

Vorarbeiten zur Entwicklung eines Gleisfehlerdetektionssystems mit Regelzügen und Low-Cost-Sensorik

Preliminary Work for the Development of a Track Fault Detection System with Standard Trains and Low-Cost Sensor Technology

Otto Lerke | Sebastian Bahamon-Blanco | Martin Metzner | Ullrich Martin | Volker Schwieger

Zusammenfassung

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen technischen Bericht über die Vorarbeiten zu einem Gleisfehlerdetektionssystem, das auf Regelzügen unter Nutzung von Low-Cost-Sensorik zum Einsatz kommen soll. Der Fokus liegt auf der Systembeschreibung sowie der Vorstellung eines ersten Ansatzes zur Datenauswertung. Das übergeordnete Ziel der Untersuchung ist die spätere Detektion und Lokalisierung von Unregelmäßigkeiten einer Gleistrasse, die aufgrund von Unstetigkeiten auf der Schiene oder bei Änderungen der Steifigkeit des Untergrundes vorkommen. Solche Unstetigkeiten beeinflussen sowohl die Wellenlänge als auch die Amplitude des Signals der Vertikalbeschleunigungen. Die Einflüsse treten z.B. beim Überqueren von Straßenkreuzungen, Weichen oder Brücken aber auch beim Überfahren von Gleisfehlern auf. Diese charakteristischen Signaländerungen sollen genutzt werden, um Gleisfehler zu detektieren. Für die Messung der Signale sind dafür am Drehgestell eines Regelzuges ein einachsiger und ein dreiachsiger Beschleunigungssensor installiert. Zusätzlich ist ein GNSS-Empfänger eingebaut, der die Lokalisierung der Unregelmäßigkeit sicherstellt. Die Erfassung und Synchronisation der Daten erfolgt mit einem Echtzeitcomputer.

Obwohl es Methoden gibt, die in der Lage sind, diskontinuierliche Punkte auf der Strecke zu identifizieren und zu klassifizieren, wurde zunächst beschlossen, mit einer normierten Kreuzkorrelation zu arbeiten, die nur dazu dient Diskontinuitäten aufzudecken. Wenn mehr Messungen zur Verfügung stehen, können robustere Analysen durchgeführt werden, um diese Diskontinuitäten zu klassifizieren. In der Zwischenzeit wird die normierte Kreuzkorrelation dazu dienen, mit den verfügbaren Daten zu arbeiten.

Schlüsselwörter: Gleisfehler, Lokalisierung, Sensor Fusion, Erkennung, Instandhaltung

Summary

This paper is a technical report on the preliminary work for a track fault detection system to be used on standard trains using low-cost sensor technology. The focus is on the system description as well as the presentation of a first approach for data evaluation. The overall objective of the study is the subsequent detection and localization of irregularities of a track which occur due to discontinuities on the rail or changes in the stiffness of the subsoil. Such

discontinuities influence both the wavelength and the amplitude of the vertical acceleration signal. The influences occur e.g. when crossing road crossings, switches or bridges but also when passing track faults. These characteristic signal changes are to be used to detect track faults. To measure the signals, a single-axis and a triple-axis accelerometer are installed on the bogie of a standard train. In addition, a GNSS receiver is installed to ensure localization of the irregularity. A real-time computer is used to record and synchronize the data.

Although methods exist that are capable of identifying and classifying discontinuous points on the track, it was initially decided to work with a normalized cross-correlation that only serves to detect discontinuities. As more measurements become available, more robust analyses can be performed to classify these discontinuities. In the meantime, the normalized cross-correlation will be used to work with the available data.

Keywords: track fault, localization, sensor fusion, detection, maintenance

1 Einleitung

Aufgrund der wachsenden Nachfrage nach Mobilität ist eine quasi-kontinuierliche, zustandsabhängige und vorausschauende Wartung der Gleisinfrastruktur erforderlich, um einen effizienten und sicheren Betrieb zu gewährleisten, wobei die Zugfahrten des Regelbetriebes möglichst wenig beeinträchtigt werden sollen. Deshalb besteht eine der wichtigsten Aufgaben bei der Instandhaltung der Infrastruktur darin, den Zustand des Fahrwegs zu überwachen.

Obwohl es dafür mehrere konventionelle Methoden gibt, sind diese nicht kontinuierlich und nicht jederzeit durchführbar (Menius und Matthews 2017). Alternative Methoden wie z. B. Zustandsüberwachungen mittels Ultraschallprüfgeräten oder Querprofilmessungen, sind kostenintensiv und benötigen für die Installation zusätzlichen Raum im Zug (Vossloh 2020). An Regelzügen, vorzugsweise zulassungsfrei, angebrachte kostengünstige Sensoren sollen dagegen die Möglichkeit bieten, den Fahrweg kontinuierlich zu überwachen sowie dessen Zustand zu ermitteln und zu beurteilen. Bei detektierten Gleisfehlern

ist es dann möglich, frühzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten, um spätere, kostenintensive Sanierungsarbeiten zu vermeiden. Des Weiteren können Prognosen der Fehlerentwicklungen aus den Sensordaten abgeleitet und den Anlagenverantwortlichen frühzeitig zur Verfügung gestellt werden.

Aktuell werden zur Überwachung des Gleiszustands vorrangig speziell ausgerüstete Messzüge eingesetzt. Solche Diagnosesysteme sind z.B. RailLAB (Allweil 2014) oder LIMEZ (Wirth 2008). Das RailLab-System besteht aus multifunktional ausgerüsteten Fahrzeugen, die Fahrwegmessungen durchführen. Die Aufgaben des RailLab-Systems sind Geometriemessungen, Schienenprüfungen, Oberleitungsfunktionsprüfungen, fahrtechnische Prüfungen, Erfassung des Schienenverschleißes sowie Lichtraumprofilmessungen (Allweil 2014). Dabei kommen für die Bestimmung der relevanten Messgrößen unterschiedliche Messverfahren, wie Lasersensoren, Ultraschallsensoren, Wirbelstromprüfungen, Kamera- und Videotechnik für optische Prüfungen sowie dynamische Kräftemessungen am Fahrzeug und Schienenoberflächenmessungen zum Einsatz. Die sensorische Ausstattung beinhaltet ein Videomesssystem, einen 2D-Fächerscanner, einen 2D-Rotationsscanner, ein Odometer, eine Inertiale Messeinheit (IMU) und einen Sensor für das globale Positionierungssystem (GNSS). Die Ortung wird mit den Daten des integrierten Odometers und der IMU in Verbindung mit einem GNSS-Empfänger durchgeführt (Allweil 2014). Der in Wirth (2008) beschriebene Messzug LIMEZ III wurde für die Erfassung und Lokalisierung von Lichtraumengstellen konzipiert. Dabei tastet ein Profillaserscanner die Umgebung ab. Zur Ergänzung der Profilmessung ist der Zug mit einem Videomesssystem für nachträgliche Messungen im Stereomodell und zusätzlichen Farbkameras für die Dokumentation ausgestattet. Ein Schienenprofilscanner ergänzt das Messsystem. Für die Lokalisierung und Trajektorienbestimmung sind ein GNSS-System sowie ein INS installiert. In der Nachbearbeitung können so Positionsgenauigkeiten von 0,1 m erreicht werden (Wirth 2008).

Der Einsatz solcher Gleismesszüge ist jedoch sehr kostenintensiv und beeinträchtigt den Regelbetrieb. Ein weiterer Nachteil ist, dass nur sehr wenige Messzüge existieren, sodass deren Disposition zeitlichen Beschränkungen unterliegt. Abhilfe können portable Systeme schaffen, wie das Siemens-System (Siemens 2018). Diese Lösung sieht vor, das Messsystem auf Regelzügen zu installieren. Jedoch ist dabei ein Eingriff in die Zugtechnik notwendig, um z.B. Odometer anzubringen. Die bahneigene DB Netz AG greift ein Konzept auf, bei dem die Sensorik aus zwei GPS, einer IMU sowie einem Beschleunigungsmesser besteht. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Systemen ist ein Eingriff in die Zugtechnik bei diesem Konzept nicht erforderlich (Bahamon und Martin 2020). Das Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) entwickelt unter dem Begriff »Predictive Measurement« optische Systeme zur Erfassung von diversen Gleistrassenobjekten und -parametern für den Regelbetrieb (IPM 2020). Diese

ermöglichen z.B. neben Lichtraumprofilen, Fahrdrähtenabnutzungen oder Tunnelzuständen auch die Detektion der Gleisgeometrie. Die Erfassung der relativen Gleisgeometrie sowie des Gleiszustandes erfolgt mit einem, speziell für diese Anwendung entwickelten, Laserscanner (Rail Track Scanner).

