

Kostengünstige, minimalinvasive und mobile Überwachung des Bahninfrastrukturzustandes mittels Smartphone-Sensorik

Stübinger, Lukas¹; Hampel, Fabian²; Hempel, Thomas¹;
Berijanian, Maryam²; Schindler, Christian²

¹Siemens Mobility GmbH

²Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, RWTH Aachen

Zusammenfassung

Die Bewertung des Zustands der Eisenbahninfrastruktur steht im Mittelpunkt des vorgestellten Forschungsprojekts. Für den vorgestellten *Monitoring*-Ansatz wird ein Smartphone mit einer eigens dafür entwickelten App eingesetzt. Die App ist in der Lage die Smartphone-Sensorik auszulesen, deren Werte abzuspeichern, zu verarbeiten und zu visualisieren. Dabei wurden zuerst drei Anwendungsfälle betrachtet, welche den Nutzen eines Smartphones für die Bewertung der Infrastruktur aufzeigen. Es wird anhand des Anwendungsfalls *Fahrkomfort* anschaulich demonstriert, wie die App zu Fehlervermeidung und -analyse beiträgt. Die einfache Einsetzbarkeit und die fortschreitende Smartphone-Technologie sind die Hauptargumente für die Verwendung von Smartphones. Des Weiteren sollen rudimentäre Aussagen über die Gleislage getroffen werden können und mittels statistischer Methoden die Genauigkeit der Aussagen des Smartphones erhöht werden.

Keywords: Data Analytics, Data Fusion, Eisenbahninfrastruktur, Fahrkomfort, Mobile Anwendung, Monitoring, Smartphone-Sensorik, Track Monitoring

1 Einleitung

Die Eisenbahninfrastruktur und das rollende Material stellen die Hauptkomponenten des Systems Eisenbahn dar. Um eine 100-prozentige Systemverfügbarkeit realisieren zu können, sind regelmäßige Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten von Nöten. Die Kenntnis über den Zustand der einzelnen Komponenten der Infrastruktur, wie Gleise, Weichen oder Oberleitung bildet dabei den Ausgangspunkt für eine effiziente Planung und Durchführung der Instandhaltung [1]. Da Zustandsinformationen in der betrieblichen Realität häufig jedoch gar nicht oder nur sehr grob vorliegen, sehen sich Infrastrukturbetreiber oft dazu gezwungen, die Instandhaltung der Infrastruktur in regelmäßigen und festen Intervallen durchzuführen. Dies führt u. a. zu hohen Kosten und verminderter Verfügbarkeit für den Betrieb [2].

Im Zeitalter des *Internet of Things* und der Digitalisierung ergeben sich heutzutage innovative Möglichkeiten, um mithilfe von Sensor- und Connectivity-Lösungen, sowie Datenanalyse die Wartungszyklen von Infrastrukturkomponenten zu verlängern und die Lebenszykluskosten zu minimieren [3]. Bei Siemens Mobility werden Service-Lösungen hierfür entwickelt, u. a. unterteilt in *Messung* und *Monitoring*:

Während *Messungen* i.d.R. mit speziellen Messzügen oder professionellem, teureren Equipment am Regelzug generiert werden und eine hochgenaue Aussage über den Infrastrukturzustand erbringen, wird mittels *Inspektionen/Monitoring* ein hinreichend genaues Abbild des Zustands ermittelt, um Fristen für aufwändige Messungen zu strecken und damit die Verfügbarkeit der Strecke zu steigern (bei sinkenden Kosten). Eine Möglichkeit in diesem Kontext des *Monitorings* ist die Verwendung von Smartphones. Moderne Geräte sind in der Lage durch die stetig verbesserte, interne Sensorik Daten in großer Anzahl aufzuzeichnen und zu verarbeiten.

Ziel des Ansatzes ist, auf kostengünstige, minimalinvasive und mobile Art den Zustand der Bahninfrastruktur vereinfacht zu messen und zu bewerten und Veränderungen frühzeitig festzustellen. Aus der Analyse der gesammelten Daten werden zukünftig Anomalien der Bahninfrastruktur abgeleitet, welche als Hinweise für eine genauere Fehleranalyse und letztendlich für eine optimierte Instandhaltung herangezogen werden.

