittlung der vertikalen Gleislage untersucht und demonstriert. Die Ergebnisse sind vielversprechend, sodass in dem vorliegenden Ansatz eine ausführlichere Untersuchung zusammen mit der VGF durchgeführt wurde. Dabei werden sowohl die Erfahrungswerte aus der Praxis miteinbezogen als auch Messsysteme der VGF zur Validierung.

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

4.1 Herstellung eines skalierbaren Ansatzes

Um eine 100-prozentige Verfügbarkeit der Strecke zu erreichen, ist es u. a. erforderlich, kontinuierlich in die aktuellen Zustände der Gleisanlagen Einblick zu haben. Dabei wird im nachfolgenden Ansatz auf die Application Suite Railigent X[®] von Siemens Mobility zurückgegriffen.

Railigent X[®] ist eine Cloud-basierte IoT-Plattform, die Zustands- und Diagnosedaten von Bahnanlagen sammelt, normalisiert, verknüpft und mit Hilfe von analytischen Methoden (u.a. Algorithmen oder Künstliche Intelligenz-Modelle) zu virtuellen Abbildungen der Anlagen, sogenannten digitalen Zwillingen, aufwertet. Diese ermöglichen konkrete Handlungsempfehlungen für einen optimierten Betrieb und Instandhaltung der Bahnanlagen, welche wiederum zu schnelleren korrektiven, zustandsorientierten und präventiven Maßnahmen führen.

Die Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) hat hierfür im Bereich der Gleisinspektion und -vermessung ihre Erfahrungen geteilt und Optimierungspotenziale aufgezeigt. Das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen University bringt tiefgreifende Kenntnisse im Bereich der Simulation und Modellierung des Fahrzeugverhaltens mit. Wesentliches Fahrzeug Know-how sowie das Verständnis zur Modularisierung und skalierten Verbreitung von Analysen auf Railigent X[®] bringt die Siemens Mobility GmbH mit. Bei der Entwicklung einer neuartigen Gleisüberwachung werden all jene aufgeführten Kompetenzen benötigt. Dadurch ist sichergestellt, dass die Nutzbarkeit des Ansatzes für die VGF gegeben ist und die Ergebnisse auch dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Ohne eine Zusammenführung der Partner wäre es nur schwer möglich gewesen, die praktischen Erfahrungen aus dem Betrieb in Abgleich mit dem aktuellen Stand der Forschung zu bringen und letzten Endes in einen skalierbaren Ansatz zu überführen.

4.2 Datenaufnahme und -Verarbeitung

Die Datenaufnahme wird mittels der Track Monitoring Smartphone-App selbstständig durch das Fahrpersonal vor Fahrtantritt mittels weniger Klicks initiiert. Hierzu wird das Smartphone im Bereich des Fahrerstands auf einer vorher definierten Position platziert und die Datenaufnahme gestartet. Zu Beginn der Datenaufnahme wird außerdem eingegeben, in welchem Fahrzeug und an welcher Position innerhalb des Fahrzeugs das Smartphone platziert ist. Nach Beenden der Messung kann diese per Knopfdruck nach Railigent X[®] zur Verarbeitung hochgeladen werden.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Das Festlegen einer definierten Messposition im Vorfeld ist wichtig, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten, da sich die gemessenen Vibrationen je nach Messposition signifikant unterscheiden können. Die Ursachen hiervon sind vielfältig, als Haupteinflüsse sind zu nennen:

- **Starrkörperbewegungen:** Dadurch, dass der Wagenkasten sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen durchführt, kann je nach Messposition eine zusätzliche Winkelbeschleunigung auf den Sensor wirken.
- **Fahrzeugfederung:** Die in der Regel zweistufig ausgeführte Fahrzeugfederung beeinflusst die Wagenkastenbeschleunigung signifikant und reduziert insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten die zu erwartenden Beschleunigungsamplituden.
- **Eigenmoden der Fahrzeugstruktur:** Die elastischen Eigenschaften der Fahrzeugstruktur- und Komponenten können zu weiteren Schwingungen führen, welche die Messung beeinflussen.
- **Vibrationseigenschaften weiterer Fahrzeugkomponenten:** In den meisten Fahrzeugen finden sich sowohl vibrationsdämpfende Komponenten (bspw. das Fahrerpult, Tische, Ablagen o.Ä.) als auch Vibration erzeugende Komponenten (bspw. Lüfter, Kompressoren o.Ä.), welche die Messung stören können.