Eine ganz wesentliche Herausforderung aller erwähnten Konzepte besteht in der Lokalisierung, bzw. der Zuordnung der für den Gleiszustand relevanten erfassten Messsignale zu einem Ort. Bei den oben gelisteten Systemen handelt es sich um sogenannte Multisensorsysteme. Multisensorsysteme kommen bereits in unterschiedlichsten Anwendungen, wie z.B. beim Mobile Mapping oder beim autonomen Fahren zum Einsatz. Für die Ortung werden dabei in der Regel INS/GNSS-Kombinationen angewendet (Jäger und Zwiener 2016), die in Verbindung mit diversen Fusionsalgorithmen (Mirabadi et al. 1996) eine Positionsbestimmung erlauben. Einige Fusionsalgorithmen nutzen zusätzlich Informationen aus digitalen Karten, um durch das Aufstellen von Bedingungen Verbesserungen bei der Positionsbestimmung zu erreichen (Böhringer 2008, Li et al. 2009).

Neben der Erfassung der Messdaten aus den beschriebenen Systemen ist die Datenauswertung der entscheidende Baustein, um Aussagen über den Gleiszustand treffen zu können. Unterschiedliche Forschungsansätze existieren bereits, die verschiedene Arten von Gleisfehlern in einem Fahrweg-Fahrzeugmodell im Maßstab 1:87 erfolgreich erkennen (Bahamon und Martin 2020, Rapp und Martin 2018).

Dieser Beitrag beschreibt die Vorarbeiten zur Entwicklung eines Systems zur kontinuierlichen Gleisüberwachung und Erkennung von Gleisfehlern sowie den entwickelten sensorischen Messaufbau für einen realen, im Regelbetrieb fahrenden Personenzug. Die Methodik zur Gleisfehlerdetektion nach Bahamon und Martin (2020) und Rapp und Martin (2018) soll dabei auf ein reales Szenario übertragen werden. Der für diese Untersuchung verwendete Zug ist ein 40 Tonnen schweres Stadler Regio-Shuttle RS1. Dieser Zug erreicht auf der exemplarischen Messstrecke eine Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h. Als sensorische Ausstattung kommen analoge Low-Cost-Beschleunigungsmesser zur Generierung relevanter Gleisinformationen und ein Multiband Low-Cost GNSS-Empfänger für die Positionsbestimmung zum Einsatz. Die Beschleunigungsmesser sind zulassungsfrei am Drehgestell montiert. Der GNSS-Empfänger ist aufgrund betriebstechnischer Beschränkungen im Fahrgastraum, in der Nähe eines Fensters, angebracht. Die Daten werden mit Hilfe eines Echtzeitcomputers erfasst und synchronisiert. Der Vorteil der eingesetzten Low-Cost-Sensorik ist, dass diese preiswert und uneingeschränkt verfügbar ist. Ein Eingriff in die Zugtechnik ist für die Installation nicht notwendig.

2 Systembeschreibung

2.1 Systemanforderungen

Das zu entwickelnde Multisensorsystem soll auf beliebigen Bahnstrecken einsetzbar sein, ohne dass Streckensperrungen notwendig sind.

Für die Anbringung der Sensorik dürfen keine Eingriffe in die Zugtechnik vorgenommen werden, damit Betriebsgenehmigungen des Zuges ihre Gültigkeit behalten (zulassungsfreie Installation). Des Weiteren ist die Sensorik so zu installieren, dass Messungen während des Regelbetriebs möglich sind und dieser nicht gestört wird. Das bedeutet, dass keine besonderen Fahrten oder Fahrplanänderungen, die für den Betreiber betriebswirtschaftliche Nachteile mit sich bringen, vorgesehen werden müssen.

Im Allgemeinen sind die Anforderungen an GNSS-Anwendungen deren Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität (Wanninger 2011). Im Rahmen dieser Untersuchung sind Positionsgenauigkeit und Verfügbarkeit die wichtigen Parameter für das Lokalisieren einer detektierten Gleisunregelmäßigkeit/Schadstelle im Gleis. Die Integrität spielt hierbei eine untergeordnete Rolle (vgl. Wanninger 2011). Die Anforderung an die Positionsgenauigkeit ist so definiert, dass der zur Gleisunregelmäßigkeit/Schadstelle geführte Sachverständige diese vor Ort exakt untersuchen kann. Unter Berücksichtigung dieser Vorgabe kann durch grobe Abschätzung die Anforderung an die Positionsgenauigkeit mit 0,5 m festgelegt werden. Der Anspruch an die Genauigkeit ergibt sich darüber hinaus dadurch, dass sich in der Realität verschiedene Gleisfehler bzw. Einflussgrößen überlagern können. Beispielsweise tritt eine punktuelle Instabilität oftmals im Bereich eines geschweißten Schienenstoßes auf, wenn dieser nicht regelgerecht ausgeführt wurde. In diesem Fall überlagern sich die erfassten Beschleunigungssignale, und in der nachgelagerten ursachenbezogenen Separierung der unterschiedlichen Einflussgrößen aus dem Gesamtignal ist eine hinreichend genaue Verortung eine wichtige Voraussetzung. Die Anforderung an die Verfügbarkeit der Position ist hoch, damit die Lokalisierung möglichst an jedem Ort der befahrenen Trasse realisierbar ist. Ein Wert von > 99 % ist für alle Trassenabschnitte, auch für Bereiche mit eindruckender Vegetation, Lärmschutzwänden und Bahnhöfen, anzustreben.

Bei der Auswahl der Beschleunigungssensoren wurden neben dem Systemdesign auch die dynamische Antwort des Sensors sowie die Einsatzumgebung berücksichtigt. Eine leichte Montage und Demontage am Drehgestell musste möglich sein. Aufgrund der Anbauposition musste der Sensor robust gefertigt sein und Temperatur- und Wetterbeständigkeit aufweisen.

Das Systemkonzept sieht in dieser ersten Phase vor, Messungen von Vertikalbeschleunigungen relativ zum Gleis mittels eines an den Drehgestellen angebrachten 1-Achs-Beschleunigungssensor durchzuführen. Die sensible Achse ist dabei in z-Richtung (senkrecht nach oben)

des Achslagers ausgerichtet. Aufgrund der Dynamik sind am Drehgestell Beschleunigungswerte von bis zu ± 500 g zu erwarten. Entsprechend wurden die eingesetzten Beschleunigungssensoren ausgelegt. Die Abtastrate für das aktuelle Einsatzgebiet ist mit 50 Hz vorgegeben, womit sich unter Berücksichtigung der Zuggeschwindigkeit eine räumliche Auflösung des Beschleunigungssignals von ca. 39 cm gewährleisten lässt.

2.2 Aufbau des Messsystems

Das Messsystem besteht aus den folgenden Sensoren: ein analoger PCB Synotech 1-Achs-Beschleunigungssensor M603C01 zur Messung der Vertikalbeschleunigung, ein weiterer analoger PCB Synotech 3-Achs-Beschleunigungssensor M629A30 zur Messung weiterer Beschleunigungen parallel und senkrecht zur Fahrtrichtung. Abb. 1 gibt eine Übersicht über die Spezifikationen der eingesetzten Beschleunigungssensoren (PCB Piezotronics 2019).

Zur Sicherstellung der exakten Ausrichtung des 1-Achs-Beschleunigungssensors am Achslager wird der Sensor an einer mechanischen Vorrichtung, einem parallel zur geometrischen x-y-Ebene des Achslagers montierten Kragen, befestigt (Abb. 2). Der 3-Achs-Beschleunigungssensor

| M603C01 | M629A30 |
|--|---|
|  |  |
| Empfindlichkeit | 10 mV/g |
| Messbereich | ± 500 g |
| Anzahl sensibler Achsen | 1-achsrig |
| | 3-achsrig |

Abb. 1: Eingesetzte Beschleunigungssensoren: links 1-achsrig, rechts 3-achsrig



Abb. 2:
Montagekragen
am Zug

erfasst zusätzliche Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtungen, um zukünftig weitere Einflüsse wie z. B. Querbeschleunigungen in Kurven, Längsbeschleunigungen beim Anfahren und Bremsen sowie weitere, auf spezifische Gleisfehler zurückzuführende Beschleunigungen mit zu berücksichtigen und von den Vertikalbeschleunigungen zu trennen. Die analogen Beschleunigungssensoren benötigen für den Betrieb eine stabile Referenzspannung. Diese wird durch eine Versorgungseinheit sichergestellt.

