

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BMVI-Förderprogramm IHATEC

Hafenbetriebsoptimierung durch
vorausschauende eingebettete Zu-
standsüberwachung der Gleisinfra-
struktur (HavenZuG)

Gemeinsamer Schlussbericht der
Verbundpartner



IHATEC
Innovative
Hafentechnologien

Inhaltsverzeichnis

1. Arbeitspaket 1: Anforderungen	6
1.1. Anforderungsanalyse.....	6
1.2. Konzeption des Messsystems.....	17
1.3. Konzeption der Datenerhebung und der Messkampagnen	21
2. Arbeitspaket 2: Datenerhebung und Messkampagnen.....	24
2.1. Inbetriebnahme.....	24
2.2. Referenzdatenmessung	27
2.3. Messkampagnen Hafenbahnen	35
3. Arbeitspakete 3: Datenanalyse und -visualisierung	36
3.1. Datenanalyse der Fahrzeugdynamik	36
3.2. Optische Sensorik.....	67
3.3. Erstellung einer interaktiven Visualisierung	80
4. Arbeitspaket 4: Evaluation	83
4.1. Reifegrad des Messsystems.....	83
4.2. Evaluation der Algorithmen zur Ableitung des Längsprofils.....	83
4.3. Evaluation der Datenanalyse mittels tiefer neuronaler Netze	94
5. Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	97
5.1. Vorgehensweise.....	97
5.2. Ausgangszustand.....	98
5.3. Mehrwert der eingebetteten Zustandsüberwachung	101
5.4. Kosteneinsparpotential.....	103
5.5. Bewertung der Wirtschaftlichkeit.....	106
5.6. Erfolgsaussichten für eine nachgelagerte Produktentwicklung	107
5.7. Zusammenfassung	108
Abbildungsverzeichnis	109

Einleitung

In diesem Bericht werden die im Projekt HavenZuG durch die Verbundpartner erreichten Ergebnisse nach Arbeitspaketen gegliedert zusammengefasst. Dieser Bericht ergänzt die individuellen Schlussberichte der beteiligten Projektpartner. Nach einer knappen Projektübersicht (siehe auch [1]) erfolgt die Darstellung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 5 in den entsprechenden Abschnitten. Das in diesem Bericht nicht tiefergehend dargestellte sechste Arbeitspaket diente der Projektkoordination in Form von regelmäßigen Konsortialtreffen und Workshops.

Der Bericht entstand durch die Mitwirkung folgender Autorinnen und Autoren:

Partner	Autorinnen und Autoren
DLR	Dr. Benjamin Baasch, Dr. Jörn Groos, Dr. Judith Heusel, Kanwal Jahan, Dr. Wolfgang Riedler, Dr. Michael Roth, Sebastian Schulz
Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig mbH	Jens Hohls, Kirstin Seliger
IS Predict GmbH	Britta Hilt
Vossloh Rail Services GmbH	Dr. Konstantin von Diest, Roman Gelzhäuser

Projektüberblick

Die Hafenbahnen sind maßgeblicher Bestandteil der Verkehrsinfrastruktur deutscher See- und Binnenhäfen. Für eine Erhöhung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Gleisinfrastruktur sowie eine Senkung der Lebenszykluskosten ist die Einführung einer prädiktiven Instandhaltung erforderlich. Grundvoraussetzung dafür ist eine kontinuierliche Zustandsüberwachung, um sich entwickelnde Fehlzustände bereits frühzeitig zu erkennen. Dies ist mit den etablierten Verfahren (Streckenbegehungen, handgeführte Messgeräte, dezidierte Messfahrzeuge) aufgrund der damit verbundenen Kosten und Einschränkungen der Anlagen-Verfügbarkeit ökonomisch nicht möglich. Ein innovativer Ansatz für Hafen- und Industriebahnen ist die Einführung einer in den regulären Betrieb eingebetteten automatisierten Gleiszustandsüberwachung mit nachrüstbaren Multi-Sensor-Systemen auf den verkehrenden Rangiereinheiten.

Projektziel

Im Rahmen dieses Projektes erfolgte die prototypische Implementierung, Erprobung und Weiterentwicklung der eingebetteten Zustandsüberwachung für Hafenbahnen im operativen Rangierbetrieb der Hafenbahn Braunschweig. Zum Abschluss des Projektes liegen nun umfangreiche Daten, Informationen und Erfahrungen vor, um sowohl die Erfolgsaussichten, Aufwände und Risiken einer dem Projekt nachgelagerten Produktentwicklung als auch den Einsatz solcher Systeme auf deutschen Hafenbahnen anhand der Anforderungen der Hafenwirtschaft bewerten zu können.

Lösungsansatz

Im Projekt wurde das Gesamtsystem bestehend aus Multi-Sensor-Systemen auf den Rangierfahrzeugen sowie einem Hintergrundsystem zur automatischen Datenanalyse und Informationsbereitstellung prototypisch aufgebaut und im Hafen Braunschweig in operativer Umgebung erprobt. Die erhobenen Messdaten waren die Grundlage für die Entwicklung von KI-basierten Analyseverfahren für die Detektion und Diagnose von Fehlzuständen der Schieneninfrastruktur.

Projektdurchführung

Die Durchführung des Projektes erfolgte im Zeitraum September 2018 bis November 2021. Das Verbundprojekt mit einem Projektvolumen von insgesamt 1.344.436 € wurde im Rahmen des Förderprogramms IHATEC – Innovative Hafentechnologien durch das BMDV (vormals BMVI) gefördert (Förderanteil 80,6%).

Das Projekt gliederte sich in insgesamt fünf fachliche Arbeitspakete und ein Arbeitspaket zur Projektkoordination (Abbildung 1). Die Projektergebnisse werden in diesem Bericht entsprechend der Arbeitspakete (AP) 1 bis 5 in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt.

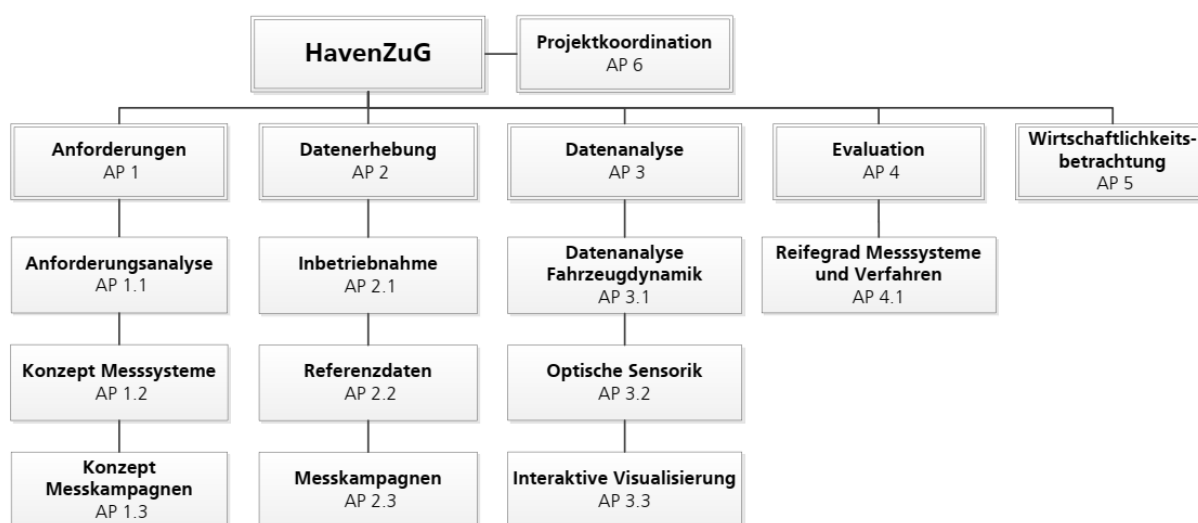


Abbildung 1: Projektstrukturplan

Projektkonsortium und Aufgabenverteilung

Die Projektdurchführung erfolgte durch einen Verbund aus Hafenwirtschaft (Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig mbH, **HBS**; Hamburg Port Authority AöR, **HPA**), Unternehmen aus der Schienenfertigung und -instandhaltung (Vossloh Rail Services GmbH, **VRS**) und industriellen Zustandsüberwachung (IS Predict GmbH, **ISP**) sowie der außeruniversitären Forschung (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt **DLR** e.V.).

Partner	Projektarbeiten
Häfen (HBS, HPA)	Lenkung der inhaltlichen Projektdurchführung durch Ableitung der Anforderungen an das System sowie durch die Evaluation der in operativer Umgebung erhobenen Zustandsinformationen (z. B. gemeinsame Streckenbegehungen, Abgleich mit vorhandenen Messdaten, etc.). Bereitstellung von Möglichkeiten zur längerfristigen Erprobung des Multi-Sensor-Systems in operativer Umgebung auf einer Rangierlok. Bewertung der Projektergebnisse vor dem Hintergrund einer wirtschaftlichen Betriebsfähigkeit.
VRS	Anforderungsanalyse mit der Hafenwirtschaft. Mitwirkung an der Weiterentwicklung des eingesetzten Multi-Sensor-Messsystems sowie der Datenerhebung in operativer Umgebung. Erhebung eines Referenzdatensatzes zum aktuellen Schienen- und Gleiszustand. Mitwirkung bei der Entwicklung der Analyseverfahren und Einbringen von Domänenexpertise (Bahnsystem). Evaluation des Reifegrades des Messsystems und der Verfahren. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine dem Projekt nachgelagerte Produktentwicklung.
ISP	Forschung und Entwicklung an datengetriebenen Datenanalyseverfahren mit selbstlernenden Algorithmen basierend auf tiefen neuronalen Netzen für die Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur.
DLR	Aufbau und Erprobung des eingebetteten Sensorsystems mit Kameras und Beschleunigungssensoren. Entwicklung von Algorithmen zur Datenerfassung, Datenvorprozessierung, Georeferenzierung, Merkmalsextraktion und Mustererkennung. Längerfristige Datenerhebung in operativer Umgebung auf einer Rangierlok der Hafenbahn Braunschweig. Erforschung von Datenanalyseverfahren zur Erhebung von Zustandsinformationen aus den erhobenen Messdaten (Fahrdynamik und optische Umfelderkennung). Koordination des Projektverbundes.

1. Arbeitspaket 1: Anforderungen

1.1. Anforderungsanalyse

Das Hauptziel des Arbeitspakets 1.1 lag in der Bestimmung der betrieblichen, rechtlichen, wirtschaftlichen sowie technischen Anforderungen an das Gesamtsystem. Dies umfasst einerseits die praktischen Anforderungen der Hafenbetreiber (z. B. Ermittlung der relevanten und somit durch das System idealerweise zu erkennenden Fehlzustände, Bestimmung der erwarteten Verbesserungspotentiale durch den Einsatz des Messsystems und dessen bevorzugte Nutzungsbereiche, Feststellung der regulatorischen Einschränkungen zur Befestigung eines Messsystems auf Rangierlokomotiven und zu einer Verwendung im laufenden Betrieb, Erwartungen an den wirtschaftlichen Nutzen, Anforderungen an den Zeitpunkt der Fehlzustandserkennung) und andererseits – teilweise darauf aufbauend – die technischen Anforderungen an das System.

1.1.1. Stand von Wissenschaft und Technik / Patentrecherche

Zur Bestimmung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik wurde ein kommentiertes Literaturverzeichnis erstellt. Dieses umfasst einen Überblick über relevante wissenschaftliche Veröffentlichungen und über die wichtigsten Fehlzustände von Schienen und Gleislage, deren mögliche Folgen sowie Zusammenhänge zu anderen Fehlzuständen. Weiterhin sind Informationen zu verschiedenen Verfahren zur Überwachung und Beurteilung des Schienen- und Gleiszustands, eine Bewertung dieser Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion der verschiedenen Fehlzustände und hinsichtlich einer Verwendung für den Einsatz auf Regelfahrzeugen enthalten. Neben einer umfassenden Recherche der wissenschaftlichen Literatur wurde eine im folgenden Abschnitt dargestellte Patentrecherche durchgeführt.

Die Patentrecherche wurde mittels der Stichworte „acceleration“, „rail“ und „defect“ durchgeführt. Es ergaben sich zahlreiche Treffer für Erfindungen, die mit Hilfe von Beschleunigungssensoren an gefederten (z. B. am Wagenkasten) oder ungefederten Massen (z. B. Achslager) Fehlzustände an Fahrzeug oder Fahrweg detektieren können. Näher untersucht wurden nur Schutzrechte, die sich auf eine Charakterisierung des Fahrwegs fokussieren.

Das älteste gefundene und inzwischen abgelaufene Patent geht zurück bis 1974. Spätere Patente spezialisieren sich deshalb auf besondere Kombinationen von Beschleunigungs- und anderen Sensoren, auf die Detektion von speziellen Schienen-/Gleismerkmalen (z. B. Weichen, Schweißstellen, etc.) oder besondere Auswerteverfahren. Der am häufigsten als „track defect“ bezeichnete Fehler ist eine laterale Gleisverwerfung, also ein relativ langwelliger Fehler. Kurzwellige Fehler wie Riffel oder Schlupfwellen werden beispielhaft als Schienenfehler erwähnt, aber eine Auswertung speziell auf die periodischen Merkmale wurde nicht erkannt. Die gefundenen Patente fokussieren vor allem auf die Detektion von Auffälligkeiten, weniger auf die Identifikation dieser Auffälligkeiten aufgrund gewisser Signalmerkmale oder -kombinationen.

Auffällig ist die hohe Anzahl von Patentanmeldungen in den USA, insbesondere im Zeitraum von 1995 bis 2005. Aus der durchgeführten Recherche ergaben sich keine Gefahren oder Schutzrechtsverletzungen für dieses Projekt.

1.1.2. Vorgehen zur Bestimmung der Anforderungen

1.1.2.1. Anforderungen der Hafenbetreiber

Zur Bestimmung der Anforderungen der Hafenbetreiber wurde zunächst ein umfangreicher Fragenkatalog erarbeitet. Der Fragenkatalog enthält Informationsabfragen zur praktischen Umsetzung der Erhebung von Referenz- und Achslagerbeschleunigungsdaten (Axle Box Acceleration, ABA), zur Feststellung relevanter Fehlzustände, zur Bestimmung des bisherigen Vorgehens bezüglich Inspektionen und Asset Management, zur Identifikation der Verbesserungswünsche der Hafenbetreiber in Bezug auf die bisher verwendeten Systeme und zu den Erwartungen an das neue System. Ergänzend fand im Hafen Braunschweig ein Workshop zur Bestimmung der Anforderungen aus Anwendersicht statt. Die aus der Besprechung und Beantwortung des Fragenkatalogs, der Ergebnisse des Workshops sowie einer Sichtung vorhandener Inspektionsdaten resultierenden Ergebnisse und deren Weiterverarbeitung im Projekt werden in Kapitel 1.1.3 genauer behandelt.

Die Antworten auf die Punkte des Fragenkatalogs zeigten, dass sich die Instandhaltung auf Reparaturen von bekannt gewordenen Schäden/Mängeln und die Inspektion auf die Durchführung von vorgeschriebenen Fristenuntersuchungen beschränkt. Eine Überwachung von Fehlern und eine präventive Instandhaltung, mit dem Ziel kleine Schäden frühzeitig und kostengünstig beheben zu können, bevor sie sich zu Fehlern größeren Ausmaßes entwickeln, findet aus Mangel an Ressourcen kaum statt. Wunsch der Infrastrukturbetreiber war es beispielsweise, den Schienenbruch – also das ultimative Versagen eines Bauteils – durch geeignete Diagnosen/Datenverarbeitung vorherzusagen, nicht das Erreichen einer Fehlertiefe, bis zu der Bahnbetrieb noch sicher möglich ist. Das Ergebnis der Befragung bestätigt die Annahme, dass eine kontinuierliche Zustandsüberwachung und automatische Auswertung dieser Daten, den Betreibern von Hafen- (und Industrie-)Gleisanlagen eine wichtige Hilfe darstellen würde.

1.1.2.2. Bestimmung der technischen Anforderungen an das Messsystem

Aus den gewünschten Funktionalitäten des Messsystems ergaben sich umfangreiche technische Anforderungen an dessen Komponenten. Eine Übersicht der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren und der betroffenen Komponenten und Eigenschaften des Systems ist nachfolgend tabellarisch dargestellt. Die Ergebnisse der technischen Anforderungsanalyse werden in Kapitel 1.1.4 dargestellt und erläutert.

<i>Funktion des Systems</i>	<i>Beeinflussender Faktor zur Bestimmung der Anforderungen</i>	<i>Berücksichtigung bei/ betroffene Komponenten und Eigenschaften:</i>
Erkennung relevanter Fehl-zustände aus Beschleunigungen am Achslager (Axle Box Accelerations, ABA)	Zu erwartende Beschleunigungen durch Überfahrt relevanter Fehlzustände	Frequenz- und Messbereich der Beschleunigungssensoren Auflösung und maximale Abtastrate des Analog-Digital-Wandlers
Georeferenzierung der ABA- und Kameradaten	Benötigte Genauigkeit der Georeferenzierung (Anwender und Datenanalyse)	Geeignete Sensorwahl/-kombination
Gesicherte Betriebsfähigkeit	Auftretende mechanische und elektro-magnetische Belastungen der Sensoren Spannungsversorgung des Gesamtsystems Befestigungsmöglichkeiten	Sensor- und Gehäusewahl Schutz der Sensoren gegenüber auftretenden Belastungen Gestaltung der Energieversorgung: Wahl möglicher Eingangsspannungen, Ausfallmechanismen
Datenverarbeitung und Datenanalyse	Benötigter Zeitpunkt der Verwendung der Daten, Datenvolumen	Art der Datenübertragung Datenformat und Datenmodelle
Bestimmung von Zustands- und Streckenmerkmalen aus Kameradaten	Erwünschte Bildinformationen, Bildschärfe, verarbeitbare Datenvolumen	Kamerawahl, Bildauflösung, Abtastrate

Tabelle 1: Einflussfaktoren zur Bestimmung der technischen Anforderungen

1.1.3. Ergebnisse: Anforderungen an das Gesamtsystem

Die Häfen in Braunschweig und Hamburg repräsentieren unterschiedliche Anwendertypen des Zustandsüberwachungssystems, deren Anforderungen und Nutzungsprofile sich aufgrund der unterschiedlichen Größe und Auslastung der vorhandenen Hafenbahnen stark unterscheiden. Der Hafen Braunschweig repräsentiert mit unter 50 Mitarbeitenden und etwa 15 km Gesamtgleislänge einen typischen deutschen Binnenhafen mittlerer Größe. Der Bahnbetrieb wird durch die Hafenbetriebsgesellschaft mit eigenen Fahrzeugen durchgeführt. Dementgegen verfügt der Hafen Hamburg als großer Seehafen über eine Hafenbahn mit etwa 300 km Gesamtgleislänge. Der Bahnbetrieb wird von mehr als hundert Eisenbahnverkehrsunternehmen erbracht. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse werden daher für beide Anwenderprofile im Folgenden getrennt dargestellt.

1.1.3.1. Anforderungen des Hafens Braunschweig (Binnenhafen)

Im Hafen Braunschweig finden bisher zyklische Inspektionen in den gesetzlich vorgeschriebenen Intervallen statt. Konkret bedeutet dies, dass in zweijährigem Rhythmus eine Gleis- und Weichenprüfung (mit einem handgeschobenen Messsystem und Sichtprüfung) und quartalsweise eine Gleisbegehung mit Sichtprüfung durchgeführt wird. Darüber hinaus erfolgen in unregelmäßigen Abständen und bei Bedarf Sichtprüfungen und Meldungen von Auffälligkeiten im Betrieb durch Eisenbahnbetriebsleiter und Lokführer. Auf diese Weise werden alle notwendigen Vorkehrungen getroffen, um gesetzliche Vorschriften ein- und den sicheren Betrieb aufrecht zu erhalten. Die genannten Inspektionen binden Personal und können nur durchgeführt werden, wenn die betroffenen Teile der Infrastruktur nicht genutzt werden. Eine deutliche Erhöhung der Inspektionsfrequenz und damit engmaschigere Kontrolle als Grundlage für eine prädiktive Instandhaltung ist mit diesen Methoden und den gegebenen Ressourcen nicht möglich.

Instandsetzungen (z. B. Korrektur der Gleisgeometrie durch Stopfen, Schwellentausch, Schienenschleifen, Spurrillenreinigung, Wiederherstellung eines freien Lichtraumprofils, ...) erfolgen nach den Empfehlungen des Gleisprüfers bzw. anhand der Befunde des Eisenbahnbetriebsleiters bei den regelmäßigen Sichtprüfungen.

Durch die Inspektionsdaten der vergangenen Jahre liegen Informationen über die Zustandsentwicklung der Infrastruktur vor, die momentan jedoch nicht für eine systematische Datenanalyse genutzt werden. Überlegungen zur Anschaffung eines Asset-Management-Systems wurden bisher aufgrund eines unklaren Kosten-Nutzen-Verhältnisses nicht weiterverfolgt. Bisher existiert kein Werkzeug zur systematischen Dokumentation der durchgeführten Inspektions- und Instandsetzungsarbeiten. Insbesondere die Sichtprüfungen durch das Personal werden nicht im Detail dokumentiert. Die Weichenblätter werden handschriftlich geführt. Hingegen existiert ein Dokumentationssystem zur Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionsintervalle.

Anwendungsprofil einer automatisierten Zustandsüberwachung

Für den Hafen Braunschweig sind in erster Linie die folgenden zwei Anwendungsbereiche relevant:

- 1) Eine Entlastung des für die Inspektionen zuständigen Personals.
- 2) Eine belastbare Dokumentation engmaschig durchgeführter Zustandsbewertungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit.

Im Idealfall sollen die Berichte des Messsystems als Nachweis eines sicheren Infrastrukturzustands gegenüber der Landeseisenbahnaufsicht (LEA, Kontrollen einmal im Jahr) dienen können. Vom Hafen Braunschweig erwünschte Funktionalitäten des Systems werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Zunächst sollte das System die Möglichkeit bieten, Berichte über den Zustand eines Streckenabschnitts automatisiert (periodisch zu vom Nutzer festgelegten Intervallen sowie ad-hoc) zu erstellen. Der Bericht sollte Informationen über die stattgefundenen Fahrten auf dem Streckenabschnitt und die letzte Zustandsbewertung enthalten, im Idealfall in Form von wenigen Zustandsstufen, die zusätzlich farblich visualisiert sind. Darüber hinaus wird erwartet, dass starke Änderungen des Anlagenverhaltens sofort an den Nutzer gemeldet werden. Sich langsam vollziehende Änderungen sollten in einem vom Nutzer festgelegten Intervall (z. B. wöchentlich oder monatlich) im Bericht dokumentiert und rückgemeldet werden. So soll vermieden werden, dass die Arbeitslast des Nutzers durch das System erhöht wird. Wetterbedingte, aber ungefährliche Änderungen der Anlage sollten vom System als solche erkannt werden und keinen Fehlalarm auslösen.

Weiterhin sollte die Möglichkeit bzw. Verpflichtung bestehen, bei Warnungen des Systems einen Bearbeitungsvermerk nach erfolgter visueller Inspektion der betreffenden Stelle durch den Nutzer zu hinterlassen. Dies soll sowohl der Dokumentation innerhalb des Unternehmens als auch der Dokumentation nach außen dienen. Die Bearbeitung solcher Vermerke sollte den Eisenbahnbetriebsleitern vorbehalten sein. Die Meldung von erkannten Auffälligkeiten sollte auch für andere Nutzergruppen (z. B. das Rangierpersonal) offen sein. Dazu muss das System die Verwendung unterschiedlicher Nutzergruppen unterstützen. Die Einträge von Auffälligkeiten sollen die Gleisnummer und den laufenden Meter umfassen und die Möglichkeit bieten, Fotografien einzubinden. Vorhandene und bekannte, aber (noch) unkritische Zustände sollen im System hinterlegt werden können. Weiterhin sollen nicht nur Verschlechterungen, sondern auch Verbesserungen des Zustands an den Nutzer gemeldet werden. Die Toleranzgrenzen, die zu Zustandswarnungen führen, sind sichtbar zu machen und sollen durch den Nutzer anpassbar sein.

Eine gewünschte Anwendung des Braunschweiger Hafens ist zudem, durch das System Informationen über auf der Strecke liegende Gegenstände zu erhalten. Zudem ist zu prüfen, ob aus den Kameradaten die Position der Prellböcke bestimmt werden kann. Hilfreich wäre ebenfalls, wenn der Verschmutzungsgrad der Spurrillen und ideale Reinigungsintervalle bestimmt werden könnten.

Die gewünschte Genauigkeit bezüglich der Längsposition im Gleis beträgt 5 Meter und geht als Anforderung an die Georeferenzierung mit in die Anforderungsanalyse ein.

Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht der erwünschten Funktionalitäten.

<i>Funktionalität des Systems/Anforderung</i>	<i>Notwendigkeit</i>
Automatisierte Berichterstellung über den aktuellen Zustand, Zustandsbewertung (z. B. Ampel), ad-hoc-Abfrage sowie Benachrichtigungen nach benutzer-definiertem Intervall	erforderlich
Sofortige Meldung starker Auffälligkeiten	erforderlich
Integration bekannter Fehler	erforderlich
Kommentar- und Protokollfunktion	erforderlich
Transparente Gestaltung der Bewertung (Schranken durch Nutzer einseh- und änderbar)	wünschenswert
Möglichkeit zur Einbindung von Fotos	wünschenswert
Anzahl stattgefundener Fahrten pro Abschnitt	wünschenswert
Einbindung unterschiedlicher Nutzerprofile	wünschenswert
Detektion von Hindernissen, Verschmutzungen (z.B. durch Kohleverladung) auf der Fahrbahn, Verschmutzung der Spurrillen	wünschenswert
Bestimmung der Position des Prellbocks, Belegung der Gleise	wünschenswert

Tabelle 2: Anwendungsbereiche des Systems aus Sicht der Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig

Relevante Fehlzustände

Durch Beantwortung des Fragebogens, Gespräche mit den Eisenbahnbetriebsleitern und Durchsicht der Inspektionsdaten der vergangenen Jahre hat sich herausgestellt, dass die folgenden Fehlzustände für den Hafen Braunschweig von besonderer Relevanz sind:

- Schienenfehler:
 - Schienenbruch
 - Überwalzungen
 - Riffel
 - Schleuderstellen
 - Schlupfwellen
 - Gratbildung an der Innenfahrkante (an Übergängen und Weichen ohne Richtungswechsel)
 - Schienenstöße
- Gleislagefehler:
 - Spurerweiterung
 - Spurverengung
 - Gleisverwerfung
 - Verwindung
 - Überhöhung
 - Richtungsfehler
- Auftreten verbrauchter Schwellen (insbesondere verbrauchte Holzschwellen, selten Risse in Betonschwellen)
- Weichenfehler:
 - Gelöste Kleineisen an den Rippenplatten
 - Ausblühungen an den Rippenplatten
 - Spurweitenabweichungen
 - Fehlstellungen am Radlenker

Spurerweiterungen, Spurverengungen und verbrauchte Schwellen stellen nach den Protokollen des Gleisprüfers die am häufigsten beobachteten Fehlzustände im Hafen Braunschweig dar. Sie werden zwar in der Regel durch die periodischen Inspektionen mit Gleisgeometriemessgeräten rechtzeitig erkannt, könnten aber durch eine frühzeitige Erkennung schneller und aufwandsärmer beseitigt werden. Diese Fehlzustände werden bei starker Ausprägung durch den Gleisprüfer als betriebsgefährdend ausgewiesen, die Sicherheitsrelevanz wurde vom Hafen Braunschweig mit Stufe 4 (Höchststufe 5) bewertet, es drohen Entgleisungen. Spurweitenabweichungen und stark verbrauchte Schwellen treten an mehreren Stellen in Kombination auf, wie beispielsweise aus der

Gleisprüfung aus dem Jahr 2015 hervorgeht. Sie erfordern bei starker Ausprägung kurzfristige umfangreiche und kostenintensive Baumaßnahmen (Neubau des Abschnitts/Schwellentausch). Die Fehlzustände und die Baumaßnahmen führen zu einer eingeschränkten Infrastrukturverfügbarkeit; je nach Flexibilität des eingesetzten Gleisbauunternehmens kann dies einen längerfristigen Ausfall des Streckenabschnitts bedeuten. Die genannten Fehlzustände kommen regelmäßig, aber selten (ca. alle zwei Jahre) vor.

Schienenfehler wie Überwalzungen, Riffel, Schleuderstellen und Schlupfwellen werden ebenfalls beobachtet. Sie sind nicht unmittelbar betriebsgefährdend, können aber teilweise schwerwiegendere Folgefehler nach sich ziehen und Schienenlärm begünstigen. Beispielsweise können Schlupfwellen zur Gratbildung und schließlich zu Schienenausbrüchen führen. In der Vergangenheit verursachte eine Schleuderstelle im Hafen Braunschweig bereits einen Schienenbruch. Durch Riffel verursachte aufgetretene Folgeprobleme sind bislang nicht bekannt und aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten unter 30 km/h auch nicht zu erwarten.

Die Fehlzustände Schienenbruch und Gleisverwerfung treten plötzlich auf und sind betriebsgefährdend. Eine frühzeitige Detektion ist nicht möglich; jedoch wäre denkbar, dass einem Schienenbruch vorangehende Fehlzustände, wie z.B. Schleuderstellen oder die Gleisverwerfung, durch das System detektiert, beobachtet und dadurch rechtzeitig behoben werden können.

Weitere vorgekommene, jedoch bisher nicht betriebsgefährdende Fehlzustände der Gleislage sind Verwindungsfehler und Überhöhung.

Auch Fehlzustände an Weichen, insbesondere abgefahrne Radlenker und Spurweitenabweichungen, bergen ein hohes Sicherheitsrisiko und traten in der Vergangenheit regelmäßig auf.

Ableitung von Anforderungen der HBS an Messsystem und Datenanalyse

Die als stark sicherheitskritisch eingestuften und aufwendig zu behebenden, aber durch das bestehende Inspektionsverfahren momentan rechtzeitig erkannten Fehlzustände sollten durch das Messsystem im Vorfeld sicher und idealerweise in einem sehr frühen Stadium detektiert werden. Als ein wichtiger Untersuchungsgegenstand wurde die Frage identifiziert, ob sich Spurweitenveränderungen aus den fahrdynamischen Reaktionen erkennen lassen, da diese häufig beobachtet werden und von ihnen eine große Gefahr ausgeht. Zudem sind sie im Gegensatz zu beispielsweise Schienoberflächenfehlern nicht gut mit dem bloßen Auge zu erkennen und werden somit nur schwer im Betrieb oder bei Begehungen entdeckt.

Berücksichtigt werden sollten zudem der Einfluss der Temperatur sowie anderer Witterungsbedingungen. Diese haben Einfluss auf das Anlagenverhalten: Hitze kann beispielsweise zur Ausdehnung der Gleise bis hin zur Gleisverwerfung führen, Frost zu Änderungen der Gleislage (Frosthebungen).

Langanhaltender Regen und eine mangelhafte Entwässerung verändern die Tragfähigkeit des Bodens [2]. Hier sollten häufig auftretende und ungefährliche witterungsbedingte Veränderungen des Anlagenverhaltens als solche erkannt und keine Fehlalarme ausgelöst werden, wohingegen kritische wetterabhängige Veränderungen wie beispielsweise Gleisverwerfung unbedingt gemeldet werden sollten.

1.1.3.2. Anforderungen des Hamburger Hafens

Aufgrund des deutlich größeren Gleisnetzes des Hamburger Hafens werden auf einigen Streckenabschnitten deutlich höhere Geschwindigkeiten (bis zu 60 km/h) erreicht. Die Sensorik des Messsystems sollte für diese höheren Maximalgeschwindigkeiten im Vergleich zum reinen Rangierbetrieb ausgelegt sein. Von der HPA wurden keine Fehlzustände als hochpriorisiert benannt; die für die HPA wichtigen Fehlzustände umfassen gleichermaßen Gleislage-, Schienen- sowie Weichenfehler. Unter anderem wurde eine Strecke benannt, auf der es zu Riffelbildung und Anwohnerbeschwerden wegen Lärmbelästigung kam.

Aufgrund der hohen Auslastung ist eine zuverlässige Infrastrukturverfügbarkeit von hoher Bedeutung und wird durch die Bundesnetzagentur kontrolliert. Aus diesem Grund werden bereits häufige, zyklische Inspektionen mit etablierten Inspektionsverfahren durchgeführt (bis zu zwei Mal im Jahr bei stark befahrenen Gleisen der Gruppe A), so dass Fehlzustände meist zeitnah erkannt werden können. Das Potential eines eingebetteten Messsystems könnte hier in einer Personal- und Aufwandsentlastung (für Inspektionen müssen die Gleise gesperrt werden, die Infrastruktur wird jedoch hochfrequent genutzt) liegen. Eine Fehlerlokalisierung für durch das Messsystem und nachgelagerte Algorithmen detektierte Fehlstellen sollte metergenau sein. Eine Herausforderung für die eingebettete Zustandsüberwachung mit Rangierfahrzeugen stellt die im Hamburger Hafen gegebene Trennung von Infrastruktur- und Bahnbetrieb dar, bei dem der Eisenbahnbetrieb durch eine große Anzahl (>100) Eisenbahnverkehrsunternehmen erbracht wird. In Folge dessen verfügt die HPA über keine eigene Fahrzeugflotte, welche das Netz regelmäßig und umfassend befährt. Für die Nutzung der verkehrenden Rangierfahrzeuge für die Zustandsüberwachung der Infrastruktur wären entsprechende Geschäftsmodelle zwischen der HPA und den EVU erforderlich.

1.1.4. Technische Anforderungen an das Messsystem

Sensorik

Die Erkennung der in Kapitel 1.1.3.1 genannten und im Literaturverzeichnis aufgelisteten gängigen Fehlzustände der Schienenfläche und Gleislage ist mit kostengünstigen triaxialen Beschleunigungssensoren mit einem Messbereich bis 50 g grundsätzlich möglich. Die zu erwartende Bandbreite der durch relevante Fehlzustände ausgelösten Vibrationen liegt bei einer Fahrtgeschwindigkeit von bis zu 60 km/h bei unter 10 kHz, so dass eine Abtastrate von 20 kHz ausreichend ist.

Um detektierte Fehlzustände beheben und die aufgenommenen Daten mehrerer Überfahrten über denselben Gleisabschnitt eindeutig zuordnen zu können, ist eine gleisgenaue Georeferenzierung der aufgenommenen Beschleunigungsdaten notwendig. Diese ist sowohl für die Datenanalyse sowie für die weitere Verwendung durch die Hafenbetreiber unabdingbar; eine maximale

Abweichung in Längsrichtung des Gleises von weniger als einem Meter ist darüber hinaus wünschenswert. Diese Genauigkeit kann mit einem einzigen kostengünstigen Sensor nicht erreicht werden. Daher wird eine Kombination aus Satellitennavigationsempfänger (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) und inertialer Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) verwendet, um durch Kombination der Sensordaten mit der digitalen Karte die erforderliche Genauigkeit im Nachhinein zu erreichen. GNSS-Empfänger stellen die Position in der horizontalen Ebene und die absolute Geschwindigkeit zur Verfügung. Inertiale Messeinheiten (IMU) messen Fahrzeugbeschleunigungen und Rotationsraten. Diese beiden Technologien bieten komplementäre Informationen und Vorteile, jedoch auch Herausforderungen. Nur durch die Kombination der Daten mit Algorithmen aus dem Bereich der Sensordatenfusion lassen sich Georeferenzen in ausreichend hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung berechnen. Für gleisgenaue Georeferenzen, also z. B. das Gleis und die Distanz auf dem Gleis für eine Sequenz oder ein Merkmal von Achslagerbeschleunigungen, müssen zudem digitale Karteninformationen verarbeitet werden. Weiterhin können Kameradaten zur Ortung und Georeferenzierung genutzt werden, z. B., indem Weichen oder bekannte Landmarken in den Bilddaten erkannt werden (siehe AP 3). Erkannte Landmarken können wiederum in Positionsinformationen umgewandelt werden und, ähnlich wie GNSS-Messungen, in einen Algorithmus eingebunden werden. Basierend auf Vorarbeiten im Bereich der Georeferenzierung wurde im Rahmen des Projekts an entsprechenden Algorithmen gearbeitet, welche die komplementären Technologien GNSS, IMU und Kamera mithilfe von Karteninformation prozessieren können.

Die Sensoren und Kameras sind während ihrer Einsatzzeit vielfältigen Belastungen ausgesetzt. Um dauerhaft im Bahnbetrieb einsatzbereit zu sein, müssen sie für einen breiten Temperaturbereich geeignet (-40°C bis 70°C), vibrationsfest (ohne bewegliche Teile), schockresistent (300 g an den Achsen und bis zu 30 g am Drehgestell), gegen Unter- und Überspannungen sowie Stromausfälle (EN 50155-konform) und – insbesondere die Kameras – gegen Verschmutzungen geschützt sein. Weiterhin ist erforderlich, dass sie magnetischen Zerstörungen (EN50121-konform) und Druckschwankungen standhalten.

Abtastraten, Datenübertragung und Datenmodelle

In der benötigten bzw. verfügbaren zeitlichen Auflösung der Daten bestehen starke Unterschiede innerhalb der Messdaten (ABA-, GNSS-, IMU- sowie Bilddaten) sowie zu den übrigen aufgezeichneten Daten (regelmäßige Statusmeldungen des Messsystems im laufenden Betrieb). Eine ausreichende Bandbreite der Achslagerbeschleunigungsdaten ist durch eine Aufnahmefrequenz von 20 kHz gewährleistet. Georeferenzen sollten mit einer Abtastrate von ca. 100 Hz vorliegen, die durch die Inertialsensoren (IMU) vorgegeben wird. GNSS-Daten stehen üblicherweise nur mit einer Abtastrate von 1-5 Hz zu Verfügung. Für Kameradaten ist eine Abtastrate von 1 Hz ebenfalls zu empfehlen, um die Datenmenge gering zu halten. Für die übrigen Daten (Statusmeldungen des Systems) reicht eine Frequenz von 1 Hz aus. Bestimmte Statusmeldungen können auch ereignisbezogen gesendet werden.