2 Technologische Grundlagen des Smartphones

Auf Grund der rasanten technischen Entwicklung avanciert das Smartphone für die meisten Menschen im Alltag zu einem unersetzbaren Begleiter, der in jeder Lebenssituation mit einer passenden App weiterhilft [4]. Die daraus resultierende weite Verbreitung und die verbesserte Rechenleistung von Smartphones ermöglichen es, große Datenmengen in Echtzeit zu verarbeiten. Diese Voraussetzungen prädestinieren das Smartphone auch für eine Verwendung im unternehmerischen Kontext als *Monitoring*-Lösung.

Damit das Smartphone zu einer *Monitoring*-Lösung wird, ist es notwendig alle relevanten verfügbaren internen Daten- und externen Informationsquellen mittels einer App nutzbar zu machen. Im Rahmen der Forschungen wurde ein konkretes Smartphone festgelegt, welches eine genaue und zuverlässige Ortung besitzt. Diese Anforderung an ein Smartphone resultiert aus der Ortsgebundenheit der Bahninfrastruktur. Das ausgewählte Smartphone kann Ortungssignale der Satellitensysteme NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo und Beidou empfangen und damit die Ortungsgenauigkeit gegenüber einem reinen NAVSTAR GPS System erhöhen. Zusätzlich zu weiterer interner Sensorik, welche in *Abbildung 1* dargestellt ist, besitzt das Smartphone eine ausreichend hohe Rechenleistung, welche für die Auswertung der Sensordaten in Echtzeit erforderlich ist. Bei der Einbettung von Quellen für die Analyse werden interne generierte Daten und externe Informationen unterschieden (vgl. *Abbildung 1*). Für den Ansatz wurden drei Anwendungsfälle (*Fahrkomfort, Trip Report, Parameter der Gleisgeometrie*) erarbeitet, für die eine *Monitoring*-Lösung mittels Smartphone in Frage kommt. Die Anwendungsfälle werden in Kap. 3.1 näher beschrieben. Die dafür genutzte Sensorik und die dazugehörigen Aufnahmeraten der Sensoren sind in *Tabelle 1* aufgelistet.

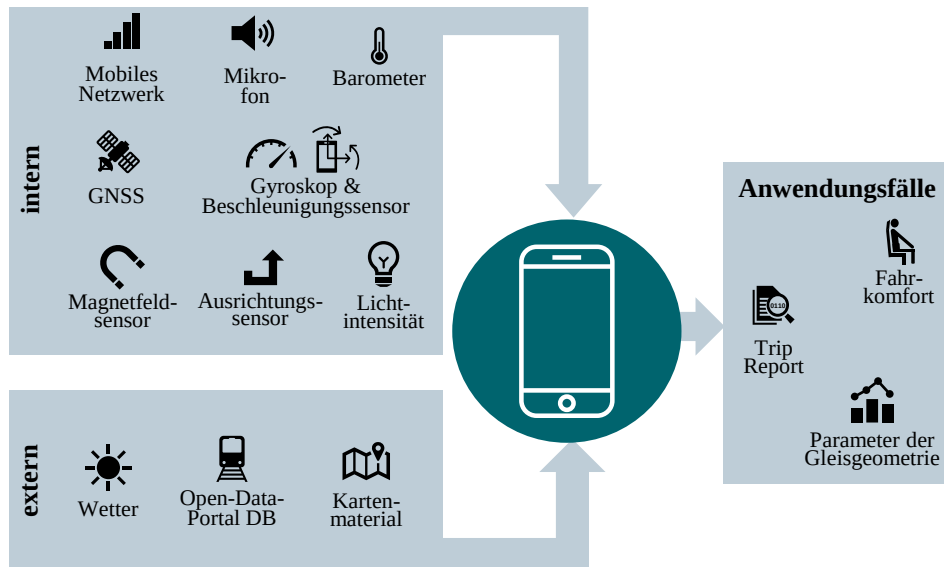


Abbildung 1: Datenquellen für die Analyse der Eisenbahninfrastruktur

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Sensoren des ausgewählten Smartphones