Als GNSS-Sensor kommt ein LEA-M8T UBLOX Multiband GNSS-Empfänger zum Einsatz, der Positionen im WGS84-System aufzeichnet. Der GNSS-Empfänger wird über seinen USB-Anschluss vom Laptop mit Spannung versorgt. Die Sensoren sind an einen NI Compact Rio 9074 Echtzeitcomputer angeschlossen, der mit der graphischen Programmiersprache LabVIEW programmiert und konfiguriert wird. Die NI CRIO 9074 Plattform ist mit Steckplätzen für verschiedene, sogenannte C-Series Steckmodule ausgestattet, die die Erfassung von Daten aus unterschiedlichen Sensorquellen ermöglichen. Die Beschleunigungssensoren sind an einen analogen Eingang (AI) angeschlossen, realisiert durch das C 9201 Steckmodul. Dieses Modul erfasst die analogen Signale der Beschleunigungssensoren und leitet diese an den internen A/D-Wandler des CRIO 9074 und später an den Prozessor weiter. Der GNSS-Empfänger ist im jetzigen Ausbauzustand über eine serielle Schnittstelle (RS232), realisiert durch das Steckmodul C 9870, mit dem Echtzeitcomputer verbunden. Die serielle Steckkarte muss zusätzlich mit einer externen 12 V-Stromquelle versorgt werden. Das serielle Steckmodul (C 9870) führt die Daten ebenfalls dem CRIO 9074 Prozessor zu. Der Echtzeitcomputer ist in der Lage, eine exakte zeitliche Synchronisation der beiden Datenquellen vorzunehmen und mit einem Zeitstempel, der auf einer internen Uhr basiert, zu versehen. Die Synchronisierung ist

auf 1/40.000 Sekunden möglich (National Instruments 2020). In einer späteren Ausbaustufe soll das GPS-ppp-Signal zur Synchronisierung genutzt werden. Der ppp-Signaleingang würde eine Auflösung des Zeitstempels von Sekunden ermöglichen (Hefelbarth 2009). Der NI CRIO 9074 Echtzeitcomputer ist ebenfalls in der Lage, FPGA (Field Programmable Gate Array) Codesequenzen zu verarbeiten. Das FPGA-Modul ist für sehr hohe Abtastraten von > 10 Mhz geeignet (National Instruments 2019). Dazu wird im Frontend-Laptop in der Programmiersprache LabVIEW 2012 zunächst ein FPGA-lauffähiger Code generiert. Dieser wird dann durch einen vorgeschalteten Compiler in einen lauffähigen FPGA-Binärkode übersetzt. Das FPGA VI wird anschließend auf den CRIO 9074 gespielt und kann über das Frontend-Gerät gestartet werden. Im Detail beinhaltet der LabVIEW Code eine Real-Time Loop und eine parallel laufende Host-Loop. Die Real-Time Loop befindet sich nach der Kompilierung auf dem CRIO 9074, während die Host-Loop auf dem Frontend-Laptop die Host-zu-CRIO-Kommunikation herstellt und ein Monitoring der Programmausführung ermöglicht. Dies ist aus dem Grund notwendig, da Frontend-Computer, für gewöhnlich Standardlaptops, die generierten Datenmengen, die bei hohen Abtastraten anfallen, nicht in Echtzeit verarbeiten können. Die erstellte FPGA-Softwarearchitektur ermöglicht es stattdessen, die Daten auf dem CRIO 9074 zu speichern. Später sind diese vom Frontend-Laptop zur Analyse und Auswertung abrufbar. Es ist ebenfalls möglich, die erfassten Signale zeitverzögert über die Host-zu-CRIO-Kommunikation auf dem Frontend-Laptop zu überwachen (National Instruments 2019).

Die Installation des Messinstrumentariums am Zug wurde vom Personal des Betreibers, die Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft mbH (WEG), durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 3 dargestellt.

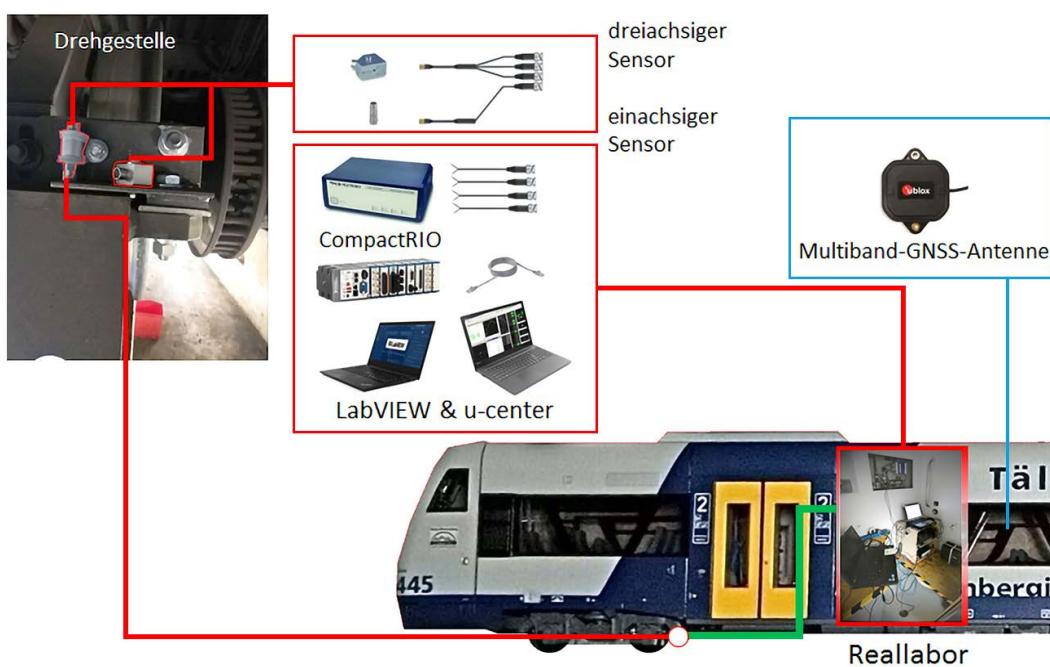


Abb. 3:
Prinzipieller Aufbau
des Messsystems

3 Methodik zur Datenerfassung, Datenverarbeitung und Auswertung

3.1 Ortung und Map-Matching

Die Ortung wird benötigt, um Streckenelemente und Gleisunregelmäßigkeiten einer Position zuzuweisen. Die Position der Gleisunregelmäßigkeiten wird dann aktuell durch ein einfaches Map-Matching-Verfahren auf einer Streckenkilometrierungskarte dargestellt.

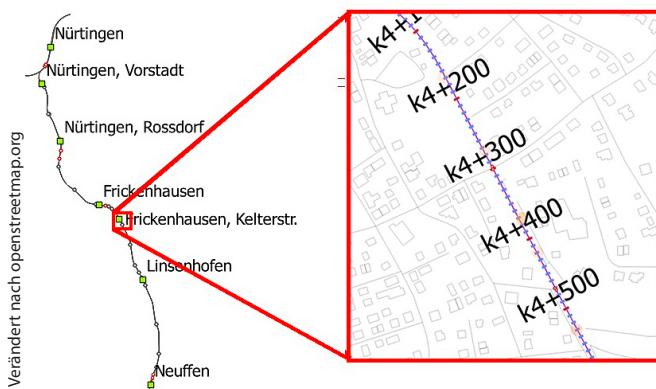


Abb. 4: Streckenkilometrierung

Die Positionsbestimmung erfolgt mittels des vorgestellten Multiband GNSS-Empfängers von UBLOX, der die Signale von GPS-, GLONASS-, BEIDOU- und GALILEO-Satellitensystemen verarbeiten kann (Ublox 2020). Die horizontale Genauigkeit wird vom Hersteller mit 2,5 m angegeben (Ublox 2020). Es wurde eine Messfrequenz von 1 Hz gewählt. Unter Berücksichtigung der maximalen Zuggeschwindigkeit von 70 km/h wird bei der vorliegenden Messfrequenz eine räumliche Auflösung der Position von 20 m erreicht. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, erfassen die Beschleunigungssensoren Daten mit einer Abtastrate von 50 Hz, was einer räumlichen Auflösung von ca. 39 cm entspricht. Um für alle Beschleunigungswerte eine Position angeben zu können, muss eine Verdichtung der gemessenen GNSS-Positionen erfolgen. Dabei wird angenommen, dass eine hohe Verfügbarkeit ($> 99\%$) der GNSS-Positionen vorliegt und es wird berücksichtigt, dass sehr großen Kurvenradien bei der Trasse vorliegen (BMJV 1967), so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine lineare Interpolation den Genauigkeitsanforderungen approximativ genügt.