Bezüglich der ABA-, GNSS-, IMU- und Kameradaten genügte im Projektverlauf eine Nachbearbeitung der Daten und damit eine lokale Speicherung mit einer aufgrund der großen Datenmenge

(mehrere GB pro Tag) nach Fahrtende stattfindenden Datenübertragung. Die Daten wurden für die Projektdurchführung lokal gespeichert und in regelmäßigen Abständen abgeholt (Festplattentausch). Für ein produktfähiges System sind eine Übertragung über WLAN oder Mobilfunk sowie Verfahren zur Datenreduktion auf dem Fahrzeug (Merkmalsextraktion), die ohne langfristige Speicherung der gesamten hochfrequenten Sensormessdaten auskommen, erforderlich. Die regelmäßigen Statusmeldungen des Systems im laufenden Betrieb wurden über eine Mobilfunkverbindung oder alternativ über eine Nahfeldkommunikation kontinuierlich an das Hintergrundsystem übertragen.

Für die Wahl eines Datenformats war neben dem zu verarbeitenden Datenvolumen die Struktur der Daten zu berücksichtigen. Es waren große Mengen an Messdaten (ABA, GNSS und IMU mit unterschiedlichen Abtastraten) zu erwarten; zudem ist eine Speicherung von verschiedenen zu den Fahrten gehörigen heterogenen Metadaten erforderlich. Das Datenformat sollte daher in der Lage sein, große Datenmengen schnell zu speichern und ein schnelles Auslesen und eine schnelle Verarbeitung ermöglichen. Das Format muss mehrdimensionale Datenstrukturen zulassen, deren Bestandteile selbst heterogene, komplexe und große Datenobjekte sein können. Da die Länge einer aufgenommenen Fahrt und somit die Größe der zu speichernden Datei im Vorhinein nicht feststeht, sollte die Speichergröße einer Datei durch das Format nicht nach oben beschränkt sein. All diese genannten Eigenschaften werden durch das Datenformat HDF5 (Hierarchical Data Format, <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/>) erfüllt.

Eine Übersicht über Abtastraten, Kommunikationsarten und Übertragungszeitpunkte der verschiedenen Daten wird in der folgenden Tabelle gegeben.

Daten	Abtastrate	Kommunikationsart	Übertragungszeitpunkt
ABA	20 kHz	WLAN oder Festplatte (Abholung)	nach Fahrtende
IMU	100 Hz	WLAN oder Festplatte (Abholung)	nach Fahrtende
GNSS	1-5 Hz	WLAN oder Festplatte (Abholung)	nach Fahrtende
Kamera	1 Hz	WLAN oder Festplatte (Abholung)	nach Fahrtende
Statusmeldungen	1 Hz	LTE	während der Fahrt

Tabelle 3: Aufnahmefrequenz, Kommunikationsart und Übertragungszeitpunkt der verschiedenen aufgenommenen Daten

1.2. Konzeption des Messsystems

In Arbeitspaket 1.2 wurde aufbauend auf den Ergebnissen des Arbeitspakets 1.1 ein technisches Konzept für das Messsystem und die Erweiterung zur Umfelderkennung erstellt. Der gemäß dieser Konzeption erfolgte Aufbau des Messsystems und dessen Installation auf einer Lok im operativen Einsatz war Gegenstand von Arbeitspaket 2.1.

Das im Projekt HavenZuG konzipierte System ist in Abbildung 2 dargestellt.

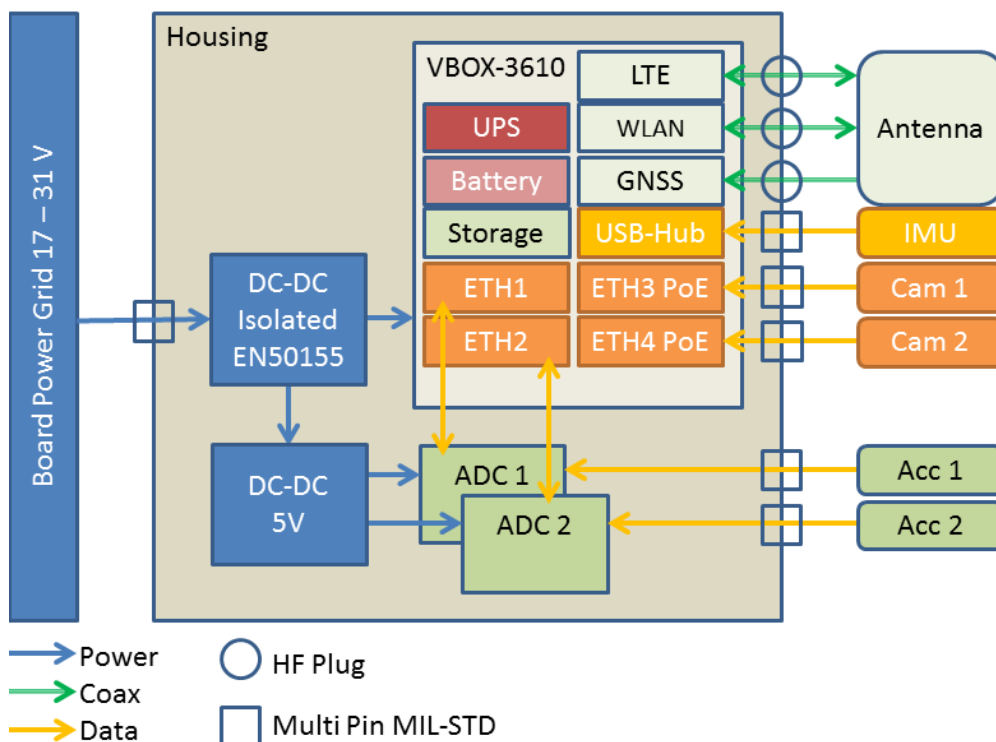


Abbildung 2: Blockschaltbild des für HavenZuG entworfenen Systems für die Erfassung von ABA-, Kamera- und Positionsdaten

Der konzipierte Prototyp basiert auf einer geeigneten Zusammenstellung marktverfügbarer Komponenten (Components-of-the-shelf) in Kombination mit einem für den Einsatz auf Schienenfahrzeugen zertifizierten Industrierechner. Kernelemente sind leistungsfähige triaxiale Beschleunigungssensoren sowie über Ethernet angebundene Industrie-Kameras.

- Es kommt ein Industrierechner (Sintrones VBOX-3610) zum Einsatz. Dieser vereint einige der benötigten Komponenten bereits in einem Gerät:
 - Der Rechner ist mit einem Linux-Betriebssystem ausgestattet. Das Management sämtlicher Sensordaten ist in dem Software-Framework Robot Operating System (ROS) realisiert. ROS ermöglicht eine einfache Einbindung verschiedener Sensoren, Treiber und Verarbeitungsmodulen. Diese können in den Programmiersprachen C++ und

Python integriert werden. Zudem ist die Aufzeichnung von Daten eine Standardfunktion in ROS.

- Der Rechner verfügt über einfach austauschbare Festplatten (Storage), so dass große Datenmengen aufgezeichnet werden können.
- Um kurze Einbrüche der Versorgungsspannung zu überbrücken, sind eine interne Batterie und eine USV (unterbrechungsfreie Spannungsversorgung, engl.: UPS) enthalten. Fällt die Spannung der Batterie unter einen bestimmten Schwellwert, so wird das System kontrolliert heruntergefahren und alle Daten gesichert.
- Kommunikationsmodul (LTE): Über aktuelle Mobilfunkstandards können Statusmeldungen oder ausgewählte Sensordaten an entfernte Nutzer kommuniziert werden. Bisher sind Schnittstellen für das vom DLR betriebene Datenmanagementsystem realisiert. So kann über eine Website z. B. die aktuelle Position des Systems dargestellt werden.
- GNSS: Satellitennavigationsempfänger. Das GNSS-Modul empfängt Signale mehrerer Satellitenkonstellationen (GPS, GLONASS, Galileo) und stellt u. a. Positions- und Geschwindigkeitsinformationen bereit.
- Zudem ist ein WLAN-Modul integriert, um Verbindungen zu bestimmten Funknetzwerken herstellen zu können. So können schneller größere Datenmengen als über die Mobilfunkverbindung (LTE) verschickt werden.
- Die Einsatztemperatur liegt in einem weiten Bereich von -40 bis 80 Grad Celsius.
- Die verbaute CPU bietet mehr Rechenleistung als z. B. bei ARM-basierten Einplattensystemen (Single Board Computer, SBC) üblich und kann so für rechenintensive Algorithmen bei der Bildverarbeitung verwendet werden.
- Der Rechner erfüllt erforderliche Normen und Standards (CE, FCC Class A, EMark Compliance, EN50155, EN50121, IEC60945).
- Energieversorgung: Das System muss mit verschiedenen und ggfs. schwankenden Eingangsspannungen zurechtkommen, welche von der Bordelektrik des Trägerfahrzeugs („board power grid“) bereitgestellt wird. Es wurde ein Netzteil verbaut, das ein entsprechend großes Intervall an Gleichspannungen abdeckt. Anschluss an 230 V Wechselspannung kann über externe Netzteile gestaltet werden, die eine Gleichspannung ausgeben.
- Inertiale Messeinheit (IMU): Komplementär zu den GNSS werden durch die IMU Beschleunigungen und Rotationsraten des Trägerfahrzeugs erfasst. Die Datenrate beträgt ca. 100 Hz. Als externe IMU für die Georeferenzierung kommt eine XSENS-Einheit zum Einsatz. Die XSENS-IMU liefert qualitativ sehr hochwertige Bewegungsdaten.
- Antennen (Antenna): Sowohl LTE als auch GNSS benötigen externe Antennen, welche über Kabel mit dem System verbunden sind. Die Antennenanbringung am Fahrzeug kann über Klebe- oder Magnethalterungen bewerkstelligt werden.
- Achslagerbeschleunigungssensoren (Acc1 und Acc2): Als ABA-Sensor wurde das Modell PCB M629A11 gewählt, welches Beschleunigungsdaten in den drei Raumachsen misst

und über den notwendigen Dynamikbereich und die erforderliche Vibrationsfestigkeit verfügt. Zwei ABA-Sensoren können an das System angeschlossen werden.

- Analog-Digital-Wandler (ADC): Um analoge Sensoren mit hohen Abtastraten zu betreiben (hier die Achslagerbeschleunigungssensoren) ist ein entsprechender Wandler notwendig. Dieser konvertiert die wertekontinuierliche Ausgangsspannung der Sensoren in digitale Werte. Bei den ADC ist auf eine ausreichend hohe Auflösung und Abtastrate zu achten. Es wurde das Modell DT7837 ADC gewählt. Die Auflösung beträgt 24 bit, die Abtastrate kann auf die gewünschten 20 kHz pro Kanal eingestellt werden.
- Zwei Kameras können per Ethernet-Verbindung an das System angeschlossen werden. Es wurde das Modell Allied Vision Mako G 233-C gewählt, welches eine maximale Auflösung von 2048x1088 Pixeln hat und Bilder mit einer Rate von bis zu 50 Bildern pro Sekunde (fps) aufzeichnen kann. Für den experimentellen Einsatz sind die Kameras in industriellen Kameragehäusen untergebracht und über speziell konzipierte Magnethalterungen an geeigneten Stellen am Fahrzeug angebracht. Die genaue Position kann durch die Magnete flexibel gewählt werden. Ausreichend lange und robuste Kabel werden für die Verbindung mit dem System genutzt. Durch die Verwendung von Power-over-Ethernet-Technologie (PoE) wird nur ein Kabel pro Kamera für den Datentransfer und die Stromversorgung benötigt.
- Sämtliche Komponenten (Rechner, Sensoren, Kabel, Verbindungen, ...) sind in einem robusten Koffer untergebracht, welcher temporär im Fahrzeug befestigt werden kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Messsystem aus mehreren Perspektiven. Weiterhin sind die externen Sensoren (IMU, ABA, Kamera) abgebildet.



Abbildung 3: Verschiedene Ansichten des Messsystems. Obenauf ist der Industrierechner zu sehen.

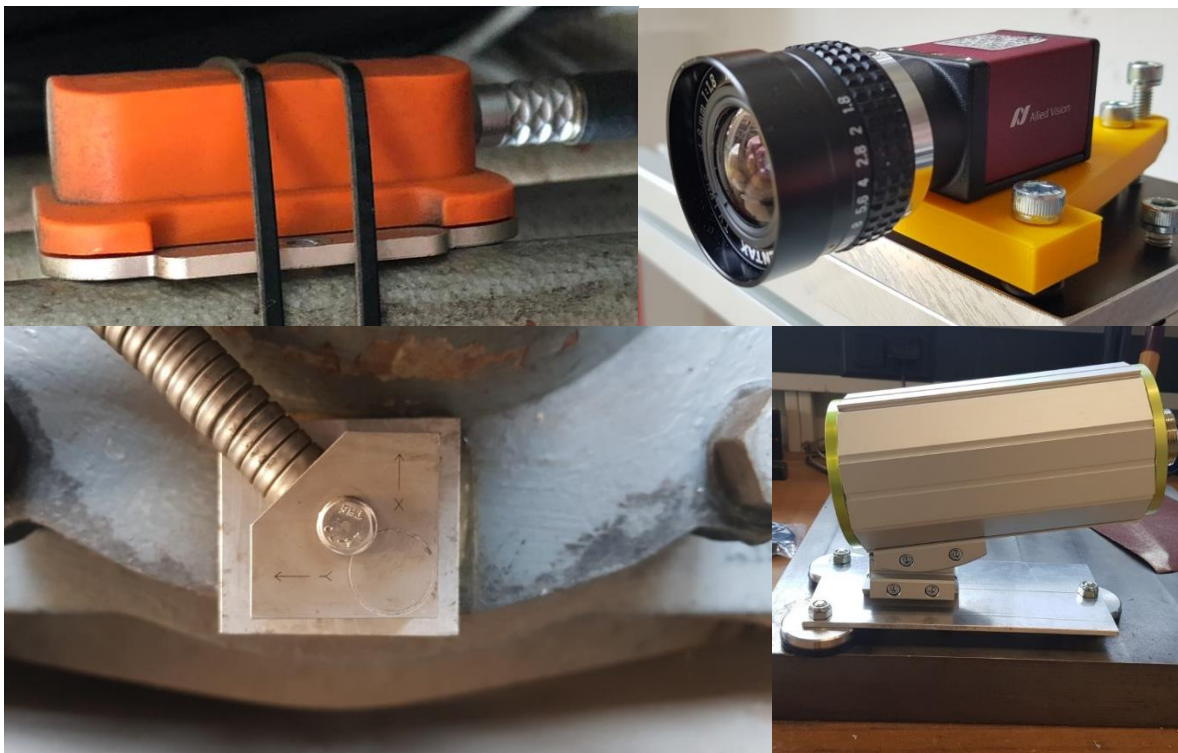


Abbildung 4: Die externen Sensoren. IMU (oben links), Kamera (oben rechts), ABA-Sensor (unten links), Kameragehäuse (unten rechts)

1.3. Konzeption der Datenerhebung und der Messkampagnen

Das Arbeitspaket 1.3 diente der strukturierten Planung der verschiedenen vorgesehenen Messkampagnen. Dazu gehörte die Vorbereitung des Messsystemeinsatzes im Dauerbetrieb, die Planung von gezielten Messkampagnen mit der Rangierlokomotive und dem Zweiwegefahrzeug RailDrive des DLR, insbesondere in zeitlicher Nähe zur geplanten Referenzdatenmessung, sowie die Planung der Referenzdatenaufnahme und die Erhebung weiterer relevanter Daten.

1.3.1. Erhebung der Referenzdaten

Ziel der Referenzdatenmessung war das Erfassen von Schienen- und Gleiszustand mittels konventioneller Messtechnik. Damit sollten insbesondere Auffälligkeiten und Fehler erfasst werden, die später als Trainingsdaten für die selbstlernenden Verfahren verwendet wurden. Gleichzeitig sollten die Daten dazu dienen, die untersuchten Ansätze zur Ableitung von Zustandsinformationen aus den fahrdynamischen Reaktionen (ABA-Daten) zu evaluieren.

Die Wahl der zu erfassenden Kennwerte und die Auswahl der Messgeräte orientierte sich an den zu erwartenden Ergebnissen der ABA-Sensoren. Mit diesen wird der *Rollkontakt* des Rades auf der Schiene charakterisiert. Gleis- und Schienenfehler, die keinen erwartbaren Einfluss auf den Rollkontakt haben, mussten deshalb durch die Referenz-Messverfahren auch nicht erfasst werden. Aus diesem Grund wurden Ultraschall- und Wirbelstrom-Messungen an den Schienen, die beide Risse und Fehlstellen in der Schiene (und nicht an ihrer Oberfläche) erfassen können, für die Referenzmessungen nicht herangezogen. Unmittelbaren Einfluss auf den Rollkontakt haben Quer- und Längsprofile der Schienen. Ferner ist die sog. Gleislage, ein Sammelbegriff für die Gleisgeometrie, insbesondere *Spurweite*, *Verwindung* und *Krümmung* des Gleisrostes, von besonderem Interesse für die Betriebssicherheit und dürfte gleichzeitig durch Beschleunigungen an den Achsen charakterisierbar sein.

Mit Blick auf die zur Verfügung stehenden Messgeräte wurde schließlich als zu messende Referenzdaten die *Längswelligkeit* der Schienen und die *Gleislage* (Spurweite und Höhenlage, nicht aber Gleiskrümmung in vertikaler und lateraler Richtung) ausgewählt. Die Daten wurden mit dem RMF (Längswelligkeit) und CDM (Gleislage), beide von der Fa. Vogel & Plöttscher, aufgezeichnet.

- Die Längswelligkeit erfasst das Höhenprofil von rechter und linker Schiene im Abstand 2 mm relativ zu einer virtuellen Referenzebene. Durch Auswertung der Rohdaten werden periodische Welligkeiten in 4 unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ermittelt und bewertet. Diese Bewertung erfolgt gemäß der DB-Richtlinie 824.8310. Für das Projekt gaben diese Bewertungen für die Gleisabschnitte einen ersten Überblick über den Zustand, von größerer Relevanz waren jedoch die Rohdaten und die ausgewerteten Wellenlängenbereiche, weil darüber ein Vergleich mit den im Projekt entwickelten on-board Messsystemen durchgeführt werden kann. Die besagten Daten wurden für jeden Gleisabschnitt im CSV-Format abgespeichert und sind mit einfachen Mitteln zu verarbeiten oder zu verstehen.

- Die Gleislage erfasst den Abstand der Schienen (bezogen auf den sog. Spurweitenmesspunkt bei Z-14) und den Höhenunterschied beider Schienen im Abstand von 10 cm. Die Spurweite ist eine wichtige Kennzahl für den Zustand des Gleises und ist ohne weitere Auswertung direkt aussagefähig, bzw. mit Grenzwerten vergleichbar. Die Höhenunterschiede werden als positiver oder negativer Unterschied von linker zu rechter Schiene angegeben. Sie sind ohne Auswertung noch nicht direkt zu bewerten, da Gleise in Bögen überhöht ausgeführt werden und ein ausgeprägter Höhenunterschied dort ganz normal ist. Relevant ist vielmehr der Gradient der Höhenunterschiede, bzw. die sog. Verwindung. Diese ergibt sich aus einfacher Rechnung und wird vom Messgerät deshalb direkt mit ausgegeben. Ein stark verwundenes Gleis weist auf kurzer Länge große Höhenunterschiedsänderungen auf (dies kann dazu führen, dass einzelne Räder des Fahrwerks eines Waggons abheben und nicht mehr spurgeführt werden). Die Daten vom CDM wurden im .xlsx-Format gespeichert.

Zeitgleich mit der quantitativen Vermessung von Längswelligkeit und Gleislage wurde visuell eine qualitative Aufnahme von Auffälligkeiten an Gleis und Schiene (z. B. Schienen-Oberflächenfehler, Schienen-Schweißstöße, lose Spannklemmen, Risse in Schwellen, etc.) vorgenommen, weil diese eine mögliche Erklärung für Auffälligkeiten im Beschleunigungsverlauf liefern können.

Weder Längswelligkeitsamplituden oder -wellenlängen noch Spurweiten noch Höhenunterschiede werden von den on-board Beschleunigungssensoren direkt gemessen, sondern Aussagen darüber müssen durch Datenanalysen abgeleitet werden.

Planung der Referenzdatenmessung im Hafen Braunschweig

Die erste gemeinsame Messkampagne von VRS, HBS und DLR erfolgte im Zeitraum vom 2. - 3. Juli 2019. Dabei sollten die Gleise 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 13, 14, 18, 19, 20, 24 und 91 erfasst werden. Ein Teil der Gleise (Nummer 6, 8 und 10) befand sich zum Zeitpunkt der Datenerhebung im Neubau und war noch nicht gestopft, weswegen noch eine zweite Erhebung im Jahr 2020 durchgeführt wurde. Begleitend wurden ausgewählte Fehlzustände durch das DLR fotografisch dokumentiert und deren exakte Position sowie insbesondere die Positionen der Start- und Endpunkte der Messungen mit einem hochgenauen (Abweichungen unter 10 cm) differentiellen GPS-Empfänger bestimmt. Die Aufnahme der Anfangspunkte der Referenzmessungen diente der genauen Georeferenzierung der durch VRS erhobenen Messdaten.

Planung der Referenzdatenmessung im Hafen Hamburg

Mit den oben beschriebenen Messverfahren sollten ferner mehrere Gleisabschnitte im Hamburger Hafen vermessen werden. Das Gleisnetz der HPA ist ungleich größer als das in Braunschweig, auch der Betrieb ist intensiver, d. h. es befinden sich mehr abgestellte Wagen im Netz und es herrscht ständiger Zugbetrieb. Da außerdem das designierte Fahrzeug, das mit einer on-board Messeinrichtung ausgerüstet werden sollte – der Schienenbus „Fridolin“ – das gesamte Gleisnetz gar nicht befährt, sondern nur sehr wenige ausgewählte Strecken durch den Hafen, wurde lediglich ein 4

km langer, aus 16 Gleisabschnitten bestehender Streckenabschnitt zur Referenzdatenmessung ausgewählt. Anders als in Braunschweig erfolgte die Messung während des Zugbetriebs, so dass eine Sicherung inkl. Sicherungsplan des Messpersonal erforderlich wurde.

1.3.2. Erhebung von Achslagerbeschleunigungsdaten

Der Schwerpunkt der Erhebung von Achslagerbeschleunigungen lag auf dem längerfristigen eingebetteten Einsatz des Multi-Sensor-Systems auf einer Rangierlok der Braunschweiger Hafenbahn.

Messkampagnen im Hafen Braunschweig

Im Hafen Braunschweig wurden gezielte Messkampagnen mit der Rangierlokomotive im Oktober 2019 im Anschluss an die Aufnahme der Referenzdaten, im März und Juni 2020 (jeweils Befahrung großer Teile des Netzes, Erprobung des Messsystems, Aufnahme von Bilddaten) sowie im November 2020 und September 2021 (jeweils Aufnahme von Bildmaterial) durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.1). Ein Einsatz im Dauerbetrieb fand über die Projektlaufzeit und darüber hinaus im Hafen Braunschweig auf einer der beiden Rangierlokomotiven (Lok 6) statt. Verwendet wird das in Kapitel 1.2 beschriebene Messsystem, die Inbetriebnahme erfolgte am 27.08.2019. Das System ist seitdem dauerhaft in Betrieb. Eine erste Datensicherung fand am 12.09.2019 statt.

Messkampagnen im Hafen Hamburg

Im Hafen Hamburg sollte das Messsystem auf einem historischen Hafenbahn-Schienenbus, der von der Stiftung Maritim betrieben wird und regelmäßig (zweimal pro Monat) auf dem regulären Schienennetz der HPA verkehrt, vorübergehend angebracht werden. Die Installation eines Messsystems wurde für März 2020 vorbereitet und geplant. Schlussendlich kam die Messkampagne mit dem Schienenbus „Fridolin“ wegen der Corona-Pandemie nicht zustande. Der Schienenbus fährt Besucher und Touristen durch den Hafen, dieses Angebot konnte während der Pandemie nicht aufrechterhalten werden, somit unterblieben die Messfahrten ebenfalls.

1.3.3. Erhebung weiterer projektrelevanter Daten

Der Hafen Braunschweig verfügt über Daten aus erfolgten Inspektionen der vergangenen Jahre seit 1994 (Weichenprüfungen) bzw. 1997 (Gleisprüfungen). Die vorliegenden Daten umfassen digitale Daten der Jahre 2015 und 2017 (.gpx/.pdf) und Daten auf Papier über die weiter zurückliegenden Zeiträume. Darüber hinaus liegt eine Auflistung der durchgeführten Baumaßnahmen der Jahre 2013 bis 2018 vor. In den Jahren 2014 bis 2018 wurden eine Vielzahl an Gleisabschnitten und Weichen erneuert. Digitalfotos vorgefundener Fehlzustände der letzten Jahre wurden ebenfalls aufbewahrt und standen für die Projektdurchführung zur Verfügung.

Im Rahmen von AP 2 wurden die vorhandenen Inspektionsdaten für die weitere Analyse in AP 3 aufbereitet und für die Anforderungsanalyse verwendet.

2. Arbeitspaket 2: Datenerhebung und Messkampagnen

2.1. Inbetriebnahme

In Arbeitspaket (AP) 2.1 wurde das im Projekt konzipierte Messsystem aufgebaut und in Braunschweig auf dem für die Datenaufnahme ausgewählten Fahrzeug installiert. Ab der erfolgten Inbetriebnahme wurden die für den weiteren Projektverlauf erforderlichen Daten aufgezeichnet.

Das Messsystem wurde in einem ersten Schritt mit allen Komponenten mit Ausnahme der beiden Kameras aufgebaut und am 27.8.2019 auf einer Rangiereinheit (Lok 6) im Hafen Braunschweig dauerhaft in Betrieb genommen. Die zentrale Einheit des Messsystems und die IMU befinden sich im Führerstand der Lok, von wo aus Verbindungskabel durch den Maschinenraum zu den Achslagern führen. Die Achslagerbeschleunigungssensoren sind an auf die Achslager geklebte Metallplatten geschraubt. Die Antenne besitzt einen Magnetfuß, der eine stabile Lage auf dem Dach der Lok gewährleistet.

Der Abschluss der Inbetriebnahme im Hafen Braunschweig durch die Einbindung der beiden Kameras erfolgte am 13.12.2019. Die Kameras sind in Industriegehäusen untergebracht, welche ebenfalls durch Magnethalterungen flexibel am Fahrzeug angebracht werden konnten. Der Blickwinkel der Kameras sollte dabei der Fahrersicht entsprechen. Zur Vermeidung von Kondensation durch Betriebswärme werden Silicagel-Trocknungsbeutel eingesetzt. Bilder der in Braunschweig im Betrieb befindlichen Installation sind nachfolgend dargestellt.

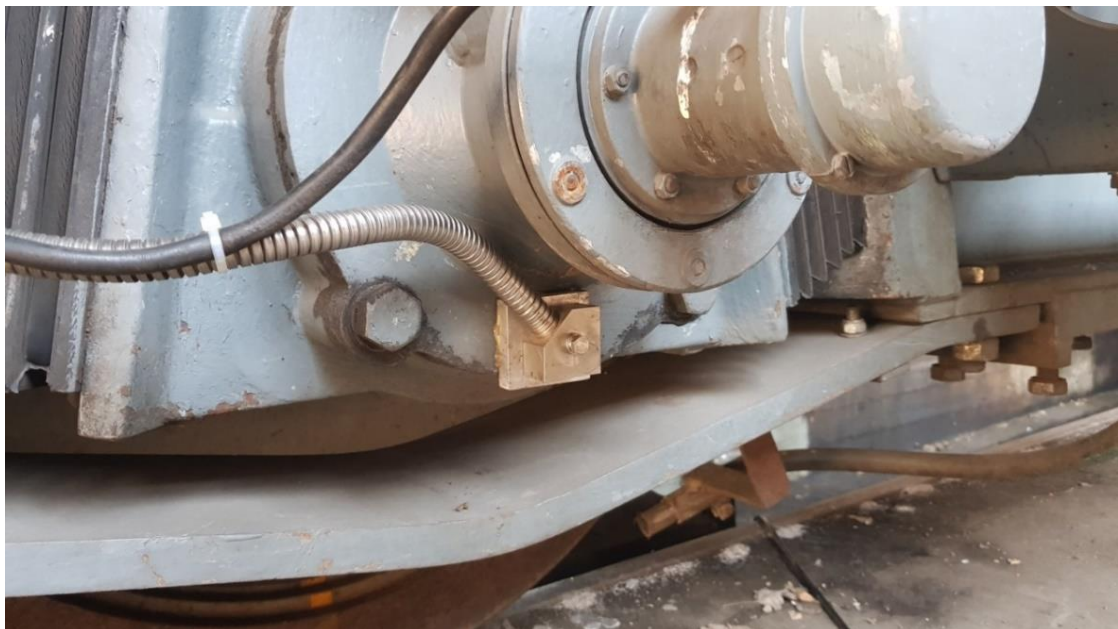


Abbildung 5: Am Fahrzeug angebrachter Beschleunigungssensor (Schraub-Klebe-Befestigung)

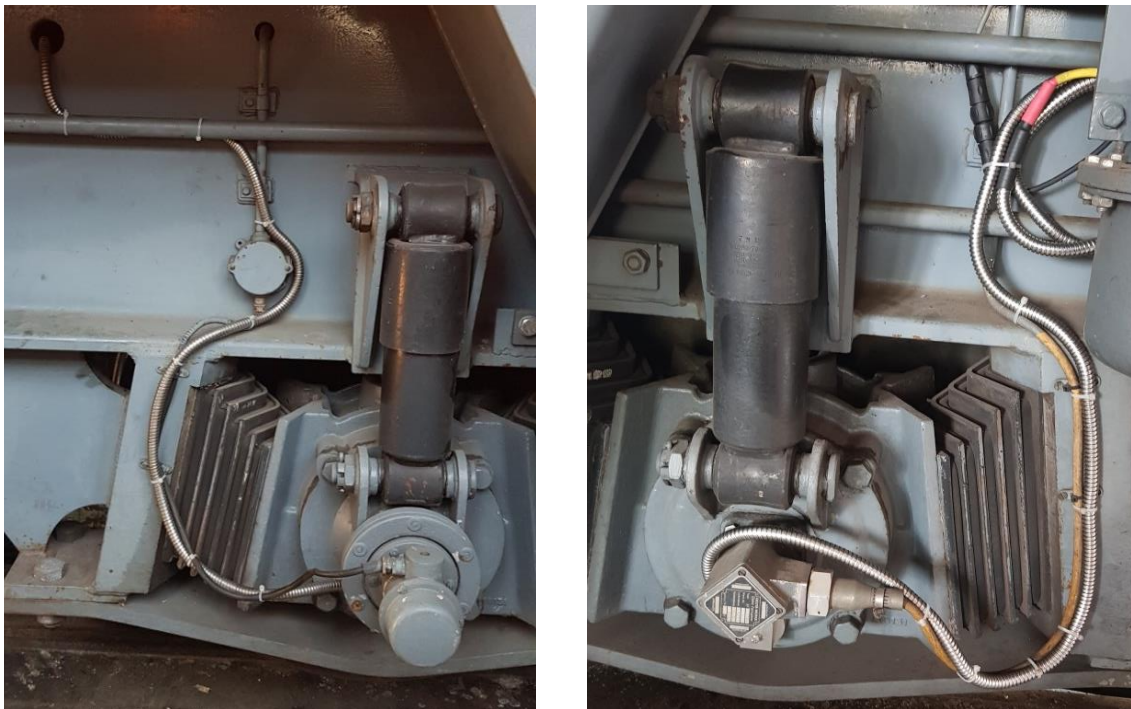


Abbildung 6: Auf der rechten und linken Fahrzeugseite angebrachte Beschleunigungssensoren



Abbildung 7: Kabellegung im Maschinenraum der Lok



Abbildung 8: Messsystem ohne externe Sensoren im Industriekoffer



Abbildung 9: Kameragehäuse mit Magnethalterung, Inbetriebnahme auf der Lok

2.2. Referenzdatenmessung

2.2.1. Referenzdatenmessung im Hafen Braunschweig

Die Messung von Schienenlängs- und -querprofil sowie der Gleislage (Spurweite und Höhenlage/Verwindung) konnte im Juli 2019 wie geplant durchgeführt werden. Vermessen wurden die Gleise 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 13, 14, 18, 19, 20, 24 und 91. Begleitend wurden vorgefundene Fehlzustände durch Vossloh und DLR visuell erfasst und teilweise fotografisch dokumentiert. Die exakte Position einiger Auffälligkeiten wurde mit einem hochgenauen differentiellen GPS-Empfänger verortet. Mit dem verwendeten Messgerät wurden zudem die Anfangspunkte der Referenzmessungen dokumentiert, so dass eine Korrektur der GPS-Verortung und genaue Georeferenzierung der durch VRS erhobenen Messdaten möglich wurde (siehe Abschnitt 2.2.5.1).

Die Referenzdatenmessung von Längsprofil und Gleislage wurde im Sommer 2020, am 17. Juni, wiederholt. Auf diese Weise konnte die Veränderung der Daten aufgrund von Bautätigkeit (z. B. Schwellentausch, Stopfarbeiten), aber auch durch betriebliche Effekte (z. B. neue Schleuderstellen, neue Spurveränderungen) erfasst werden. Wieder wurde die Längswelligkeit mit dem RMF und die Gleislage mit dem CDM gemessen. Wieder wurden auch visuell erkennbare Auffälligkeiten dokumentiert sowie die Anfangs- und Endpunkte der Messungen verortet.

Beim Vergleich der Protokolle aus der visuellen Inspektion der Jahre 2019 und 2020 zeigte sich, dass diese nicht deckungsgleich sind, dass einige Gleismerkmale in dem einen Jahr erkannt und im anderen nicht erkannt wurden. Dies betraf insbesondere die (zahlreichen) Schienenschweißungen, die nur bedingt zuverlässig erkannt worden waren. Zu diesem Zweck wurden am 9. Dezember 2020 die Gleise 91, 1 und 4 nochmals intensiv visuell inspiziert und sämtliche Schweißungen, Schleuderstellen, Riffelabschnitte und andere Merkmale, die den Rad-Schiene-Kontakt beeinflussen würden, erfasst und hochgenau verortet.

2.2.2. Referenzdatenmessung im Hamburger Hafen

Wegen der notwendigen Sicherung des Messpersonals, des dafür notwendigen Sicherungsplans und der damit verbundenen Vorlaufzeit erfolgte die Referenzdatenmessung im Hamburger Hafen erst im August 2019. Vermessen wurde ein Gleis bestehend aus 18 Gleisabschnitten mit 3.100 m Länge, sowie 16 Weichen mit jeweils 27 m Länge im Bahnhofsteil „Hohe Schaar“. Gemessen wurden nur Längswelligkeit (mit RMF) und Spurweite/Höhenlage (mit CDM). Die hochgenaue Verortung der Gleisabschnitte war per TOPCON GRS-1 durch das DLR aus Termingründen nicht möglich. Die Datenaufnahme mit RMF und CDM erfolgte in gleicher Weise wie in Braunschweig.

2.2.3. Fehlerkatalog

Für die bei den Referenzmessungen vermerkten Gleis- und Schienenfehler wurde ein Fehlerkatalog erstellt, der diese Fehler illustriert und ihre voraussichtlichen Auswirkungen auf den Rollkontakt und

die ABA-Messdaten beschreibt. Ferner gibt der Katalog die Schwere des Fehlers und seine räumliche Ausdehnung an. Eine entsprechende ID sorgt für eine rasche und eindeutige Referenzierung. Insgesamt wurden zehn Schienenfehler (Riffel, Ausbrüche, Schienenbruch, lockere Laschung, Querprofilabweichung, Überwalzungen, Schleuderstellen, Seitenverschleiß, Vertikalverschleiß, fehlerhafte Schweißung) und acht Gleisfehler (Hohllage, Gleisverwerfung, Spurerweiterung, Spurverengung, Gleisverwindung, Spannklemmenbruch, Schwellenrisse, Schwellenverwitterung, verschmutzter Schotter) katalogisiert. Die meisten dieser Fehler wurden im Hafen Braunschweig auch beobachtet. Nicht gefunden wurde in Braunschweig ein Fall von Schienenbruch. Mangels entsprechenden Messgeräts wurden auch keine Fälle von Hohllage oder seitlicher Gleisverwerfung identifiziert.

2.2.4. Datenanalyse der Referenzdaten

Längswelligkeit

Eine Vor-Analyse der Schienen-Höhenkontur aus der RMF-Messung erfolgte mit der zugehörigen Software von Vogel & Plöttscher. Die Höhenkontur wird in vier Wellenlängenbereiche (10 – 30 mm, 30 – 100 mm, 100 – 300 mm, 300 – 1.000 mm) gefiltert. Rohdaten (Höhenkontur) und gefilterte Wellen wurden in einem .csv Format exportiert. Der Export ist auf 65.000 Zeilen (131 m) beschränkt, für einen fortlaufenden Datenverlauf mussten die .csv-Daten wieder aneinandergefügt werden. Im langen Gleis 91 im Braunschweiger Hafen (ca. 1.500 m Länge) war die Messung zudem auf mehrere Dateien aufgeteilt worden, entsprechend musste der Datenverlauf auch hier aneinandergefügt werden.

Eine Bewertung gemäß Ril824 mit den dort definierten Toleranzbändern wurde durchgeführt, liefert allerdings nur einen integralen Wert über die betrachtete Abschnittslänge. Von Relevanz war der Verlauf der Höhenkontur. Auffälligkeiten wie Schleuderstellen, Ausbrüche und Riffel waren teilweise bei der Datenaufnahme im Gerät schon vermerkt worden, zusätzlich lagen noch handschriftliche Protokolle der Gleisbegehung mit den jeweiligen Streckenmetern vor.

Gleislage

Die Vorauswertung der Gleislage-Messdaten des CDM beschränkte sich auf die Ermittlung der *Gleisverwindung*, also den Grad der Veränderung der Höhenlage. Dies erfolgte direkt im Messgerät. Das Ergebnis wurde zusammen mit der Spurweite als Excel-Datei ausgegeben. Abschnitte, in denen die Spur oder die Verwindung Grenzwerte über-/unterschreiten, sind auf diese Weise sehr einfach auffindbar.

2.2.5. Referenzdatenaufbereitung

Die Aufbereitung der aufgezeichneten Referenzdaten umfasste hauptsächlich deren Georeferenzierung sowie einige nachgelagerte Arbeiten.