Sensor	Aufnahmerate des Smartphones
Dual-Frequency GNSS-Sensor	1 Hz
Beschleunigungssensor	400 Hz
Gyroskop	400 Hz
Barometer	25 Hz
Mikrofon (Schalldruckpegel)	25 Hz
Magnetfeldsensor	1-100 Hz
Lichtintensität	5-750 Hz
Ausrichtungssensor	100 Hz

Aus analytischer Sicht müssen die Aufzeichnungsraten der Sensoren harmonisiert werden, sodass jedem Messpunkt ein Ort zugewiesen werden kann. Vor allem die Aufnahme der GNSS-Position muss zwischen zwei Messpunkten an die hohen Aufzeichnungsraten der Beschleunigungs- und Gyroskopwerte angepasst werden. Für die Interpolation zwischen zwei GNSS-Messpunkten wird die Geschwindigkeit des Zugs verwendet.

Für den effizienten Einsatz der Daten eines Smartphones zur Erkennung von Fehlern der Infrastruktur ist es häufig notwendig weitere, externe Informationen in das Smartphone zu integrieren. Über eine entsprechende Schnittstelle wird das Kartenmaterial von O-

penStreetMap eingebunden. Wetterinformationen (z.B. Temperatur, Niederschlag), welche den Zustand der Infrastruktur beeinflussen, werden ebenfalls in der App für die Analyse verwendet und zusammen mit den Sensorwerten abgespeichert. Weitere Informationen über die Infrastruktur können über das Open-Data-Portal der Deutschen Bahn gewonnen werden (Deutsche Bahn Open Data). Die Kombination von internen und externen Informationsquellen lässt im Anschluss an die Verarbeitung eine genauere Aussage über einen potenziellen Fehler an der Infrastruktur zu.

3 Vorgestellter Ansatz zur Nutzung des Smartphones

3.1 Zielstellung

Die entwickelte App ist in der Lage, alle für den geplanten Anwendungsfall notwendigen Sensorwerte des Smartphones auszulesen, abzuspeichern, zu verarbeiten und zu visualisieren. Die interne Sensorik wird noch um externe Informationsquellen ergänzt. Mit der Verwendung der App können die drei folgenden Anwendungsfälle bearbeitet werden:

- Trip Report
- Fahrkomfort
- Parameter der Gleisgeometrie

Zum einen ist es möglich verschiedene Daten entlang der zurückgelegten Strecke für manuelle Analysen anzuzeigen (*Trip Report*) und zum anderen kann der *Fahrkomfort* basierend auf den Beschleunigungswerten berechnet werden. Durch eine entsprechende anschließende Analyse des Komforts und der damit einhergehenden Georeferenzierung auffälliger Messwerte über mehrere Messkampagnen hinweg, werden Unzulänglichkeiten im Komfort aufgedeckt. Der dritte Anwendungsfall besteht aus der Berechnung der *Parameter der Gleisgeometrie* (z.B. Überhöhung, Kurvenradius, etc.). Ein wesentlicher Vorteil der Lösung ist, dass die gesamte Handhabung der Daten und Informationen in nur einer App stattfindet und somit in Echtzeit auf die Ergebnisse zugegriffen werden kann. Im Fokus für die Entwicklung der App steht ein Reisender im Zug, sodass sich für die Verwendung der Sensorik des Smartphones einige Limitationen gemäß der Versuchsbedingungen (siehe Kap. 3.2) ergeben.

Durch die Integration verschiedener Quellen ist die App in der Lage grundlegende Informationen für die Diagnose eines Fehlers zu liefern. Der Inhalt des ersten Anwendungsfalls (*Trip Report*) ist die einfache Aufzeichnung und Visualisierung aller möglichen Sensorwerte. Der *Fahrkomfort* verarbeitet die aufgezeichneten Beschleunigungswerte nach der DIN EN 12299 weiter und visualisiert diese auf einer Karte. Das Monitoring der *Parameter der Gleisgeometrie* stellt den letzten Anwendungsfall und den Ausblick der Forschungstätigkeit dar.