Der Auswertalgorithmus kann einen Teil dieser Einflüsse in die Verarbeitung miteinbeziehen bzw. durch geschickte Wahl von Hoch- und Tiefpassfiltern vermindern. Anspruchsvoll ist dabei der Umgang mit dem Einfluss der Fahrzeugfederung, welcher sich insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bemerkbar macht. Da Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge aber in der Regel selten schneller als 70 km/h fahren und daher die Fahrzeugfederung einen geringeren Einfluss hat, kann der Wagenkasten näherungsweise als starr vertikal über die Schiene fahrend betrachtet werden, so dass sich eine Schätzung des Längshöhenfehlers LL als Funktion des Weges s wie folgt angenommen wird:

$$\widehat{LL}(s) = \iint \frac{z''_{WK,BP(s)}}{v^2} ds.$$

Hierbei ist $z''_{WK,BP(s)}$ die vertikale bandpass-gefilterte Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten und v die Fahrzeuggeschwindigkeit. Dieser Ansatz ist insbesondere für eher steif ausgelegte Fahrwerke gut geeignet. Für höhere Fahrgeschwindigkeiten oder Fahrzeuge mit sehr weicher Federung ist dieser Ansatz allerdings nicht geeignet, da hier die Fahrzeugfederung das Signal bereits zu sehr verzerrt.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

5 Ergebnisse

Zur Bewertung der Genauigkeit der entwickelten Track Monitoring Smartphone-App wurden Messungen auf verschiedenen Streckenabschnitten bei der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) durchgeführt. Gemessen wurde im Stadtbahnnetz durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei ein Fahrzeug des Typs „U5“. Die Fahrzeuge ähneln hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Fahrdynamik Straßenbahnfahrzeugen. Zur Validierung bzw. Genauigkeitsbewertung der Smartphone-Messung wurden außerdem Messdaten eines zertifizierten, handgeschobenen Gleislagemesssystems zur Verfügung gestellt. Zur Bewertung wurde die DIN EN 13848-2 [12] herangezogen, welche unter anderem ein Verfahren zur Validierung eines neuen Gleislagemesssystems aufzeigt. Hieran angelehnt wurde die Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit sowie Übertragungsfunktion bestimmt. Zu beachten ist, dass die Track Monitoring Smartphone-App eine Monitoring-Lösung und kein Gleismesssystem darstellt, und daher nicht den Anforderungen der Norm genügen muss.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für einen 100 m langen Streckenabschnitt für verschiedene Smartphones und Fahrzeuggeschwindigkeiten im Vergleich zu den Messergebnissen eines handgeschobenen zertifizierten Gleislagemesssystems (Referenzsystem). Er-sichtlich ist, dass der Verlauf des vertikalen Gleislagefehlers unter allen Bedingungen den Ergebnissen des Referenzsystems qualitativ nahekommt, aber nicht 100-prozentig übereinstimmt.