2.2.5.1. Georeferenzierung der Referenzdaten (Hafen Braunschweig)

Die im Projekt aufgezeichneten Referenzdaten mussten zunächst mit Positionsinformationen versehen werden, um diese im Nachgang sinnvoll mit den Achslagerbeschleunigungs-Daten vergleichen zu können. Hierzu wurden während der beiden Referenzmesskampagnen die jeweiligen Anfangs- und Endpunkte der CDM- und RMF-Messungen mit einem hochgenauen differentiellen GNSS-Empfänger verortet. Messunterbrechungen, beispielsweise an Bahnübergängen (hier konnte das RMF-Messgerät aus messtechnischen Gründen nicht normal geführt werden), wurden ebenfalls aufgezeichnet. Im Anschluss konnte durch Projektion der Anfangs- und Endpunkte auf die Gleismitte und unter Hinzunahme der Distanzinformationen der Messgeräte (äquidistante Messungen, z.B. alle 10 cm) den Messwerten Positionen im Gleisnetz (Gleis-ID und Streckenmeter zum Gleisanfang) zugeordnet werden. Die Positionen der Anfangspunkte wurden hierbei zur Zuordnung verwendet; die Positionen der Endpunkte und die damit verbundenen erwarteten Messlängen (Abstände zwischen Anfangs- und Endpunktprojektionen auf dem Gleis) konnten mit den durch die Messgeräte ausgegebenen Messlängen verglichen werden, um die maximalen Abweichungen abzuschätzen und Fehler auszuschließen.



Abbildung 10: Links: Positionen des Messstarts auf Gleis 1 (Referenzdatenerhebung 2020), linke und rechte Schiene (orange); Projektion auf das digitale Gleisnetz (braun). Rechts: Markierungen der Endpunkte der Messungen während der Messkampagne 2020. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.

2.2.5.2. **Verbesserung der absoluten Positionierung der Referenzdaten**

Durch die erneute Aufnahme von Referenzdaten im Jahr 2020 auf einem großen Teil der Gleise in Braunschweig konnten die Messwerte und Positionen der beiden Jahre verglichen werden. Hierbei trat eine Reihe von Abweichungen zu Tage. Insgesamt waren die Messungen der beiden Jahre erwartungsgemäß sehr ähnlich; die Zuordnung der Gleispositionen offenbar gleicher Messstücke wies jedoch Abweichungen bis in den Dezimeterbereich auf. Diese konnten auf vielfältige Ursachen zurückgeführt werden (beispielsweise Ungenauigkeiten der GNSS-Positionen, der Odometer, der digitalen Karte oder der Projektionen auf die Gleismitte, Abschattungen, Messunterbrechungen, etc.). Durch Abgleich der verschiedenen zur Verfügung stehenden Quellen konnten systematische Abweichungen (z. B. Positionsungenauigkeit des Startpunktes) erkannt und reduziert werden: So wurden Abweichungen zwischen den Längen der Messstrecken der Messgeräte und der Abstände der Referenzpunkte auf dem Gleis festgestellt, die innerhalb der Jahre und Messgeräte das gleiche Muster zeigten und auf (prozentual an der vermessenen Strecke sehr kleine) Ungenauigkeiten der Odometer zurückzuführen sind. Zudem wurden vereinzelte punktuelle Abweichungen festgestellt (bspw. an Bahnübergängen). Auf dem etwa 1,5 km langen Zufahrtsgleis trat darüber hinaus bei einem der Messgeräte eine über das erste Drittel kontinuierlich zunehmende Abweichung zwischen den Daten der beiden Jahre auf, die auf den letzten zwei Dritteln konstant blieb. Durch Abgleich mit den Referenzpunkten konnte hier festgestellt werden, in welchem Jahr die Abweichung auftrat und der betroffene Datensatz über den fehlerhaften Abschnitt unter Berücksichtigung der Kreuzkorrelation auf die tatsächliche Länge gestaucht werden.

Zusammenfassend war durch Abgleich der verschiedenen Informationsquellen (Distanz zwischen den Referenzpunkten auf dem Gleis zu den Messlängen der beiden Messgeräte in beiden Jahren, Abweichungen der Position der Projektion der Referenzpunkte auf linker und rechter Schiene auf die Gleismitte, Qualität bei der Referenzpunktaufnahme, Vergleich der Referenzdaten der beiden Jahre, Vorliegen von besonderen Stellen wie Bahnübergängen) eine plausible, aber fallabhängige und aufwendig zu bestimmende Auflösung von Abweichungen, die insbesondere eine Verbesserung der Absolutposition der Messdaten beider Jahre umfasst, möglich.

Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Messdaten des CDM auf Gleis 2 vor und nach der Nachbearbeitung der Positionsinformation. Abbildung 12 zeigt die nachbereiteten Längsprofilmessungen auf Gleis 91 (ca. 1,5 km Länge) nach Auflösung diskreter Verschiebungen und Korrektur von festgestellten Odometerabweichungen.

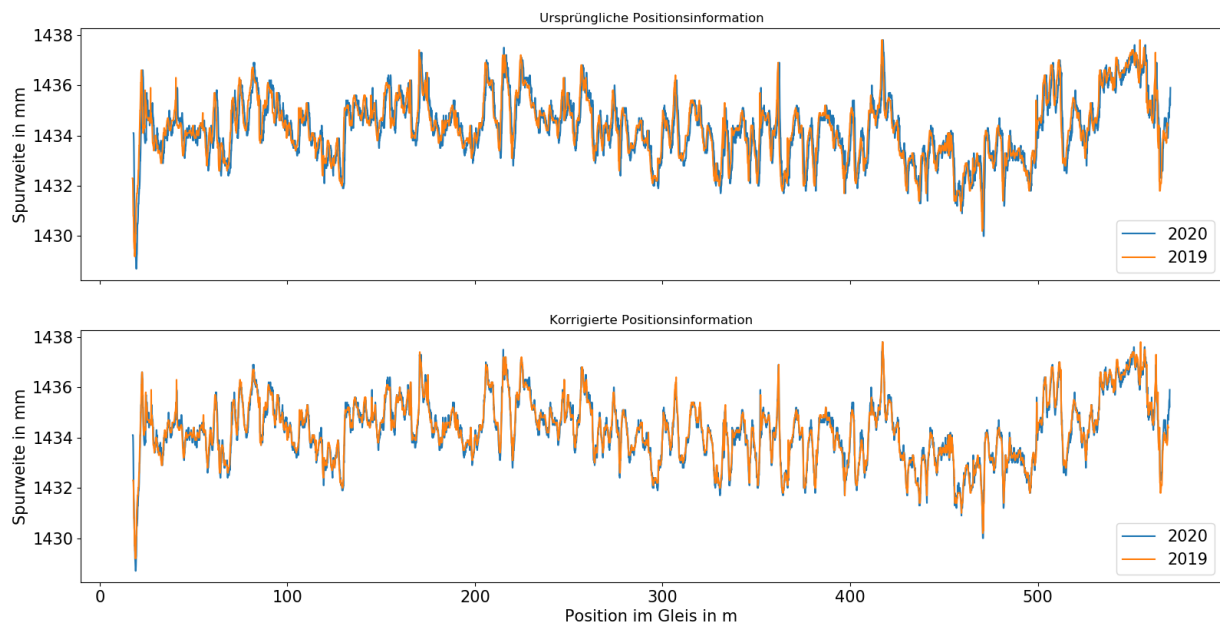


Abbildung 11: Spurweitenmessungen auf Gleis 2 aus den Jahren 2019 (orange) und 2020 (blau). Oben: Ursprüngliche Positionsinformation auf Basis der Referenzpunkte und Odometer der Messgeräte. Unten: Korrigierte Positionsinformation unter Einbezug der Daten aus beiden Jahren und daraus abgeleiteten Korrekturen.

Aus den im Projekt gesammelten Erfahrungen lassen sich Handlungsempfehlungen für eine verbesserte Vergleichbarkeit wiederholter Messungen (z.B. um Änderungen zu erkennen und Trends untersuchen zu können) ableiten. Hierzu würde es sich anbieten, fest installierte Anfangs- und Endpunkte entlang der Strecke zu etablieren, die dauerhaft markiert und hochgenau absolut eingemessen sind und bei der Durchführung von Messungen präzise eingehalten werden. Überdies könnten an Bahnübergängen vergleichbare dauerhafte Markierungen angebracht werden, um bei der Unterbrechung und Fortsetzung der Messungen eine hohe Wiederholungsgenauigkeit zu erreichen.

Abbildung 13 zeigt abschließend ein Beispiel für ein Gleis, an dem zwischen den beiden Referenzmessungen Instandhaltungsmaßnahmen (Schleifen) durchgeführt wurden, wodurch sich die Messungen aus den beiden Jahren deutlich unterscheiden. Da durch die Schleifarbeiten eine konstante Dicke Schienenmaterial abgetragen wurde, ist der Verlauf (z. B. als Differenz vom Mittelwert) der Spurweite in den Jahren fast identisch, die absoluten Werte der Spurweite unterscheiden sich jedoch.

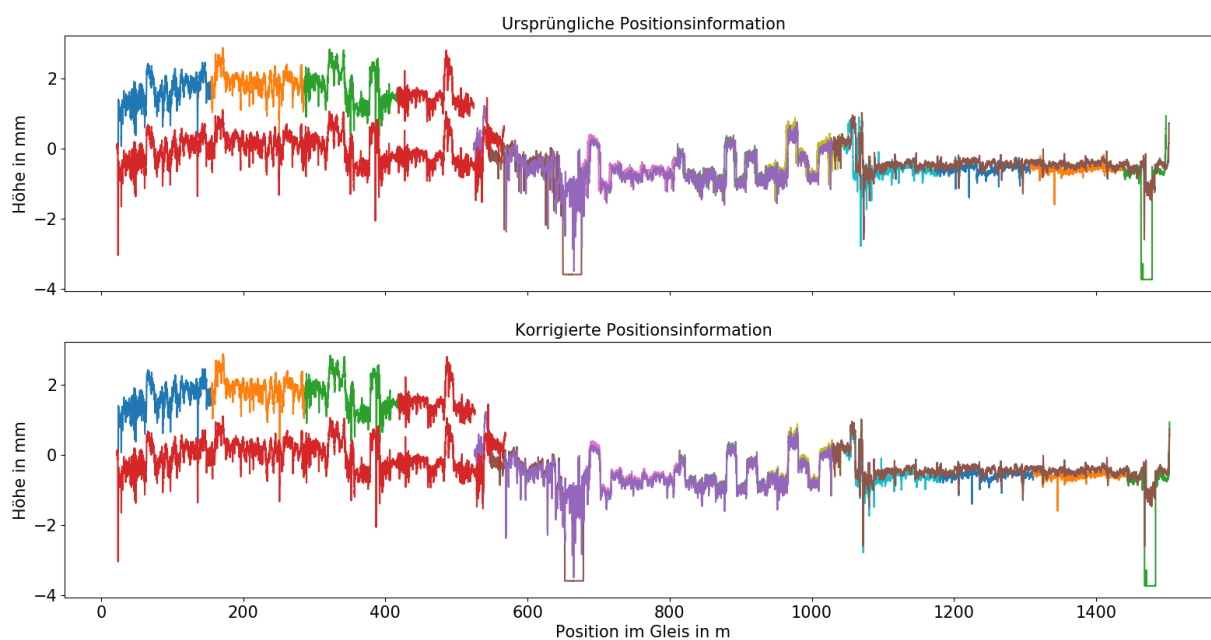


Abbildung 12: Längsprofilmessungen auf Gleis 91 (1,5 km Länge) aus den Jahren 2019 und 2020. Oben: Ursprüngliche Positionsinformation auf Basis der Referenzpunkte und Odometer der Messgeräte. Unten: Korrigierte Positionsinformation nach Auflösung diskreter Abweichungen, bspw. an Bahnübergängen, und nach Anpassung der Messlänge an die Länge auf dem Gleis. Farbliche Unterscheidungen innerhalb eines Jahres markieren Messabschnitte oder -Dateien.

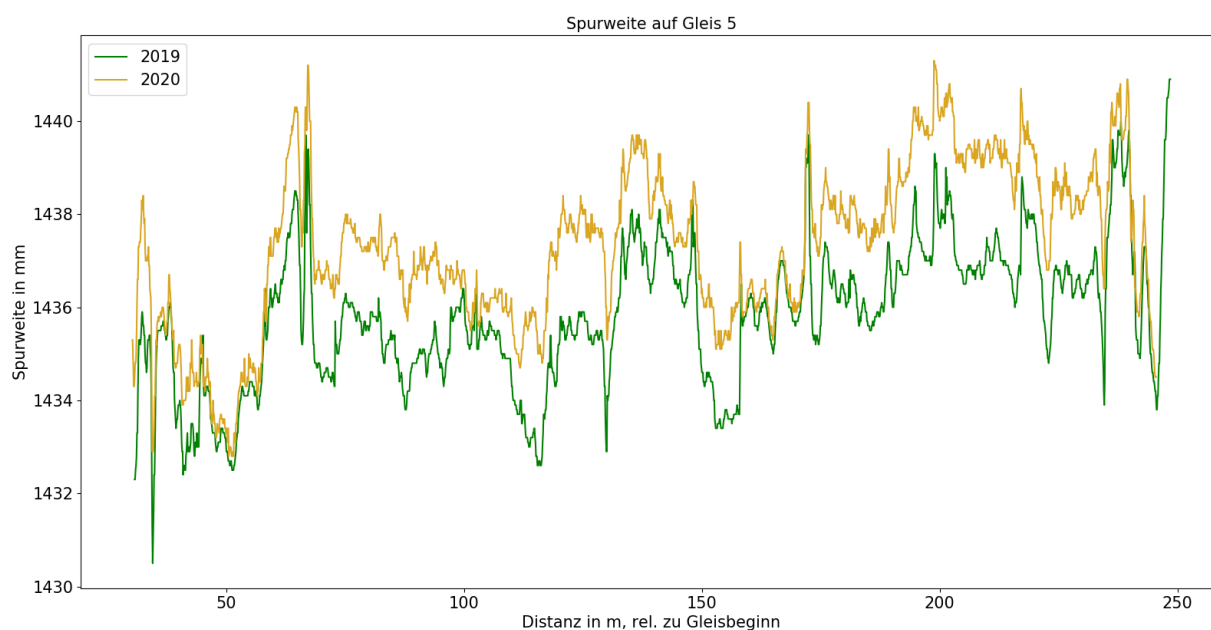


Abbildung 13: Spurweite auf Gleis 5. Zwischen den Referenzmessungen in den Jahren 2019 und 2020 wurden hier Schleifarbeiten an der Schiene zur Gratentfernung durchgeführt.

2.2.5.3. **Verbesserung der relativen Positionierung der Referenzdaten der Jahre 2019 und 2020 (Hafen Braunschweig)**

Neben der Verbesserung der absoluten Position im Gleis mit dem Ziel der bestmöglichen Verortung, die sowohl die Messdaten als auch andere Informationsquellen zur Hilfe nahm und durch Einbezug ersterer auch schon eine gute Übereinstimmung der Positionen zusammengehöriger Messpunkte der beiden Messkampagnen lieferte, wurden die Referenzdaten der beiden Jahre auch bestmöglich relativ zueinander positioniert. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Analyse von Veränderungen der Messergebnisse zwischen den beiden Jahren und dem Vergleich der Messkampagnen interessant. Ohne den Fokus auf eine absolute Positionierung konnte hier eine der beiden Messungen als Referenzmessung definiert werden und die Position der zweiten Messung so angepasst werden, dass diese möglichst gut übereinander liegen. In diesem Szenario wurden also Messpunkte einander zugeordnet („aligniert“), ohne zu bewerten, welches Maß an Ausdehnung der Messung (verschiedene Ausprägungen an Stauchung oder Streckung über den Streckenabschnitt) der beiden Jahre wie gut der Realität entspricht.

Methode *Varianz der Differenzen*

Hierzu wurde die Methode *Varianz der Differenzen* eingesetzt. Die beiden Datenverläufe werden bei der genannten Methode voneinander subtrahiert und aus allen lokalen Differenzen die Varianz errechnet. Diese drückt in einem einzigen Zahlenwert den „Unterschied“ zwischen beiden Verläufen aus. Diese Berechnung wird dann für schrittweise gegeneinander verschobene Verläufe wiederholt. Der geringste Varianzwert aus diesen Ergebnissen drückt denjenigen Versatz aus, bei dem die Datensätze den geringsten Unterschied aufweisen. Diese Methode funktioniert gut, wenn beide Verläufe lediglich gegeneinander verschoben, aber „gleich lang“ sind. In der Realität sind aber Verläufe wegen durchrutschender oder verschlissener Odometer-Räder oder imperfekter Satelliten-Verortung häufig auch noch gestaucht oder gedehnt, und zwar nicht nur gleichmäßig über die Länge, sondern sogar unregelmäßig verteilt. Daher ist eine Anpassung der Methode nötig.

Methode *Abschnittsweise Varianz der Differenzen*

Hierbei wird der zu alignierende Verlauf in mehrere Teilabschnitte aufgeteilt und für jeden davon sein „Passer“ im Referenzverlauf in oben beschriebener Weise gesucht. Anschließend werden die Teilabschnitte wieder verbunden. Kleine Dehnungen/Stauchungen werden dadurch korrigiert. Vor dem Zusammenfügen wird noch kontrolliert, dass zwei Teilabschnitte, die zuvor direkt nebeneinander lagen, auch in der neuen Zusammenstellung wieder Nachbarn sind – andernfalls wird die Verschiebung verworfen.

Untenstehend ein Ergebnis der Alignierung auf Basis des RMF-Höhenprofils aus den Referenzdatenmessungen der Jahre 2019 und 2020 (Abbildung 14).

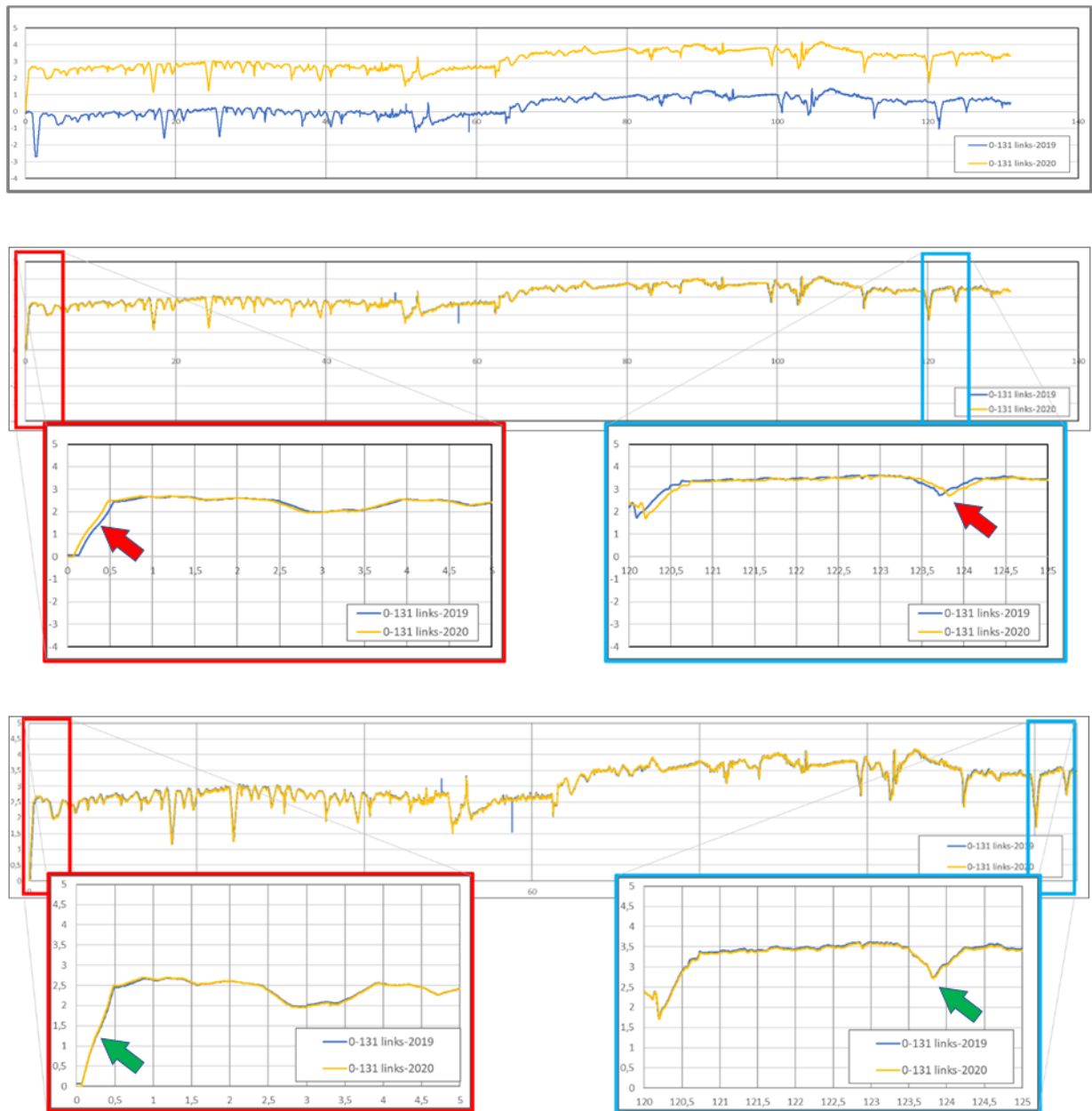


Abbildung 14: RMF Rohdaten aus 2019 und 2020 (Gleis 91, linke Schiene) (oben), aligniert mittels Methode *Varianz der Differenzen* mit erkennbarer Dehnung (oben) und *Abschnittsweise Varianz der Differenzen* mit korrigierter Dehnung (unten).

2.3. Messkampagnen Hafenbahnen

2.3.1. Messkampagnen im Hafen Braunschweig

Nach Einrichtung des Messsystems auf der Lokomotive 6 im Hafen Braunschweig Ende August 2019 wurden dort kontinuierlich Daten aufgezeichnet. Während der ersten Phase (Inbetriebnahme) wurden am System noch einige Verbesserungen vorgenommen. Neben der kontinuierlichen Datenaufnahme im regulären Betrieb wurden ergänzende Messkampagnen durchgeführt. Diese dienten einer möglichst großflächigen Erfassung von Daten des Schienennetzes, der Datenaufnahme unter kontrollierten Geschwindigkeitsprofilen, der gezielten Aufnahme von Bildmaterial sowie der Optimierung des Messsystems. Die Messkampagnen im Hafen Braunschweig fanden am 17.03.2020, 16.06.2020, 12.11.2020 sowie 21.09.2021 statt. Abbildung 15 zeigt die Lokomotive während der Messkampagne am 12.11.2020.



Abbildung 15: Lok 6 während einer Messfahrt im Hafen Braunschweig, November 2020.

3. Arbeitspakete 3: Datenanalyse und -visualisierung

3.1. Datenanalyse der Fahrzeugdynamik

3.1.1. Datenaufbereitung

Die Arbeiten zur Datenaufbereitung umfassten die Georeferenzierung der Messdaten sowie die Einbindung der Daten in die AWS-Cloud.

3.1.1.1. Georeferenzierung der Achslagerbeschleunigungsdaten

Um die Achslagerbeschleunigungsdaten gewinnbringend einsetzen zu können, müssen diese mit Positionsinformationen im Schienennetz versehen werden. Der alleinige Einsatz von Satellitennavigationsdaten ist für diesen Anwendungsfall unzureichend, da die auftretenden Ungenauigkeiten gerade im Rangierbetrieb keine gleisgenaue Ortung ermöglichen. Aus diesem Grund wurden Verfahren der statistischen Sensordatenfusion eingesetzt, um die Lokalisierung zu verbessern. Die hier zum Einsatz kommenden Algorithmen bauen auf Arbeiten des Vorgängerprojektes „Ortung im Hafen“ der Förderlinie IHATEC auf (siehe [3, 4]). Die zugrundeliegenden Daten umfassen Messungen der Satellitennavigationsempfänger (GNSS, Position und Geschwindigkeit), der inertialen Messeinheit (IMU, Beschleunigungen und Drehraten) sowie die digitale Karte des Hafennetzes in Braunschweig.

Die Georeferenzierung umfasst die folgenden wesentlichen Schritte (für eine detailliertere Beschreibung des Vorgehens siehe [5]). Zunächst werden die aufgezeichneten Daten in Fahrten („journeys“) unterteilt. Für jede Fahrt wird im nächsten Schritt der gefahrene Pfad auf dem Schienennetz geschätzt. Hierzu werden für alle im Schienennetz erlaubten Pfade, die den Anfangs- und den Endpunkt der Fahrt verbinden, die GNSS-Positionen auf den Pfad projiziert. Durch Minimierung der Projektionsfehler wird der wahrscheinlichste Pfad ausgewählt. Nun kann das Problem auf die (gemeinsame) Bestimmung von Positionen längs dieses Pfades und Geschwindigkeiten reduziert werden; es handelt sich nur noch um ein eindimensionales Problem. Dies erfolgt mittels Kalman-Filter und Rauch-Tung-Striebel-Smoother unter Einbeziehung von GNSS-Positionen sowie -Geschwindigkeiten und Längsbeschleunigungsdaten, die durch die inertielle Messeinheit zur Verfügung stehen. Das Ergebnis der Georeferenzierung sind Positionsdaten (in den Formaten Längen- und Breitengrad, UTM-Koordinaten, Gleis-ID mit Streckenmeter), Geschwindigkeiten sowie Unsicherheiten (Standardabweichung der angenommenen Normalverteilungen) mit 100 Hz Zeitauflösung. Ebenfalls abgeleitet werden kann die Fahrtrichtung der Lokomotive.

Die Achslagerbeschleunigungsdaten werden über die Zeitstempel mit den Positionsinformationen verknüpft. Da die erstgenannten Daten mit einer Frequenz von 20.625 Hz aufgezeichnet werden, wird zwischen den Zeitstempeln der letzteren interpoliert, um vollständige Positions- und Geschwindigkeitsschätzungen zu erhalten. Auf diese Weise wurde ein ca. 400 GB umfassender Datensatz aus georeferenzierten Achslagerbeschleunigungsdaten erstellt, der über 2.000 Journeys in 105 Sessions beinhaltet. Eine Session enthält dabei alle Daten, die zwischen An- und Ausschalten

der Lok und damit des Systems aufgezeichnet werden. Diese Daten wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und stellten die Grundlage für die entwickelten Algorithmen dar. Die Georeferenzierung bietet über die Zuordnung von Monitoring-Daten zu Streckenpositionen überdies die Möglichkeit, annäherungsweise Belastungen für die verschiedenen Gleissegmente in Form der Anzahl von Befahrungen zu erhalten oder beispielsweise mittlere oder maximale Geschwindigkeiten auf den Streckenabschnitten zu berechnen. Entsprechende Belastungskarten wurden im Projekt erstellt; ein Beispiel ist in Abbildung 16 zu finden. Diese Anwendung wurde überdies vom Hafen Braunschweig in der Anforderungsanalyse als vielversprechend und hilfreich benannt. Schließlich wurden die Ergebnisse der Georeferenzierung, insbesondere die Zeitstempel mit Positionsdaten, für die Verortung der Bilddaten im Gleisnetz verwendet (siehe Kapitel 3.2).

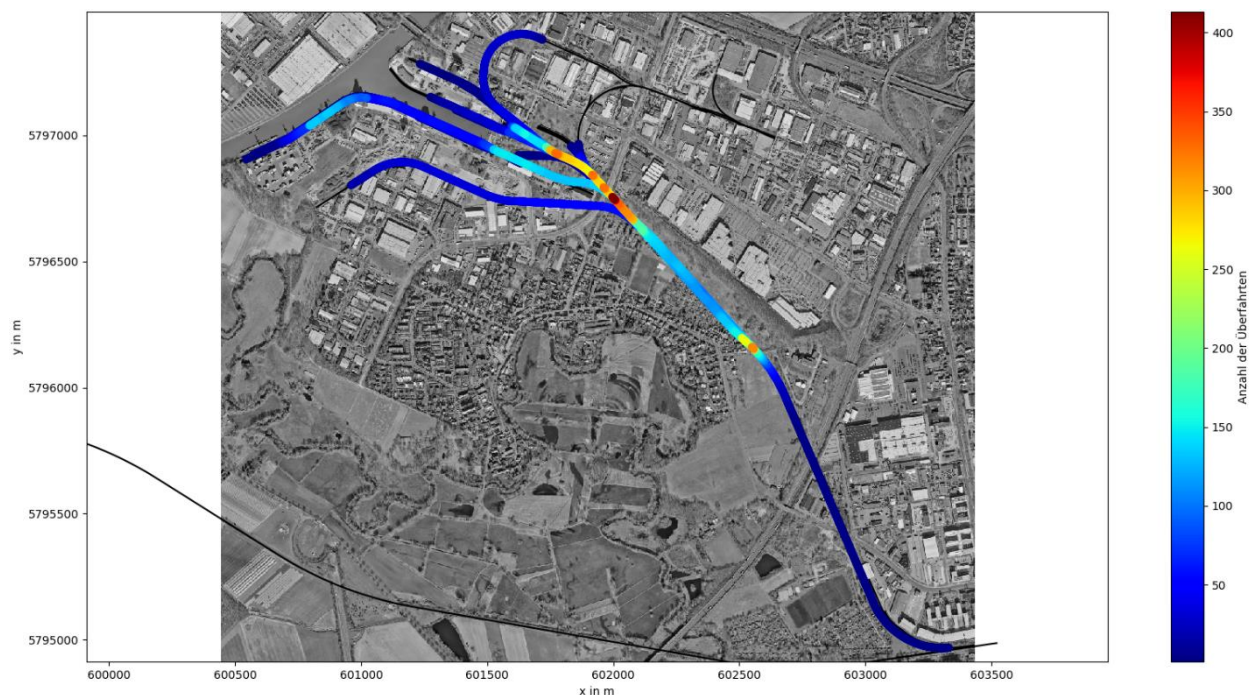


Abbildung 16: Anzahl der Befahrungen der Gleise, pro m. Datengrundlage: Positionen aus der Georeferenzierung des Zeitraums bis Anfang Juli 2020. Gezählt wurde die Anzahl der Journeys, in denen die Position befahren wurde. Der Datensatz beinhaltet alle Fahrten, in denen die Positionen durch die Georeferenzierung als befahren registriert wurden (auch Fahrten, in denen bspw. die Fahrtrichtung nicht eindeutig bestimmt werden konnte oder in denen es zu fehlerhaften Aufzeichnungen von ABA-Daten kam). Farblegende: Anzahl der Überfahrten. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.

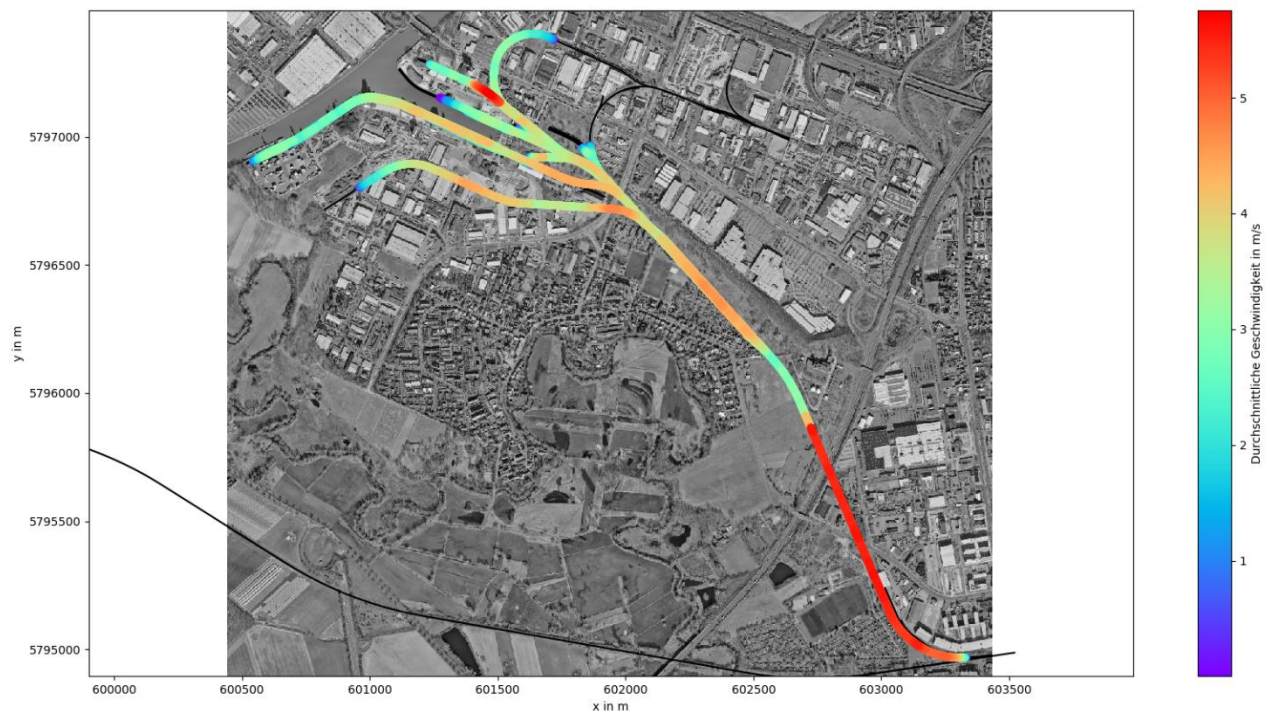


Abbildung 17: Mittlere gefahrene Geschwindigkeiten auf Gleispositionen, pro m. Datengrundlage: Positionen aus der Georeferenzierung des Zeitraums bis Anfang Juli 2020, vgl. Abbildung 16. Farblegende: Geschwindigkeit in m/s. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.

3.1.1.2. Implementierung Cloud-Umgebung

Die Datenanalyse des Projekts HavenZuG stand neben der technischen Entwicklung geeigneter Algorithmen und Methoden auch vor der Herausforderung, sehr große Datenmengen verarbeiten zu müssen. Ferner galt es, gewisse Verarbeitungsschritte zu standardisieren. Zu diesem Zweck wurde beim Projektpartner Vossloh eine Cloud-Umgebung für Speicherung und Verarbeitung eingesetzt. Mit der Festlegung auf den Anbieter AWS waren einige Methoden vorgegeben. Der gesamte Prozess wird als „Datenpipeline“ bezeichnet.

Die Datenverarbeitung der Cloud basiert auf dem Konzept eines „Data-lake“, in dem die eingehenden Daten durch verschiedene Zonen geschleust und dabei schrittweise analysiert werden. Bezeichnend ist u. a., dass das Eingabeformat der Daten zunächst offen ist und notwendige Formatkonvertierung innerhalb der Cloud vorgenommen werden.

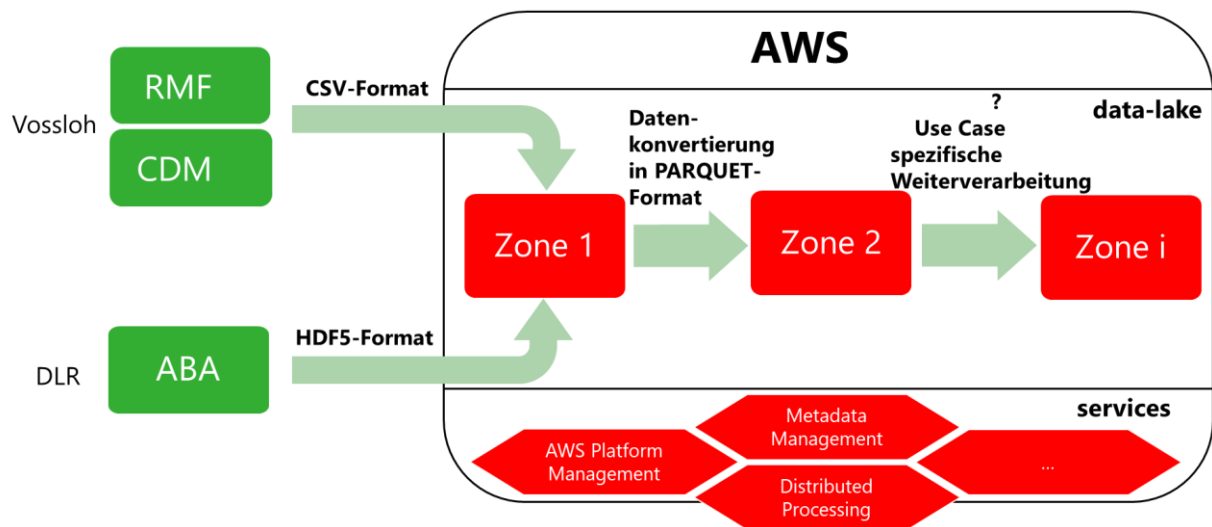


Abbildung 18: Konzept der Cloud-Verarbeitung

Ausgegangen wird vom gewählten HDF5-Format, in dem die Datenbereitstellung durch das DLR erfolgte: Die (bereits vorverarbeiteten) ABA-Daten einzelner Mess-Fahrten („journeys“) werden als „Gruppen“ zusammengefasst und sämtliche Gruppen eines Tages („Sessions“) als HDF5-Datei gespeichert.