3.2 Definition der Versuchsbedingungen und des Versuchsaufbau

Die Daten wurden auf der Hauptstrecke zwischen Aachen und Mönchengladbach (Streckennummer 2550) im Personenverkehr aufgenommen. Die Strecke wird planmäßig im Regional- und vereinzelt im Fernverkehr befahren. Die Daten werden im Regionalverkehr mit einem Wendezug mit Doppelstockwagen sowie Elektrotriebwagen der Baureihe 425 aufgenommen. Der Wendezug ist mit einer Lokomotive der Baureihe 111 bespannt, die Bombardier Doppelstockwagen haben klassische Drehgestelle der Bauart Görlitz VIII und sind mit Schraubenkupplungen verbunden. Der vierteilige Elektrotriebwagen hat Jakobsdrehgestelle zwischen den fest gekuppelten Wagenkästen und klassische Drehgestelle an den Fahrzeugköpfen. Das Jakobsdrehgestell in der Zugmitte ist als Lauffahrwerk ausgeführt, die anderen sind angetrieben.

Die Datenaufnahme im Zug wurde stets in der Nähe des Fensters und im Doppelstockwagen in der oberen Ebene durchgeführt, um einen besseren Empfang für die satellitenbasierten Ortungssysteme zu haben. Wenn möglich wurden die Daten im Steuerwagen im Bereich des in Fahrtrichtung ersten Drehgestells aufgenommen. Das Smartphone wurde parallel zur Wagenlängsachse ausgerichtet, um Koordinatentransformationen der Daten zu vermeiden. Das Smartphonekoordinatensystem ist wie in Abbildung 2 links dargestellt definiert. Abbildung 2 in der Mitte zeigt das für die Züge definierte Koordinatensystem und Abbildung 2 rechts zeigt ein Foto im Wagenkasten des Doppelstockwagens während der Datenerfassung. Hierbei ist die y-Achse des Smartphonekoordinatensystems entlang der x-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems ausgerichtet.

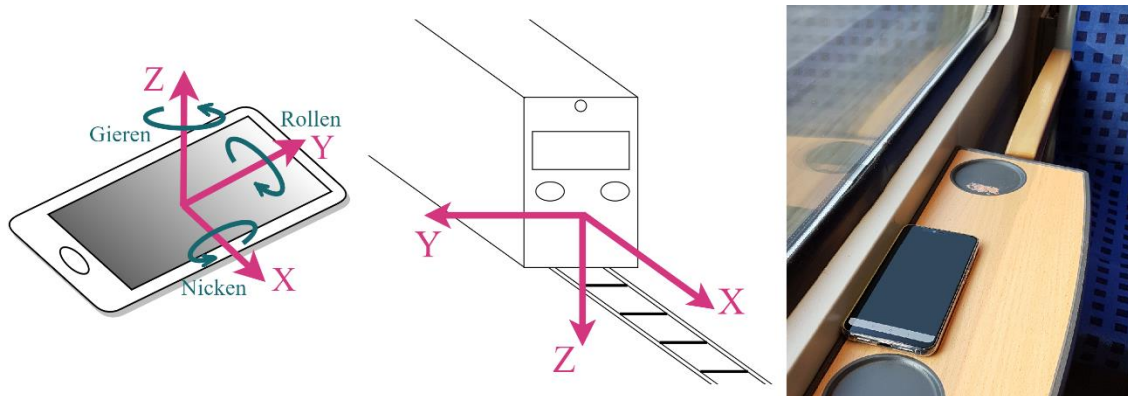


Abbildung 2 links: Handykoordinatensystem und positive Richtungen, Mitte: definiertes Zugkoordinatensystem, rechts: Foto, das während der Datenerfassung im Doppelstockwagen aufgenommen wurde

Faktoren, die voraussichtlich die *Monitoring*-Qualität beeinflussen, sind in *Tabelle 2* für die Doppelstockwagen aufgeführt. Inwieweit jeder Faktor zu Änderungen der Daten beiträgt ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Daher wurden diese Parameter zunächst so konstant wie möglich gehalten, um unbekannte Einflüsse zu minimieren. Die Parameter Verwendung der mobilen Netzwerke, Art des Smartphones und Fahrzeugtyp wurden jedoch absichtlich zwischen den zu vergleichenden Datensätzen variiert, da diese Änderungen grundlegende Änderungen im Muster oder der Genauigkeit der Daten verursachen.