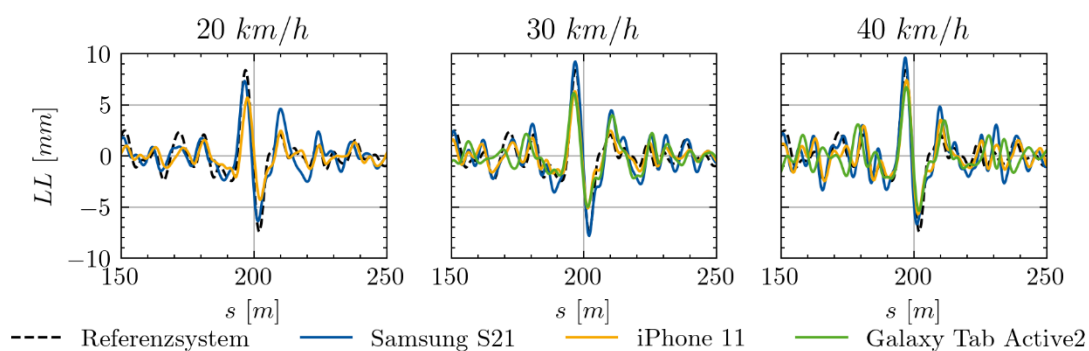


Abbildung 3: Gemessener Längshöhenfehler für verschiedene Geräte und Fahrzeuggeschwindigkeiten im Vergleich zum handgeschobenen Gleislagemesssystem.

Zu beachten ist, dass die zurückgelegte Wegstrecke bei beiden Systemen über das GPS-Signal gemessen wurde und daher fehlerbehaftet ist, so dass Spitzenwerte ggf. nicht direkt übereinander liegen. Daher wurde der Dynamic-Time-Warping-Algorithmus [13] für die weiteren Analysen angewendet. Dieser findet zwischen zwei verzerrten Signalen durch lokale Stauchung und Streckung ein optimales Mapping, so dass darauf aufbauend

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Distanzmaße wie z.B. absolute Differenzen berechnet werden können. Der Algorithmus sucht dafür den „kostengünstigsten“ Weg zwischen einer „Sollfolge“ und „Istfolge“ auf Basis von paarweisen Vergleichen der Wertepaare beider Folgen. Der Einsatz dieses Algorithmus wurde in Bezug auf Gleislagemessungen in [14] ausgiebig untersucht.

In Anlehnung an die DIN EN 13848-2 wurde zunächst die Wiederholbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen (in diesem Fall Messposition und Fahrgeschwindigkeit) ausgewertet. Die Norm gibt hierfür den Grenzwert als 95. Perzentil der Verteilung der absoluten Differenzen zwischen zwei Messungen an. Die Auswertung ist in Abbildung 4 in Form von Boxplots dargestellt. Als „Whisker“ sind hier als 5. bzw. 95. Perzentil definiert, so dass ein Vergleich der einzelnen identischen Fahrten mit dem Grenzwert von 0,5 mm möglich ist. Die Abbildung zeigt, dass eine Wiederholbarkeit innerhalb des Grenzwerts für nahezu alle Versuche gegeben ist.

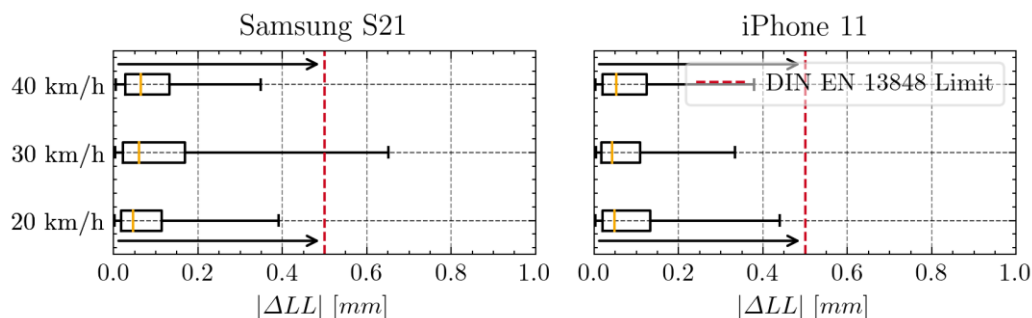


Abbildung 4: Wiederholbarkeit der Ergebnisse für gleiche Versuchsbedingungen. Darstellung in Form der Verteilung der absoluten Differenzen als Boxplots.