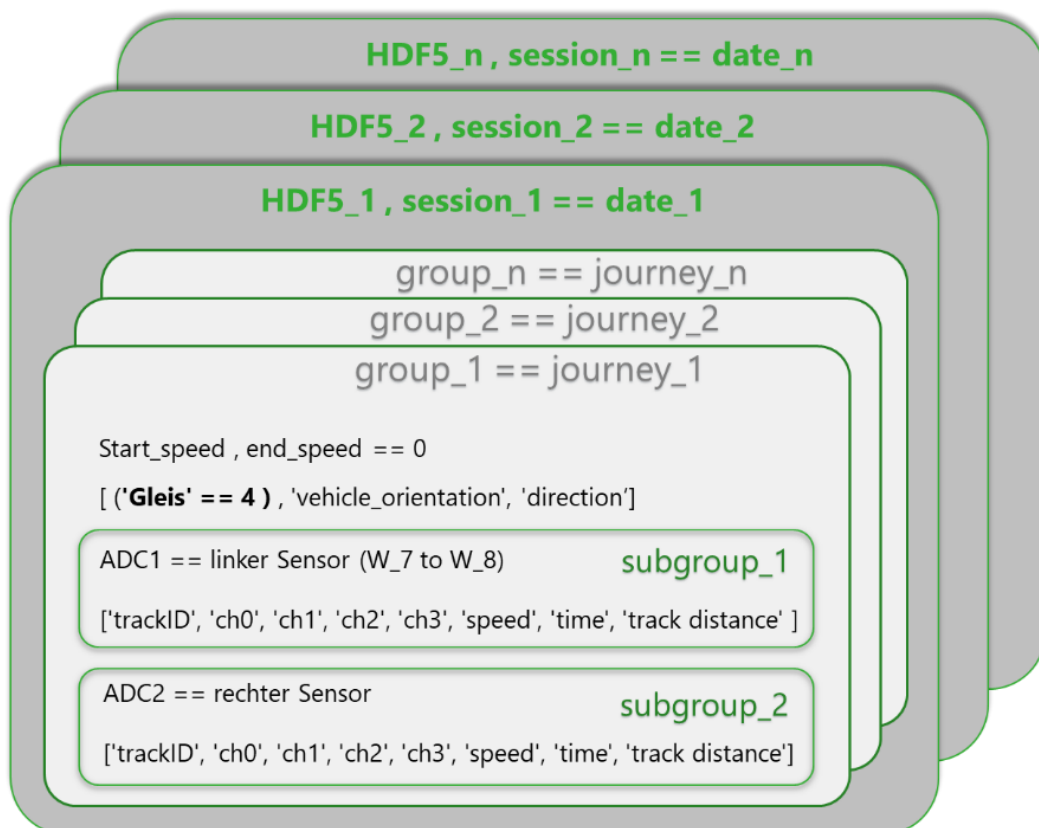


Abbildung 19: Struktur der ABA-Daten im HDF-5 Format.

Weil die Entwicklungsumgebung von AWS nicht direkt mit dem Schnittstellen-Dienst „h5py“ des HDF-5-Formats zusammenarbeiten kann, wird gleich nach dem Upload eine Umformatierung in das Cloud-Standard-Format „Parquet“ vorgenommen. Im Anschluss erfolgt die Datenprozessierung, im Fall von ABA-Daten nach untenstehendem Muster. Diese besteht aus verschiedenen Filtern, um Datenverläufe zu vergleichen und zu bewerten.

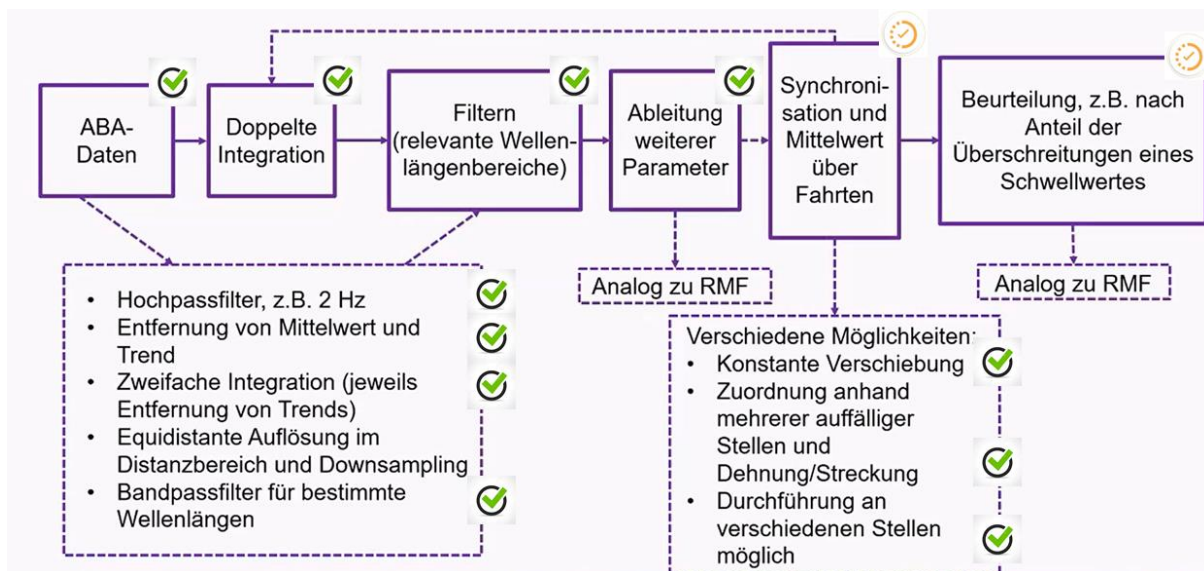


Abbildung 20: Datenprozessierung von Beschleunigungsdaten

3.1.1.3. Algorithmen zur Alignierung von Messdaten

Um lineare Messdaten zu vergleichen, z. B. um Daten eines neuen Messverfahrens den Daten aus Referenzmessungen gegenüberzustellen, muss zuvor sichergestellt werden, dass die Daten aus beiden Verfahren einen identischen Ortsbezug haben. Andernfalls könnte ein kleiner Verortungsfehler zu einem Offset entlang der Gleise führen. Anhand einiger auffälliger Fahrzeugreaktionen, zum Beispiel an diskreten Fehlstellen oder einer unebenen Schweißnaht, konnte für verschiedene Fahrten die entsprechend der unvermeidbaren Ungenauigkeit der Georeferenzierung erwartbaren Abweichungen nachvollzogen werden. Es wurden Verschiebungen im Dezimeter- bis maximal Meterbereich beobachtet. Aus diesem Grund müssen Datensätze von verschiedenen Messfahrten noch zueinander ausgerichtet – „aligniert“ – werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die lokalen Verschiebungen zwischen den zu vergleichenden Datensätzen aufgrund einer hochgenauen Georeferenzierung bereits gering sind und dass besondere Merkmale im Datenverlauf in beiden Verläufen enthalten sind.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Lösung dieses Problems vorgestellt. Für die durchgeführte Alignierung von Längsprofildaten ganzer Gleisabschnitte wurden verschiedene dieser Methoden kombiniert.

Methode 1: Ausrichtung an Signalspitzen

Grundsätzlich können zwei zu vergleichende Datenverläufe mit Hilfe von charakteristischen Signalspitzen (Maxima oder Minima) so zueinander verschoben werden, dass sie sich bestmöglich überdecken. Mit dieser Methode kann rasch ein erster Eindruck gewonnen werden, ob und wie gut die Verläufe übereinstimmen. Hierzu werden automatisch die Position des Maximalausschlags verschiedener Überfahrten extrahiert und die Daten so verschoben, dass sie sich an dieser Stelle überdecken.

Die Performanz dieser Methode hängt stark vom Anwendungsfall ab. Besteht der Input aus ABA-Rohdaten (wie für erste Analysen auf Gleis 4, auf dem die Daten anhand der Fahrzeugreaktionen an einer auffälligen Schweißnaht bei etwa Gleismeter 30 übereinander geschoben werden konnten, siehe Abbildung 21), so muss die Signalspitze manuell der mutmaßlich richtigen Stelle der Referenzdaten (hier eine stark ausgeprägte Schweißnaht) zugeordnet werden. Zur Automatisierung sollten also vergleichbare Datenquellen (ABA- zu ABA-Daten oder Längsprofilaten verschiedener Quellen) verwendet werden.

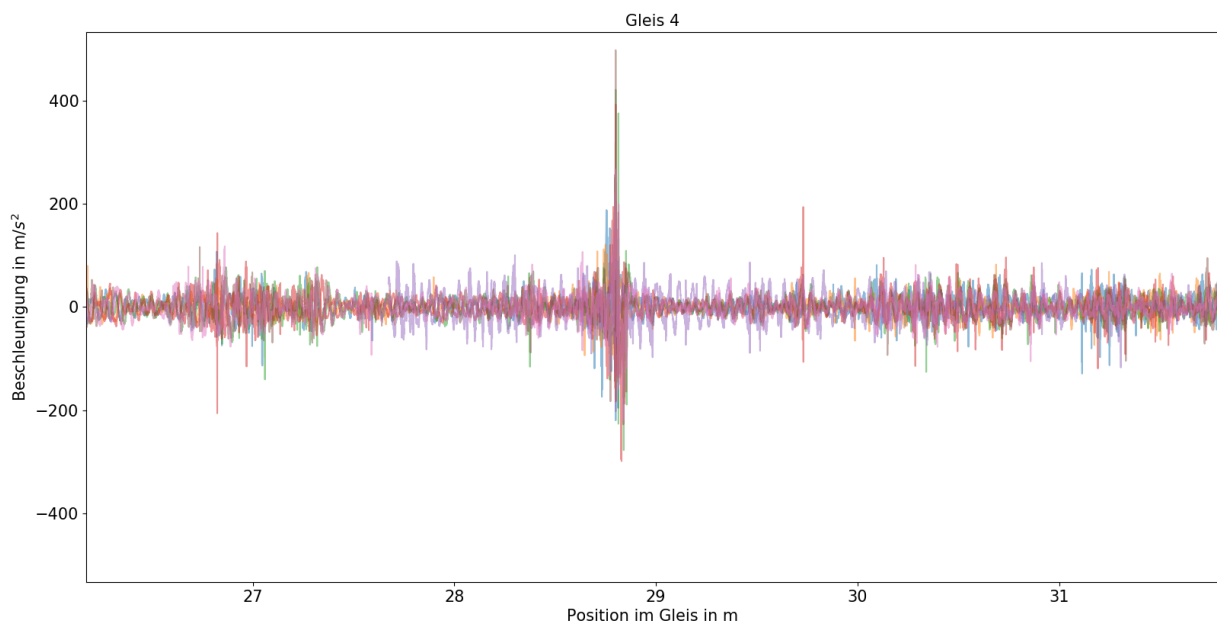


Abbildung 21: Vertikale Beschleunigung an einer auffälligen Schweißnaht auf Gleis 4 für mehrere Überfahrten.

In der einfachsten Form ist die Methode auch nicht automatisiert anwendbar, da gleisabhängig geprüft werden muss, ob es auf dem Gleissegment eine immer wiederkehrende Maximalspitze an (fast) derselben Stelle gibt; andernfalls müssen hier unter Vorwissen Einschränkungen vorgegeben werden (d.h. es werden Maximum und Minima nur in bestimmten Gleisbereichen gesucht), was grundsätzlich möglich ist, aber eine manuelle Erstbetrachtung aller Gleise fordert. Schließlich werden bei der Methode Schwankungen in den Positionsabweichungen nicht berücksichtigt, so dass die Genauigkeit mit zunehmender Distanz zur auffälligen Stelle in der Regel abnimmt. Dies kann

durch wiederholtes Anwenden der Methode auf kurze Gleisstücke und lineare Interpolation der Verschiebungen behoben werden; die eindeutige automatische Zuordnung von verschiedenen Ausschlägen bleibt jedoch eine Herausforderung. Die beschriebene Methode kann jedoch als Baustein für eine Alignierungspipeline verwendet werden.

Methode 2a: Varianz der Differenzen

Wie bereits in Kapitel 2.2.5.3 beschrieben, werden die beiden Signalverläufe voneinander subtrahiert, aus allen lokalen Differenzen die Varianz errechnet und die Berechnung für schrittweise gegeneinander verschobene Verläufe wiederholt. Der geringste Varianzwert aus diesen Ergebnissen drückt denjenigen Versatz aus, bei dem die Datensätze den geringsten Unterschied aufweisen. Die beiden untenstehenden Bilder zeigen jeweils oben die beiden Datenverläufe und darunter deren lokalen Abstand. Abbildung 22 zeigt im obigen Bild den Ausgangszustand, unten den Zustand nach dem Verschieben.

Diese Methode funktioniert gut, wenn beide Verläufe lediglich gegeneinander verschoben aber „gleich lang“ sind. In der Realität sind aber Verläufe wegen durchrutschender oder verschlissener Odometer-Räder oder imperfekter Satelliten-Verortung häufig auch noch gestaucht oder gedehnt, und zwar nicht nur gleichmäßig über die Länge, sondern sogar unregelmäßig verteilt. Stauchung/Dehnung können sogar in einer Journey gleichzeitig auftreten.

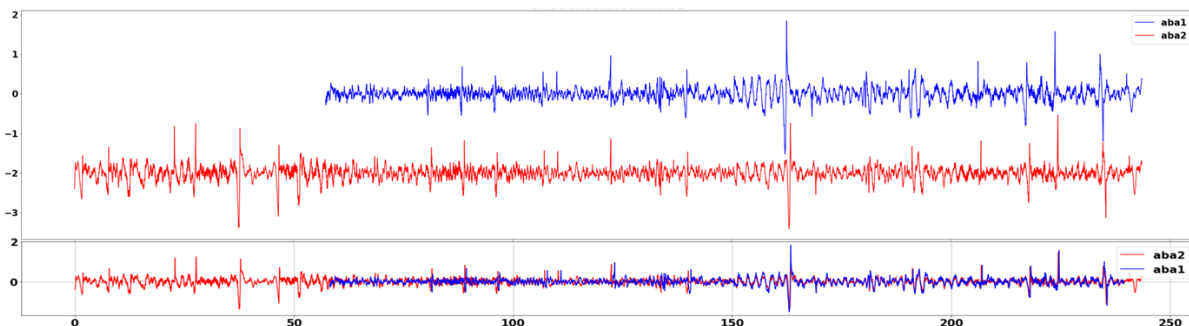


Abbildung 22: Alignierung Varianz der Differenzen. Oben zwei leicht versetzte Datenverläufe, unten nach Alignierung

Methode 2b: Abschnittsweise Varianz der Differenzen

Nach Aufteilung des zu alignierenden Verlaufs in mehrere Teilabschnitte wird für jeden Abschnitt sein „Passer“ im Referenzverlauf nach Methode 2a gesucht. Anschließend werden die Teilabschnitte wieder verbunden. Kleine Dehnungen/Stauchungen werden dadurch korrigiert. Vor dem Zusammenfügen wird noch kontrolliert, dass zwei Teilabschnitte, die zuvor direkt nebeneinander lagen, auch in der neuen Zusammenstellung wieder Nachbarn sind – andernfalls wird der Verschiebung verworfen.

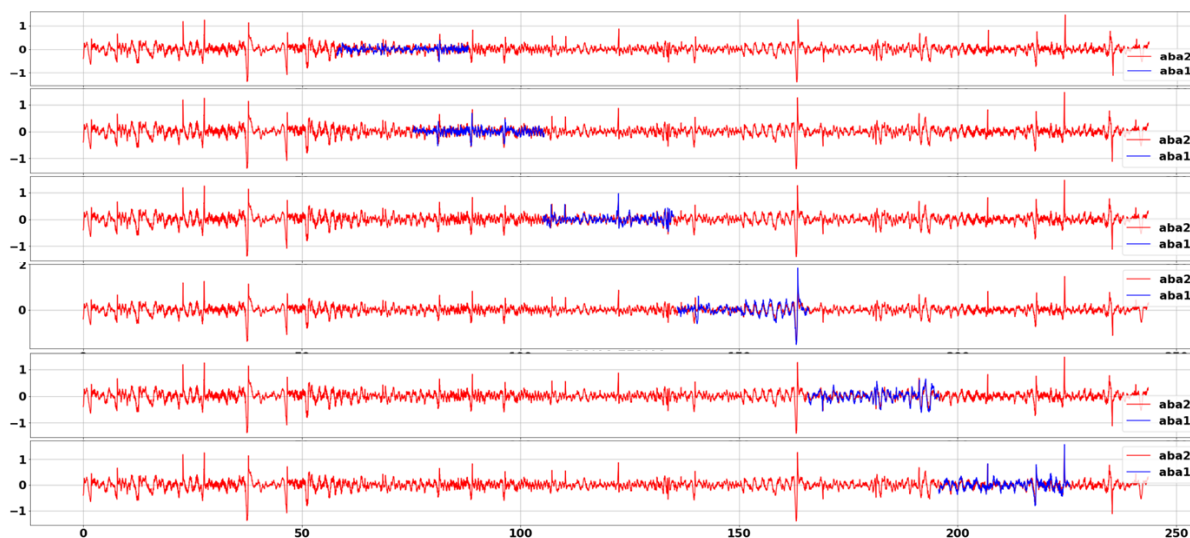


Abbildung 23: Abschnittsweise Alignierung Varianz der Differenzen. Der blaue Datenverlauf wurde aufgeteilt und lokal in den roten Verlauf eingepasst.

Methode 3: Bestimmung der stellenweisen Verschiebung zweier Signale mittels Maximierung der Kreuzkorrelation

Die Signale auffälliger Fahrzeugreaktionen, die an derselben Stelle im Gleisnetz durch beispielsweise eine Fehlstelle oder eine unebene Schweißnaht hervorgerufen werden, können für ähnliche Geschwindigkeiten durch Maximieren der Kreuzkorrelation relativ zueinander so verschoben werden, dass die Fahrzeugreaktionen an dieser auffälligen Stelle dieselben Positionsinformationen aufweisen. Die relativen Verschiebungen zweier Überfahrten über dasselbe Teilstück des Hafennetzes (dieselbe Gleisabfolge in derselben Richtung) variieren in der Regel über die Fahrt. Die beschriebene Methode ist zur Ableitung einer lokalen Verschiebung geeignet. Um gesamte Überfahrten anzugleichen, müssen die Verschiebungen an verschiedenen Stützstellen kombiniert werden – dies wird jedoch nicht auf die Rohdaten angewendet, da dann auch geschwindigkeitsunabhängige Signalanteile verändert würden. Die hier beschriebene Methode kann einerseits für die Alignierung schon prozessierter ABA-Daten (Längsprofil) verwendet werden; darüber hinaus für kleine Signalausschnitte, für die die Verschiebung der beiden Signale konstant ist, z.B. bei nur kurzen Ausschnitten um eine Fehlstelle.

Im Folgenden wird der Terminus „Graph“ im mathematischen Sinne verstanden, d.h. er bezeichnet die Menge aller geordneten Paare $(x, f(x))$ für eine Funktion f und alle Punkte x in deren Domäne; in der betrachteten Anwendung handelt es sich hier um eine endliche Menge an Tupeln aus zwei reellen Zahlen, wobei die Domäne durch die Längsposition im Gleis gegeben ist. Bei der betrachteten Funktion kann es sich um beliebige Messgrößen wie z.B. die vertikale Achslagerbeschleunigung, das Schienenlängsprofil, etc. handeln.

Der Zweck des Algorithmus ist es, die lokale Ähnlichkeit zwischen zwei Graphen g_0 und g_1 festzustellen. Hierzu wird für jeweils beide Graphen eine Menge an Untergraphen festgelegt und diese

untereinander mittels (normierter) Kreuzkorrelation auf Ähnlichkeit geprüft. Die Festlegung dieser Untergraphen erfolgt durch Festlegung von Untermengen in der Schnittmenge der Domänen der beiden Graphen (Unterabschnitte der betrachteten Gleissegmente). Falls die Korrelation zwischen zwei Untergraphen einen festgesetzten Schwellwert übersteigt, wird diejenige Differenz über die Domäne zwischen diesen beiden Untergraphen ausgegeben, welche die größte Kreuzkorrelation aufweist. Übersteigt die Korrelation keiner der Paare der Untergraphen den Schwellwert, so wird keine Verschiebung ausgegeben. In der Anwendung auf das Gleis wie oben angesprochen ist eine solche Differenz somit der örtlichen Abweichung gleichzusetzen.

Für die detaillierte Erklärung des Algorithmus seien die zu den Graphen zugehörigen Funktionen f_o zu g_o als *Referenzsignal* sowie das Pendant f_i zu g_i als *Testsignal* bezeichnet. Wir nehmen an, dass das Referenz- sowie Testsignal über einen zusammenhängenden Streckenabschnitt D mit Startpunkt d_o und Endpunkt d_i mit $d_o < d_i$ vorliegt. Für festgelegte Längen λ und δ bezeichnen wir für natürliche Zahlen n alle Punkte p_n mit $p_n = d_o + \delta + (\frac{1+n}{2})\lambda$, sodass der Abstand zu d_i größer gleich $\delta + \frac{1}{2}\lambda$ beträgt, als *Ankerpunkte*. Jeder Ankerpunkt p_i dient als Referenzpunkt, an dem das Referenzsignal mit dem Testsignal lokal auf Ähnlichkeit überprüft wird. Dies geschieht wie folgt: Jeder Ankerpunkt p_i sei Mittelpunkt eines Gleissegments der Länge λ . Das Referenzsignal f_o wird nun ausschließlich über diesem Gleissegment betrachtet. Zur einfachen Referenzierung bezeichnen wir das ausschließlich zu diesem Gleisabschnitt zugehörige Referenzsignal mit $f_o^{p_i}$. Zusätzlich sei p_i der Mittelwert eines weiteren Gleisabschnitts der Länge $\lambda + 2\delta$. Dieses längere Gleissegment unterteile man in weitere Unterabschnitte der Länge λ mit den Mittelpunkten $p_i - \delta$, $p_i - \delta + \epsilon$, $p_i - \delta + 2\epsilon$, ..., $p_i + \delta$. Über jedem dieser Unterabschnitte der Länge λ betrachte man nun das zugehörige Testsignal f_i welche im Weiteren mit $f_i^{p_i - \delta + n\epsilon}$ bezeichnet werden. Nun betrachte man alle Paare $(f_o^{p_i}, f_i^{p_i - \delta + n\epsilon})$, unterziehe jedem Paar einer Abtastratenkonvertierung (Resampling) und berechne die normierte Kreuzkorrelation. Anschließend gebe man zum Paar mit der höchsten Kreuzkorrelation $(f_o^{p_i}, f_i^{p_i - \delta + j\epsilon})$ die zusätzlich über einem festgelegten Wert κ liegt das Paar (p_i, Δ) wobei Δ die örtliche Verschiebung des Testsignals $f_i^{p_i - \delta + j\epsilon}$ zum Referenzsignal $f_o^{p_i}$ angibt. Dieses Vorgehen lässt einen eindeutigen Rückschluss auf die Gleisabschnitte zu, an denen eine besonders hohe Ähnlichkeit zwischen Referenz- und Testsignal vorliegt. Zudem kann die örtliche Verschiebung zwischen dem Referenz- und Testsignal unter Zuhilfenahme des berechneten Werts Δ korrigiert werden.

Anwendungsbeispiel

Das folgende Beispiel zeigt anhand von Achslagerbeschleunigungsdaten, wie der Algorithmus zur Anpassung der relativen örtlichen Positionierung verwendet werden kann. Für die Ausführung des Algorithmus wurden folgende Werte verwendet: $\lambda = 1\text{m}$, $\delta = 0.5\text{m}$, $\epsilon = 0.1\text{m}$, $\kappa = 0.8$.

In Abbildung 24 ist die vertikale Achslagerbeschleunigung zweier Fahrten zu sehen. Das Gleissegment wurde zur Übersicht auf einen Abschnitt von 4.5m eingeschränkt. Mit bloßem Auge kann man erahnen, dass beide Signale gegeneinander verschoben erscheinen.

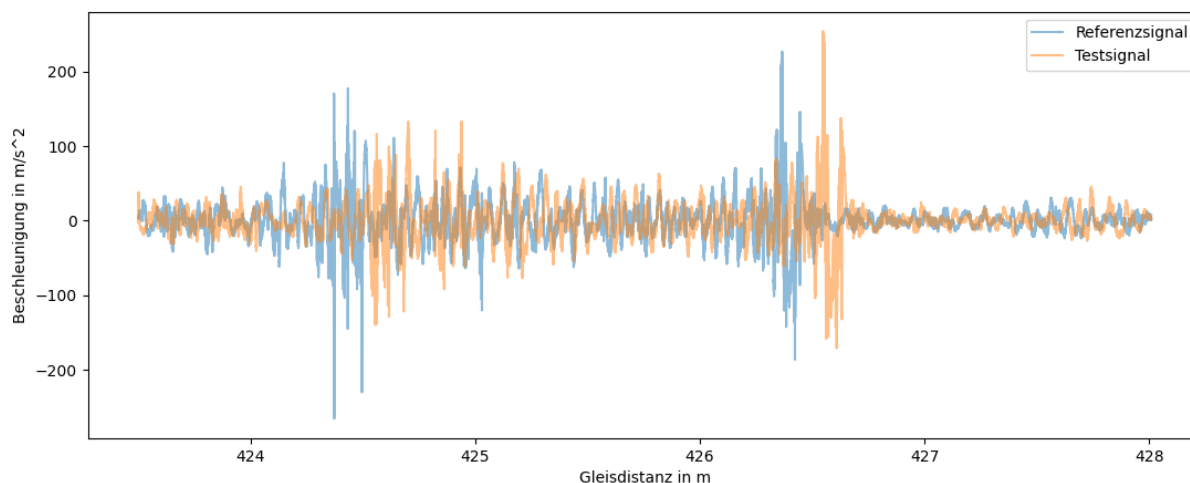


Abbildung 24: Vertikale Beschleunigungsdaten zweier Überfahrten.

Eine Anwendung des oben beschriebenen Algorithmus liefert folgende Ausgabe:

```
[ (424.5, nan),
  (425.0, nan),
  (425.5, nan),
  (426.0, 0.18656733868056108),
  (426.5, 0.18624074684157677) ]
```

Der Wert `nan` sagt aus, dass am zugehörigen Ankerpunkt keine berechnete Kreuzkorrelation über den zuvor festgelegten Wert κ liegt. Abbildung 25 zeigt die zum letzten Ankerpunkt zugehörigen Rohdaten sowie die verschobenen Daten über dem Gleissegment der Länge λ , zu dem der Algorithmus eine Kreuzkorrelation über dem Wert κ festgestellt hat.

Die beschriebene Methode wird im weiteren Teil einer Pipeline zur hochgenauen Alignierung der abgeleiteten Längsprofile verschiedener Überfahrten desselben Gleissegments sein, bei dem Daten über einen kompletten Gleisabschnitt verbesserte relative und absolute Positionsinformationen erhalten, um die Achslagerbeschleunigungsdaten sowohl untereinander vergleichbar zu machen als auch die Achslagerbeschleunigungs- und Referenzdaten korrekt zuzuordnen und vergleichen zu können. Schließlich können auf dieser Basis sinnvoll gemittelte Features aus den Achslagerbeschleunigungsdaten mehrerer Fahrten berechnet werden.

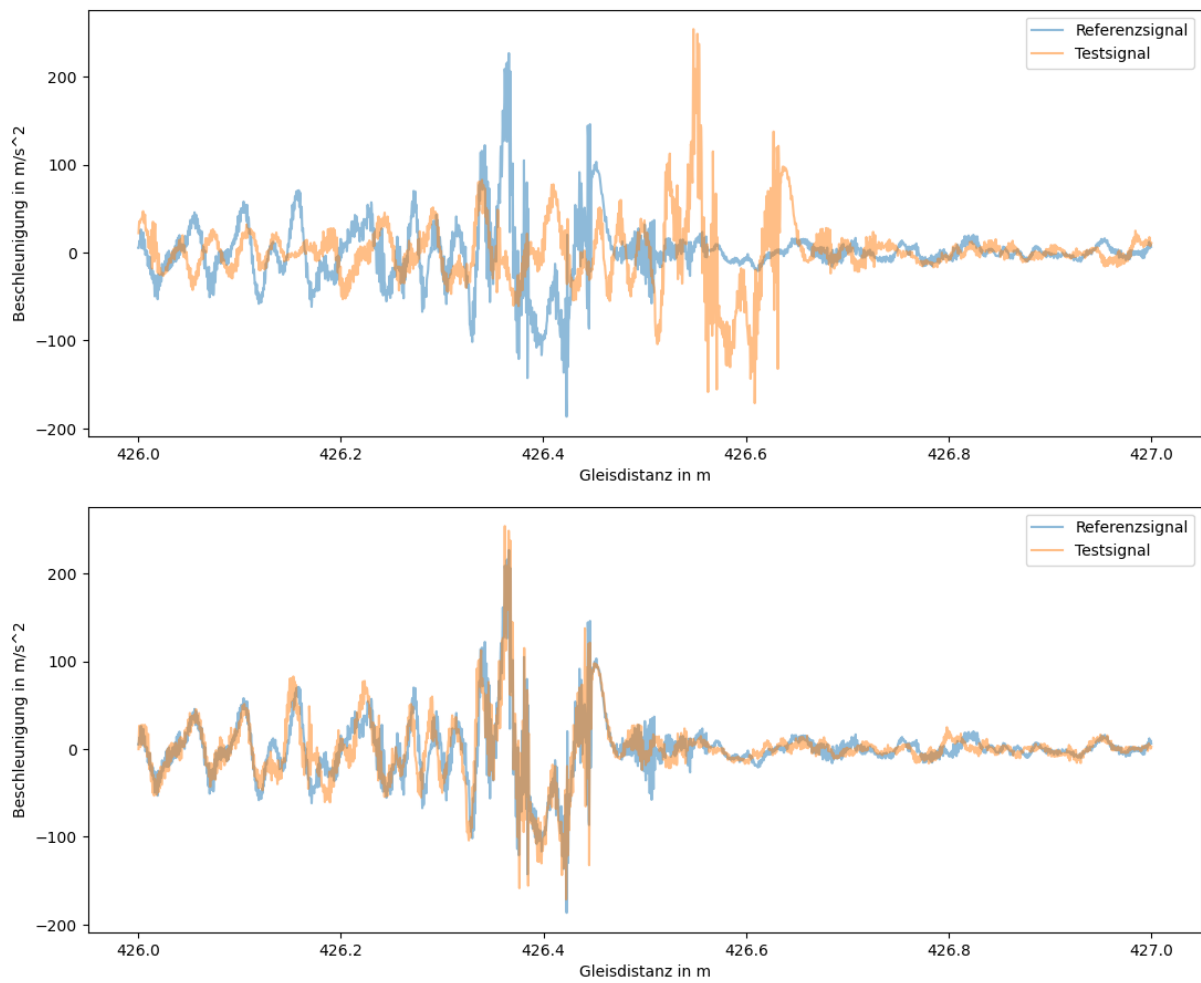


Abbildung 25: Roh- und verschobene Daten zum Ankerpunkt 426.5m. Im unteren Bild wurden die Rohdaten um zirka 0.1862m verschoben.

3.1.2. Digitale Signalverarbeitung / Zeitreihenanalyse

3.1.2.1. Längsprofilschätzung aus Achslagerbeschleunigungsdaten

Untersuchungsgegenstand der hier beschriebenen Arbeiten war, inwieweit relevante Parameter aus dem Längsprofil (Vermessung mittels Messgerät RMF) aus den ABA-Daten extrahiert werden können. Dies umfasst insbesondere die Erkennung von Fehlzuständen, die im Längsprofil sichtbar sind, z.B. schlecht profilierte Schweißstellen oder Riffel.

Als Untersuchungsgegenstand der ersten Analyse wurde Gleis 4 ausgewählt, da dieses Gleis so aus verschiedenen Altschienenstücken zusammengestellt ist, dass durch Schweißstellen getrennte verriffelte und nicht verriffelte Bereiche direkt aufeinandertreffen. Abbildung 26 zeigt eine Aufnahme der Riffel auf Gleis 4; auf Abbildung 27 ist das durch das RMF vermessene Längsprofil auf Gleis 4 für beide Schienen auf einem Ausschnitt von 20 Metern zu sehen. Insbesondere sieht man einen Übergang eines verriffelten Bereiches auf einen intakten Bereich bei Meter 65 und einen erneuten Übergang zu einem verriffelten Bereich bei Meter 72. Anhand dieses Gleises konnten in AP 3 die Bearbeitungsschritte ausgearbeitet und getestet schließlich auf das gesamte Gleisnetz ausgeweitet werden.



Abbildung 26: Riffel auf Gleis 4, Begehung am 9.12.2020.

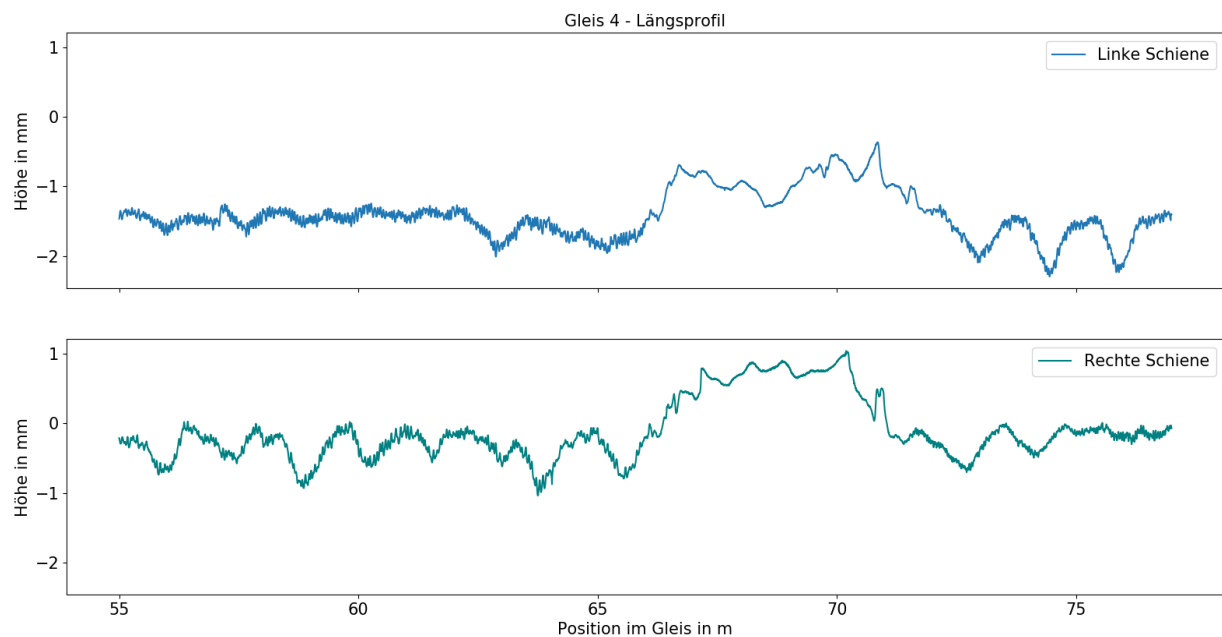


Abbildung 27: Längsprofil für linke und rechte Schiene auf Gleis 4 (Messungen des RMF). Verriffelte Bereiche (bis Meter 65, ab Meter 72) grenzen an in dieser Hinsicht intakte Bereiche.

Datenprozessierung

Um eine Schätzung des Längsprofils des Gleises zu erhalten, wurden die Achslagerbeschleunigungsdaten in vertikaler Richtung zunächst vorprozessiert (Hochpassfilterung nahe der Eckfrequenz des verwendeten Beschleunigungssensors, Entfernung des Mittelwerts und ggf. Trends) und anschließend zweifach integriert, wobei die Daten nach jeder Integration von auftretenden Störfaktoren bereinigt wurden. Dieser Schritt transformiert die auftretenden Vertikalbeschleunigungen in ein Höhenprofil. Das resultierende Höhenprofil, das zu diesem Bearbeitungsschritt in zeitlich gleichmäßiger Auflösung der Aufnahmefrequenz von 20.625 Hz vorliegt, wurde im Anschluss auf eine niedrigere Frequenz aufgelöst und über äquidistanten Stützstellen im Distanzbereich (Gleismeter) statt im Zeitbereich dargestellt. Bei diesem Schritt muss darauf geachtet werden, dass es zu keinen Alias-Effekten kommt; in der gesamten Bearbeitungskette müssen Prozessierungsartefakte vermieden werden.

Alignierung des Längsprofilverlaufs verschiedener Überfahrten desselben Gleises

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, zeigten die prozessierten Beschleunigungsdaten für dasselbe Gleis über unterschiedliche Fahrten eine sehr gute Wiederholbarkeit. Die aus der Georeferenzierung ermittelten Positionsschätzungen bergen variierende Abweichungen in der Längsposition. Um verschiedene Fahrten untereinander sowie die aus den Sensordaten ermittelten Längsprofile mit den Referenzdaten vergleichen zu können, wurden die Daten aligniert, d.h. die Position entlang des Gleises wurden mithilfe der prozessierten Beschleunigungsdaten aktualisiert. Für erste Analysen auf Gleis 4 reichten dabei konstante Verschiebungen anhand einer auffälligen

Schweißnaht aus; die Verschiebungen über ein Gleis sind jedoch innerhalb einer Fahrt nicht konstant und mussten gerade im Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Fahrten und die Mittelung über verschiedene Fahrten auf dem gesamten Netz verbessert und automatisiert werden. Die Alignierung wurde hierbei als Ergänzung zur Georeferenzierung genutzt und konnte insbesondere entwickelt werden, da die aus den ABA-Daten ermittelten Längsprofile größtenteils über charakteristische Merkmale und Verläufe verfügen, so dass verschiedene Stellen des Streckenverlaufs wiedererkannt werden können.

Die Alignierung geht iterativ vor. Verglichen werden Daten einer beliebigen Befahrung des Gleises zu einer Referenzfahrt bzw. die Referenzfahrt zu den Referenzdaten. In einem ersten Schritt werden die Längsprofilaten auf einem schmalen Wellenlängenbereich betrachtet und dessen Verlauf über das Gleis genutzt, um über die Kreuzkorrelation (s. Kapitel 3.1.1.3) eine bestmögliche Schätzung der Größenordnung der Verschiebung in Form einer konstanten Verschiebung der Fahrt zur Referenzfahrt zu erhalten. Dies soll der Korrektur insbesondere größerer Offsets dienen, die über das Gleis als konstant angenommen werden, um im Anschluss die Feinjustierung durchzuführen. Diese ermöglicht idealerweise eine eindeutige Zuordnung von Auffälligkeiten, deren Verschiebungen über das Gleis variieren. Zur Feststellung der ersten konstanten Verschiebung wird bei kurzen Gleisen das gesamte Gleis betrachtet; erhält man keine bestmögliche Verschiebung oder handelt es sich um lange Gleise, so werden Teilstücke betrachtet und die Positionsabweichungen werden zwischen den erhaltenen Verschiebungen linear interpoliert. Gerade bei längeren Gleisen kann die Verschiebung über das Gleis stark variieren. Die zur Feststellung der Verschiebung verwendeten Daten haben eine deutlich geringere Auflösung im Distanzbereich als das abgeleitete Längsprofil, was die Rechenzeit für die großen Datenmengen stark verringert. Dies geht zwar zu Lasten der Genauigkeit, die jedoch für diesen ersten Schritt im verfügbaren Maß ausreichend ist. Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass bei einer möglichst genauen Initialverschiebung im zweiten Schritt Schweißstellen sowie andere lokale Maxima und Minima idealerweise eindeutig zugeordnet werden können und die Daten trotzdem in einer vertretbaren Rechenzeit verarbeitet werden können.