Tabelle 2: Liste der Faktoren, die die Datenmessungen beeinflussen sowie deren mögliche Abweichungen und Einflüsse

Faktoren	Mögliche Varianten	Festgelegte Variante	Beeinflussung
Wetterlage	regnerisch, sonnig, windig usw.	trocken	satellitenbasierte Ortung, Fahrweg
Anzahl der Passagiere	überfüllt, leer	leer	Schalldruckpegel, Gesamtmasse
Wagenposition	nah an der Lokomotive, in der Mitte des Zuges usw.	Steuerwagen	Beschleunigungen
Position im Wagen	in der Nähe der vorderen / hinteren Drehgestelle, Mitte des Wagens, Fenster- / Nichtfenstersitz, oberer / unterer Wagen	nahe am Drehgestell, Fensterplatz, oberer Ebene	Beschleunigungen, satellitenbasierte Ortung
Art der Auflageflächen	Tisch, Mülleimer, Sitz, Wagenboden	Tisch, Mülleimer	Beschleunigungen
Kontakt zwischen Handy und Oberfläche	mit / ohne Handyhülle, Klebebänder (Verrutschen / Fixieren des Handys gegenüber der Oberfläche)	mit Handyhülle	Beschleunigungen

4 Datenhandling

4.1 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme wurde ohne genaue Kenntnis des Messsystems durchgeführt. Die Messkette von physikalischer Messgröße bis hin zur Datenspeicherung wird dazu als Black-Box betrachtet und es wird angenommen, dass die Genauigkeit der Messungen mitsamt ihren systematischen und zufälligen Fehlern ausreicht, um in der Datenanalyse signifikante Aussagen zu treffen. In der folgenden Datenanalyse muss also stets mit Messfehlern unbekannter Größenordnung gerechnet werden. Weiterhin sind Fehler durch eine hinreichende Anzahl von Messungen in der Datenanalyse statistisch zu eliminieren.

Als Smartphone wurde für Aufnahmen ein Xiaomi Mi 8 Pro mit Android 8.1.0 verwendet. Die Datenaufnahme erfolgt mit einer Android-Applikation, die eine parallele Aufzeichnung mehrerer Sensordaten ermöglicht und die Daten direkt im Festpeicher des Smartphones ablegt. Die Zeitstempel der Aufzeichnung sind nicht äquidistant, sodass je nach Analyse eine Abtastratenkonvertierung (engl. Resampling) notwendig wird. Da bei Aufnahmezeiten, die unter der maximal möglichen Frequenz liegen nicht bekannt ist, wie eine Heruntertaktung (engl. Downsampling) vorgenommen wird, wird immer in der höchstmöglichen Frequenz aufgenommen und eine Tiefpassfilterung bzw. Betrachtung von Frequenzen nach dem Shannon-Theorem anschließend softwareseitig vorgenommen. Mögliche Aliasing-Effekte sowie mangelnde Kalibrierung werden ebenfalls zunächst vernachlässigt.

Es wird daher wie in der Einleitung definiert von einem *Monitoring* gesprochen, und nicht von einer Messung im klassischen Sinne. In Tabelle 3 sind exemplarisch drei Zeilen der Daten gelistet, die vom Smartphone exportiert wurden:

Tabelle 3: Drei exemplarische Datenzeilen der Aufnahme mittels Smartphone

Nr.	Zeit	Beschleunigung (m/s ²)			Gyroskop (rad/s)			Druck p (kPa)	Lichtintensität E (lx)	Fahrgeschwindigkeit v (km/h)
		a _x	a _y	a _z	ω _x	ω _y	ω _z			
1	14:04:09:966	0,0046	-0,0043	0,0024	-0,0021	0,0029	0,0032	99,69236	3878,5	67,208855
2	14:04:09:972	0,0046	-0,0043	0,0024	-0,0021	0,0029	0,0032	99,68702	3878,5	67,208855
3	14:04:09:977	-0,0062	0,0056	-0,0035	-0,0021	0,0029	0,0032	99,68702	3878,5	67,208855
Nr.	Schalldruckpegel (dB)	Orientierung (grad)			Standort		Magnetische Flussdichte (μT)			
		Gieren	Nicken	Rollen	Breitengrad	Längengrad	B _x	B _y	B _z	
1	71,0335	-102,609	2,367	0,99	51,075555	6,320628	354,2879	-71,0560	-176,8850	
2	71,0335	-102,609	2,367	0,99	51,075555	6,320628	354,2879	-71,0560	-176,8850	
3	71,0335	-102,609	2,367	0,99	51,075555	6,320628	354,2879	-71,0560	-176,8850	

4.2 Datenanalyse

Für alle Anwendungsfälle ist eine möglichst genaue Lokalisierung notwendig, um den Ereignissen einen Ort zuzuordnen. Versuche mit unterschiedlichen Smartphones zeigten eine Abweichung über satellitenbasierte Ortungssysteme von im Mittel drei Metern zur in OpenStreetMap eingezeichneten Strecke, die bei Empfang von Signalen aus weiteren Satellitensystemen oder von mobilen Netzwerken verbessert werden kann. Versuche auf der Strecke zeigten eine Verbesserung der Genauigkeit auf im Mittel ca. 2 Metern. Bei Verlust der satellitenbasierten Ortung bietet sich an, die aktuelle Position entweder durch doppelte Integration der Beschleunigung entlang des Gleises oder durch einfache Integration der geschätzten Fahrgeschwindigkeit zu ermitteln. Letztere wird aus dem fahrzeugspezifischen geschwindigkeitsabhängigen Schalldruckpegel näherungsweise ermittelt. Dabei lieferte die Geschwindigkeitsintegration stets die genaueren Ergebnisse, Abbildung 3.

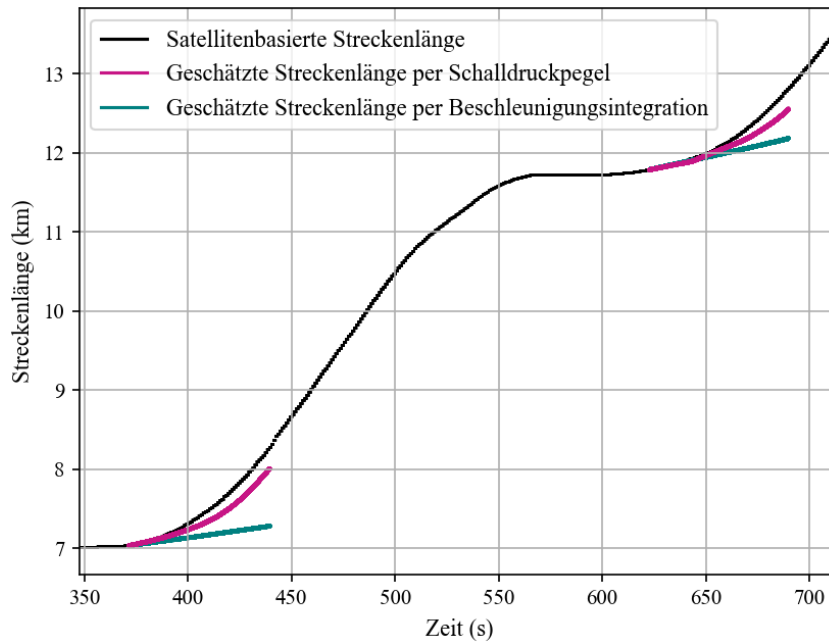


Abbildung 3: Schätzung der Position bei Verlust der satellitenbasierten Ortung

Der Schalldruckpegel steigt mit zunehmender Geschwindigkeit im Mittel fahrzeugspezifisch an. *Abbildung 4* zeigt den Schalldruckpegel im Doppelstockwagen einer Fahrt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie eine lineare Regression. Daraus kann eine Umkehrfunktion aufgestellt werden, die aus dem Schalldruckpegel die Geschwindigkeit schätzt.