Die Streckenkilometrierungskarte mit Meterauflösung wurde vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet die Kilometrierungsmarken mit Koordinaten im UTM-System (Abb. 4).

Der Zweck der positionsbezogenen Datenvorverarbeitung ist es, die Kilometrierungsmarken mit den gemessenen Beschleunigungswerten zu versehen und diese somit in einen räumlichen Bezug zu bringen, um eventuell erkannte Gleisfehler in der Streckenkilometrierungskarte abbilden zu können. Dazu sind zunächst die vom GNSS-Empfänger gemessenen WGS84-Koordinaten des Messsystems

in eine UTM-Projektion, analog zur Projektion der Streckenkilometrierungskarte, überführt worden. Diese sind anschließend auf eine zeitliche Abtastrate von 1/50 Sekunden durch lineare Interpolation verdichtet worden, um diese an die Auflösung der Beschleunigungsdaten anzugeleichen. Im weiteren Schritt erfolgte das Map-Matching-Verfahren, das die gemessenen Positionen auf die Streckenkilometrierungskarte überträgt. Dies erfolgte im Detail über ein Point-to-Point Matching, bei dem jedem Punkt der Streckenkilometrierung der nächstgelegenen GNSS-Position zugeordnet wird. Da zu jeder GNSS-Position auch Beschleunigungsdaten vorliegen, sind diese nun ebenfalls der Streckenkilometrierung zugeordnet.

Die CRIO 9074 Echtzeitplattform generiert während der Erfassung eine ASCII-Ausgabedatei. Die Ausgabefelder können zuvor im Host-Loop (vgl. Abschnitt 2.2) beliebig festgelegt werden. Die auf diese Weise aufbereiteten Daten werden im nächsten Schritt dem Auswertealgorithmus zugeführt.

3.2 Erkennung von Diskontinuitäten und Gleisfehler

3.2.1 Erkennung von Unstetigkeiten im Fahrweg-Fahrzeugmodell

Wie einleitend erwähnt, können bereits verschiedene Arten von Gleisfehlern in einem Fahrweg-Fahrzeugmodell im Labor im Maßstab 1:87 (siehe Abb. 5) erfolgreich erkannt werden.

Das Fahrweg-Fahrzeugmodell ist ein 4,04 m langes Oval, in dem verschiedene Arten von Fehlern eingerichtet sind (vgl. Abb. 6). Die Messfahrten beginnen am markierten Startpunkt und werden im Uhrzeigersinn durchgeführt. Nach einer Durchfahrt wird das Fahrzeugmodell angehalten.

Jede Unstetigkeit bzw. jedes Fehlerelement erzeugt ein bestimmtes Vertikalbeschleunigungsmuster mit einer damit einhergehenden, charakteristischen Änderung der Wellenlänge, wie aus der von Esveld (1986) vorgeschlagenen Klassifizierung von Gleisfehlern hervorgeht. Im Gegensatz dazu bleibt die Wellenlänge auf Schienenabschnitten ohne Fehler unverändert.



Rapp et al. 2019

Abb. 5: Fahrweg-Fahrzeugmodell

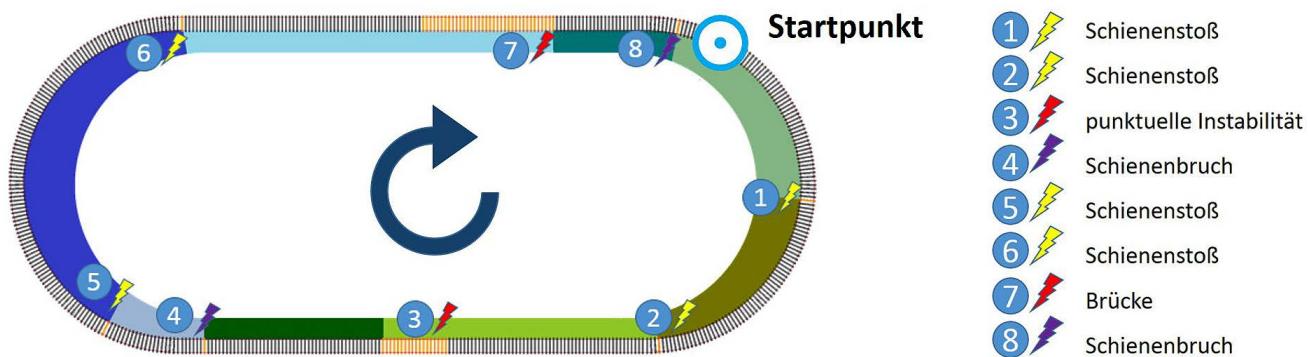


Abb. 6: Diskontinuitäten und Gleisfehler des Fahrweg-Fahrzeugmodells

Rapp et al. (2019) stellten bereits eine Methode zur Erkennung von Gleisfehlern des Fahrweg-Fahrzeugmodells mittels normierter Kreuzkorrelation vor. Der Vorteil der normierten Kreuzkorrelation besteht darin, dass nur eines der zu überwachenden Signale und ein Referenzmuster (z. B. eine Diskontinuität) benötigt werden und im Gegensatz zur gewöhnlichen Kreuzkorrelation weniger empfindlich gegenüber linearen Änderungen der Amplitude in den beiden verglichenen Signalen ist (Rao 2014).

Die entsprechenden Referenzmuster, dargestellt in Abb. 7, wurden am Fahrweg-Fahrzeugmodell generiert, indem mehrere Beschleunigungssignale gemittelt wurden. Die einzelnen Beschleunigungssignale werden generiert und gemessen, wenn das Fahrzeug des Fahrweg-Fahrzeugmodells den jeweiligen Gleisfehler überquert.

Die Größe des Korrelationskoeffizienten gibt Aufschluss darüber, ob ein spezifischer Gleisfehler im Fahrzeug-Fahrwegmodell einem entsprechenden Muster zugeordnet werden kann. Der normierte Korrelationskoeffizient beschreibt dabei die Ähnlichkeit zwischen der gemessenen Beschleunigung und dem generierten Referenzmuster. Je größer der Korrelationskoeffizient, desto größer ist die

Übereinstimmung zwischen der gemessenen Vertikalbeschleunigung und dem Referenzmuster (Rapp et al. 2019).

In zurückliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der eine Diskontinuität charakterisierende Steifigkeitswechsel im Fahrweg-Fahrzeugmodell identifiziert werden kann. Abb. 8 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Übereinstimmung zweier Fahrten und zeigt sowohl die normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten als auch das im Fahrweg-Fahrzeugmodell gemessene Vertikalbeschleunigungssignal. Es ist zu erkennen, dass die höchsten Korrelationskoeffizienten (gelbe Punkte, Abb. 8 oben) mit den im Fahrweg-Fahrzeugmodell erfassten Beschleunigungssignalen bzw. deren Muster (Abb. 8 unten, grüne Markierung), generiert durch die vorliegenden Unstetigkeiten, korrespondieren.

3.2.2 Erkennung von Unstetigkeiten auf realer Strecke mit Regelzügen

Das im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Verfahren soll nun als Ausgangsmethode zur Identifizierung einiger realer Bahnanlagen dienen. Dabei wird auf das gleiche