Der nächste Schritt vergleicht Auffälligkeiten (Maxima oder Minima, z.B. Schweißnähte), die in der Vergleichs- beziehungsweise der Referenzfahrt (bei Vergleich von ABA- zu ABA-Daten; bei Vergleich von ABA- zu RMF-Daten analog in der Referenzfahrt und in den Referenzdaten) auftreten. In einem geringen Bereich nahe der gefundenen Auffälligkeit in der Referenzfahrt wird nach Auffälligkeiten in der Vergleichsfahrt gesucht. Gibt es mehrere Treffer, so wird erneut die Kreuzkorrelation für die verschiedenen Verschiebungen verglichen; zudem muss sie einen gewissen Schwellwert überschreiten. Zusätzlich werden die Verschiebungen auf Plausibilität untersucht. Bei Schwankungen der Verschiebungen, die nicht im realistischen Bereich des Beschleunigungsverhaltens der Lokomotive liegen oder bei sich widersprechenden Verschiebungen werden die betroffenen Ergebnisse nicht berücksichtigt. Im Anschluss wird zwischen den erhaltenen Verschiebungen linear gestreckt oder gestaucht. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen beispielhaft das alignierte

Längsprofil der Überfahrten auf der linken Schiene auf Gleis 1. Gut zu sehen sind die Minima, die zur Alignierung herangezogen werden können.

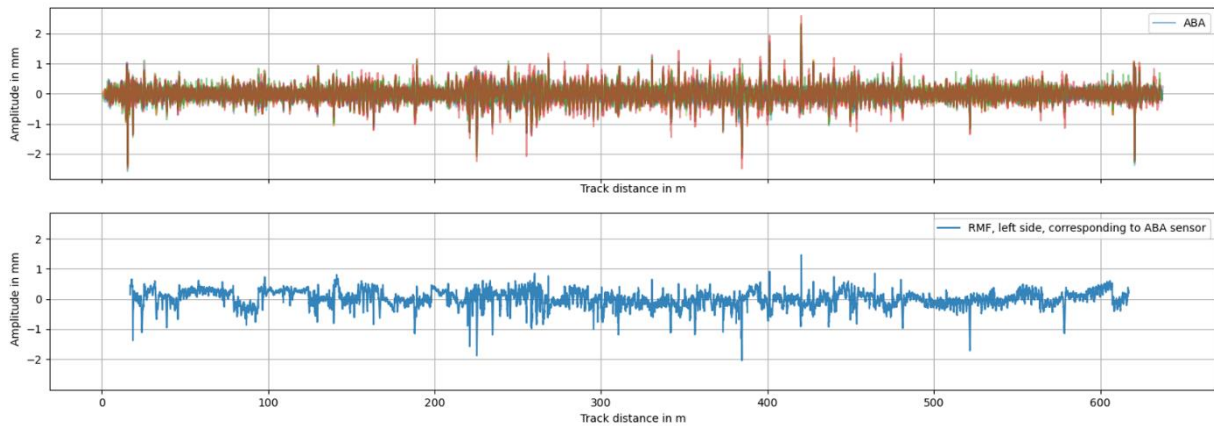


Abbildung 28: Oben: Alignierte Längsprofile aus ABA-Daten, Gleis 1 (linke Schiene bzgl. Nordwesten). Unten: Zugehöriges gemessenes Längsprofil (RMF).

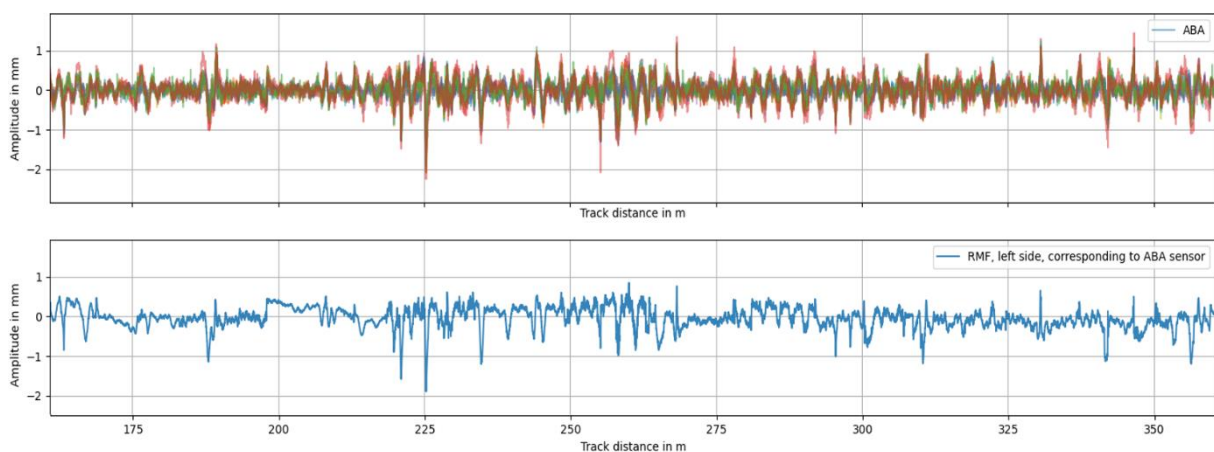


Abbildung 29: Nahaufnahme von Abbildung 28.

Abbildung 30 zeigt beispielhaft das Ergebnis der auf Gleis 4 angewendeten Alignierung für eine Überfahrt sowie die zugehörigen Referenzdaten der rechten Schiene, Abbildung 34 die genannten Ergebnisse für mehrere Überfahrten und beide Schienen auf einem Ausschnitt von Gleis 4.

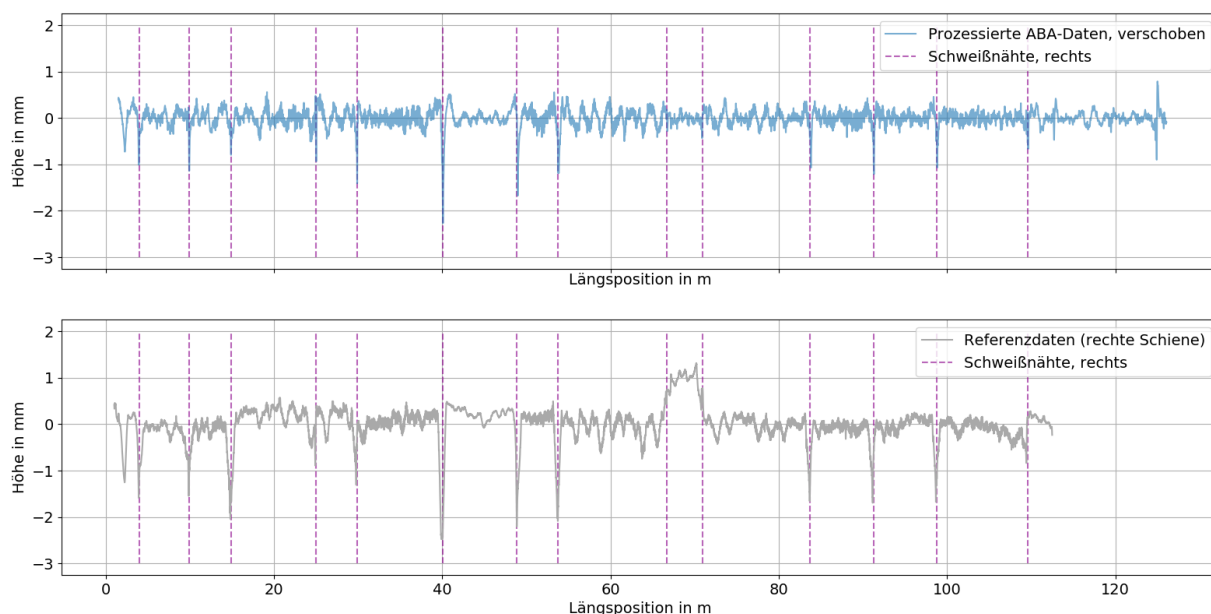


Abbildung 30: Längsprofil und Schweißungen auf Gleis 4. Oben: Aus ABA-Daten abgeleitetes Längsprofil der rechten Schiene. Unten: Gemessenes Längsprofil (RMF) der rechten Schiene. Gestrichelte vertikale Linien: Protokollierte Schweißnähte (Begehung im Dezember 2020).

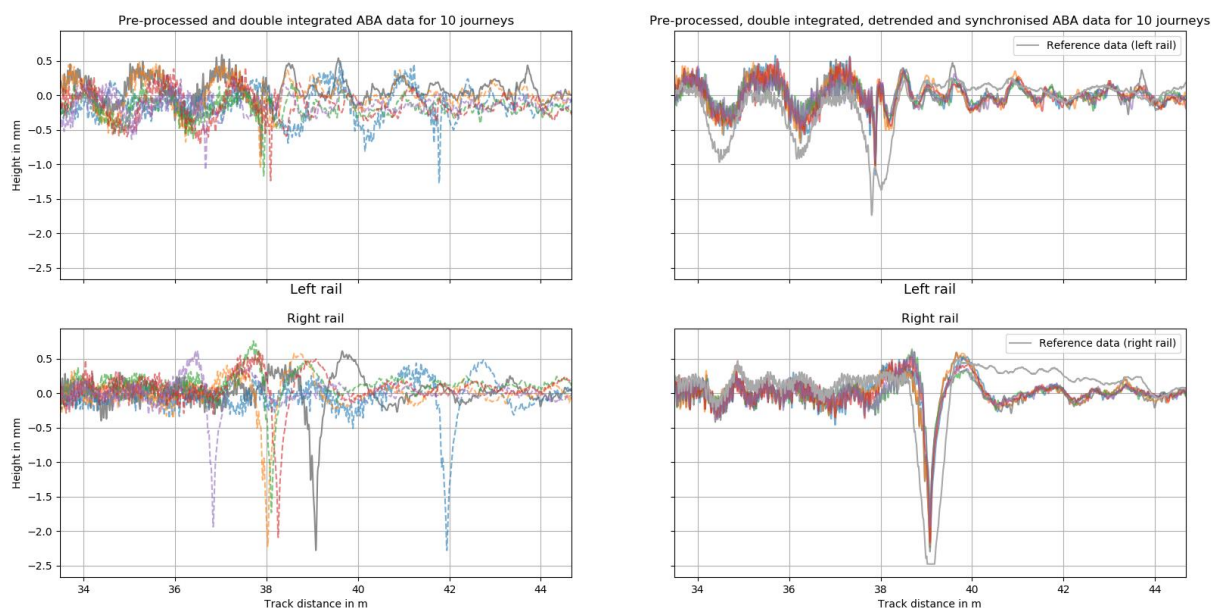


Abbildung 31: Prozessierte ABA-Daten (erhaltenes Längsprofil) für insgesamt zehn Fahrten auf Gleis 4, aufgeteilt auf die linke und rechte Seite. Oben: Linke Seite der Lok, unten: Rechte Seite der Lok. Links: Das in dunkelgrau, nicht gestrichelt dargestellte Längsprofil zeigt die Referenzfahrt (ABA). Rechts: In hellgrau sind die in den Referenzmessungen (RMF) gemessenen Längsprofile abgebildet.

Bewertung der Längsprofile

In den prozessierten Achslagerbeschleunigungsdaten können nun einerseits starke Minima (z. B. auffällige Schweißnähte) oder aber periodische Fehlermuster detektiert werden. Für letzteres müssen die Daten in den relevanten Wellenlängenbereichen betrachtet werden. Die nun anstehenden Bearbeitungsschritte werden analog für die prozessierten Achslagerbeschleunigungs- und Referenzdaten durchgeführt. Die aus beiden Datenprozessierungen resultierenden Zielgrößen wurden während der Datenanalyse verglichen sowie auf die Aussagekraft der ABA-Daten bezüglich der RMF-Daten untersucht. Dieses Vorgehen ist in Kapitel 4 beschrieben. Abbildung 32 zeigt die in diesem und im nächsten Kapitel dargestellte Prozessierungskette anhand von Gleis 4. Die letzten beiden Schritte zeigen die auf ein Wellenlängenband gefilterten Daten sowie deren Einhüllende¹ (siehe Kapitel 4).

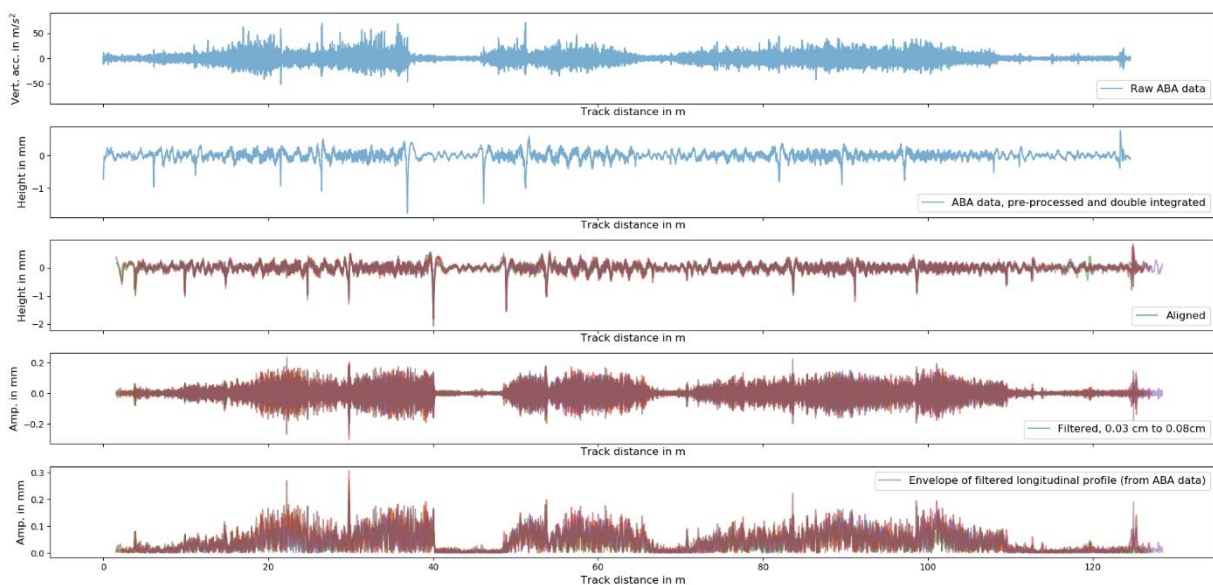


Abbildung 32: Prozessierungskette der ABA-Daten. Von oben nach unten: (1) Rohdaten (vertikale Beschleunigungen in m/s^2) für eine Fahrt. (2) Aus (1) abgeleitetes Höhenprofil in mm. (3) Höhenprofil aus ABA-Daten nach Alignierung für mehrere Fahrten. (4) Gefiltertes Längsprofil aus (3), Wellenlängen 3-8 cm. (5) Einhüllende der Daten aus (4). Gezeigt werden Fahrten auf Gleis 4, Sensor auf der rechten Schiene.

¹ Die Einhüllende eines Signals ist definiert als Amplitude des zugehörigen analytischen Signals, welches aus dem Signal (Realteil) und seiner Hilbert-Transformierten (Imaginärteil) besteht.

3.1.3. Implementierung der Riffelanalyse in einer Cloud-Umgebung

Bei der Referenzdatenerfassung wurde erkannt, dass im Gleis 4 von Hafen Braunschweig Abschnitte mit klar erkennbaren (und messbaren) Riffeln in unmittelbarer Nähe zu Abschnitten ohne Riffel lagen. Somit bot sich die Gelegenheit, die Eignung einer Riffeldetektion mittels ABA-Daten zu erforschen, mit dem Ziel...

- ... Gleisabschnitte *mit* Riffeln klar von solchen *ohne* Riffel zu unterscheiden.
- ... die Riffelamplitude über die ABA-Daten in korrekter Weise zu bestimmen.
- ... den Einfluss von
 - ... Fahrtrichtung,
 - ... Fahrgeschwindigkeit,
 - ... Riffeln auf der jeweils anderen Schiene herauszuarbeiten.

Riffel sind wellenförmige, periodische Unebenheiten mit einem Abstand von ca. 5 cm und Amplituden von wenigen Hundertstel-Millimetern. Für eine genaue Quantifizierung der Amplitude bedarf es entweder sehr exakter Messtechnik oder der Absicherung der in großer Zahl anfallenden Messdaten mittels statistischer Methoden. Angesichts der zahlreichen zu erwartenden Störeinflüsse wurde die zweite Methode gewählt. Es sollten also stets die ABA-Daten aus mehreren Überfahrten mit den Referenzdaten verglichen werden.

Vor dem eigentlichen Datenvergleich sind verschiedene Vorverarbeitungen notwendig:

- Es ist erforderlich, dass die ABA-Daten alle die gleiche Ortsreferenz haben, dass kleine Fehler in der Verortung einer jeden Überfahrt vorab korrigiert werden. Diese Korrektur wird im Weiteren als „Alignierung“ bezeichnet.
- Ferner muss das Beschleunigungs-Signal der ABA-Sensoren durch eine zwei-fache Integration nach der Zeit in ein Höhenprofil umgerechnet werden.
- Das Höhenprofil setzt sich aus Wellen von einer sehr kurzen bis zu sehr langen Wellenlängen zusammen. Verglichen werden sollen konkrete Wellenlängenzonen. Diese sind zunächst noch zu filtern.
-

Referenz für die Identifikation von Riffeln waren visuell identifiziert Riffel im Gleis, die Abschnitte mit und ohne Riffeln waren im Zuge einer Gleisbegehung durch ein Rollenmaß verortet worden.

Bei der Identifikation von Riffeln aus ABA Daten wurde wie folgt vorgegangen:

1. Zunächst wurden die ABA-Daten aus mehreren Fahrten nach der Methode in Kap. 3.1.1.3 aligniert.
2. Die ABA-Daten werden zweifach nach der Zeit integriert, dies ergibt das sog. „approximiertes Höhenprofil“ (siehe Kap. 3.1.2.1).
3. Da die Riffel in Gleis 4 eine Wellenlänge von ca. 5 cm aufweisen, wurde das approximierten Höhenprofil einer jeden Fahrt mit einem Bandpassfilter für ein Wellenlängenband von $5\text{ cm} - b$ bis $5\text{ cm} + b$ gefiltert, wobei b die halbe Breite des Bands ist. Die Untersuchung wurde mit verschiedenen breiten Wellenlängenbändern durchgeführt.
4. Das so gefilterte Höhenprofil enthält jetzt nur noch Wellen der relevanten Wellenlänge. Um zu prüfen, ob Wellen vorliegen oder nicht, wurde um jeden Messpunkt in einem Fenster der halben Breite L die „Streuung“ der Nachbarpunkte untereinander über die empirische Standardabweichung aller Punkte in diesem Fenster bestimmt. Später wurde wiederum mit unterschiedlichen Werten für die halbe Fensterbreite L gerechnet, um deren Einfluss zu ermitteln. Das Bild unten zeigt einen Ausschnitt aus dem gefilterten Höhenprofil und das zur Bildung der Standardabweichung betrachtete Fenster (rot) für einen einzelnen Datenpunkt.
5. Die abschnittsweise Standardabweichung wird wiederum entlang der Gleislänge geplottet. Ist die Standardabweichung hoch (=das ABA-Signal schwankt stark) liegen Wellen von ca. 5 cm Wellenlänge vor. Die Daten aus allen Messfahrten (hellblaue Kurvenschar) wurden mit einem Medianfilter an jedem Messpunkt zu *einer* Kurve (rot) zusammengefasst.
6. Über einen einstellbaren Cut-off-Wert (grüne Linie) wurden verriffelte Abschnitte von unverriffelten unterschieden. Je geringer der Cut-off-Wert angesetzt wird, umso eher würden Abschnitte als verriffelt identifiziert werden.

Die so rechnerisch identifizierten Riffelabschnitte (dicke blaue Linie im Diagramm unten) lassen sich mit visuell identifizierten Riffelabschnitten (dicke rote Linie) vergleichen.

Um den Einfluss der Werte für b und L zu untersuchen, wurden die folgenden Werte getestet:

- Für b : 1, 5, 10, 15, 20 und 30 mm,
- für L : 200, 300, 400, 600 und 800 mm.

Die Breite b des zu filternden Wellenlängenbands könnte dann Auswirkungen auf die weitere Auswertung haben, wenn benachbarte Wellenlängen deutlich größere Ausschläge im Höhenprofil machen würden. Wirklich große Ausschläge sind allerdings nur bei langen Wellenlängen zu erwarten ($> 500\text{ mm}$), und die Parameterstudie bestätigte, dass die Wahl von b mit der oben genannten Spanne kaum von Einfluss ist.

Die Breite des Fensters L für die Auswertung der Streuung der Nachbarpunkte hätte dann einen Einfluss, wenn Riffel nur in kurzen Clustern (mal und mal nicht) auftreten. Naturgemäß sind Riffel-Cluster aber viele Meter lang. Deshalb war es nicht verwunderlich, dass eine Variation der Größe L über die genannte Spanne praktisch ohne Einfluss blieb.

Fortan wurde deshalb mit Werten von $b = 20$ mm und $L = 300$ mm gerechnet.

Die nächsten Abbildungen zeigen die Ergebnisse für unterschiedliche Cut-off-Werte. Durch Wahl eines Cut-off-Werts zwischen $0,41E-3$ und $0,55E-3$ mm können Riffelabschnitte von unverriffelten mit hinreichender Genauigkeit unterschieden werden.

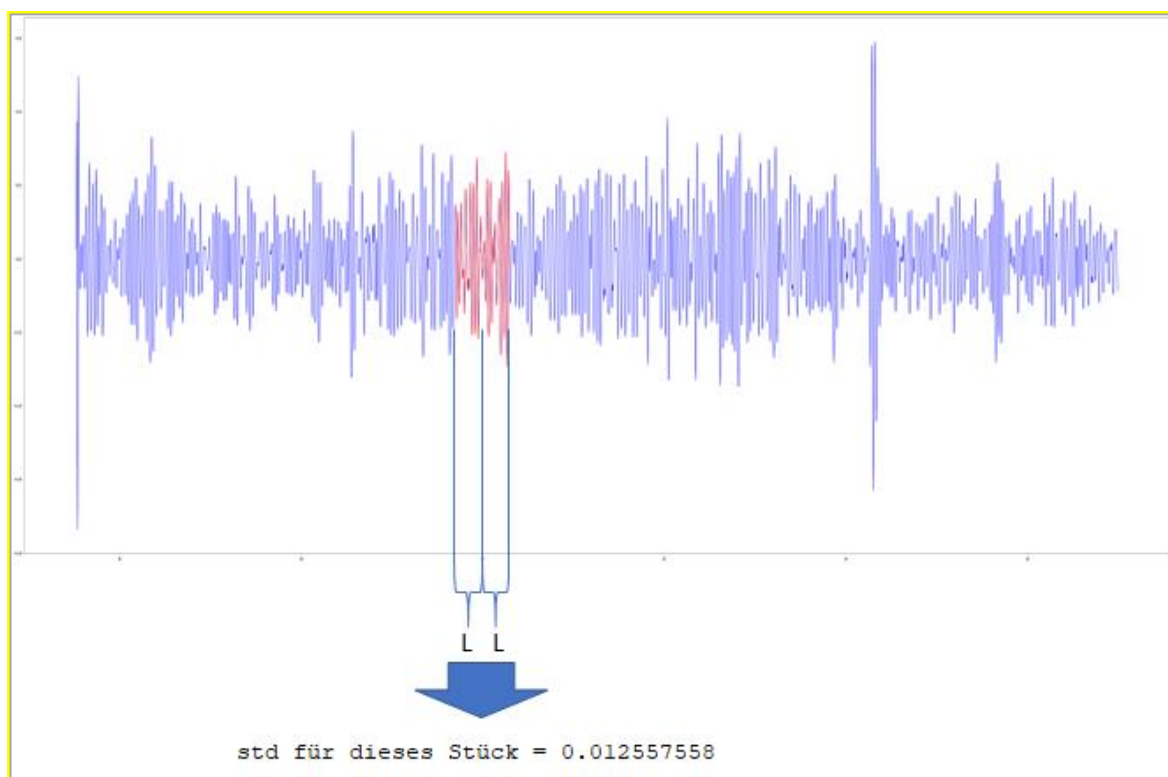


Abbildung 33: Riffelidentifizierung mit Hilfe der Standardabweichung innerhalb eines Fensters $\pm L$

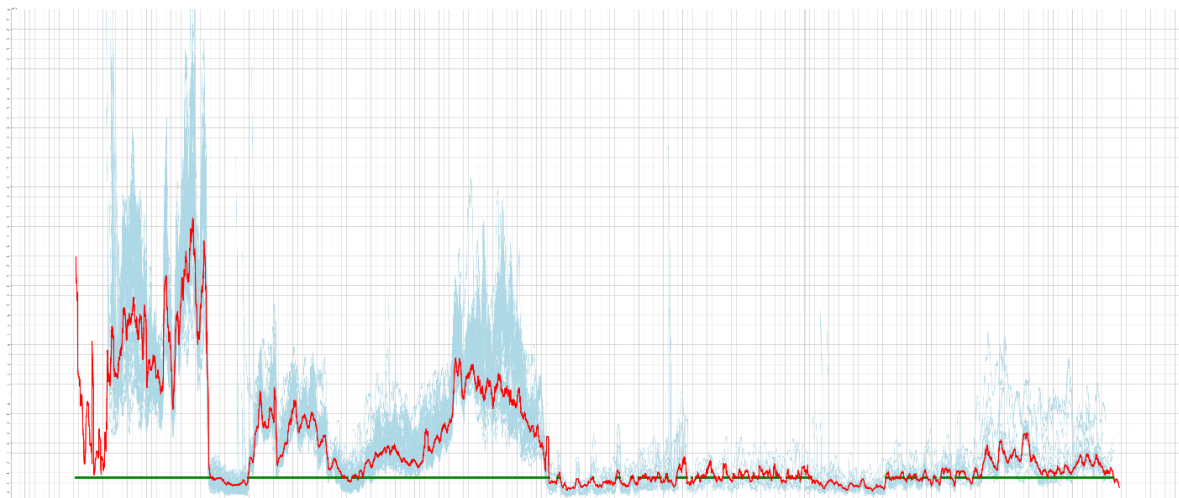


Abbildung 34: Verlauf der Standardabweichung von gefilterten ABA-Daten (alle Messfahrten in hellblau, Zusammenfassung per Median in rot)

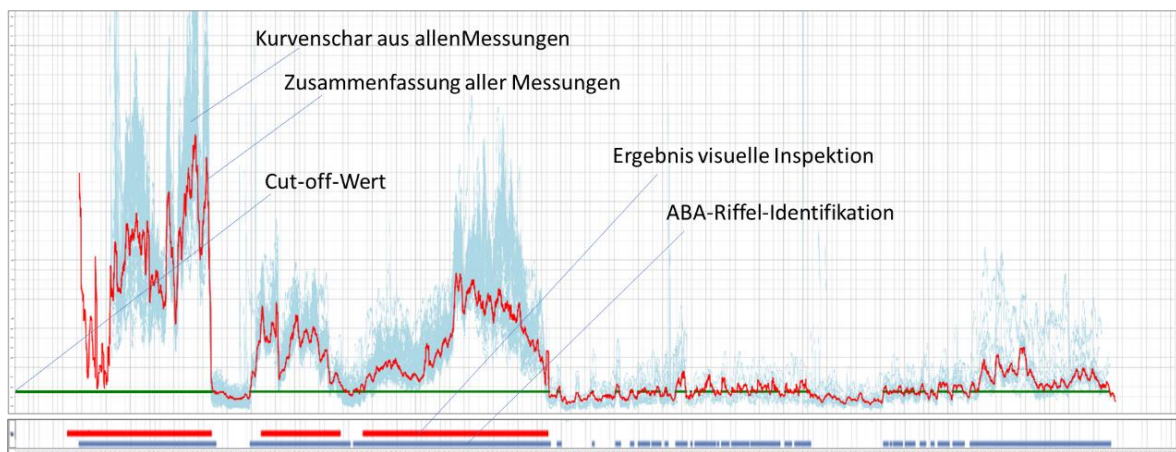


Abbildung 35: Riffelidentifizierung aus ABA-Daten

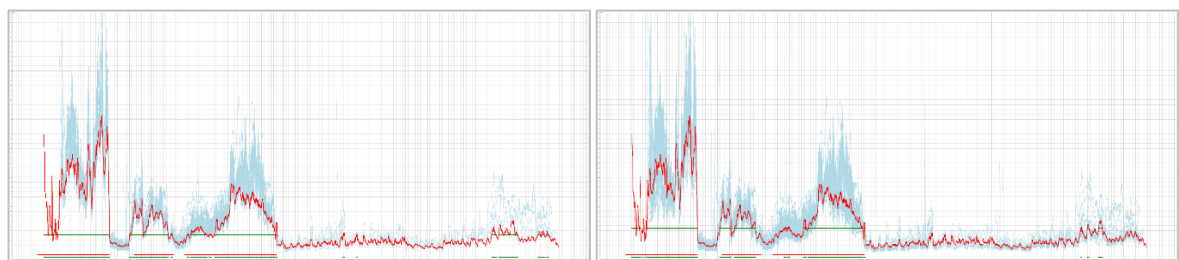


Abbildung 36: Riffelidentifikation mit Cutoff-Wert: 0,41E-3 mm (links) und 0,55E-3 mm (rechts), $L = 300$ mm, $b = 20$ mm.

3.1.4. Anomalie-Erkennung mit überwachten tiefen neuronalen Netzen

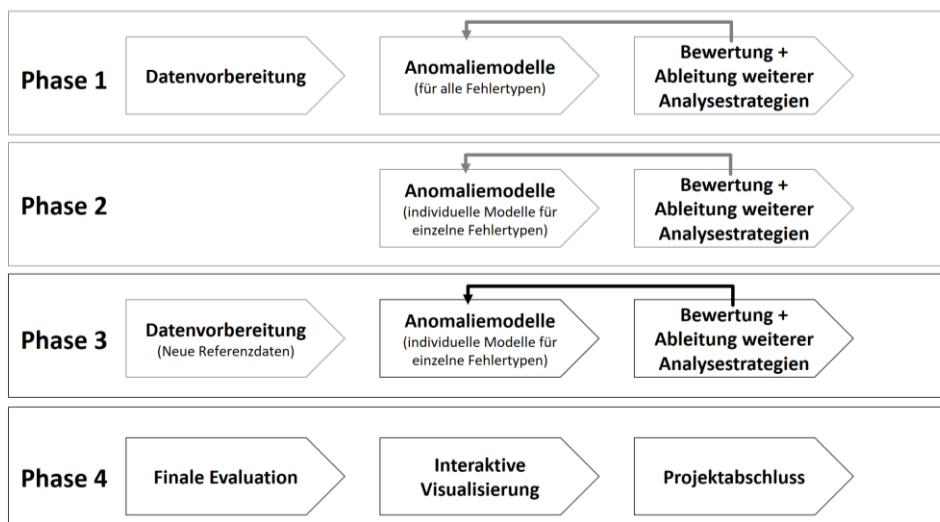
Im Arbeitspaket 1 wurden die Fehlzustände an der Gleisinfrastruktur definiert und priorisiert. Diese Priorisierung wurde abgeglichen mit Fehlzuständen, die im Schienennetz des Braunschweiger Hafens tatsächlich vorhanden waren. Hierzu wurden beide Referenzdatensätze (2019 und 2020) analysiert.

Es zeigte sich, dass vier priorisierten Fehlzustände in ausreichender Zahl im Braunschweiger Hafenbahn-Schienennetz vorlagen:

- Riffel und Schlupfwellen
- Ausbrüche
- Schleuderstellen
- Spurverengung

Die folgende Grafik zeigt das prinzipielle Vorgehen, unterteilt in vier Projektphasen:

Projektvorgehen



www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 37: Projektvorgehen

Wie ersichtlich, wurden zuerst Anomalieerkennungsmodelle aufgebaut, die alle fokussierten Fehlertypen erkennen sollen. Jedoch hat sich gezeigt, dass bessere Ergebnisse erzielt werden können, wenn pro Fehlertyp individuelle Anomalieerkennungsmodelle realisiert werden. Dies ist damit zu erläutern, dass die unterschiedlichen Fehlertypen Typ-individuelle Auswirkungen auf die Beschleunigung der Lokomotive haben. Im Laufe des Projektes wurden beide Referenzdatensätze detailliert

analysiert. So beschreibt die Phase 2 die Analysen mit den Referenzdatensätzen von 2019 und die Phase 3 die Analysen mit den Referenzdatensätzen 2020.

Im Folgenden sind die relevanten Ergebnisse beschrieben.

3.1.4.1. **Merkmalsextraktion**

Die in den verschiedenen Datenerhebungen erfassten georeferenzierten Datensätze (Referenzmessungen und Messungen mit dem auf der Lokomotive installierten Sensorsystem) lagen in unterschiedlichen Formaten, Abtastraten, etc. vor. Die Fehlzustände wurden weiterhin auf verschiedene Weisen aufgedeckt. Einerseits durch manuelle Begehung der Gleise durch entsprechend geschultes Fachpersonal. Andererseits unter Nutzung von Messtechnik, die über die Gleise geschoben wurden. Gerade bei den manuellen Überprüfungen musste man davon ausgehen, dass hier kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht. Außerdem gab es oft das Phänomen, dass sich Fehlzustände verschiedener Typen überlappen, also bspw. am gleichen Gleismeter Schleuderstellen und Spurerweiterungen auftreten. Sowohl die Nicht-Vollständigkeit der Dokumentation als auch die Überlappung von Fehlzuständen führen zu einer Unschärfe in den Daten. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass für bestimmte Fehlertypen nur eine sehr geringe Anzahl von Fehlzuständen vorlag, also bspw. um den Faktor 100 weniger Schleuderstellen als Riffel. Je mehr Fehlzustände vom gleichen Typ vorliegen, desto besser können die Anomaliemodelle antrainiert werden, was zu besserer Qualität in der Anomalieerkennung führt.

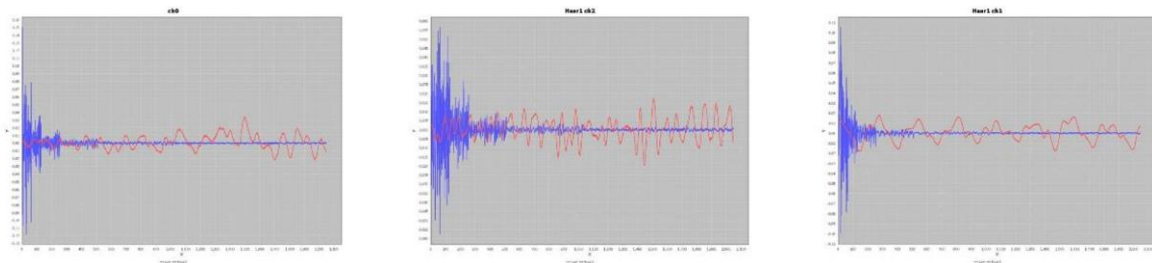
Um die o.g. Herausforderungen zu meistern, wurden nicht die vorhandenen Sensormessdaten direkt für das überwachte Training genutzt. Stattdessen wurden die Daten mit unterschiedlichen Verfahren vorverarbeitet um Merkmale aus den vorhandenen Sensordaten zu extrahieren. Das Ziel war, die Daten auf für das Training der Modelle relevante Daten/Informationen zu reduzieren.

- Reduktion bedeutet, dass weniger Daten zur Verfügung stehen und somit die Verarbeitung weniger Zeit in Anspruch nimmt.
- Die richtigen Daten zu haben, ist natürlich ein kritischer Erfolgsfaktor. Der Fokus muss sein, „sinnvoll-ungewöhnliche“ Merkmale herauszufiltern.

Die folgende Grafik zeigt in Rot die original aufgenommenen Daten. In Blau sind die transformierten Daten zu sehen. Hierzu wurde die Methode Discrete Wavelet (Haar) verwendet.

Es ist gut erkennbar, dass die blauen Kurven zu Beginn, also wenn die Lokomotive losfährt, stark ausschlägt. Folglich kann man davon ausgehen, dass gerade zu Beginn der Fahrt ein signifikantes Datenrauschen vorliegt, so dass der Beginn nicht zum Antrainieren der Anomalieerkennungsmodelle genutzt werden soll.

Daten-Vorverarbeitung



www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 38: Rauschen in den Daten durch Transformation reduzieren

Auch das Ende der Fahrt zeigte großes Rauschen, so dass auch dieser Datenbereich entfernt wurde. Es wurden 2.048 Werte auf einen Wert transformiert. Hierzu wurden verschiedene statistische Verfahren ausprobiert, wobei Root Mean Square (RMS) die besten Ergebnisse hervorbrachte. Auch wurden Überlappungen ausprobiert, also bspw. Transformation zu einem Wert aus 2.048 Werten + jeweils 1.024 Werten links und rechts. Dies hat jedoch keine Verbesserungen in der späteren Analyse gezeigt, so dass im Endeffekt die Transformation von 2.048 Werten zu einem Wert durchgeführt wurde.

Es wurden verschiedene Verfahren für die Transformation ausprobiert:

- Gute Ergebnisse, aber zu lange Bearbeitungszeit (viele Stunden für eine Datei):
Choi Williams Distribution (CWD)
Born Jordan Distribution (BD)
- Akzeptable Ergebnisse mit akzeptabler Bearbeitungszeit (wenige Minuten für eine Datei):
Discrete Wavelet Transformation (Daubechies und Haar)
Fourier (Fast Fourier Transform (FFT))
High Pass Filter (HPF)
Updated Morlet Transform (UMT)
Wigner-Ville Distribution (WVD)
Pseudo Wigner-Ville Distribution (PWVD)
- Keine akzeptablen Ergebnisse
Short Time Fourier Transform (STFT))
Wavelet
(Fast Wavelet Transform Haar (FWTH), Wavelet Packet Transform Haar (WPTH), Fast Wavelet Transform Coiflet (FWTCA), Wavelet Packet Transform Coiflet (WPTCA), Wavelet Packet Transform Daubechies (WPTDB), Fast Wavelet Transform Symlet (FWTSB), Wavelet Packet Transform Symlet (WPTSB), Fast Wavelet Transform Legendre (FWTLA), Wavelet Packet Transform Legendre (WPTLA))
Stockwell Transform (SW)

Es wurden auch Gleisabschnitte entfernt, die über eine lange Distanz keine Fehlzustände aufzeigten. Dadurch resultierte zwar keine signifikante Verbesserung in der Analysequalität, aber es war eine Performancesteigerung zu verzeichnen.