Bei weiterführenden Analysen der Anwendungsfälle wurden physikalische Zusammenhänge, statistische Untersuchungen, Filter unterschiedlicher Art oder normspezifische Vorgaben (z.B. Fahrkomfort) verwendet, um Ereignisse signifikant zu detektieren.

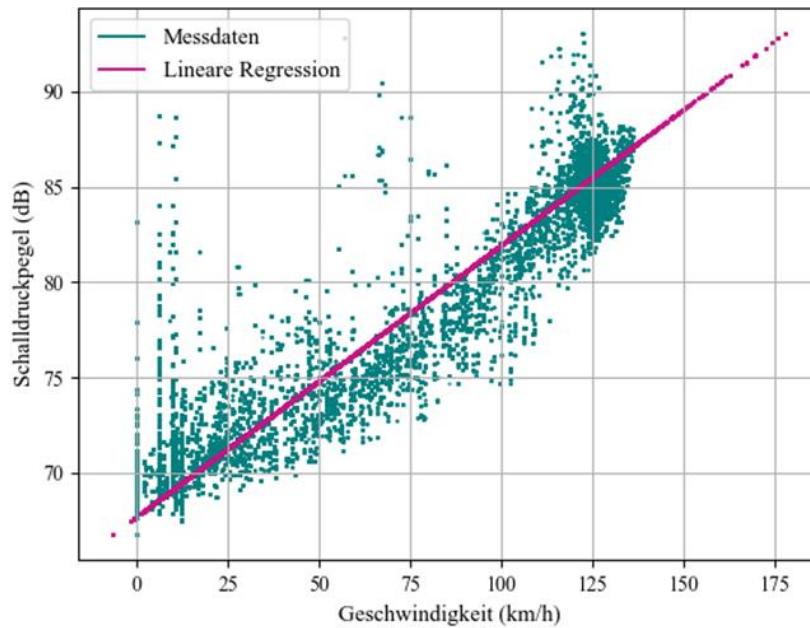


Abbildung 4: Diagramm Schalldruckpegel über Geschwindigkeit (Doppelstockwagen)

5 Anwendungsfall: Fahrkomfort

Die Verbesserung des Fahrkomforts ist ein Faktor, um das Wohlbefinden und damit die Zufriedenheit der Fahrgäste an Bord zu steigern. Unter Einbeziehung der Beschleunigungsdaten und des Kartenmaterials von OpenStreetMap [6] wird der Fahrkomfort entsprechend der Norm DIN EN 12299 [7] errechnet und visualisiert. *Abbildung 5* zeigt einen Screenshot der App. Der Fahrkomfort wird in der App auf der Karte in einer Skala von „Sehr komfortabel“ bis „sehr unkomfortabel“ farblich dargestellt.



Abbildung 5: Visualisierung des Fahrkomforts in der App

Die Ortsinformationen stellen die Grundlage für weiterführende Analysen dar. Durch eine einfache und intuitive Bedienung der App lässt sich schnell der entsprechende Datensatz zur Bewertung des Fahrkomforts aufrufen. Über die fingerbasierte Auswahl auf der Karte wird ein bestimmter Bereich mit den dazugehörigen Beschleunigungswerten angezeigt. Die automatische Analyse des Fahrkomforts und die Einbindung von Kartenmaterial ermöglicht es zudem offensichtliche Ursachen für auffällig schlecht bewerteten Fahrkomfort, wie z.B. Weichen, zu identifizieren. Durch das Vergrößern des ausgewählten Streckenabschnittes lässt sich auf Satellitenbildern erkennen, ob an dieser Stelle eine Weiche, eine Kreuzung von Gleisen, eine Unter- oder Überführung oder ein Bahnübergang vorliegt. All diese Infrastrukturkomponenten liefern bei Überfahrt deutlich höhere Beschleunigungswerte. Sie müssen vor der Beurteilung des Zustands des durchgehenden Gleises eliminiert werden. Eine nachgeschaltete manuelle Analyse, welche innerhalb der App stattfindet, liefert nach Ausschluss der offensichtlichen Infrastrukturkomponenten Anomalien auf den verbliebenen Streckenabschnitten. Für eine detaillierte Betrachtung der Anomalie können zusätzlich in der App noch weitere Sensorwerte an derselben Stelle betrachtet werden.