Ebenfalls ausgewertet wurde die Reproduzierbarkeit, um zu untersuchen, inwiefern unterschiedliche Versuchsbedingungen sich auf die Ergebnisse auswirken. In diesem Fall wurden die Resultate für 20 und 40 km/h verglichen. Die zugehörigen Boxplots sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Grenzwert liegt hier bei 0,8 mm. Wie zu erkennen ist, liegen die Ergebnisse teils über dem Grenzwert.

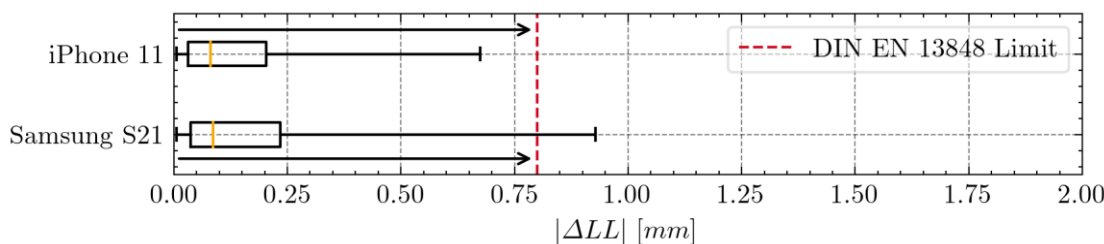


Abbildung 5: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse für unterschiedliche Versuchsbedingungen (20 km/h und 40 km/h).

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Auf eine ähnliche Art und Weise wurde auch ein Vergleich mit den Messdaten des handgeschobenen Messsystems durchgeführt. Hierzu wurden Versuche auf zwei verschiedenen Streckenabschnitten, für welche Referenzdaten vorlagen, durchgeführt. In diesem Fall wurden keine konstanten Geschwindigkeiten gefahren, sondern im Fahrgastbetrieb auftretende Fahrprofile. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt und zeigen ebenfalls, dass die Ergebnisse der Track Monitoring Smartphone-App nah an den geforderten Grenzwert von 0,8 mm kommen. Lediglich 5 % der absoluten Differenzen zwischen den Messpunkten zeigen eine Abweichung von mehr als 2 bis 3 mm.

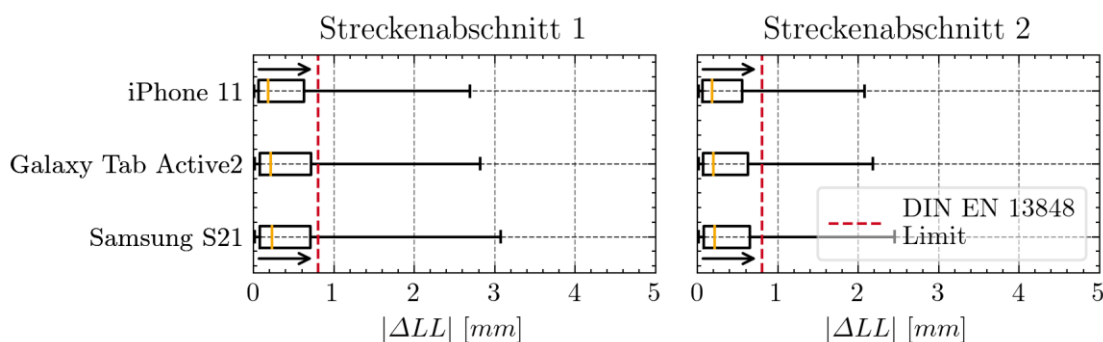


Abbildung 6: Verteilung der absoluten Differenzen zwischen Smartphone- und Referenzsystemmessungen als Boxplots für zwei verschiedene Streckenabschnitte.