Aufgrund der Unschärfe der Georeferenzierung wurde die Strecke „um den Fehlzustand“ ebenfalls fokussiert analysiert. (Es wurde jeweils die Distanz des Fehlzustandes rechts und links betrachtet, bzw. bei punktuellen Fehlzuständen wurde die Strecke von einem Meter rechts und links genauer betrachtet.) Hier zeigte sich im Schnitt eine leichte Verbesserung der Anomalieerkennungsgüte.

Es wurden die Lokomotivfahrten nach Geschwindigkeit gruppiert und getrennt analysiert. Hier zeigten sich keine Verbesserungen. Es wird vermutet, dass dies damit zusammenhängt, dass die Rangierloks im Hafen mit niedriger Geschwindigkeit fahren. Dieser Ansatz hätte vermutlich höhere Auswirkungen, wenn bspw. ICE-Fahrten analysiert worden wären, da hier die Geschwindigkeiten stark variieren.

3.1.4.2. Bewertung der Algorithmikgüte

Um die Güte der Anomalieerkennungsmodelle zu bewerten, wurden drei unterschiedliche Methoden verwendet, die typischerweise in dieser Art von Analyse Anwendung finden: Precision, Recall und F1-Score. Die im Folgenden dargestellten Analyseergebnisse beziehen sich immer auf Daten, die nicht zum Trainieren der Modelle genutzt wurden.

Die folgende Grafik zeigt, wie sich die Trefferquote für die drei unterschiedlichen Methoden berechnet.

Bewertung der Algorithmik-Güte

PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS

- **Precision** (auch **true negative rate** genannt)

$$precision = \frac{TP}{TP+FP} \Rightarrow \frac{\text{Korrekt aufgedeckte Fehlzustände}}{\text{Aufgedeckte Fehlzustände (sowohl korrekt als auch nicht korrekt)}}$$

- **Recall** (auch **sensitivity** genannt)

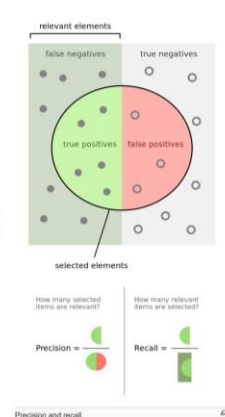
$$recall = \frac{TP}{TP+FN} \Rightarrow \frac{\text{Korrekt aufgedeckte Fehlzustände}}{\text{Alle tatsächlichen Fehlzustände (aufgedeckt oder nicht aufgedeckt)}}$$

- **F1 score** (auch **F-score** oder **F-measure** genannt)
= Harmonischer Mittelwert von Precision und Recall mit bestmöglichem Wert 1.
Gewichtung auf schlechteres Ergebnis. Bsp.: 100% und 50%, dann F1 = 66%

$$f1 = 2 \frac{precision * recall}{precision + recall}$$

Quelle sowie weitere Informationen: https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall

www.ispredict.com | Copyright



Quelle Grafik:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Precisionrecall.svg>

Abbildung 39: Bewertung anhand Precision, Recall und F1 score

Die folgende Tabelle zeigt, was in dem Kontext Aufdeckung von Fehlzuständen im Schienennetz als „Positive“, als „Negative“, als „true“ und als „false“ definiert wird:

Bewertung der Algorithmik-Güte

„Positive“ = Fehlzustand erkannt „True“ = ☺ es stimmt „False“ = ☹ es stimmt nicht		„Negative“ = Gute Schiene erkannt „True“ = ☺ es stimmt „False“ = ☹ es stimmt nicht	
True Positive (TP)	False Positive (FP)	True Negative (TN)	False Negative (FN)
Anzahl von Punkten als Anomalie korrekt erkannt	Anzahl von Punkten als Anomalie erkannt, obwohl es keine Anomalie gab	Anzahl von Punkten, die korrekt als Nicht-Anomalie erkannt wurden	Anzahl von Punkten, die als Nicht-Anomalie erkannt wurden, obwohl eine Anomalie vorlag
Fehlzustände sind gefunden worden	Guter Schienenabschnitt ist als Fehlzustand bewertet worden	Guter Schienenabschnitt ist als gut bewertet worden	Fehlzustand vorhanden, wurde aber nicht erkannt.
Korrekt	Falsch	Korrekt	Falsch

www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 40: Einordnung in den Schienenkontext von „true“, „false“, „positive“ und „negative“.

3.1.4.3. Analyse: Riffel und Schlupfwellen

Es wurden alle Daten analysiert, sofern zu den Gleisabschnitten Daten von der Messkampagne (RMF-Messtechnik) zur Verfügung standen. Die Lokomotive hat auf jeder Seite einen Beschleunigungssensor. Diese Daten wurden separat analysiert. Außerdem wurden die visuellen Protokolle der manuellen Begehung herangezogen.

Es wurden Wavelet-Verfahren und Deep Learning mit Neuronalen Netzen verwendet.

Die Genauigkeit wurde einerseits pro Anomalie berechnet, aber andererseits pro Meter.


Die folgende Grafik zeigt beispielhaft einen Gleisabschnitt mit Riffel / Schlupfwellen:



Abbildung 41: Gleisabschnitt mit Riffeln / Schlupfwellen (© Vossloh Rail Services)

Über alle drei o.g. Scores konnten gute und zuverlässige Ergebnisse erzielt werden. Die folgende Grafik zeigt die Güte der Anomalie-Erkennung, unterteilt nach „pro Anomalie“ bzw. „pro Meter“.

Analyse Fehlertyp: Riffel und Schlupfwellen



	Pro Anomalie		Pro Meter	
	ADC1	ADC2	ADC1	ADC2
Precision	90%	94%	88%	90%
Recall	80%	73%	69%	73%
F1 score	84%	82%	77%	80%

www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 42: Analyseergebnis Riffel / Schlupfwellen

3.1.4.4. Analyse: Ausbrüche

Bei der Analyse der Ausbrüche gab es zwei spezifische Herausforderungen, neben den o.g. allgemeingültigen Datenspezialitäten.

Einerseits war ein hoher Prozentsatz der Ausbrüche dort, wo es auch andere Schienenfehler gab. Dies beeinflusst natürlich das Anlernen der Anomalieerkennungsmodelle, da wir immer auf die gleichen Beschleunigungsdaten zurückgegriffen haben. Anomalien in den Beschleunigungsdaten können dann durch einen Ausbruch, oder durch eine andere Fehlstelle an der gleichen Stelle, verursacht gewesen sein.

Andererseits waren die im Braunschweiger Hafen dokumentierten Ausbrüche nicht immer nur an der horizontalen Gleisfläche, sondern auch seitlich an den Stellen, die das Rad nicht berührte. Folglich haben diese Ausbrüche keine Auswirkung auf die erfassten Beschleunigungsdaten, so dass rein mit Beschleunigungsdaten diese seitlichen Ausbrüche definitiv nicht erkannt werden können.

Die folgende Abbildung zeigt das Prinzip von Ausbrüchen und auch einen entsprechenden Gleisabschnitt:

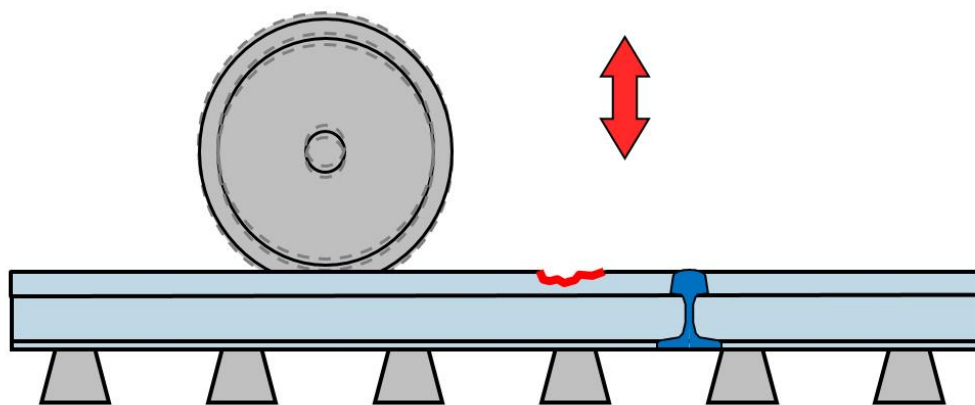


Abbildung 43: Gleisabschnitt mit Ausbruch (Copyright Vossloh)

Trotz seitlicher Ausbrüche und trotz Überlappung mit anderen Fehlstellentypen konnten über alle drei Scores stabile Ergebnisse von ca. 2/3 Aufdeckungsquote erzielt werden.

Analyse Fehlertyp: Ausbrüche



Precision	= 61%
Recall	= 65%
F1 score	= 63%

www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 44: Analyseergebnis: Ausbrüche trotz seitlicher, nicht erfassbarer Ausbrüche und Überlappungen mit anderen Fehlertypen

3.1.4.5. Analyse: Schleuderstellen

Zur Analyse der Schleuderstellen wurden Wavelet und Deep Learning mit Neuronalen Netzen verwendet. Die Berechnung der Genauigkeit wurde für die einzelnen Fahrten unterschieden pro Anomalie und pro Punkt. (Punkt = separat gespeicherter Wert in der Aufzeichnung. Die Länge zwischen Punkten variiert, da sie von der Geschwindigkeit der Lokomotive abhängt.) Des Weiteren wurden auch hier die beiden Sensoren an der Lokomotive jeweils individuell analysiert (ADC1 und ADC2).

Die folgende Grafik zeigt einen Gleisabschnitt mit einer Schleuderstelle:

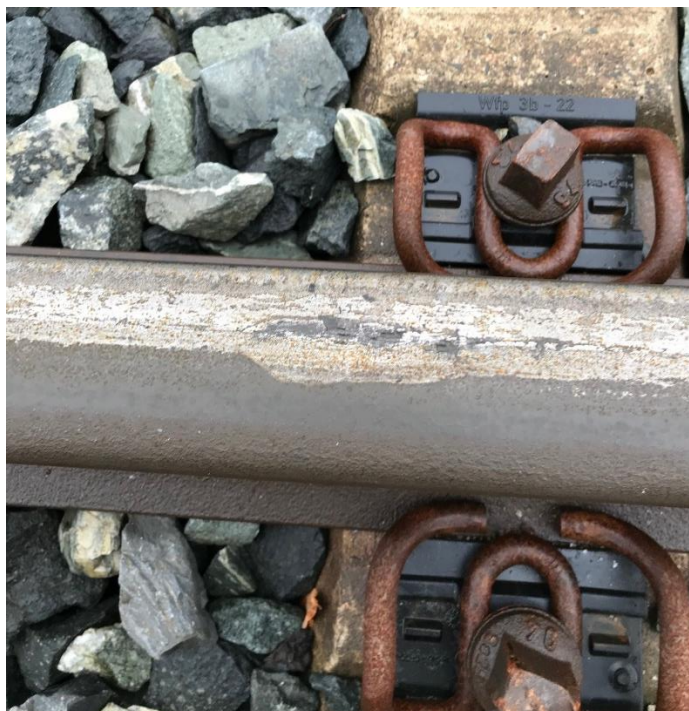


Abbildung 45: Schleuderstelle auf Gleis 91 der Braunschweiger Hafenbahn

Für Precision konnten pro Anomalie sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Recall war nicht so überzeugend, was entsprechend den F1 Score reduzierte.

Bei Recall waren es nur geringe Unterschiede, wenn pro Anomalie oder pro Punkt analysiert wurde. Die folgende Grafik zeigt die Anomalieerkennungsgüte:

Analyse Fehlertyp: Schleuderstellen

	Pro Anomalie		Pro Punkt	
	ADC1	ADC2	ADC1	ADC2
Precision	76%	67%	48%	30%
Recall	35%	29%	38%	29%
F1 score	48%	41%	42%	29%

www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 46: Analyseergebnis Schleuderstellen

3.1.4.6. Analyse: Spurverengung

Die Spurverengungen wurden mit der CDM-Messtechnik erfasst.

Die folgende Grafik zeigt das Prinzip der Spurverengung:

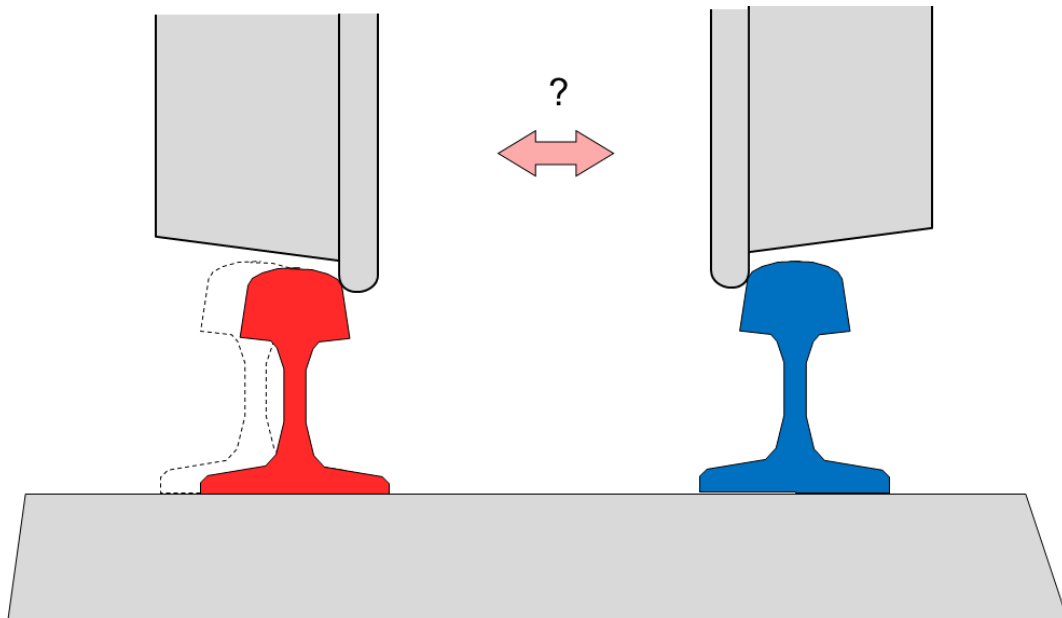


Abbildung 47: Schematische Darstellung Spurverengung (Copyright Vossloh)

Zwischen den beiden Referenzdatensätzen (2019 und 2020) zeigte sich eine strukturelle Verschiebung der Messergebnisse. In der folgenden Grafik zeigt die grüne Linie einen Messwert von 2019. Die blaue Linie zeigt, für den gleichen Gleisabschnitt, den Messwert von 2020. (Die rote Linie zeigt die Spur mit einer Breite von 1430 mm an.)

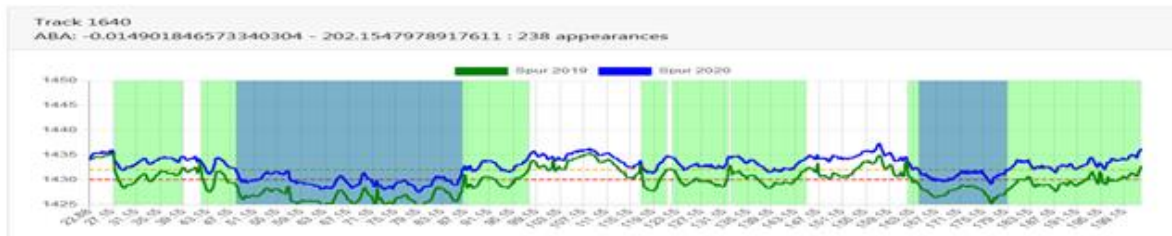


Abbildung 48: Messungen der Spurbreite (2019 und 2020)

Es kann davon ausgegangen werden, dass diese strukturellen Verschiebungen durch Schleifarbeiten verursacht wurden. Die Verschiebung wurde daher durch die Datenvorverarbeitung ausgeglichen. Zur Anomalieerkennung wurden Modelle im Deep Learning-Verfahren mit Neuronalen Netzen genutzt.

Auch hier zeigte sich, dass bei Precision sehr zuverlässige Ergebnisse erzielt werden konnten. Recall konnte ca. die Hälfte aller Spurverengungen aufdecken, so dass F1 Score als harmonischer Mittelwert entsprechend niedriger ist.

Analyse Fehlertyp: Spurverengung



Precision	76%
Recall	48%
F1 score	59%

www.ispredict.com | Copyright

Abbildung 49: Analyseergebnis Spurverengung

3.2. Optische Sensorik

In Arbeitspaket 3.2 wurde eine Machbarkeitsstudie zur Gewinnung relevanter Zustandsinformationen sowie Erkennung relevanter Objekte anhand der Umfelderkennung mit Industriekameras (siehe Arbeitspaket 2, Abbildung 9) durchgeführt. Im Zuge der prototypischen Implementierung der Umfelderkennung wurden zwei Kameras mit Blickrichtung „vorwärts“ und „rückwärts“ auf der Lok installiert. Der aufgezeichnete Bildausschnitt der Kameras wurde so gewählt, dass die befahrene Strecke vergleichbar der Sicht des Triebfahrzeugführers optisch erfasst wurde (siehe Abbildung 50). Relevante wissenschaftliche Ergebnisse der in AP 3.2 durchgeführten Forschungsarbeiten wurden auf einer internationalen Fachkonferenz veröffentlicht ([6]). Für die Auswertung der Bilddaten wurden im Projekt drei Ansätze untersucht:

- 1) Erkennung relevanter Objekte (z. B. Weichen, Weichenzeichen, Prellböcken, Waggons)
- 2) Erkennung der vorherrschenden Witterungsbedingungen)
- 3) Erkennung der Schienen sowie von Anomalien auf der Schiene (z. B. Verschmutzungen)

Für Ansatz 1 konnte ein bereits vorhandenes tiefes neuronales Netz ([7]) auf die Bilddaten aus der Hafenbahn Braunschweig angewendet und hinsichtlich der Performanz untersucht werden. Für Ansatz 2 wurde im Projekt ein Trainingsdatensatz aus öffentlich verfügbaren Bildern (siehe auch ([7]) hinsichtlich der Wetterbedingungen ergänzend annotiert und für das überwachte Training eines tiefen neuronalen Netzes zur Erkennung der Witterungsbedingungen (sonnig, bewölkt, regnerisch, Schnee) genutzt. Für Ansatz 3 wurde ein neuer Ansatz zur unüberwachten Erkennung von Anomalien auf Schienen mittels tiefer neuronaler Netze entwickelt und erprobt ([6]).

3.2.1. Objekterkennung

Die Aufgabe der Objekterkennung in einer gesteuerten Umgebung kann mithilfe von Kameradaten gelöst werden, da diese eine reichhaltige Informationsquelle darstellen. In letzter Zeit haben die Fortschritte in der modernen Hardware- und GPU-Technologie die Einführung von Deep-Learning-Methoden ermöglicht, die rechenintensiv sind. Die Anwendung von Deep Learning Methoden auf Kameradaten zur Schätzung der Position und des Zustands von Bahnanlagen ist wichtig für einen reibungslosen Bahnbetrieb und eine automatisierte Entscheidungsfindung. Die Eisenbahnumgebung besteht aus Anlagen wie Weichen, Weichenzeichen, Bahnübergängen und Prellböcken. In diesem Abschnitt werden der verwendete gelabelte Datensatz, die angewandte Deep Learning Methode und die Erkennungsgenauigkeit der einzelnen Anlagen anhand von Bildern aus dem Braunschweiger Hafen näher erläutert.

DNNs sind robust gegenüber Dynamiken wie Änderungen der Lichtintensität, der Wetterbedingungen, der Größe von Objekten und geringfügigen Änderungen der Kamerainstallationen, wenn sie auf einem ausreichend großen gelabelten Datensatz trainiert werden. Im Eisenbahnsektor sind nicht viele gelabelte Datensätze öffentlich verfügbar. Wir haben uns der Herausforderung des Mangels an verfügbaren Daten gestellt, indem wir unseren eigenen Datensatz, der die benötigten

Objekte enthält, mit Etiketten versehen haben. Die gelabelten Daten bestehen aus 3563 Bildern, die aus 41 öffentlich verfügbaren Videos stammen. Wenn DNNs nur auf Bildern des Braunschweiger Hafens trainiert werden, könnte die Erkennungsleistung bei geringfügigen Änderungen an den Bahnanlagen (z. B. wenn ein Prellbock einen neuen Farbanstrich erhält) sinken. Wir haben einen größeren Datensatz aus verschiedenen Eisenbahnregionen in ganz Europa verwendet, um die Generalisierung einzuführen und eine Überanpassung zu vermeiden. Das Netzwerk wird zunächst auf diesem großen Datensatz trainiert, dann wird das Transferlernen durchgeführt, um die Lücke zwischen den verwendeten gelabelten Daten und den Bildern aus dem Braunschweiger Hafen zu schließen. Zu diesem Zweck haben wir nur 161 Bilder des Braunschweiger Hafens markiert, um das Transferlernen durchzuführen. Tabelle 4 zeigt die Details der gelabelten Daten aus öffentlich zugänglichen Videos und den Bildern, die im Braunschweiger Hafen gesammelt wurden.

<i>Klassen</i>	<i>Labels (Öffentliche Videos)</i>	<i>Labels (Braunschweiger Hafen)</i>
Rechte Weiche	1288	26
Linke Weiche	1369	24
Weichenzeichen	1448	89
Prellböcken	297	35
Bahnübergänge	732	79
Insgesamt	5135	251

Tabelle 4: Anzahl der Labels pro Klasse für die Objekterkennung

Zur Durchführung der Objekterkennung haben wir die frühere Arbeit zur Erkennung und Klassifizierung von Weichen ([7]) auf die Erkennung und Klassifizierung mehrerer Klassen erweitert. Dies bringt jedoch die Herausforderung mit sich, dass die Klassen nicht ausgeglichen sind und Objekte unterschiedlicher Größe erkannt werden müssen. Einige der Eisenbahnobjekte kommen auf den Bahnstrecken sehr häufig vor, während andere, wie z. B. Prellböcke, nur selten vorhanden sind. Dies führt zu einem Ungleichgewicht in der Anzahl der Instanzen pro Klasse. Auch die Geometrie und Größe der verschiedenen Objekte variiert stark, z. B. beträgt das Größenverhältnis zwischen einem Weichenschild und einem Bahnübergang etwa 1:10. Wir gehen diese Herausforderungen mit einem dreistufigen Ansatz an, der in ([7]) beschrieben ist. In der Trainingsphase lernt das Netzwerk, ein Bahnobjekt vom Rest des Bildes zu unterscheiden (Regression) und klassifiziert dann mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsfaktoren, um welches Objekt es sich handeln könnte (Klassifikation). Wir teilen die Datensätze in einem Verhältnis von 80 %, 10 % und 10 % für die Trainings-, Validierungs- und Test Set auf. Anfänglich zeigte das Netzwerk keine gute Leistung bei der Erkennung von Prellböcken. Dabei sind Prellböcke sicherheitskritische Elemente, die am Ende eines Gleises platziert werden, um ein Entgleisen der Schienenfahrzeuge zu verhindern. Ihre Erkennung und die Sicherstellung der korrekten Platzierung sind für einen stabilen Bahnbetrieb unerlässlich. Wir haben festgestellt, dass ihre Erkennung vor allem aufgrund der Art und Weise, wie sie aus der Kameraperspektive erscheinen, schwierig war. Wenn sie von öffentlichen Videos des fahrenden Fahrzeugs erfasst werden, befinden sie sich nicht direkt auf dem Gleis, so dass sie sehr klein erscheinen und

die gekennzeichneten Instanzen daher ziemlich verrauscht sind. Um dies zu beheben, werden die Prellböcke im Vorfeld des Netzwerktrainings die Denoisierung. Autoencoder sind vielversprechend für die Denoisierung der Bilder, die ein Paar von kodierenden und dekodierenden Netzwerken sind. Während der Trainingsphase werden dem Netz sowohl die Originalbilder als auch deren verrauschte Version zugeführt. Das Netz lernt, die Ausgabe so zu rekonstruieren, dass sie den Originalbildern so nahe wie möglich kommt. Auf diese Weise wird der Prozess der Denoisierung der Bilder erlernt.

Nach dem Training des Netzwerks in mehreren Iterationen haben wir die Leistung des Netzwerks anhand von Testdaten aus öffentlichen Videos (insgesamt 514 Bilder) bewertet. Es folgt die klassenweise Auflistung der Recall-, Präzisions- und Konfusionsmatrix. Tabelle 5 zeigt die Konfusionsmatrix des Testsatzes.

	<i>Rechte Weiche</i>	<i>Linke Weiche</i>	<i>Weichenzeichen</i>	<i>Prellböcken</i>	<i>Bahnübergänge</i>
Rechte Weiche	122	12	13	2	1
Linke Weiche	11	110	6	3	1
Weichenzeichen	9	9	140	2	2
Prellböcken	2	0	0	25	1
Bahnübergänge	3	4	0	1	52

Tabelle 5: Konfusionsmatrix für die Objekterkennung

Tabelle 6 zeigt die klassenweise Auflistung von Recall, Precision und F1-Score.

	<i>Rechte Weiche</i>	<i>Linke Weiche</i>	<i>Weichenzeichen</i>	<i>Prellböcken</i>	<i>Bahnübergänge</i>
Precision	88%	87%	79%	76%	91%
Recall	81%	84%	61%	82%	89%
F1-score	84%	85%	68%	78%	89%

Tabelle 6: Recall, Präzision und F1-Score für die Objekterkennung

Die Evaluierungsergebnisse mit den gekennzeichneten Daten aus öffentlichen Videos sind recht vielversprechend. Daher wird das Transfer-Lernen ([7]) mit demselben Netzwerk durchgeführt, wobei eine sehr kleine Anzahl von gelabelten Bildern verwendet wird, die im Braunschweiger Hafen aufgenommen wurden, um die Lücke zwischen den beiden Datenquellen zu schließen. Schließlich wird die Erkennung auf Videos durchgeführt, die von den auf der Lokomotive installierten Kameras aufgenommen wurden. Abbildung 50, Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen einige der Ergebnisse für Weichen rechts, Weichen links, Weichenzeichen, Prellböcke und Bahnübergänge. Das farbige Rechteck zeigt, dass ein Eisenbahnobjekt erkannt wurde. Die korrekte Klassifizierung und die Konfidenzbewertung durch das Netzwerk sind auf jedem Rechteck angegeben.



Abbildung 50: Erkannte Weichen und Weichenzeichen im Hafen Braunschweig

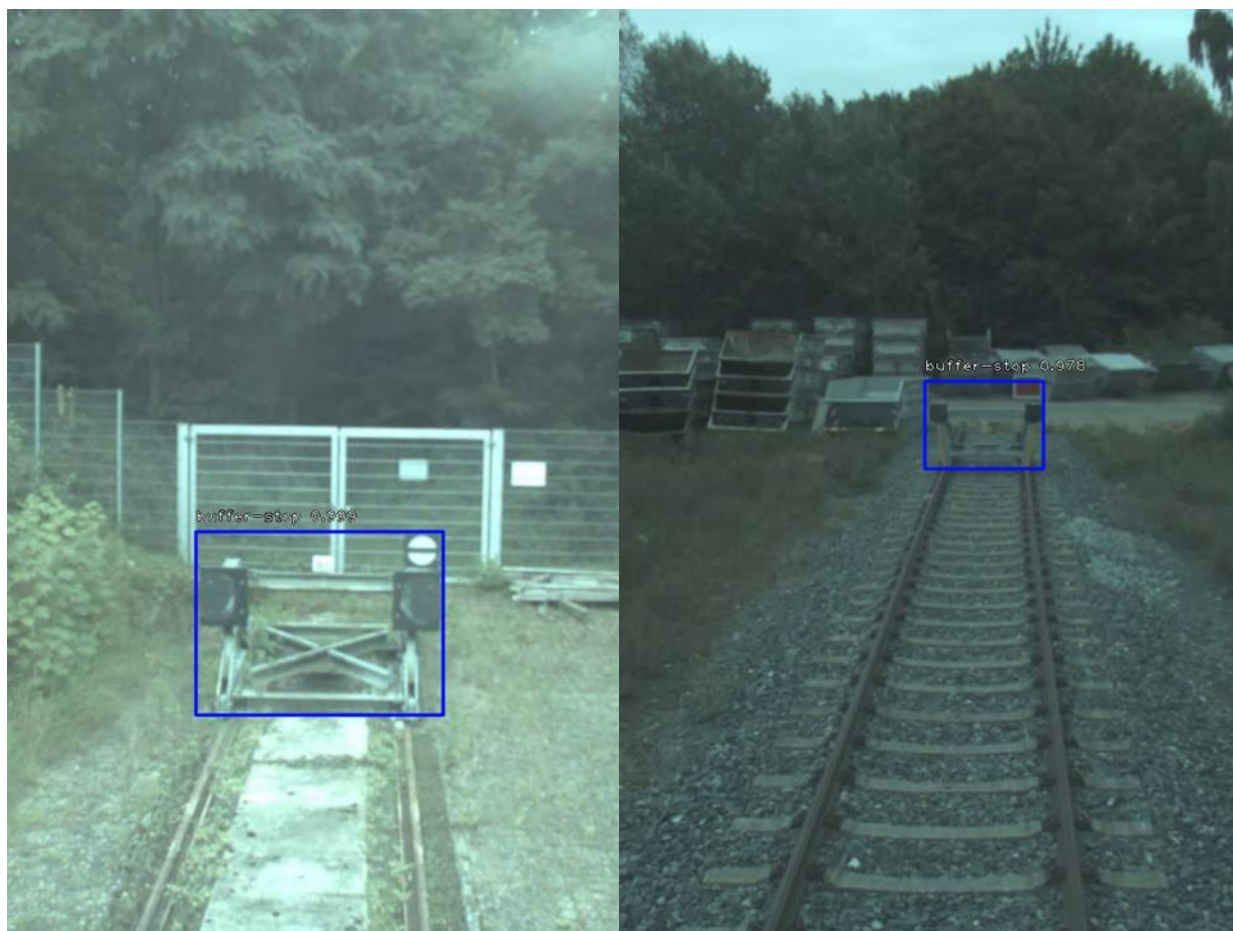


Abbildung 51: Erkannte Prellböcke im Hafen Braunschweig (Containerterminal)

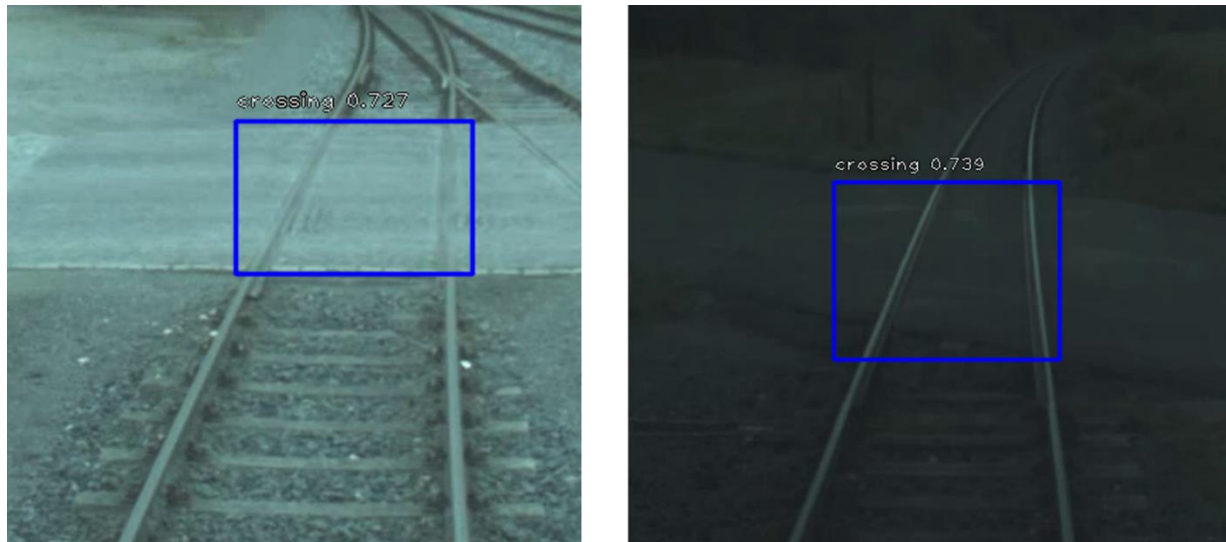


Abbildung 52: Erkannte Bahnübergänge im Hafen Braunschweig

3.2.2. Erkennung der Witterungsbedingungen

Wir haben untersucht, wie sich der Wetterwechsel auf die Leistung anderer verwendeter Algorithmen auswirken kann. Beispielsweise konzentriert sich die Aufgabe in Kapitel 3.2.3 auf die Erkennung von Anomalien wie Kohle und Schmutz auf den Bahngleisen auf unüberwachte Weise, aber während der Schneesaison werden einige falsch-positive Anomalien festgestellt, wenn Schneeflocken auf den Bahngleisen erscheinen. Für diese Aufgabe werden insgesamt 4 Wetterbedingungen berücksichtigt, nämlich sonnig, bewölkt, regnerisch und schneidend. Das für die Schätzung der Wetterbedingungen trainierte Netzwerk ist in mehrfacher Hinsicht hilfreich: Es informiert nicht nur über die Wetterbedingungen, sondern unterstützt auch die Entscheidungsfindung bei anderen Ansätzen. Die zu diesem Zweck verwendete neuronale Netzarchitektur wird als ResNet-50 ([7]) bezeichnet. In dieser Forschung wird das zweistufige Transfer-Lernen verwendet, um jegliche Art von Etikettierungsaufwand zu vermeiden. Die verwendeten Datensätze sind ImageNet-1000², Multiclass-Weather Dataset (MWD)³ und ein bereits gelabelter Datensatz aus Kapitel 3.2.1.

Zunächst wird Transfer-Learning durchgeführt, um die Ergebnisse von ImageNet-1000, einem generischen Datensatz, auf MWD zu übertragen, der die vier Wetterklassen repräsentiert. MWD ist öffentlich verfügbar und wird für das Training mit einer Aufteilung von 80 %, 10 % und 10 % für die Trainings-, Validierungs- und Testmengen verwendet. MWD repräsentiert jedoch nicht die Eisenbahnumgebung, so dass wir die Lücke durch Verwendung des in Kapitel 3.2.1 erwähnten Datensatzes, der die Eisenbahnumgebung repräsentiert, schließen.

Im Tabelle 7 werden die verwendeten Datensätze und die einzelnen Wetterklassen im Detail beschrieben.

² <https://image-net.org/>

³ <https://data.mendeley.com/datasets/4drtyfjtfy/1>

	MWD	DLR Labelled Dataset
Sonnig	9999	3478
Schneien	9999	828
Bewölkt	9999	4741
Regnerisch	9999	290
Tabelle 7: Anzahl der Labels pro Klasse für die Erkennung der Witterungsbedingungen.		

Wie in Tabelle 7 gezeigt, ist der MWD-Datensatz spezifisch für die Wetterklassen und hat eine recht ausgewogene Anzahl von Instanzen für jede Klasse. Andererseits ist die Datenbeschriftung im DLR eher für die Objekterkennung als für Wetterklassen bestimmt. Daher besteht in diesem Fall ein Klassenungleichgewicht und die Leistung bei der Klassifizierung von Regen ist geringer. Wir gehen dieses Problem an, indem wir die Regentropfen auf normalen Bildern ergänzen.

Außerdem kann das Wetter in der realen Welt manchmal zwei dieser Klassen darstellen, z. B. sonnig und bewölkt oder bewölkt und regnerisch, so dass das Netzwerk nicht differenzieren kann und nur eine Klasse ergibt. Anstelle einer One-Hot-Codierung, bei der die Labels als regnerisch 1, sonnig 0, verschneit 0, bewölkt 0 zugewiesen werden, haben wir eine Label-Glättung verwendet. Bei der Label-Glättung wird das Label geteilt, z. B. regnerisch 0,6, sonnig 0,2, verschneit 0,2, bewölkt 0,2. Statt nur einer Vorhersage berücksichtigen wir auch die ersten beiden höchsten Vorhersagen für eine Wetterklasse. Abbildung 53 zeigt die Konfusionsmatrix nach der Beseitigung des Klassenungleichgewichts durch Augmentationstechniken und Labelglättung.

Tabelle 8 gibt einen Einblick in die Bewertung der Leistung des Netzes auf dem Testsatz aus dem Datensatz, der in DLR beschriftet ist.

	Precision	Recall	F1-score	No. of images
Sonnig	86%	87%	87%	405
Schneien	98%	98%	98%	50
Bewölkt	90%	87%	88%	500
Regnerisch	90%	1.0	95%	71

Tabelle 8: Recall, Präzision und F1-Score für die Erkennung der Witterungsbedingungen

Einige Ergebnisse der Wetterklassifizierung sind auf den Ausgabebildern in den Abbildungen von Kapitel 3.2.3.