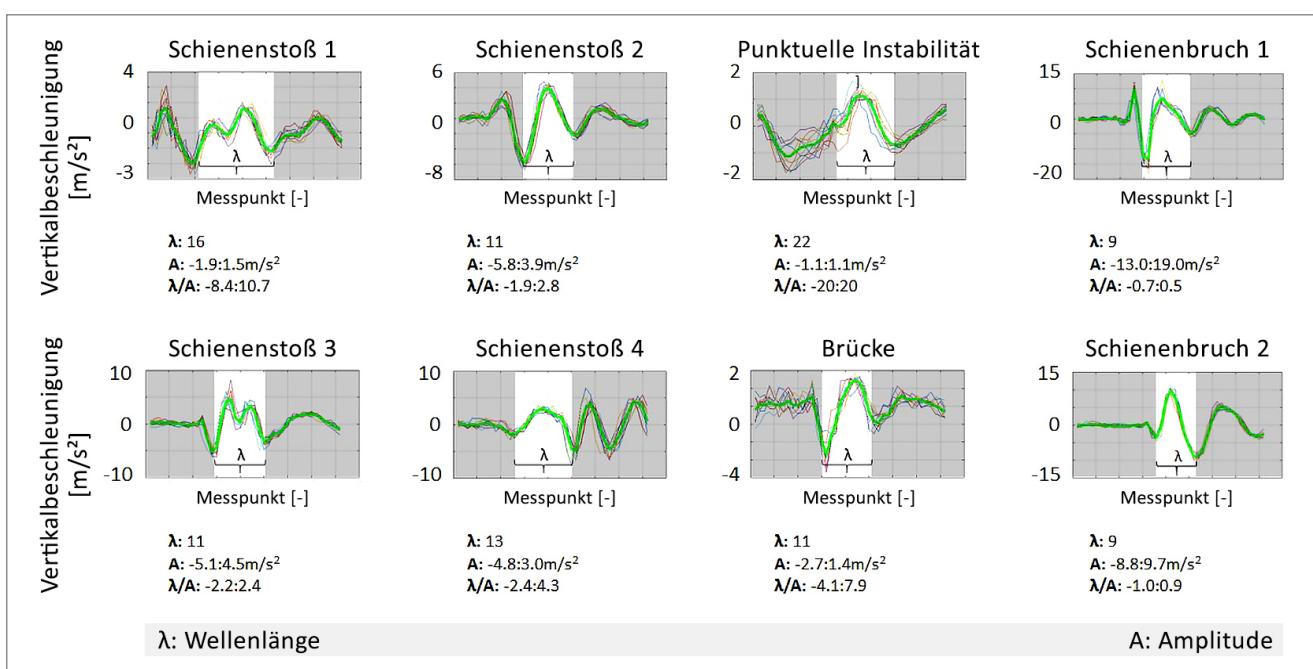


Abb. 7: Gleisfehler Referenzmuster des Fahrweg-Fahrzeugmodells

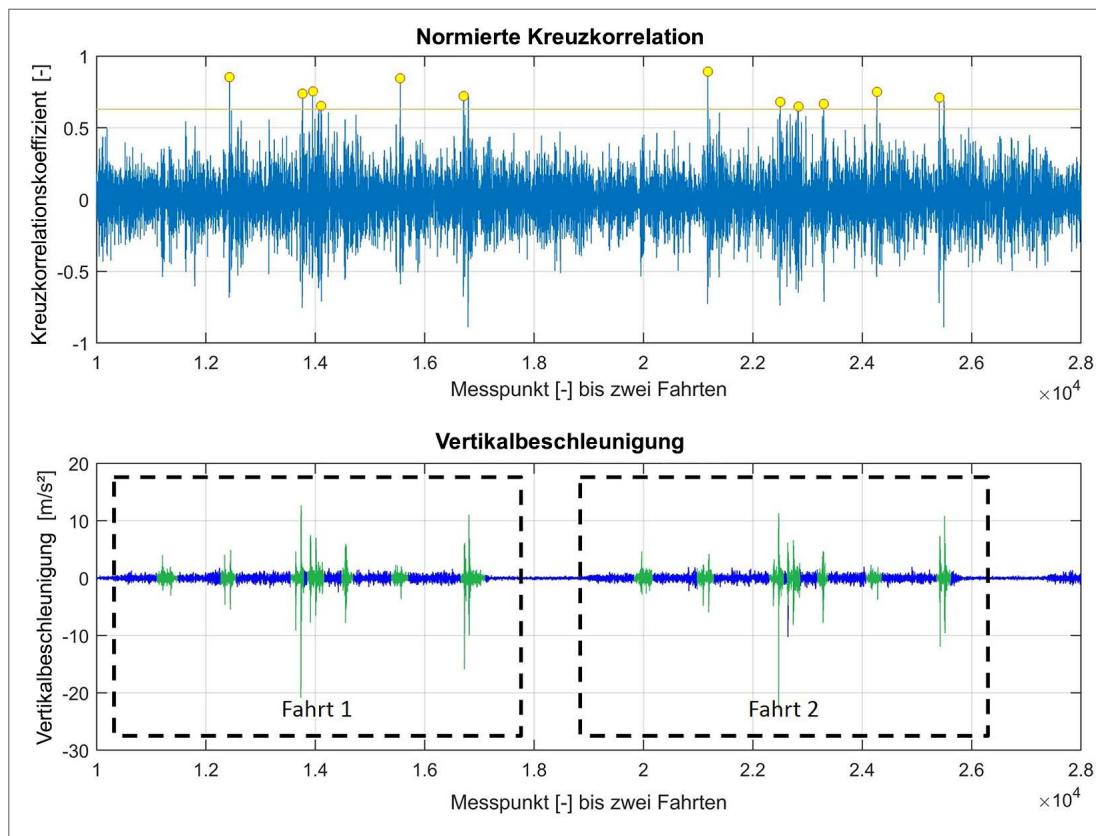


Abb. 8:
Normierte Kreuzkorrelation zur Erkennung von Diskontinuitäten am Fahrweg-Fahrzeugmodell

Prinzip zurückgegriffen, wonach die vertikalen Bewegungen des realen Zuges entlang der Strecke durch Bahnanlagen wie z. B. Brücken, Straßenkreuzungen oder Weichen beeinflusst werden. Genau wie im Fahrweg-Fahrzeugmodell sollen die Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen einem Referenzmuster und dem während der Messfahrten generierten Vertikalbeschleunigungssignal ermittelt werden. Das Referenzmuster einer beliebigen Diskontinuität wurde, ähnlich Abschnitt 3.2.1, mit verschiedenen Überfahrten und anschließender Mittelung erzeugt (Abb. 9).

Dieses eine Referenzmuster wird nun dazu verwendet, unterschiedliche Diskontinuitäten zu detektieren. Anhand des Musters erkennt man jedoch nur grundsätzlich Diskontinuitäten, ohne ein Trassenelement zu identifizieren.

Das bedeutet, dass die Methode bisher Fehler oder Streckenelemente zwar erkennen, jedoch nicht klassifizieren kann.

Unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen werden das generierte Referenzmuster einer Diskontinuität und das am Regelzug gemessene Beschleunigungssignal verglichen, um Kreuzkorrelationskoeffizienten zu erhalten. Jedem Messpunkt werden dabei der entsprechende normierte Kreuzkorrelationskoeffizient sowie dessen Position zugeordnet.

4 Messfahrten und Ergebnisse

4.1 Beschreibung des Messvorhabens

Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Betreiber in einem Reallabor, einem Zug der WEG, auf der Strecke »Tälesbahn« zwischen den Städten Neuffen und Nürtingen durchgeführt. Der größte Teil der untersuchten Strecke ist im Eigentum der WEG (ca. 9,6 km), ein kleiner Abschnitt (ca. 206 m) ist im Eigentum der DB Netz AG (Abb. 10). Die Strecke ist somit insgesamt ca. 9,81 km lang und hat eine Höhendifferenz von ca. 100 m.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden elf durchgeführte Messfahrten, alle in Fahrtrichtung Nürtingen, für die Analyse verwendet. Die Messungen wurden, wie oben beschrieben, mit normierter Kreuzkorrelation vorverarbeitet.

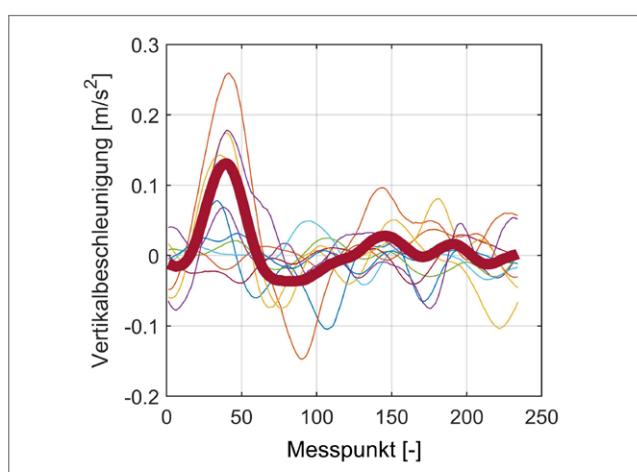


Abb. 9: Reales Referenzmuster einer Diskontinuität (gemitteltes Signalmuster)