Diese aufwandsarme Methode des Strecken-Monitorings lässt einen ersten Rückschluss auf ausfällige Streckenabschnitte zu. Diese Erkenntnis kann dazu verwendet werden die Inspektionen der Strecke gezielter zu planen und durchzuführen. Dadurch werden früh-

zeitig und gezielt Mängel an der Infrastruktur erkannt und Gegenmaßnahmen durchgeführt. Dies liefert einen Beitrag zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Infrastruktur, wobei der Betrieb des Schienenverkehrs während der Aufnahme und der Analyse der Daten durch das Smartphone nicht beeinträchtigt wird.

6 Fazit und Ausblick

Um die aufwändigen und kostenintensiven Instandhaltungsintervalle der Schieneninfrastruktur optimal planen zu können, ist es möglich das Smartphone als *Monitoring*-Plattform heranzuziehen. Die Vorteile sind der kostengünstige, minimalinvasive und mobile Einsatz der Smartphone-Sensorik mit anschließender Datenanalyse. Aufgrund der stetig verbesserten internen Sensorik und durch die Integration von externen Informationen kann unter der Beachtung der genannten Versuchsbedingungen eine hinreichende Aussage über die Infrastruktur getroffen werden. Die Aufnahme und Analyse der Daten geschehen mittels einer eigens dafür entwickelten App. Sie erfolgt nach standardisierten und statistischen Methoden. Die in diesem Aufsatz vorgestellten Anwendungsfälle veranschaulichen, dass u. a. über den Fahrkomfort Unzulänglichkeiten der Infrastruktur erkannt werden können.

Weitere Entwicklungen der App zielen darauf ab die Parameter der Gleisgeometrie zu integrieren. Basierend auf den bisher getroffenen Annahmen wird im weiteren Verlauf des Projekts die Verlässlichkeit der Sensorik und deren Aussagefähigkeit mittels performanterer Messtechnik überprüft. Auch die Datenanalyse wird mithilfe von statistischen Methoden weiterentwickelt. Daraus lassen sich zukünftig Trends über den Zustand der Infrastruktur ableiten. Diese Trends werden wiederum dazu verwendet die Lebenszyklen der Infrastrukturkomponenten zu strecken und dadurch die Kosten für die Instandhaltung zu reduzieren. Darüber hinaus wird die Nutzerfreundlichkeit der App durch Anwender-tests verbessert und im Anschluss wird das Nutzungsszenario weiter konkretisiert.

Literatur

- [1] L. Fendrich und W. Fengler, Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [2] T. Lidén, „Railway Infrastructure Maintenance - A Survey of Planning Problems and Conducted Research,“ *Transportation Research Procedia*, Bd. 10, pp. 574-583, 2015.
- [3] A. V. S. Kumar, C. Roberts und J. M. Easton, Innovative applications of big data in the railway industry, Hershey, Pennsylvania: IGI Global, 2018.
- [4] V. P. Andelfinger und T. Hänisch, Internet der Dinge, Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [5] J. Pahl, Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [6] OpenStreetMap Foundation, OpenStreetmap.org, Open Database License (ODbL)
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste – Messung und Auswertung, DIN EN 12299, 2009

Autoren



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 Technology and Infrastructure.



Hampel, Fabian

Fabian Hampel studierte Maschinenbau in Aachen und Bahnsystemingenieurwesen in Dresden. Er arbeitet seit 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH Aachen.



Hempel, Thomas

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der RWTH bis 2013. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH bis 2017 mit Abschluss Dr.-Ing. Seit 2018 bei der Siemens Mobility GmbH im Bereich Customer Services als Projektmanager Technology and Infrastructure.



Berijanian, Maryam

Studium der Luft- und Raumfahrttechnik und des Maschinenbaus an der Scharif-Universität für Technologie in Teheran, Iran, sowie der System- und Steuerungstechnik an der Universität Twente in Enschede. Seit 2019 ist sie wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der RWTH.



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.