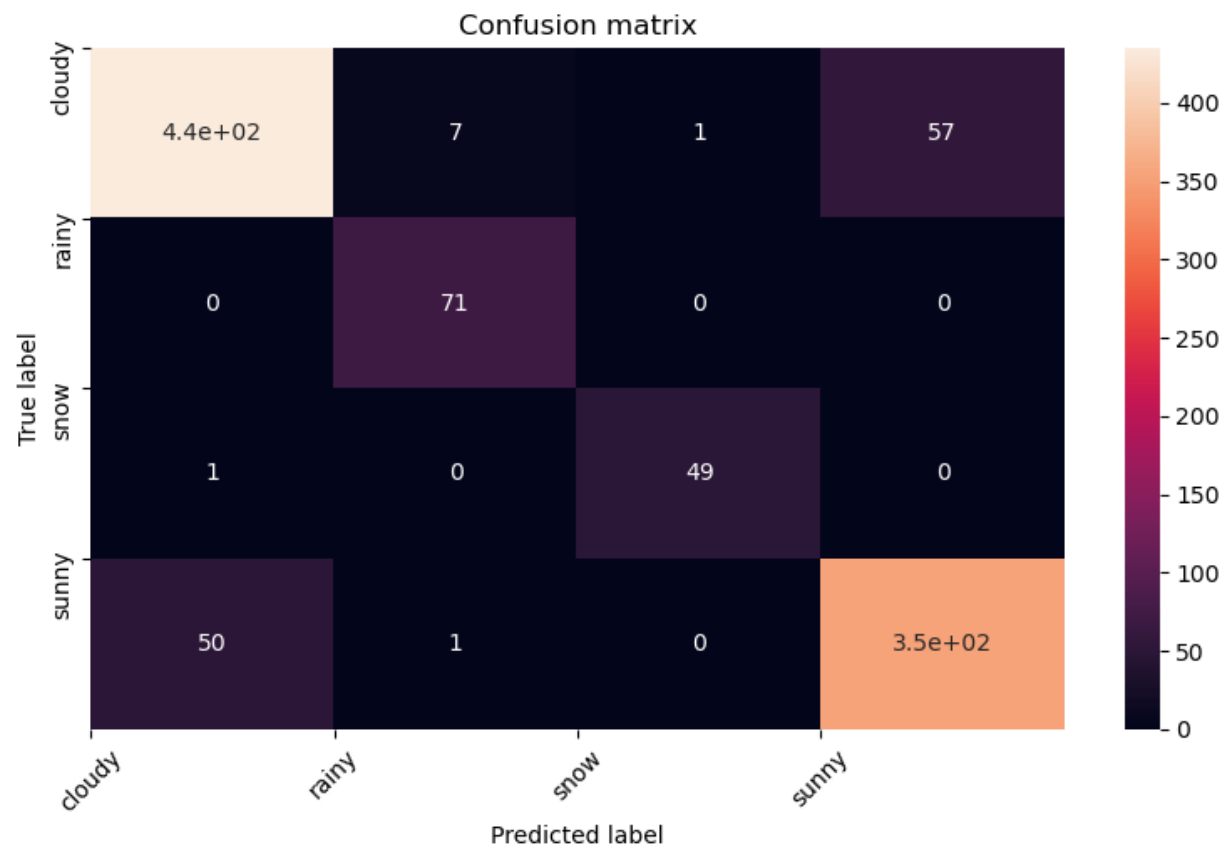


Abbildung 53: Konfusionsmatrix für die Erkennung der Witterungsbedingungen

3.2.3. Erkennung von Anomalien

In der Hafenumgebung gibt es Unregelmäßigkeiten wie Kohle, Schutt und Schmutz. Wenn solche Gleisanlagen nicht rechtzeitig gereinigt werden, können Wartungskosten anfallen. Wir stellen einen auf Deep Learning basierenden Ansatz zur Verarbeitung der gesammelten Bilddaten vor, um Schmutz, Steine, Baumblätter, Kohle und andere Hindernisse zu erkennen, die sich als unerwünschte Objekte auf den Bahnstrecken befinden. Das Wissen über das Vorhandensein solcher Objekte ist entscheidend für den reibungslosen Betrieb der Eisenbahn. Die Labelling-Daten sind eine teure und zeitaufwändige Aufgabe, die noch schwieriger wird, wenn Art, Farbe und Form des zu erkennenden Objekts willkürlich sein können. Wir verwenden eine Methode des self-supervised Lernens, um das Problem der fehlenden gelabelten Daten für Anomalien zu lösen. In der ersten Phase führen wir eine supervised semantische (pixelweise) Segmentierung des Bildes durch und extrahieren nur die Pixel, die zu den Bahnlinien gehören. Anschließend werden mit Hilfe von Autoencodern Anomalien auf unüberwachte Weise erkannt, indem die Patch-Größe von 16x16x3 entlang der extrahierten Schienenlinien bewertet wird. Die Einzelheiten des vorgeschlagenen Algorithmus sind in ([6]) zu finden. Abbildung 54 zeigt das Ergebnis des von uns vorgeschlagenen Algorithmus. Das linke Bild ist das ursprünglich aufgenommene Bild (Eingabe), das mittlere Bild zeigt die Ausgabe der semantischen Segmentierung und das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Autoencoder, wobei in diesem Fall keine Anomalie gefunden wurde.

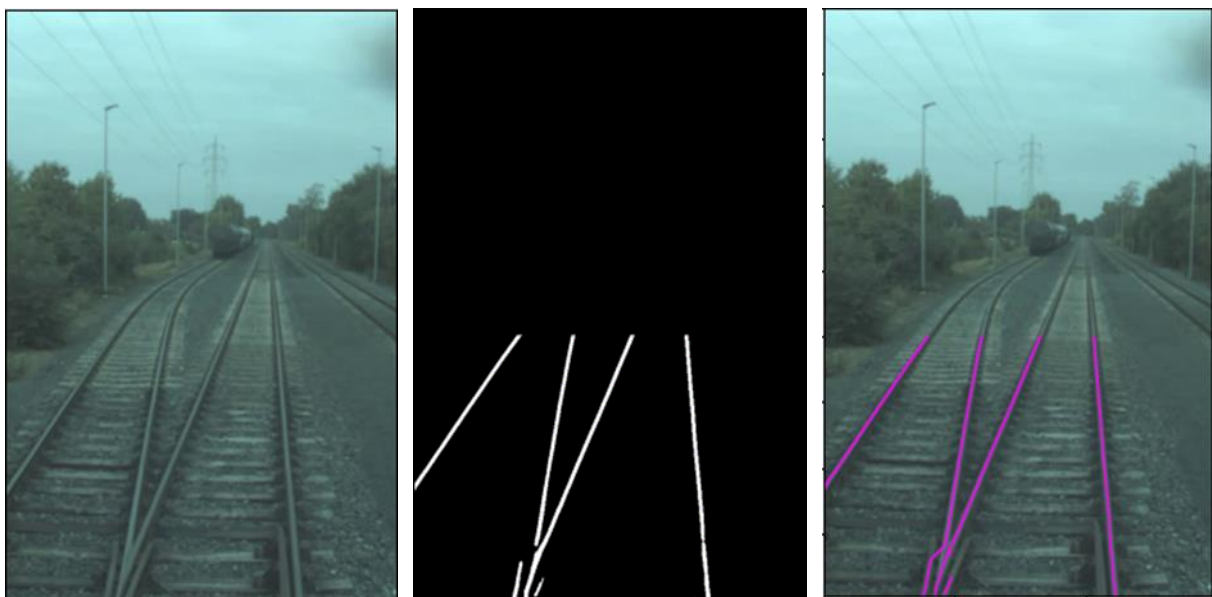


Abbildung 54: Keine Anomalien erkannt.

Der Ansatz wird anhand eines kleinen Videoclips getestet, der von der "Rückfahrkamera" der Lokomotive aufgenommen wurde. Zu Testzwecken legten wir ein Notebook der Größe 9x12 Zoll auf die Schienen und ließen das Netzwerk auf insgesamt 132 Bildern (Videolänge 13 Sekunden) laufen, von denen einige ein Notebook auf der linken Schiene hatten und andere nicht. Wie in Abbildung 55 dargestellt, ist das erste Bild das Original-Kamerabild, das zweite Bild zeigt das Ergebnis der

semantischen Segmentierung und das letzte Bild zeigt das Notebook, das als anomales Objekt (mit einem rot gefärbten Rechteck) auf der Bahnstrecke erkannt wurde.



Abbildung 55: Notebook als Anomalie entdeckt.

Die Konfusionsmatrix aus Tabelle 9 zeigt das Ergebnis der oben genannten Testmessungen. Von insgesamt 132 Bildern wurde bei 12 Bildern eine Anomalie erkannt. Es gibt keine falsch-positiven oder falsch-negativen Ergebnisse.

	Normal	Anomalien
Normal	120	0
Anomalien	0	12

Tabelle 9: Konfusionsmatrix für die Anomalie-Erkennung

Da die Ergebnisse vielversprechend sind, testen wir den Ansatz auch im restlichen Netz des Braunschweiger Hafens. Wie in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt, werden auf den Gleisen 6 und 7 im Hafen etwas Schmutz und Kohle erkannt. Das vorgeschlagene DNN ist auch in der Lage, andere auf den Gleisen stehende Waggon und etwas Vegetation auf Gleis 6 zu erkennen. Einzelheiten zu weiteren Ergebnissen finden sich in Kapitel 0.

Einige überraschend gute Ergebnisse sind auf den Gleis 5 zu sehen. Der Algorithmus hat einige Anomalien gefunden, bei denen es sich um Defekte an den Schienensträngen handeln könnte. Für die Erkennung der Defekte werden normalerweise Kameras direkt gegenüber den Gleisen installiert, da unsere installierten Kameras die Ego-Perspektive der Bewegung erfassen, sind wir uns über die Qualität dieser Ergebnisse nicht sicher. Die Korrektheit dieser Erkennungen könnte anhand von

ABA-Daten bewertet werden. In Zukunft können wir auch die Möglichkeit prüfen, diese beiden Informationsquellen für die Fehlererkennung zu synchronisieren.

Allerdings gibt es nur am Ende von Gleis 6 und 7, wo der Boden nicht glatt ist, wie in Abbildung 59 gezeigt, Fehlalarme bei eingebetteten Schienen. In Zukunft möchten wir dieses Problem angehen, indem wir den Algorithmus robuster gegen eingebettete Schienen im Allgemeinen machen.

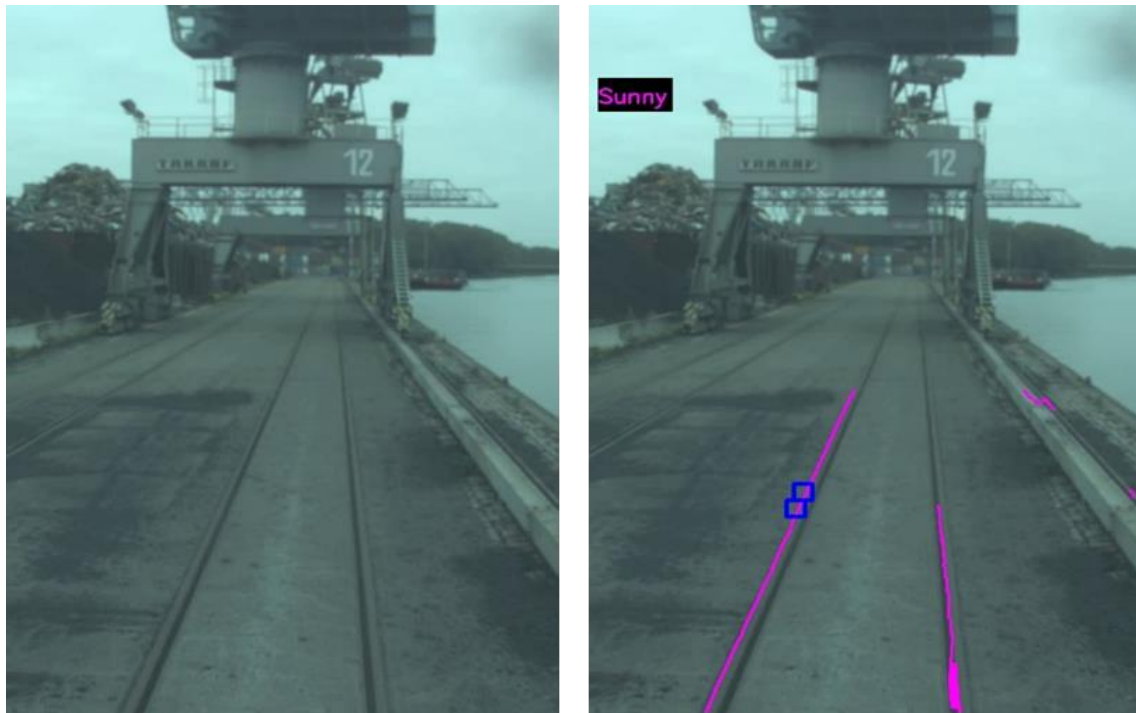


Abbildung 56: Kohle auf Gleis 7 des Braunschweiger Hafens.

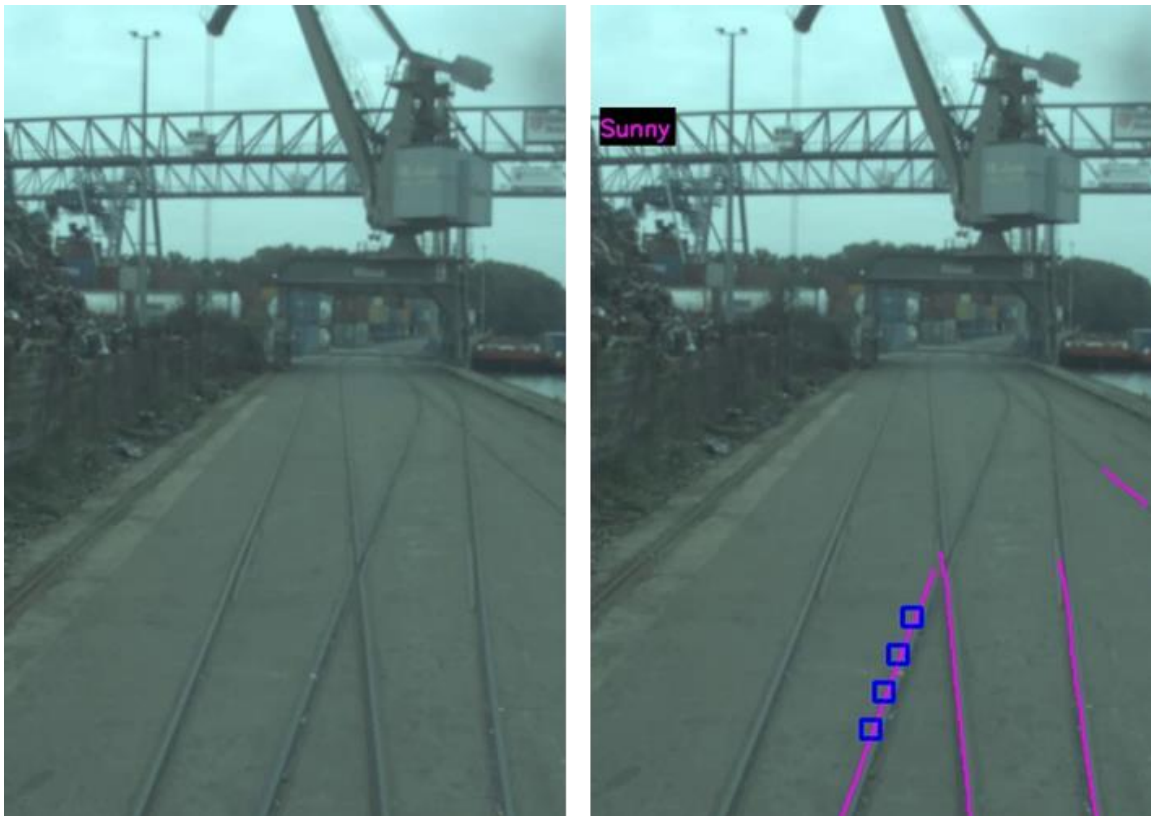


Abbildung 57: Erkannte Verschmutzungen auf Gleis 6 im Bereich der Schrottverladung.s



Abbildung 58: Ergebnisse auf den Gleis 5 für die Anomalie-Erkennung



Abbildung 59: Falsch-Positive Erkennung auf Gleis 7 auf den eingebetteten Schienen

3.2.4. Ergebnisdarstellung auf DLR Web-Frontend

Die Ergebnisse der Detektion von Bahnobjekten und Anomalien aus den Kameradaten vom 14.09.2022 sind auf dem DLR Web-Frontend verfügbar. Die Erkennungen werden georeferenziert, indem die Zeitstempel der Kamerabilder und die Positionsinformationen (siehe Kapitel 3.1.1.1) der Lokomotive synchronisiert werden. Abbildung 60 zeigt ein repräsentatives Bild der Weboberfläche. Die orangefarbenen Punkte zeigen die Erkennungen durch die Rückfahrkamera und die blauen die Erkennungen durch die Frontkamera. Diese Punkte können angeklickt werden, und sobald sie angeklickt werden, zeigen sie Ausgabebilder mit Begrenzungsrahmen um die erkannten Objekte und auch das Originalbild. Diese Bilder können auch vergrößert werden, um die Anomalien deutlich zu sehen.



Abbildung 60: Bildausschnitt des DLR Web-Frontend (<https://bahnsver.ts.dlr.de/>). Hintergrundkarte: OpenStreet-Map

3.3. Erstellung einer interaktiven Visualisierung

3.3.1. Visualisierung mittels mapl-e

Messdaten von Schienen/Gleisen können als Datenverläufe entlang der Gleis-/Schienenlängsachse dargestellt werden. Die Interpretation dieser Verläufe obliegt dann dem Betrachter. Beim Auftragen von Datenverläufen über längere Gleisabschnitte ist die Datendichte zu beachten. Beispielsweise ist die Längswelligkeit durch ein Höhenprofil repräsentiert, dass im Abstand von 2 mm (oder weniger) abgetastet wird. Für einen Abschnitt von 1 km Länge wären dann 500.000 Datenpunkte darzustellen – weitaus mehr, als Bildpunkte zur Verfügung stehen.

Um große Datenmengen anschaulich darzustellen, ist es deshalb üblich, diese abschnittsweise zu bewerten und das Ergebnis für jeden Abschnitt (z. B. pro Meter) durch einen Farbcode entlang des Gleisverlaufs in einer Karte aufzutragen. Durch eine Ampelfarbendarstellung kann der Grad der Schädigung intuitiv erkannt werden, durch die Verortung in der Karte kann der Betrachter die Schädigung leicht mit geografischen, topologischen oder Merkmalen des Streckenverlaufs in Bezug gebracht werden.

Vossloh Rail Service hat die Web-Applikation „mapl-e“ (maintenance planning-easy) entwickelt, mit der Zustandsdaten von Schienen/Gleisen in einer Datenbank abgespeichert und auf einem virtuellen Gleisnetz dargestellt werden kann. Statt abstrakten Datenverläufen werden dem Anwender die bewerteten Ergebnisse auf „seinem“ Netz gezeigt.

Die Bewertung erfolgt üblicherweise durch Analyse der Abweichung von einem Sollwert. Zustandsdaten dürfen in einem Toleranzband gewissen Abweichungen vom Sollwert annehmen, sobald das Toleranzband überschritten wird, ist die Abweichung aber unzulässig. Bei mapl-e bietet sich dem Anwender die Möglichkeit, die Toleranzbandbreite im GUI sehr einfach zu verändern und die Auswirkung direkt in der Karte zu betrachten. Statt eines einzelnen werden zwei Toleranzbänder angeboten, deren Breiten durch einen Doppel-Slider angepasst werden, wodurch nicht nur eine gut-schlecht Bewertung, sondern noch eine Zwischenstufe angezeigt werden kann. Über Ampelfarben kann dann meterweise der bewertete Zustand gemäß der gewählten Toleranzbandbreite visualisiert werden.

Für die Darstellung von Auswertungen der ABA-Daten wurden folgende Datentypen angelegt:

- Ausbrüche (gemäß Analyse von IS Predict)
- Spurverengung (gemäß Analyse von IS Predict)
- Schleuderstellen (gemäß Analyse von IS Predict)
- Riffel (gemäß Analyse von IS Predict)
- Riffel (gemäß Analyse von DLR)
- Riffel (gemäß Analyse von Vossloh)

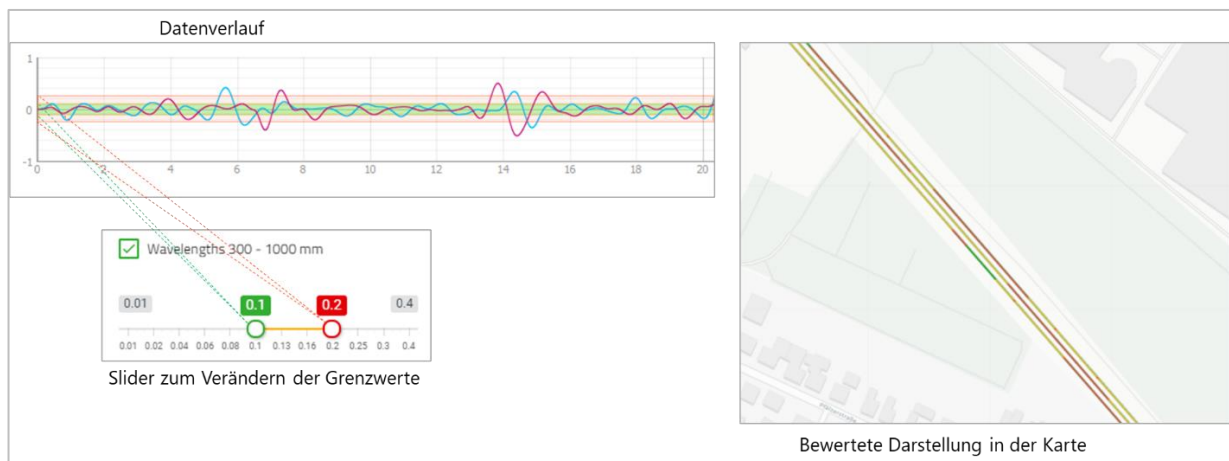


Abbildung 61: Bewertung von Messdatenverläufen über variable Toleranzbänder und Darstellung in Karte

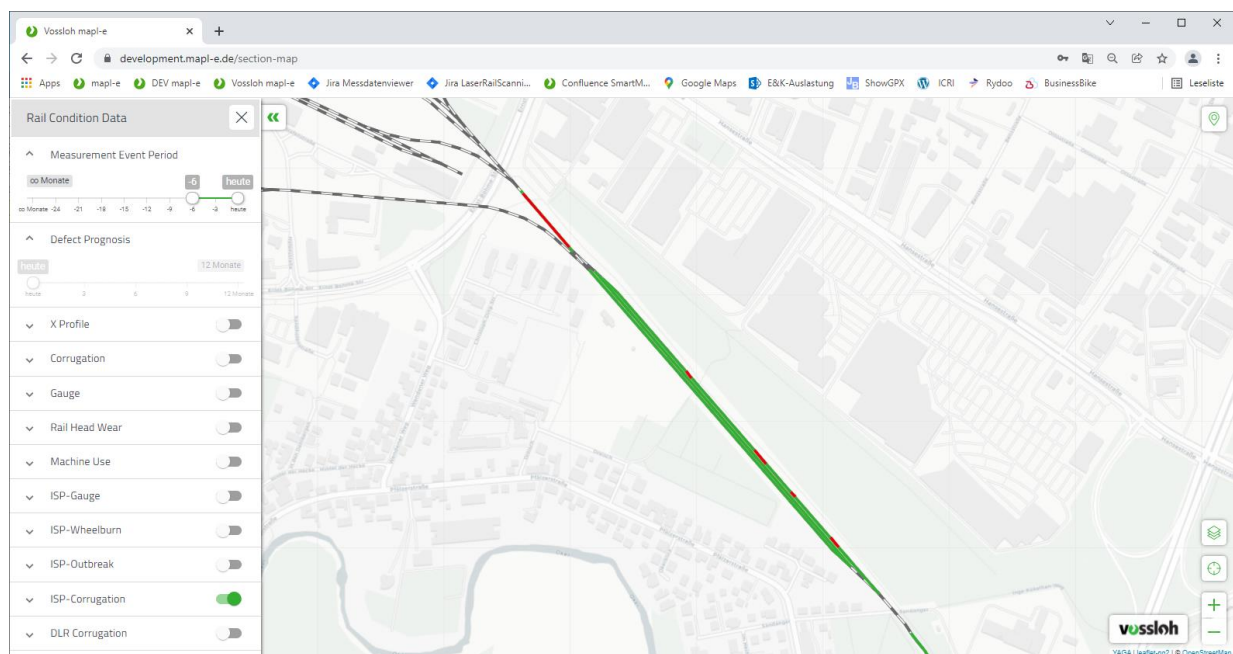


Abbildung 62: Darstellung der Längswelligkeit in mapl-e gemäß Analyse von IS Predict

Die Analyse der ABA-Daten durch IS Predict für die jeweilige Schädigung macht (lediglich) eine Angabe, ob auf dem betreffenden Meter eine Schädigung vorliegt (rot) oder nicht (grün). Der Grad der Schädigung wird nicht ermittelt und ist somit auch nicht über einen Doppel-Slider zu bewerten.

Die Riffelanalyse durch DLR und Vossloh differenziert unterschiedliche Wellenlängenbereiche und berechnet die lokale Wellenamplitude (= die „Höhe“ der Welle). Entsprechend kann über die Doppel-Slider das Toleranzband für akzeptable und kritische Amplituden eingestellt werden. Die Differenzierung der Wellenlängenbereiche erfolgt auf Basis der R1824.8310 der DB-Netz oder der EN13231-2. Die längeren oder kürzeren Wellenanteile am Höhenprofil haben in den Regelwerken unterschiedliche Toleranzbänder für die Amplituden. Im Fall von Hafenbahnen mit eher langsamem

Rangierverkehr kann es sinnvoll sein, von den engtolerierten Vorgaben der Regelwerke abzuweichen, die vor allem für schnellen Verkehr auf Strecken vorgesehen sind. Solches „Aufweichen“ der Grenzwerte ist mit mapl-e einfach möglich.

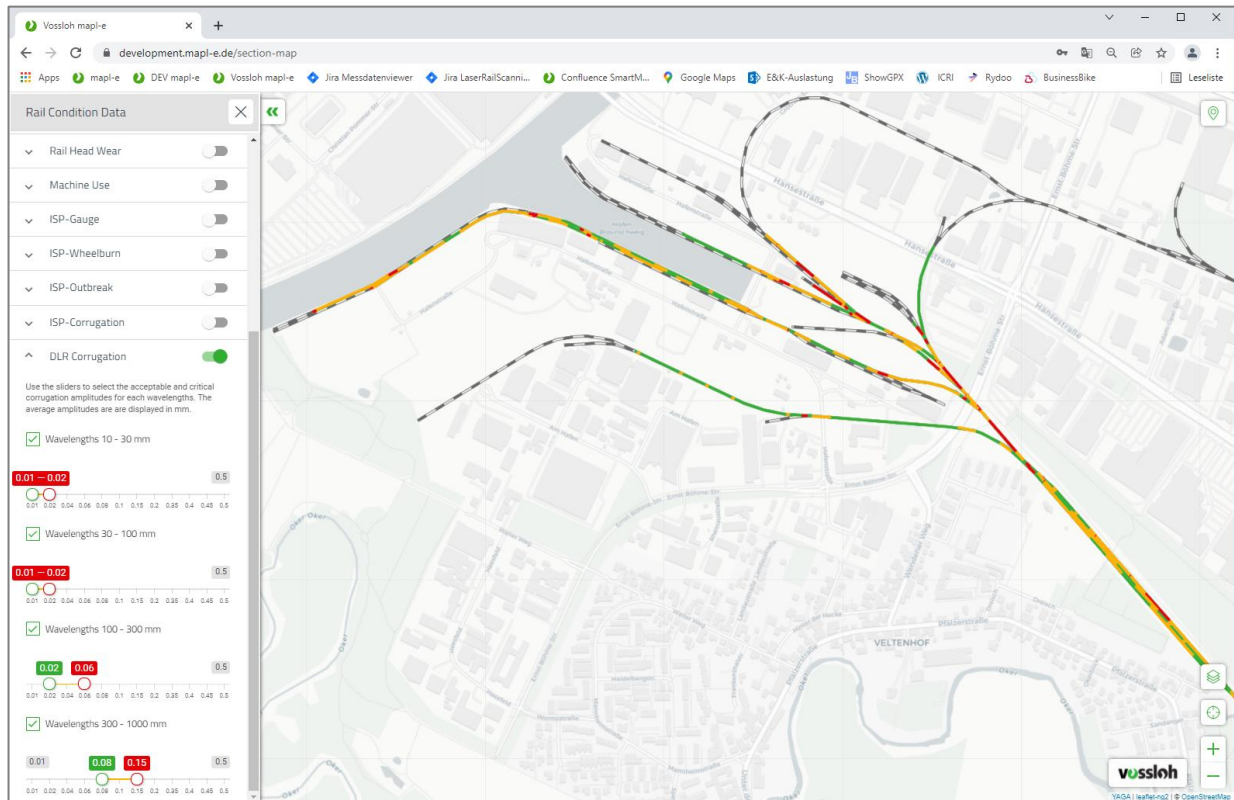


Abbildung 63: Darstellung der Längswelligkeit in mapl-e gemäß Analyse von DLR

Noch nicht implementiert wurde der Zustand „Gleisverschmutzung“ (z. B. Ablagerungen in Rillen- oder eingebetteten Schienen im Bereich von Massengut-Verladung).

Der Upload der ABA-Daten und die Vorverarbeitung erfolgten teilweise manuell. Diese Vorverarbeitung nimmt einige Zeit für Berechnungen und Datenübertragung in Anspruch. Denkbar ist es, zukünftig die Daten über Nacht zu verarbeiten und ins System zu speichern, so dass der für die Infrastruktur Verantwortliche am Morgen den aktuellen Zustand - zukünftig auch Veränderungen – einsehen und ggf. Maßnahmen einleiten kann. Diese Arbeiten sind nicht mehr Teil des laufenden Vorhabens.

4. Arbeitspaket 4: Evaluation

4.1. Reifegrad des Messsystems

Das im Projekt aufgebaute Messsystem (siehe Abschnitt 2) ist ein aus marktverfügbaren Industriekomponenten aufgebauter Prototyp zur Erprobung in operativer Umgebung und erreicht somit einen Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TRL) von 6 entsprechend der von der europäischen Union für Forschungs- und Entwicklungsprojekte angewendeten Definition. Verschiedene Systeme zur messtechnischen Erfassung von Achslagerbeschleunigungen auf Schienenfahrzeugen sind grundsätzlich und in zunehmender Anzahl am Markt verfügbar. Für die Umsetzung entsprechender Produkte besteht kein grundsätzlicher weiterer Forschungsbedarf. Je nach konkretem Anwendungsszenario (Fahrzeugtypen, Vollbahn/Nebenbahn, etc.) und gewünschtem Sensorsetup entstünden spezifische Entwicklungsaufwände zur Entwicklung entsprechender Produkte. In der Regel sehr aufwändig ist dabei die Entwicklung von nachrüstbaren Systemen aufgrund der hohen Kosten / Aufwände für die Zertifizierung / Zulassung entsprechender Systeme, die in der Regel fahrzeugtyp-spezifisch erfolgen muss. Hierbei sind die Anforderungen und Aufwände für Fahrzeuge des Güterverkehrs auf Nebenbahnen jedoch um ein Vielfaches geringer als für Personenzüge auf Vollbahnen. Entwicklungsbedarfe bestehen weiterhin bezüglich der Bereitstellung von Rechenkapazitäten für die Anwendung aufwändigerer maschineller Lernverfahren in Echtzeit auf dem Fahrzeug (eingebettete KI, edge-AI).

4.2. Evaluation der Algorithmen zur Ableitung des Längsprofils

In Arbeitspaket 4 wurde untersucht, wie aussagekräftig für den tatsächlichen Schienenzustand die entwickelten Ansätze zur Ableitung von Zustandsinformationen aus ABA-Daten sind.

4.2.1. Bewertung der alignierten Längsprofile

Die Bewertung des Längsprofils findet nach Norm EN-13231 [8] in vier verschiedenen Wellenlängenbereichen statt. Ein Gleisabschnitt wird als fehlerhaft eingestuft, wenn mehr als 5% der Werte absolut den wellenlängenabhängigen Grenzwert überschreiten. Diese Bewertung ist für Strecken ausgelegt, auf denen deutlich höhere Geschwindigkeiten gefahren werden können als in den Häfen, insbesondere in Braunschweig, und ist den Bedürfnissen der Hafenbetreiber anzupassen.

Zur Bewertung herangezogen wurden verschiedene Möglichkeiten, um analog aus den ABA- und RMF-Daten Aussagen über die Existenz und Schwere von Fehler in bestimmten Wellenlängenbereichen zu ziehen. Die erste Möglichkeit besteht aus der genannten prozentualen Überschreitung des Schwellwerts, wobei hier die Prozentmarke oder der Schwellwert hinsichtlich der Toleranz der Häfen angepasst werden kann. Als zweite Möglichkeit wurde betrachtet, ob die mittleren Werte der Einhüllenden des gefilterten Längsprofils über kurze Gleissegmente einen Schwellwert überschreiten; als dritte Möglichkeit wurde die Überschreitung der mittleren Absolutwerte des gefilterten Längsprofils über diese Gleissegmente herangezogen. Alle Bewertungen zeigten ähnlich gute Ergebnisse. Da die Riffel auf Gleis 4 etwa eine Wellenlänge von 5 cm aufweisen, wurde für die ersten

Analysen zunächst der Bereich von 3-8 cm betrachtet. Für die Ausweitung auf das gesamte Netz erfolgte die Bewertung anhand der in der Norm vorgeschriebenen Wellenlängenbereiche.

Für die Datenanalyse auf Gleis 4 wurden nur Fahrten verwendet, die eine Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s aufweisen, bei denen also die Überfahrt insbesondere nicht unterbrochen wird und deren Geschwindigkeit darüber hinaus bei der Überfahrt des Gleises weniger als 0.5 m/s variiert. Die so untersuchten Fahrten umfassten für beide Sensoren zusammen 100 Fahrten (wegen anfänglicher Probleme bei der Datenaufnahme des linken Sensors teilen sich diese nicht gleichmäßig auf beide Seiten auf). Hierbei wurden Geschwindigkeiten über den im Braunschweiger Hafennetz zulässigen Bereich erfasst (hier: der Bereich von 1 m/s bis 7 m/s). Abbildung 64 zeigt die mittleren Werte der Einhüllenden der gefilterten Längsprofile für diesen Wellenlängenbereich über Fenster fester Länge mit Überlapp für die in AP 3 betrachteten Fahrten (hier nur Vorwärtsfahrten) auf der linken Seite für Gleis 4 sowie den Mittelwert über die Fahrten, der zur Bewertung herangezogen wird. Ebenso abgebildet sind die analog prozessierten RMF-Daten für die linke und rechte Schiene.

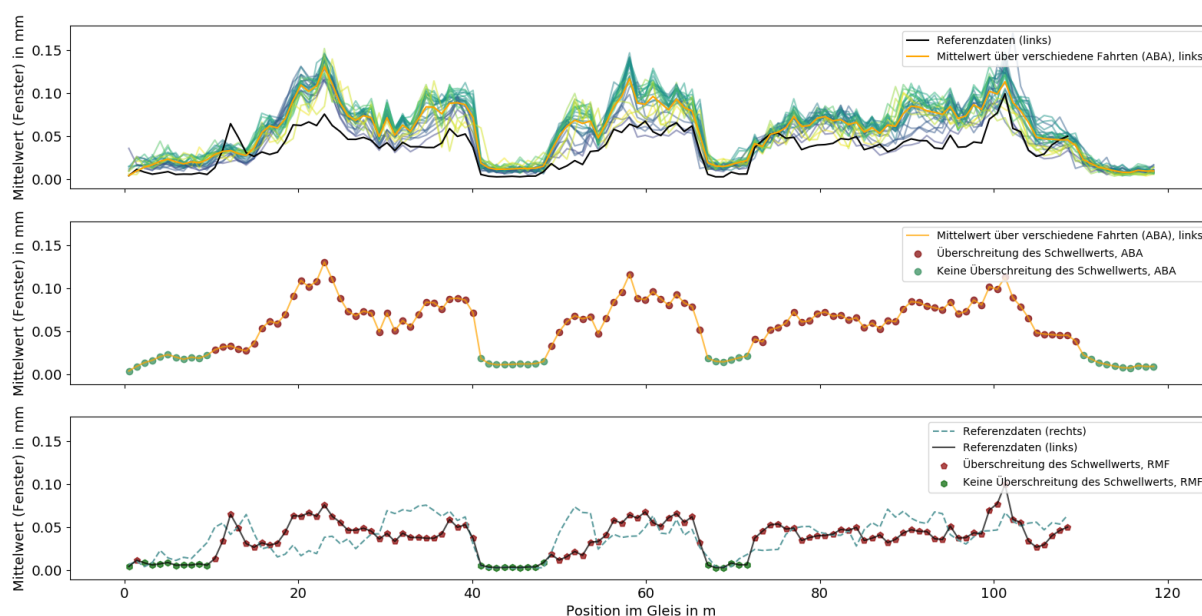


Abbildung 64: Oben: Ergebnis der prozessierten ABA-Daten für mehrere Überfahrten in Vorwärtsrichtung, Sensor auf der linken Schiene, d.h. Mittelwerte der der letzten Zeile aus Abbildung 20 entsprechenden Daten der linken Seite über Fenster von 2 m mit 50% Überlapp (bunt); Mittelwert über die Fahrten (orange); analog prozessierte RMF-Daten (schwarz). Mitte: Mittelwert über die prozessierten ABA-Daten der verschiedenen Überfahrten (orange, s. oben), Klassifikation in verriffelte und nicht-verriffelte Bereiche auf Basis eines Schwellwerts (rot/grün). Unten: Analog prozessierte RMF-Daten der linken Schiene (schwarz) und zugehörige Beurteilung der Qualität in Bezug auf periodische Fehler im angegebenen Wellenlängenbereich auf Basis der Überschreitung des zugehörigen Schwellwerts (rot/grün); prozessierte RMF-Daten der rechten Schiene (türkis).

Der Schwellwert der ABA-Daten wurde in diesem Fall anders gewählt als der für die Referenzdaten verwendete Schwellwert, da in diesem Wellenlängenbereich die Amplituden der ABA-Daten höher

ausfallen als die der RMF-Daten. Der optimale Schwellwert wurde auf wenigen Fahrten in eine Richtung auf Gleis 4 bestimmt (s. [9]) und führt zu einer fast optimalen Übereinstimmung der Einteilung in verriffelte und nicht verriffelte Bereiche auf Basis der ABA- und RMF-Daten auf diesem Gleis. Auch aus der in AP 4 durchgeführten Anwendung auf das gesamte Gleisnetz waren die für Gleis 4 erhaltenen Schwellwerte (bzw. Skalierungsfaktoren, s. unten) nahezu optimal und führten zu einer guten Übereinstimmung zwischen den beiden Zielgrößen.

Äquivalent zur Anpassung der Schwellwerte können die Ergebnisse aus der ABA- bzw. RMF-Prozessierung mit einer entsprechenden Konstanten multipliziert werden. Werden die Daten auf Fahrten verschiedener Geschwindigkeiten gemittelt, so kann dieser Faktor wie bereits beschrieben auf dem Mittelwert aus wenigen Fahrten gelernt und auf den übrigen Fahrten validiert werden; die für Gleis 4 im Bereich 3 – 8 cm verwendeten Faktoren für die Einhüllende waren 1/2.3 (links) und 1/1.65 (rechts) und konnten sehr gut für die Bearbeitung der Daten des gesamten Netzes verwendet werden. Alternativ kann eine Geschwindigkeitskorrektur vorgenommen werden, indem der im obigen Abschnitt beschriebene Mittelwert auf wenigen Fahrten gelernt wird (Regression) und dann die Endergebnisse der ABA-Prozessierung mit dem Quotienten aus dem Mittelwert der Amplituden (Einhüllenden) der Daten des RMF über das gesamte Gleis zu dem Regressionswert der ABA-Daten für die mittlere Geschwindigkeit der Fahrt multipliziert werden und anschließend der Mittelwert über die Fahrten gebildet werden. Dies ermöglicht überdies eine deutlich verbesserte Vergleichbarkeit verschiedener Überfahrten und könnte Degradationen sichtbar machen. Über die Befahrungen von Gleis 4 zeigten sich in dieser Analyse robuste und richtungsunabhängige Abhängigkeiten der mittleren Amplituden bzw. der mittleren Einhüllenden über das gesamte Gleis je Seite. In Kapitel 4.2.2.1 werden die Ergebnisse über die übrigen Gleise näher erläutert; hier stellte sich heraus, dass auch auf den übrigen Gleisen wiederholbare Muster zu erkennen sind.