Abschließend wurde noch auf Basis dieser Daten die Übertragungsfunktion zwischen Gleislagemesssystem und Smartphones bestimmt. Die Übertragungsfunktion gibt Aufschluss, inwiefern die unterschiedlichen Wellenlängen des Gleislagefehlers durch das Auswerteverfahren verstärkt oder gedämpft werden. Wie in Abbildung 7 ersichtlich wird, tritt hauptsächlich eine Dämpfung der Wellenlängen im D1 Bereich (3 m – 25 m) auf, insbesondere bei den niedrigeren Wellenlängen. Dies lässt sich auf den Einfluss der Fahrzeugfederung zurückführen, welche die zugehörigen höheren Frequenzen aus der Gleislagestörung stärker dämpft. Da nicht genau bekannt ist, inwiefern das Referenzsystem selbst durch das Sehnemessverfahren und ein etwaiges Entzerrungsverfahren eine ausgeprägte Übertragungsfunktion mit einbringt, ist zusätzlicher Einfluss hierdurch denkbar.

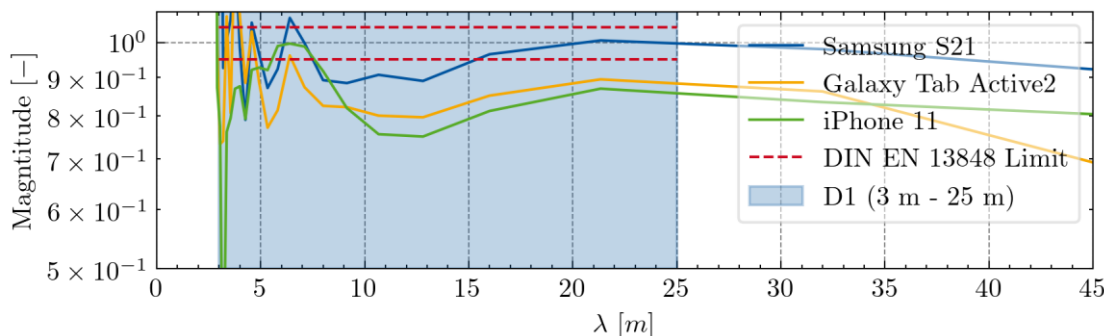


Abbildung 7: Übertragungsfunktion zwischen Referenzsystem und mobilem Endgerät.

*Session 13**Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler*

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Validierung mit dem Referenzsystem zeigen insgesamt einen hohen Übereinstimmungsgrad, welcher die Nutzbarkeit von Smartphones für das Monitoring des Gleislängshöhenfehlers im Straßen- und Stadtbahnbereich bestätigt. Das entwickelte Verfahren ist dazu in der Lage, den Längshöhenfehler bis auf wenige Ausnahmen mit einer Genauigkeit von zwei bis drei Millimetern zu ermitteln und eine Wiederholbarkeit sowie Reproduzierbarkeit unweit von den normativen Grenzen für professionelle Gleismesssysteme zu ermöglichen.

Zusammen mit der Application Suite Railigent X® kann so in kurzer Zeit eine minimal-invasive Gleismonitoring-Lösung aufgesetzt werden, die dem Betreiber ein tagesaktuelles Bild seines Gleisinfrastrukturzustands liefern kann. Durch die Nutzung der Track Monitoring Smartphone-App kann der zeit- und kostenintensive Einsatz von Messfahrzeugen verringert werden und damit der direkte Aufenthalt von Inspektionspersonal im Gleisbett minimiert werden. Durch die Nutzung von Smartphones (oder Tablets) wird außerdem keinerlei Genehmigung von technischen Aufsichtsbehörden benötigt, da das Fahrzeug an sich, im Gegensatz zu einigen vergleichbaren Lösungen, unberührt bleibt.

Die Analyseverfahren sollen in Zukunft noch weiterentwickelt werden. Hierzu gehört z.B. die Auswertung von Track Quality Classes (TQC) und weiterer typischer Fehlerbilder im Gleisumfeld, wie z.B. die Detektion von Riffeln oder Schienenbrüchen. Ebenfalls angestrebt wird eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Erkennung von Überhöhungs- bzw. Verwindungsfehlern, die aufgrund der Eigenschaften der Fahrzeugfederung bzw. des Smartphone-Setups nur indirekt zu detektieren sind, aber ebenso wichtig sind für den Inspektions- und Instandhaltungsprozess.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