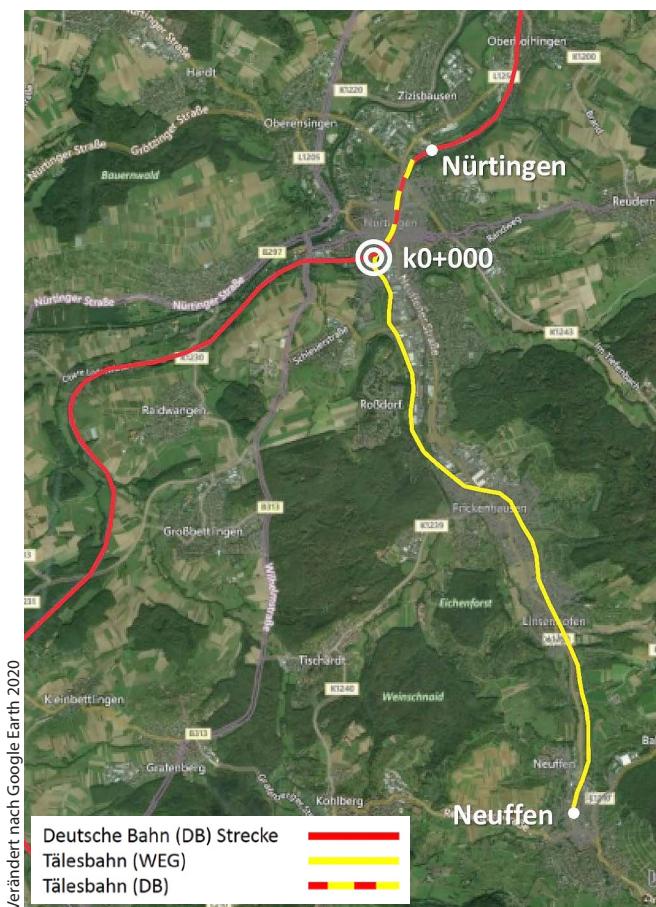


Abb. 10: Tälesbahn-Karte

4.2 Ergebnisse

Zur Bestimmung der Detektionsschwelle, ab der die normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten als Diskontinuitäten auf der Strecke identifiziert werden, wurden quantitative Analysen durchgeführt, anhand derer der Schwellwert festgelegt werden konnte. Die Detektionsschwelle wurde unter Berücksichtigung der bekannten Positionen der Diskontinuitäten und den dazugehörigen Ausschlägen des Kreuzkorrelationskoeffizienten empirisch ermittelt. Durch die Kenntnis der Positionen der Diskontinuitäten auf der Strecke, konnte zunächst jeder Diskontinuität der entsprechend ermittelte Koeffizientenwert zugeordnet werden. Dies erfolgte für elf durchgeführte Fahrten. Abb. 11 zeigt ein Beispiel für die Erkennung der Diskontinuitäten auf der Route. In Abb. 11 oben wird das Diagramm der normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten gezeigt. Mehrere hohe Werte stimmen mit den Positionen der Diskontinuitäten, wie Weichen, Straßenkreuzungen und Brücken, überein. Die gelbe Linie stellt dabei den Schwellwert der Koeffizienten dar, ab dem davon auszugehen ist, dass eine Diskontinuität vorliegt. Die Festlegung der Schwelle auf einen Wert von 0,74 wird anhand der Tab. 1 erläutert. Abb. 11 unten zeigt eine grobe Skizze der Trasse mit ihren jeweiligen Weichen, Straßenkreuzungen und Brücken. Die orangefarbenen Kreise zeigen die Werte des Kreuzkorrelationskoeffizienten an, die über dem definierten Schwellwert liegen. Die Nummerierung von 1 bis 24 repräsentiert die in Tab. 1 gezeigte Diskontinuitätsnummer.

Tab. 1 zeigt die Auswertematrix für die Bestimmung des Schwellenwertes. Dabei sind die Abkürzungen wie folgt definiert: S = Straßenkreuzung, W = Weiche, B = Brücke.

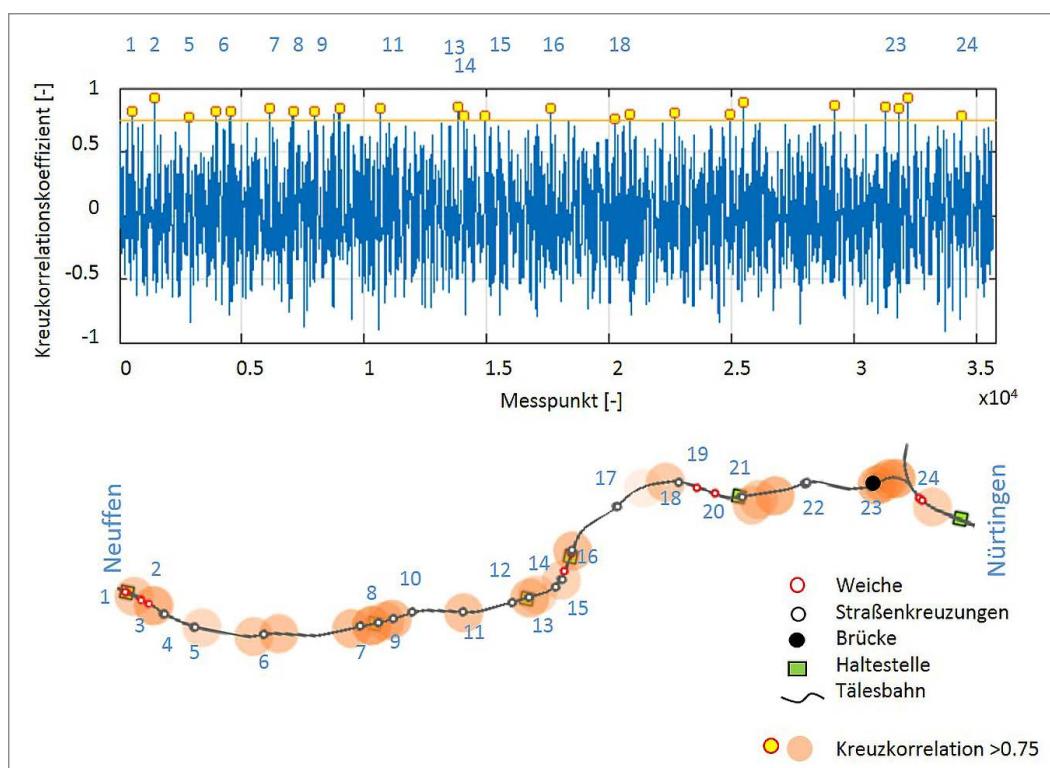


Abb. 11:
Erkennung von Dis-
kontinuitäten entlang
der Tälesbahn durch
vertikale Beschleu-
nigungen, die von
einem einachsigen
Beschleunigungs-
messer gemessen
wurden.

Die Matrix zeigt die normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten, die für jede Diskontinuität über elf Fahrten berechnet wurden. Da diese Koeffizienten unterschiedliche Werte haben, wird ein Durchschnittskoeffizient berechnet, um einen Referenzwert bereitzustellen, mit dem diese Diskontinuitäten identifiziert werden können. Aus der Menge der Durchschnittswerte wurde 0,74 als Schwellwert festgelegt. Alle Werte größer oder gleich 0,74 wurden sowohl in der Matrix als auch in Abb. 11 unten in Orange hervorgehoben und repräsentieren positive Matches/Detektionen. Mit dieser Methode konnten 16 der 24 analysierten Diskontinuitäten erkannt werden.

Für die Ortung mittels GNSS lag die Verfügbarkeit bei der Befahrung der Strecke bei 100 %. Entsprechend der Aufgabenstellung bezieht sich die Analyse der Positionsgenauigkeit relativ zur Streckenkilometrierungskarte. Die erreichte Genauigkeit der GNSS-Messungen relativ zur

Streckenkilometrierungskarte, dargestellt über die errechneten Abstände zwischen den Wegmarken der Karte und den zu den Wegmarken zugeordneten, gemessenen GNSS-Positionen, liegen zwischen maximal 4,65 m und minimal 0,04 m. Der Mittelwert liegt bei 1,71 m, der RMS bei 1,10 m. Werte unter 0,5 m haben nur einen Anteil von ca. 12 % an der Gesamtstrecke. Bei der Betrachtung der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit von 2,5 m ist festzustellen, dass diese auf ca. 74 % der Strecke eingehalten worden ist. Werte über 4 m haben einen Anteil von ca. 6 % an der Gesamtstrecke. Hier handelt es sich um Gebiete mit streckenangrenzender Vegetation und Bahnhöfen, sodass Abschattungen offensichtlich eine Rolle spielen. Stellt man diesen Wert den in Abschnitt 2.1 formulierten Anforderungen von 0,5 m Ortungsgenauigkeit gegenüber, so sind diese auf 88 % der Strecke nicht eingehalten worden. Die Einflüsse der Antennenposition im Fahrgastraum auf die

Tab. 1: Auswertematrix für die Festlegung der Detektionsschwelle

| Nummer | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Typ | W | W | W | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| Fahrt 1 | 0,81 | 0,92 | 0,62 | 0,65 | 0,76 | 0,81 | 0,84 | 0,81 | 0,82 | 0,70 | 0,84 | 0,70 |
| Fahrt 2 | 0,84 | 0,83 | 0,67 | 0,70 | 0,80 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,68 | 0,62 | 0,68 | 0,66 |
| Fahrt 3 | 0,71 | 0,84 | 0,75 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,72 | 0,81 | 0,63 | 0,62 | 0,90 | 0,81 |
| Fahrt 4 | 0,75 | 0,80 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,90 | 0,87 | 0,62 | 0,65 | 0,65 | 0,79 |
| Fahrt 5 | 0,68 | 0,65 | 0,70 | 0,71 | 0,68 | 0,74 | 0,71 | 0,72 | 0,68 | 0,73 | 0,73 | 0,68 |
| Fahrt 6 | 0,77 | 0,76 | 0,80 | 0,76 | 0,78 | 0,77 | 0,79 | 0,81 | 0,76 | 0,68 | 0,65 | 0,77 |
| Fahrt 7 | 0,84 | 0,82 | 0,67 | 0,69 | 0,80 | 0,69 | 0,70 | 0,69 | 0,68 | 0,61 | 0,68 | 0,65 |
| Fahrt 8 | 0,71 | 0,84 | 0,74 | 0,70 | 0,69 | 0,71 | 0,71 | 0,81 | 0,62 | 0,62 | 0,89 | 0,81 |
| Fahrt 9 | 0,80 | 0,92 | 0,62 | 0,64 | 0,76 | 0,81 | 0,83 | 0,81 | 0,82 | 0,69 | 0,84 | 0,70 |
| Fahrt 10 | 0,80 | 0,75 | 0,71 | 0,73 | 0,70 | 0,72 | 0,69 | 0,72 | 0,63 | 0,65 | 0,88 | 0,71 |
| Fahrt 11 | 0,68 | 0,72 | 0,71 | 0,71 | 0,77 | 0,73 | 0,77 | 0,78 | 0,72 | 0,73 | 0,71 | 0,88 |
| Durchschnitt | 0,76 | 0,80 | 0,70 | 0,70 | 0,74 | 0,74 | 0,76 | 0,78 | 0,70 | 0,66 | 0,77 | 0,74 |

| Nummer | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Typ | S | S | S | S | S | S | W | W | S | S | B | W |
| Fahrt 1 | 0,85 | 0,78 | 0,78 | 0,85 | 0,68 | 0,76 | 0,61 | 0,52 | 0,68 | 0,69 | 0,92 | 0,78 |
| Fahrt 2 | 0,83 | 0,82 | 0,77 | 0,81 | 0,80 | 0,70 | 0,68 | 0,72 | 0,93 | 0,72 | 0,82 | 0,78 |
| Fahrt 3 | 0,82 | 0,72 | 0,71 | 0,75 | 0,69 | 0,89 | 0,84 | 0,75 | 0,76 | 0,71 | 0,79 | 0,85 |
| Fahrt 4 | 0,75 | 0,70 | 0,69 | 0,76 | 0,65 | 0,75 | 0,76 | 0,71 | 0,92 | 0,72 | 0,78 | 0,68 |
| Fahrt 5 | 0,76 | 0,72 | 0,71 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,72 | 0,71 | 0,76 | 0,71 | 0,90 | 0,77 |
| Fahrt 6 | 0,76 | 0,77 | 0,70 | 0,76 | 0,74 | 0,69 | 0,73 | 0,73 | 0,92 | 0,73 | 0,76 | 0,74 |
| Fahrt 7 | 0,82 | 0,81 | 0,77 | 0,80 | 0,80 | 0,69 | 0,67 | 0,72 | 0,92 | 0,76 | 0,76 | 0,77 |
| Fahrt 8 | 0,75 | 0,72 | 0,71 | 0,75 | 0,69 | 0,65 | 0,83 | 0,75 | 0,76 | 0,75 | 0,75 | 0,84 |
| Fahrt 9 | 0,84 | 0,74 | 0,72 | 0,84 | 0,68 | 0,76 | 0,60 | 0,52 | 0,68 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
| Fahrt 10 | 0,76 | 0,82 | 0,77 | 0,82 | 0,78 | 0,76 | 0,76 | 0,74 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,74 |
| Fahrt 11 | 0,69 | 0,71 | 0,72 | 0,81 | 0,80 | 0,75 | 0,77 | 0,88 | 0,83 | 0,86 | 0,82 | 0,78 |
| Durchschnitt | 0,78 | 0,76 | 0,73 | 0,79 | 0,73 | 0,74 | 0,72 | 0,70 | 0,81 | 0,74 | 0,80 | 0,77 |

Ortungsgenauigkeit sind dabei grundsätzlich nicht bekannt. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Sensorsgenauigkeit auf 74 % der Strecke eingehalten worden ist, sodass die Einflüsse grundsätzlich gering zu sein scheinen. Nach Eissfeller et al. (2005) erfährt ein Signal beim Durchtritt einer Wand eine Dämpfung. Der Dämpfungsfaktor ist dabei, neben der Schichtdicke und der Wellenlänge, maßgeblich vom Material und der zugehörigen Dielektrizitätskonstante abhängig. Die umgebenden Materialien in der Nähe der Antenne waren Glasfenster und die GFK-Karosserie des Zugwagens, für die Dämpfungsfaktoren zwischen 0,4 bis 0,8 anzusetzen sind. Des Weiteren wurden in einer Studie über kinematischen GPS/GNSS-Anwendungen in Open-Sky-Szenarien für verschiedene Empfänger Positionsfehler zwischen unter 0,06 m und 1,44 m festgestellt (Catania et al. 2020). Diese unabhängig festgestellten Werte liegen im ähnlichen Genauigkeitsbereich wie die hier festgestellten Werte, sodass die Vermutung eines geringen Einflusses durch die Antennenposition gestützt wird.

Abschließend ist zu erwähnen, dass keinerlei Informationen über die Genauigkeit der Streckenkilometrierungskarte zu Verfügung standen, sodass im Moment keine Angaben über die absolute Ortungsgenauigkeit möglich sind.

5 Fazit und Ausblick

Der Beitrag präsentiert ein erstes Konzept zum Aufbau eines Gleisfehlerdetektionssystems, das zukünftig auf Regelzügen unter Nutzung von Low-Cost-Sensorik zum Einsatz kommen soll. Das Konzept sieht vor, Methoden aus den Themengebieten Signalverarbeitung und Ortung so zu kombinieren, dass dem Anwender ein möglichst effizientes Detektions- und Ortungsverfahren zur Verfügung gestellt werden kann.

Erkennung von Diskontinuitäten und Gleisfehlern

Es wurde gezeigt, dass das System im momentanen Ausbauzustand noch nicht in der Lage ist, vollständige Detektionen von Streckenelementen der Gleisinfrastruktur oder Gleisfehler zu gewährleisten. Ebenfalls ist eine eindeutige Klassifikation der detektierten Diskontinuitäten nicht möglich. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass einige ausgewählte und zuvor lokalisierte Streckenelemente detektiert werden konnten. Die Erkennungsrate liegt dabei bei ca. 67 %.

Die Anwendung der Kreuzkorrelationsmethode ist grundsätzlich sowohl für die Messungen am Fahrweg-Fahrzeugmodell wie auch für die Regelzugmessungen in der Realität möglich. Jedoch bleibt die Erzeugung von eindeutigen Referenzmustern und die Festlegung von eindeutigen Detektionsschwellen zum jetzigen Zeitpunkt ein offener, noch zu lösender Aspekt.