7 Literatur

- [1] SHAFIQUE, Rahman ; SIDDIQUI, Hafeez-Ur-Rehman ; RUSTAM, Furqan ; ULLAH, Saleem ; SIDDIQUE, Muhammad Abubakar ; LEE, Ernesto ; ASHRAF, Imran ; DUDLEY, Sandra: *A Novel Approach to Railway Track Faults Detection Using Acoustic Analysis*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (2021), Nr. 18, S. 6221. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6221>
- [2] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen*
- [3] DIN EN 13848-1:2019-06. Juni 2019. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität*
- [4] DB NETZ AG (Hrsg.): *Richtlinie 821 : Oberbau inspizieren*. München, 2017
- [5] VDV-Schrift. August 2018. *Oberbau-Richtlinien und -Zusatzrichtlinien für Bahnen im Geltungsbereich der BOStrab*
- [6] DIN EN 13848-6:2014+A1:2020. März 2021. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität*
- [7] DIN EN 12299:2009-08. August 2019. *Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste*
- [8] PAIXÃO, André ; FORTUNATO, Eduardo ; CALÇADA, Rui: *Smartphone's Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation Assessment*. In: *Advances in Civil Engineering* 2019 (2019), S. 1–13
- [9] AZZOUG, Adam ; KAEWUNRUEN, Sakdirat: *RideComfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality*. In: *Frontiers in Built Environment* 3 (2017)
- [10] HAUPTVOGEL, Annika ; STÜBINGER, Lukas: *Track Monitoring Smartphone-App : Kostengünstige, minimalinvasive und mobile Überwachung des Bahninfrastrukturzustandes mithilfe von Smartphone-Sensorik*. In: *Der Eisenbahningenieur* (2021), S. 47–49
- [11] LEIBNER, Philipp ; STILLFRIED, Axel von ; SCHINDLER, Christian: *Potential of estimating track irregularities from in-service vehicles using smartphones*. In: *Proceedings of The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*.

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

-
- [12] DIN EN 13848-2:2021-02. Februar 2021. *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleisla-
gequalität*
- [13] Dynamic Time Warping. In: *Information Retrieval for Music and Motion* :
Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 69–84
- [14] KHOSRAVI, Mahdi ; SOLEIMANMEIGOUNI, Iman ; AHMADI, Alireza ; NISSEN, Arne:
*Reducing the positional errors of railway track geometry measurements using
alignment methods: A comparative case study*. In: *Measurement* 178 (2021), S.
109383. URL [https://www.sciencedirect.com/science/arti-
cle/pii/S0263224121003778](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121003778)

Session 13

Philipp Leibner, Lukas Stübinger, Thomas Hempel, Lothar Wolf, Christian Schindler

Autoren**Leibner, Philipp**

Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen bis 2021. Seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen im Bereich Zustandsüberwachung und Digitalisierung in der Schienenfahrzeugtechnik.

**Stübinger, Lukas**

Studium des Maschinenbaus an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2018 bei der Siemens Mobility GmbH im Bereich Customer Services als Projektmanager Service Engineering für die Rail Infrastructure.

**Hempel, Thomas**

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der RWTH bis 2013. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH bis 2017 mit Abschluss Dr.-Ing. Seitdem ist er bei der Siemens Mobility GmbH. Heute leitet er das Service Engineering für die Rail Infrastructure im Customer Service.

**Wolf, Lothar**

Studium Elektrische Energietechnik an der Fachhochschule Gießen-Friedberg bis 1988. Seit 2001 bei der Verkehrsgesellschaft Frankfurt mbH tätig, u.a. im technischen Büro der Zentralwerkstatt. Ab 2018 ist er Mitarbeiter in der Abteilung Systemtechnik und Innovation für Fahrzeugtechnik und Infrastruktur.

**Schindler, Christian**

Christian Schindler studierte Maschinenbau an der RWTH und promovierte zum Thema Schienenfahrzeugdynamik. 2004 wurde er zum Professor für Konstruktion an die TU Kaiserslautern berufen. Seit 2016 leitet er das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.