Für das zukünftige Detektions- und Lokalisierungssystem von Gleisfehlern sind alternative Methoden wie z. B. Wavelet-Analysen oder Algorithmen der künstlichen

Intelligenz zu wählen. Diese Methoden konzentrieren sich nicht auf die Berechnung von Korrelationskoeffizienten, sondern auf die Zuweisung einer Gleisfehlerkategorie zu jedem Messpunkt. Für die Anwendung der alternativen Verfahren sollen in Zukunft automatische Klassifikationen der Diskontinuitäten auf Rohsignalebene, in Kombination mit einer präzisen Positionsbestimmung, möglich werden. Die Klassifikationen können dann für die Algorithmen der künstlichen Intelligenz eingesetzt werden, um verschiedene Arten von Defekten sowohl im Fahrzeug-Fahrwegmodell als auch auf realen Gleistrassen zu erkennen (Bahamon et al. 2019, Bahamon und Martin 2020, Rapp und Martin 2018). Des Weiteren ist es beabsichtigt, eine Datenbank zu erstellen, die unterschiedliche Arten von Gleisfehlern sowie typische Infrastrukturpunkte (Steifigkeitswechsel an Brücken und Bahnübergängen, fahrdynamische Unstetigkeitsstellen an Weichenherzstücken und am Weichenanfang usw.) enthält. Auf dieser Grundlage kann ein dynamisches Datensystem entwickelt werden, das eine Veränderung des Gleiszustands im zeitlichen Verlauf erkennbar macht. Eine Erweiterung der Schadensmuster sowie eine Verbesserung der Auswertemethode um die Betrachtung des Frequenzbereichs und Ansätze der neuronalen Netze befinden sich in der Entwicklung.

Ortung und Map-Matching

Auch im Bereich der Ortung konnten die Vorgaben an die Positionsgenauigkeit von 0,5 m relativ zur Streckenkilometrierungskarte über große Teile von ca. 88 % der Strecke nicht eingehalten werden. Im Hinblick darauf ist eine Steigerung der Ortungsgenauigkeit von größter Notwendigkeit. Dafür, aber auch zur erweiterten Nutzung des Systems auf alternativen Strecken, ist der Einsatz eines Multisensorsystems geplant. Die Erweiterung des jetzt vorhandenen GNSS-basierten Messsystems um optische Odometrie (Korrelationsgeschwindigkeitsmesser) und Gyroskope kann in Gebieten mit niedriger GNSS-Genauigkeit helfen, die Ortungsgenauigkeit zu verbessern. Darüber hinaus können GNSS-Störungen oder Ausfälle durch eine Koppelnavigationslösung überbrückt werden. Solche Bereiche können z. B. hohe Böschungen, Tunneldurchfahrten und Brückenunterfahrten sein. Mit dem Einsatz eines Multisensorsystems ist auch die Konzeption eines entsprechenden Datenfusionsalgorithmus, wie z. B. Erweiterter Kalmanfilter (EKF) oder Unscented Kalmanfilter (UKF) unter Nutzung digitaler Streckenkarten sowie der Berücksichtigung von Kartenelementen, wie z. B. Haltestellen, als Bedingungen geplant. Zuletzt ist die Nutzung des globalen GNSS PPP-Uhrensignals zur zeitlichen Synchronisation aller Sensoren erstrebenswert.

Danksagung

Die Autoren danken der WEG für die gegebene Möglichkeit, Messungen am realen Zug durchzuführen, sowie den WEG Mitarbeitern für ihre Unterstützung bei der Installation der Sensoren und der Durchführung der Messfahrten.

Literatur

- Allweil, M. (2014): Fahrwegmessung bei der DB Netz AG. Vortrag im Rahmen der Veranstaltung DMG Bezirksgruppe Mitte, 06.03.2014, Berlin. www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag_allweil.pdf, letzter Zugriff 07.07.2020.
- Bahamon, S., Martin, U. (2020): Erkennung von punktuellen Unstetigkeitsstellen am Fahrweg am Beispiel eines Fahrzeug-Fahrwegmodells – Ansatz mit Methodik der künstlichen Intelligenz (EPIB 1.1). Beitrag Abschlussworkshop EPIB, Februar 2020 in Stuttgart.
- Bahamon, S., Rapp, S., Rupp, C., Liu, J., Martin, U. (2019): Recognition of track defects through measured acceleration P1 & P2. Proceedings 7th International Conference of EACEF (European Asian Civil Engineering Forum), 30.09.–02.10.2019 in Stuttgart.
- BMJV – Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (1967): Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). Zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 5.4.2019 I 479. www.gesetze-im-internet.de/ebo/EBO.pdf, letzter Zugriff 15.07.2020
- Böhringer, F. (2008): Gleisselektive Ortung von Schienenfahrzeugen mit bordautonomer Sensorik. Schriftreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH). ISBN: 978-3-86644-196-5.
- Catania, P., Comparetti, A., Febo, P., Morello, G., Orlando, S., Roma, E., Vallone, M. (2020): Positioning Accuracy Comparison of GNSS Receivers Used for Mapping and Guidance of Agricultural Machines. *Agronomy* 2020, 10, 924. DOI: 10.3390/agronomy10070924.
- Eissfeller, B., Teubner, A., Zucker, P. (2005): Indoor-GPS: Ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich? *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Heft 4/2005, 130. Jg., 226–234.
- Esveld, C. (1986.): Measuring and rectifying rail roughness and bad welds. 3rd Int. Heavy Haul Railways Conf., Paper BIB-52, Vancouver.
- Heßelbarth, A. (2009): GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Heft 5/2009, 134. Jg., 278–286.
- IPM (2020): »Predictive Maintenance«: Optische Überwachung von Infrastruktur und Zügen. Augensichere Laserscanner und ultraschnelle Kamerasysteme für die effiziente Erfassung im Regelbetrieb. www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/objekterfassung-laserscanning/anwbahnmesstechnik.html, letzter Zugriff 04.07.2020.
- Jäger, R., Zwiener, J. (2016): Flugdynamik, Multisensornavigation und Steuerung skalierbarer Out-/Indoor-Multicopter UAV. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Augsburg, 53–81.
- Li, K., Tan, H-S., Hedrick, J.K. (2009): Map-Aided GPS/INS Localization Using a Low-Order Constrained Unscented Kalman Filter. Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December, 2009.
- Menius, R., Matthews, V. (2017): Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen. 9. Aufl., Springer Verlag. ISBN 978-3-658-17177-3.
- Mirabadi, A., Mort, N., Schmid, F. (1996): Application of Sensor Fusion to Railway. Proceedings of the 1996 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. December 8–11, 1996, Washington, D.C., U.S.A
- National Instruments (2019): NI LabVIEW for CompactRIO Developer's Guide. www.ni.com/de-de/shop/compactrio/compactrio-developers-guide.html, letzter Zugriff 08.10.2019.
- National Instruments (2020): Getting Started with CompactRIO. https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373254C-01/canopenhelp/canopen_crio_gsd/, letzter Zugriff: 02.02.2021.
- PCB Piezotronics (2019): Datasheet PCB Synotech Accelerometer. www.pcb.com/products?m=M603C01, letzter Zugriff 07.08.2020.
- Rao, Yerravelli. (2014): Application of normalized cross correlation to image registration. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Vol. 03. 12–16. DOI: 10.15623/ijret.2014.0317003.
- Rapp, S., Martin, U., (2018): Erkennung von punktuellen Unstetigkeitsstellen am Fahrweg am Beispiel eines Fahrzeug-Fahrwegmodells – Ansatz zur Modellbildung (EPIB 1.1). Beitrag Auftaktworkshop EPIB, März 2018 in München.
- Rapp, S., Martin, U., Strähle, M., Scheffbuch, M. (2019): Track-vehicle scale model for evaluating local track defects detection methods. *Transportation Geotechnics* (2019), Volume 19. ISSN: 2214-3912.
- Siemens (2018): Railigent – die Lösung für intelligentes Asset-Management. www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/services/digital-services/railigent.html, letzter Zugriff 26.07.2020.
- Ublox (2020): LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet. www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_%28UBX-14044797%29.pdf, letzter Zugriff 07.07.2020.
- Vossloh (2020): Immer bereit für die Strecke: Asset Management, Schieneninspektion, Data Processing, Training und Consulting. www.vossloh.com/01_product_finder/VRS/Asset-Management/VOS_AM_DE-Final.pdf, letzter Zugriff 04.07.2020.
- Wanninger, L. (2011): Qualitätsicherung bei GNSS-Diensten. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Heft 1/2011, 136. Jg., 8–17.
- Wirth, H. (2008): Der neue Lichtraummesszug LIMEZ III der Deutschen Bahn AG. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Heft 3/2008, 133. Jg., 180–186.

Kontakt

Otto Lerke | Martin Metzner | Volker Schwieger
 Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie
otto.lerke@iigs.uni-stuttgart.de
martin.metzner@iigs.uni-stuttgart.de
volker.schwieger@iigs.uni-stuttgart.de

Sebastian Bahamon-Blanco | Ullrich Martin
 Universität Stuttgart, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen
sebastian.bahamon@ievvwi.uni-stuttgart.de
ullrich.martin@ievvwi.uni-stuttgart.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeis.info.