Schließlich wurde bei der Analyse der Daten von Gleis 4 beobachtet, dass an Stellen, an denen hohe Amplituden in einem Wellenlängenbereich auf nur einer Schiene vorliegen (siehe Abbildung 64, RMF-Daten bei Meter 50-55), auch die prozessierten ABA-Daten des Sensors der gegenüberliegenden Seite erhöhte Werte zeigen. Dies ist auf die Übertragung der Vibrationen über die starre Achse der Lokomotive zurückzuführen. Der Umgang mit dieser Beobachtung wird in Kapitel 4.2.2 genauer beschrieben.

4.2.2. Anwendung auf die gesamte Hafenbahn

In AP 4 erfolgte die Evaluation der entwickelten Datenanalyseansätze auf dem gesamten befahrenen Netz des Hafens in Braunschweig. Betrachtet wurden dabei Gleisüberfahrten mit einer Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s. Die zusätzliche Restriktion auf Fahrten ohne starke Beschleunigungsvorgänge, wie sie in AP 3 für erste Analysen der Daten von Gleis 4 verwendet wurde, wurde fallen gelassen und führte zu keinen Problemen in der Bearbeitung.

4.2.2.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Analysen über das gesamte befahrene Netz im Hafen Braunschweig und der Abgleich zwischen den aus den ABA-Daten und den Referenzmessungen gewonnenen Längsprofilen zeigte, dass eine

qualitative Beurteilung von Gleisabschnitten auf Basis der ABA-Daten in allen vier Wellenlängenbereichen grundsätzlich gut möglich ist. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, ist dazu insbesondere für die mittleren Wellenlängenbereiche, 3-10 cm und 10-30 cm, eine Anpassung des Schwellwerts zur Beurteilung der ABA-Daten oder äquivalent eine Multiplikation der ABA-Daten mit einem Skalierungsfaktor nötig. Die Multiplikation mit einem einheitlichen Faktor für alle Gleise und Geschwindigkeiten ist eine vereinfachende Annahme, die jedoch robust ist und trotzdem gute Ergebnisse liefert, insbesondere, wenn über mehrere Fahrten gemittelt wird. Obwohl der Verlauf der prozessierten ABA-Daten dem der RMF-Daten sehr ähnlich ist, sind Abweichungen (absolut und relativ) beispielsweise über den Verlauf eines Gleises nicht einheitlich (s. Abbildung 65).

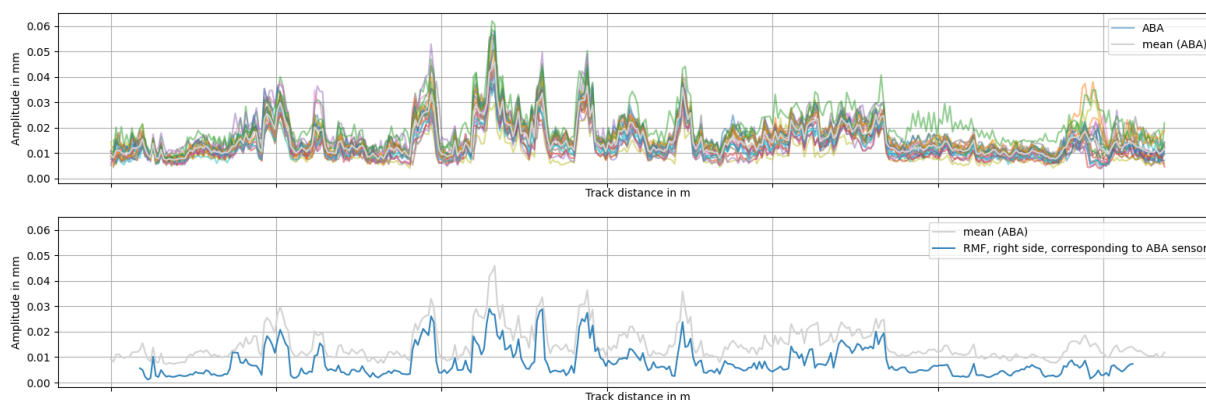


Abbildung 65: Oben: Mittlere Absolutwerte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die Fahrten auf Gleis 1, ABA-Daten, rechte Schiene (bunt); Mittelwert über die Fahrten (grau). Unten: Mittelwert über die Fahrten (grau), analog prozessierte Referenzdaten (blau).

Optimale Skalierungsfaktoren können einerseits bestimmt werden, in dem die Klassifikationsergebnisse optimiert werden (hohe Werte für beispielsweise richtig klassifizierte Punkte (Accuracy), Sensitivität (Recall, siehe Kapitel 3.1.4.2, Selektivität oder Genauigkeit (Precision)); andererseits können die mittleren absoluten oder relativen Abweichung von ABA- zu RMF-Werten (bezogen auf die mittleren Absolutwerte pro Gleissegment) minimiert werden. Für den ersten Fall sollte dabei als Klassifikationsgrundlage das Maximum der Werte der linken und rechten Schiene herangezogen werden, um dem Überspruch von Vibrationen der einen auf die andere Schiene Rechnung zu tragen (siehe Abbildung 65). Dabei werden die (ABA-)Werte zunächst seitenabhängig skaliert und danach das Maximum der beiden Werte ausgewählt (dies gilt für ABA- und RMF-Daten), was dann als Grundlage der Bewertung dient. Auf Abbildung 66 ist das Ergebnis der auf diese Weise verarbeiteten ABA- und RMF-Daten und die Einteilung in fehlerhafte und intakte Fenster zu sehen; als Skalierungsfaktoren wurde 1/2.3 (links) und 1/1.7 (rechts) verwendet, als Schwellwert wird dann für beide Daten 0.01 mm herangezogen.

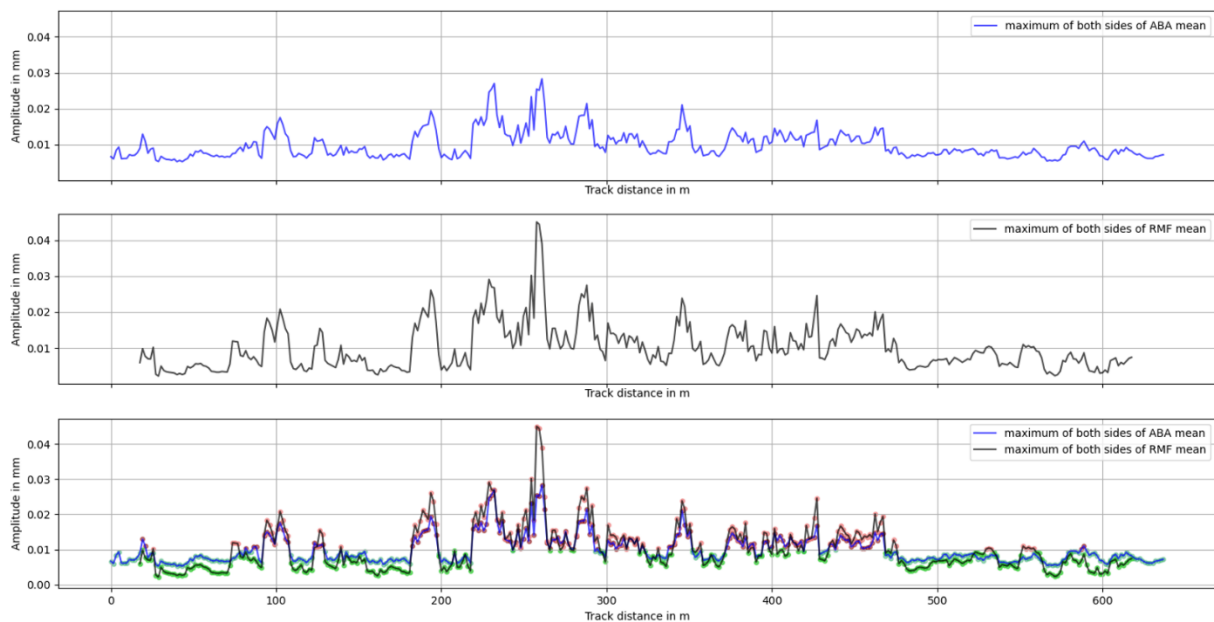


Abbildung 66: Oben (1): Maximum der folgenden Werte für linke und rechte Schiene: Skalierter Mittelwert über die Fahrten auf Gleis 1 der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm in Fenstern der Länge 2 m mit 20% Überschneidung, auf Basis der ABA-Daten. Mitte (2): Maximum der Werte für linke und rechte Schiene der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm in Fenstern der Länge 2 m mit 20% Überschneidung. Unten: Werte aus (1) und (2) und Einteilung in schadhaft und intakt auf Basis des Schwellwerts 0.01 mm.

Beim zweiten Ansatz werden die Fahrten geschwindigkeits- und seitenabhängig skaliert; anschließend wird der Mittelwert über Fahrten und das Maximum der beiden Seiten berechnet. Der Ansatz, die mittleren Amplituden pro Gleissegment für mehrere Fahrten zu mitteln, zeigte etwas bessere Ergebnisse als eine Geschwindigkeitskorrektur. Die optimalen Faktoren für die Minimierung der Abweichung führt zu kleineren Skalierungsfaktoren (Multiplikationswert für die ABA-Daten) als die Optimierung der Klassifikationsergebnisse. Die Auswahl der Fenstergröße (1m, 2m und 4m) und der Überschneidung (10%, 50%) oder die Verwendung der Einhüllenden hatten keine nennenswerten Effekte.

Für die beiden mittleren Wellenlängenbereiche liegen nicht nur die Faktoren in der Regel deutlich unter 1; zudem zeigen sich auch deutliche Unterschiede zwischen den Gleisen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 67).

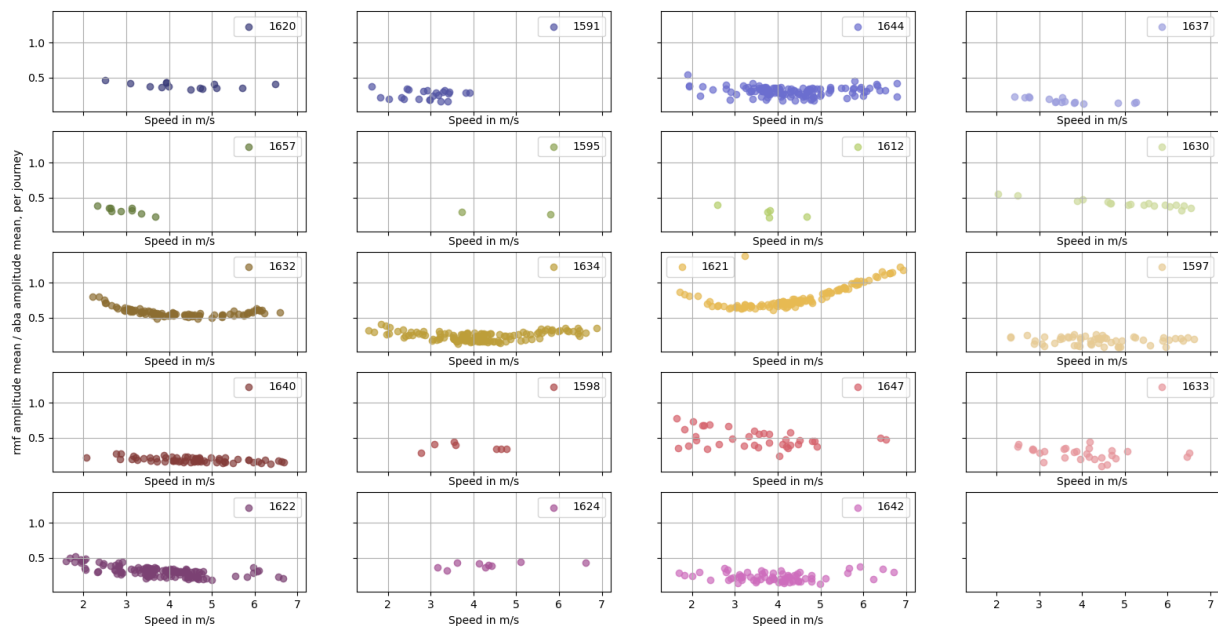


Abbildung 67: Quotient aus den mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils über das gesamte Gleis der prozessierten RMF-Daten zu den prozessierten ABA-Daten pro Fahrt (Journey) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für den Wellenlängenbereich 3-10 cm. Legende: Gleis-Identifikator (1620 entspricht Gleis 1, 1632 entspricht Gleis 4). Abgebildet sind alle Gleise, für die ABA-Daten (mindestens eine Fahrt mit Mindestgeschwindigkeit 1 m/s) und RMF-Daten vorliegen.

Diese sind jedoch pro Gleis gut reproduzierbar und können geschwindigkeitsabhängig berechnet und eingesetzt werden. Für die Randbereiche, also die Wellenlängen 1 – 3 cm und 30 – 100 cm, sind die Amplituden gut abgebildet, d.h. auch quantitative Aussagen sind in diesen Bereichen in unserem Anwendungsfall ohne starke Anpassungen möglich (ein Beispiel für Gleis 1 findet sich in Abbildung 69). Insbesondere zeigte sich in den beiden genannten Bereichen nicht nur ein Skalierungsfaktor nahe 1, sondern auch auf den meisten Gleisen keine starke Geschwindigkeits- und Gleisabhängigkeit (siehe Abbildung 68).

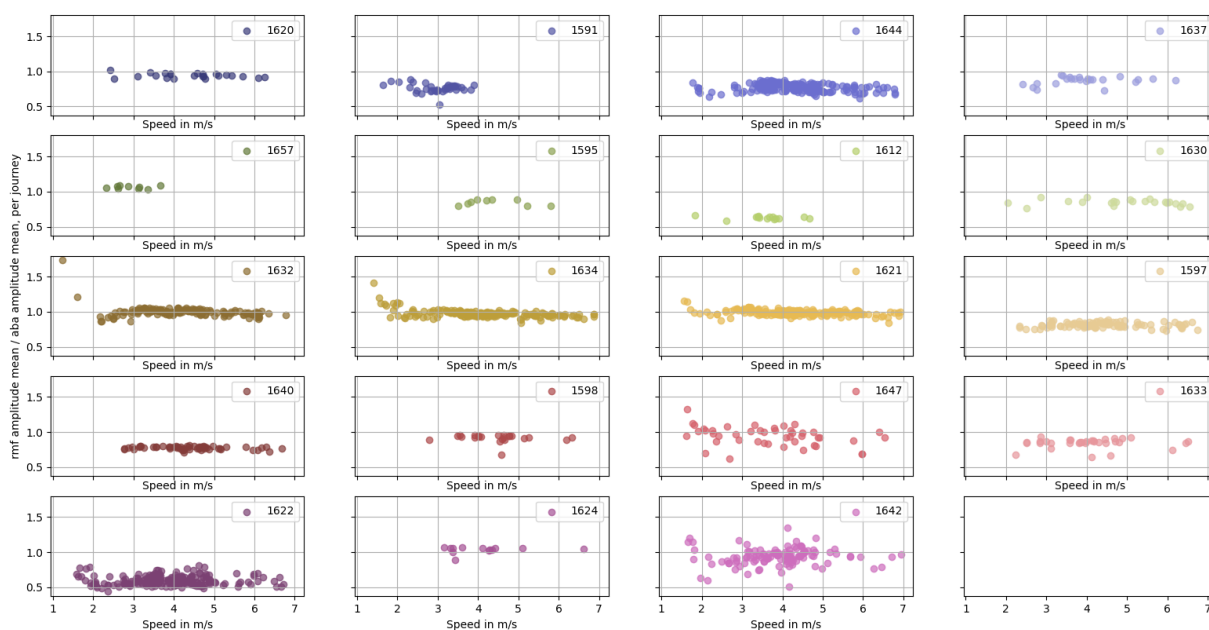


Abbildung 68: Quotient aus der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils über das gesamte Gleis der prozessierten RMF-Daten zu den prozessierten ABA-Daten pro Fahrt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für den Wellenlängenbereich 30-100 cm. Legende: Gleis-Identifikator. Abgebildet sind alle Gleise, für die ABA-Daten (mindestens eine Fahrt mit Mindestgeschwindigkeit 1 m/s) und RMF-Daten vorliegen.

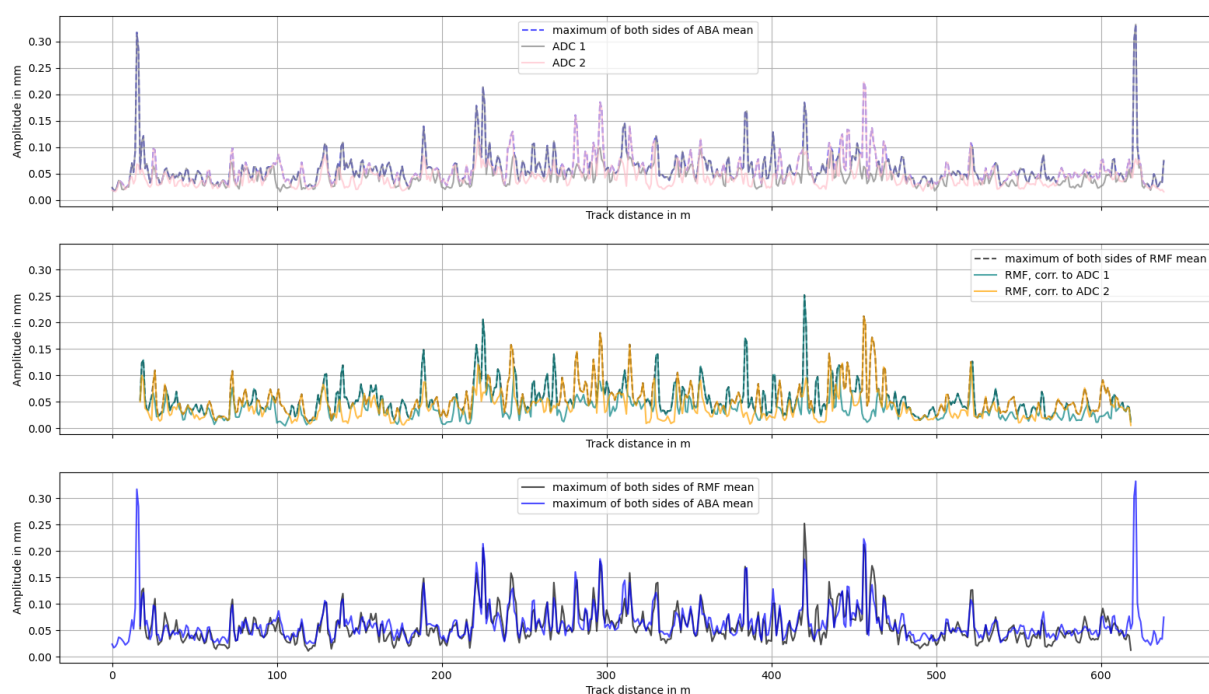


Abbildung 69: Oben: Über die Fahrten auf Gleis 1 gemittelte absolute Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 30-100 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die linke und rechte Schiene auf Basis der ABA-Daten und deren Maximum. Mitte: Gemittelte absolute Werte des gefilterten

Längsprofils für Wellenlängen 30-100 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die linke und rechte Schiene auf Basis der RMF-Daten und deren Maximum. Unten: Verlauf der Maxima der Werte für linke und rechte Schiene für die ABA-Daten (blau) und die RMF-Daten (schwarz).

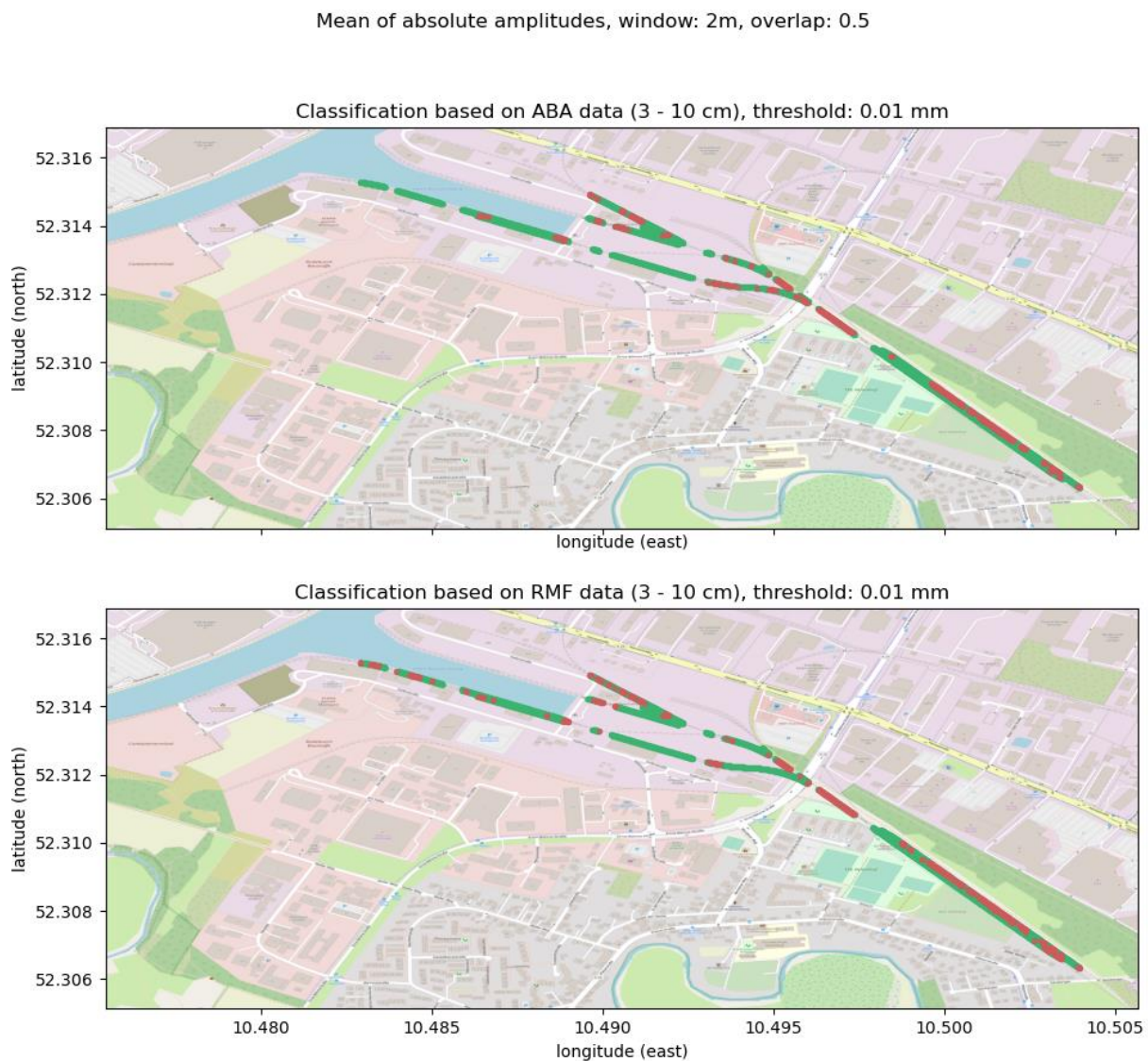


Abbildung 70: Ergebnisse der Bewertung von Gleisabschnitten der Länge 2 m (50% Überschneidung) hinsichtlich der Komponenten des Längsprofils mit Wellenlängen 3 – 10 cm. Bewertet wurde hinsichtlich der Über- bzw. Unterschreitung des Schwellwerts von 0.01 mm. Oben: Bewertungsgrundlage sind die Achslagerbeschleunigungsdaten (ABA). Unten: Grundlage sind die Referenzdaten (RMF). Abgebildet sind die Teile des Netzes, für die sowohl ABA- als auch RMF-Daten vorlagen. Hintergrundkarte: ©Open Street Map

Abbildung 70 zeigt schließlich die Ergebnisse der auf das gesamte Netz ausgeweiteten Datenanalyse und Fehlstellendetektion für den Wellenlängenbereich 3 – 10 cm. Abgebildet sind die Bewertungen für die Gleise, für die sowohl ABA- als auch RMF-Daten zur Verfügung standen. Die Bewertung erfolgte auf der Basis des Mittelwerts über alle Fahrten, die bei einer Geschwindigkeit von mindestens 1m/s aufgezeichnet wurden, wobei Ausreißer (z.B. aufgrund einzelner fehlerhafter

Alignierungen) herausgefiltert wurden. Der letztgenannte Schritt erfolgt unter Verwendung der Standardabweichung der erhaltenen gemittelten absoluten Werte des gefilterten Längsprofils pro Fenster über die Fahrten. Für die Anwendung in der Praxis ist an dieser Stelle wichtig, dass die Standardabweichungen über eine gewisse Anzahl an Fahrten (unter Berücksichtigung der Variation der auftretenden Geschwindigkeiten) an verschiedenen Punkten des Netzes verglichen werden und zur Bewertung herangezogen werden. Alternativ kann hier auch explizites Wissen über das vorliegende Netz einfließen: Für Gleise, auf denen Schüttgutverladung stattfindet, ist die genannte Standardabweichung auffällig hoch und Fahrten sollten einzeln bewertet werden, da in diesem Fall hohe Amplituden auf eine akute Verschmutzung der Gleise hindeuten (siehe Kapitel 4.2.2.2). Hier muss die Analyse in die Detektion von Verschmutzungen und die Bewertung des Schienenzustandes getrennt werden.

4.2.2.2. Ableitbare Anwendungen und Ausblick

Erkennung von Weichenüberfahrten

In den aus den ABA-Daten gewonnenen Längsprofilen zeigen sich gut wiederholbare Muster der Befahrungen der Weichen im Streckennetz. Die Signale sind in den Daten des Sensors beobachtbar, der sich auf der Seite der Lok befindet, die das Herzstück überfährt. Weitere Analysen sollten sich in Zukunft damit befassen, ob diese Signale von anderen eindeutig unterscheidbar sind (z.B. Schweißungen und Laschenstöße). Das Potential hierfür wird jedoch als hoch eingeschätzt. Abbildung 71 zeigt die Muster von Weichenbefahrungen auf den Gleisen 1 und 2 im Längsprofil. Die Erkennung von Weichenbefahrungen könnte in Zukunft beispielsweise zur Integration in die Georeferenzierung genutzt werden. Darüber hinaus bieten sich hier Potentiale für die Überwachung des Zustandes der Weichen, was als interessanter Anwendungsfall für den Hafen Braunschweig benannt wurde (s. Kapitel 5).

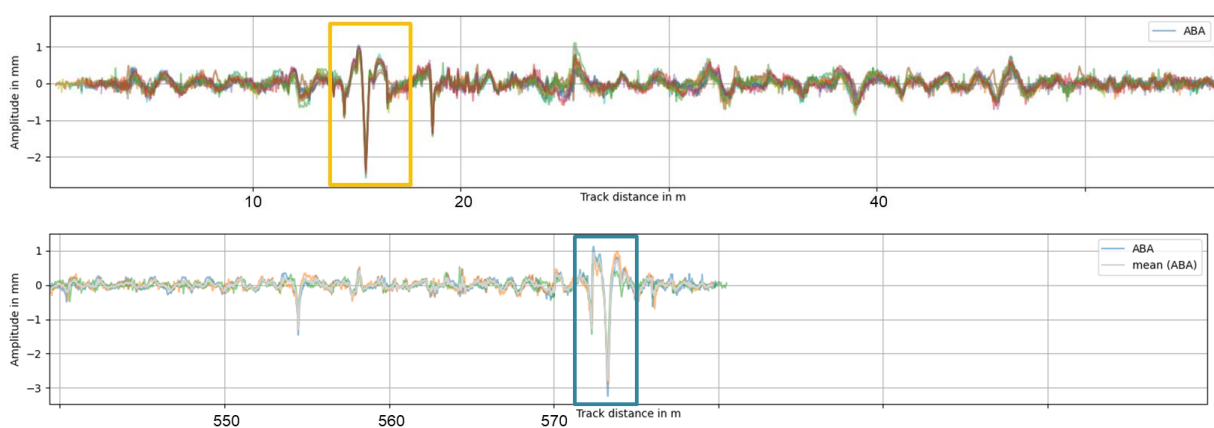


Abbildung 71: Charakteristische Muster von Weichenüberfahrten im Längsprofil für mehrere Fahrten, Gleis 1 (orange) und Gleis 2 (türkis).

Detektion von Verschmutzungen auf Gleisen mit Schüttgutverladung

Die Untersuchung des Längsprofils und abgeleiteter Parameter kann Rückschlüsse auf den Verschmutzungsgrad von eingebetteten Gleisen, insbesondere im Bereich der Schüttgutverladung, liefern. Das Längsprofil und die in diesem Kapitel untersuchten Parameter sind auf freiliegenden Gleisen - abgesehen von einer verhältnismäßig kleinen relativen (unter anderem geschwindigkeitsabhängigen) Variation - gut reproduzierbar. Auf den eingebetteten Gleisen, die beispielsweise im Bereich der Kohle- und Schrottverladung liegen, treten teils sehr starke Änderungen auf, die mutmaßlich auf Verschmutzungen zurückzuführen sind. Die Detektion von Verschmutzungen könnte in einem in der Praxis angewandten System, wie in der Anforderungsanalyse vom Hafen Braunschweig gewünscht, zu einer Warnung oder einem Vermerk führen. Ebenso könnte der zeitliche Verlauf der Werte über das Gleis sichtbar gemacht werden, so dass für das zuständige Personal nach einer Fahrt sofort ersichtlich wird, in welchem Zustand sich das Gleis gerade befindet (siehe Abbildung 72).

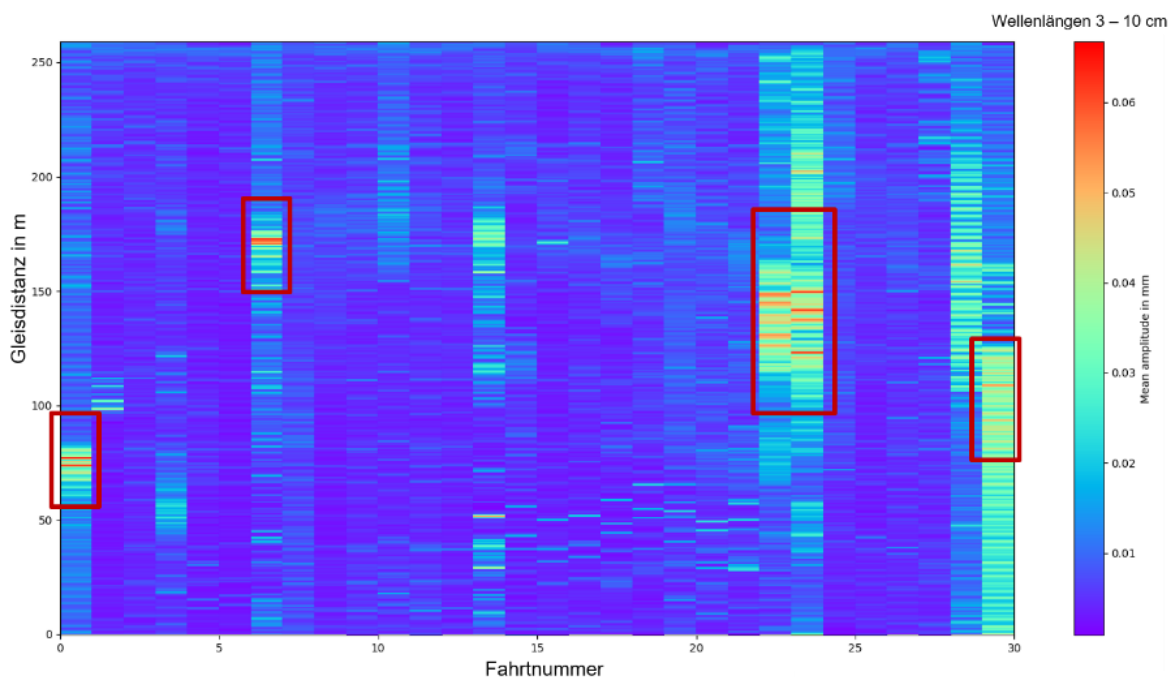


Abbildung 72: Variation der mittleren Amplituden (Wellenlängenbereich 3-10 cm) pro Fenster für Überfahrten auf Gleis 7. Hohe Werte deuten auf eine Gleisverschmutzung hin.

4.2.2.3. Visualisierung der Ergebnisse mittels mapl-e und DLR-Frontend

Im Zuge der Erstellung einer gemeinsamen Visualisierung wurden Dateien erstellt, die im Vossloh-eigenen Frontend *mapl-e* hinterlegt wurden. Es handelt sich um die in diesem Kapitel beschriebenen mittleren Amplitudenwerte für Fenster der Länge 2 Meter und 50 % Überschneidung für die verfügbaren Fahrten. In *mapl-e* können durch den Nutzer zwei Schwellwerte angepasst werden, in deren Abhängigkeit die Gleismeter in drei Kritikalitätsstufen eingefärbt werden (siehe Abbildung 73). Diese Ergebnisse sowie die analog erhaltenen Resultate der Referenzdaten der Jahre 2019 und 2020 wurden ebenfalls im DLR-eigenen Frontend zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 74).



Abbildung 73: Visualisierung der Ergebnisse der Analyse der ABA-Daten für Wellenlängen 30 – 100 cm in *mapl-e*.

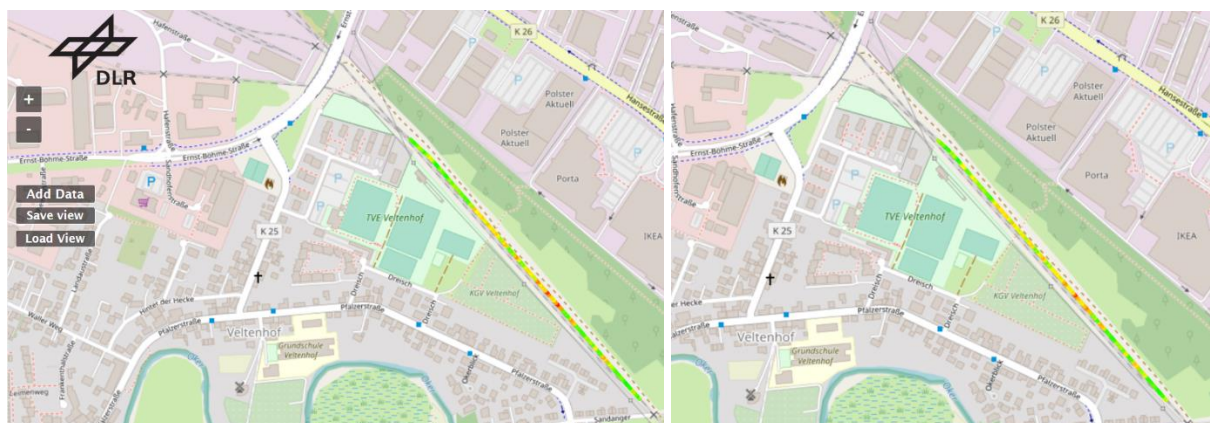


Abbildung 74: Visualisierung der Ergebnisse der Analyse der ABA-Daten (links) und der RMF-Daten (rechts) auf Gleis 1 im DLR-Frontend, Wellenlängen 3 – 10 cm. Hintergrundkarte: © Open Street Map

4.3. Evaluation der Datenanalyse mittels tiefer neuronaler Netze

Mithilfe tiefer neuronaler Netze wurden die Anwendungsfälle der Detektion von Riffel- und Schlupfwellen, Ausbrüchen, Schleuderstellen sowie Spurverengungen untersucht.

4.3.1. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Insgesamt konnte in diesem Arbeitspaket eine gute bis sehr gute Aufdeckungsquote mit Deep Learning (Neuronale Netze) realisiert werden,

- obwohl es z.T. Fehlstellen gab, die die Räder nicht berührten (seitliche Ausbrüche) und somit auch keine Auswirkungen auf die Beschleunigung der Lokomotive hatten
- obwohl am gleichen Gleisabschnitt z.T. mehrere Fehlstellen unterschiedlichen Typs vorlagen, was das Aufdecken von Fehlstellentyp-spezifischen Mustern auf die Beschleunigungsdaten deutlich erschwerte.

Da die angewendete Algorithmik mit kontinuierlichem Lernen arbeitet, ist davon auszugehen, dass für einen operativen Einsatz ein stabiles Künstliche Intelligenz-Produkt basierend auf den entwickelten Prototypen entstehen kann.

Ggf. sollten die Analysen für bestimmte Fehlertypen (bspw. seitliche Ausbrüche) mit Bildverarbeitungsanalysen ergänzt werden, um noch bessere Ergebnisse zu erreichen.

4.3.2. Visualisierung der Ergebnisse der Anomalieerkennung

Zur interaktiven Visualisierung wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt.

Einerseits eine Applikation, die den Fokus auf die Algorithmikgüte legt (IS Predict-eigene Visualisierung). Andererseits eine Applikation, die den Fokus auf das Definieren und Bearbeiten der Wartungsaufträge im operativen Betrieb legt (Applikation von Vossloh namens Mapl-e).

4.3.2.1. Visualisierung mit Fokus auf Algorithmikgüte

Um die Algorithmikgüte darzustellen, wurden – natürlich – Prozentsätze auf ungelernten Daten ausgewiesen, wie im obigen Kapitel dargestellt. Jedoch ist es auch sinnvoll, die reinen Zahlen grafisch aufzubereiten. Dazu wurde der Kontext verwendet, also das Schienennetz der Braunschweiger Hafenbahn. Hier hat der Betrachter die Möglichkeit, gezielt auf bestimmte Gleisbereiche oder auf bestimmte Fehlertypen zu fokussieren.

Die folgende Grafik zeigt einen Teil des Schienennetzes mit Augenmerk Riffel/Schlupfwellen (Englisch: Corrugation).

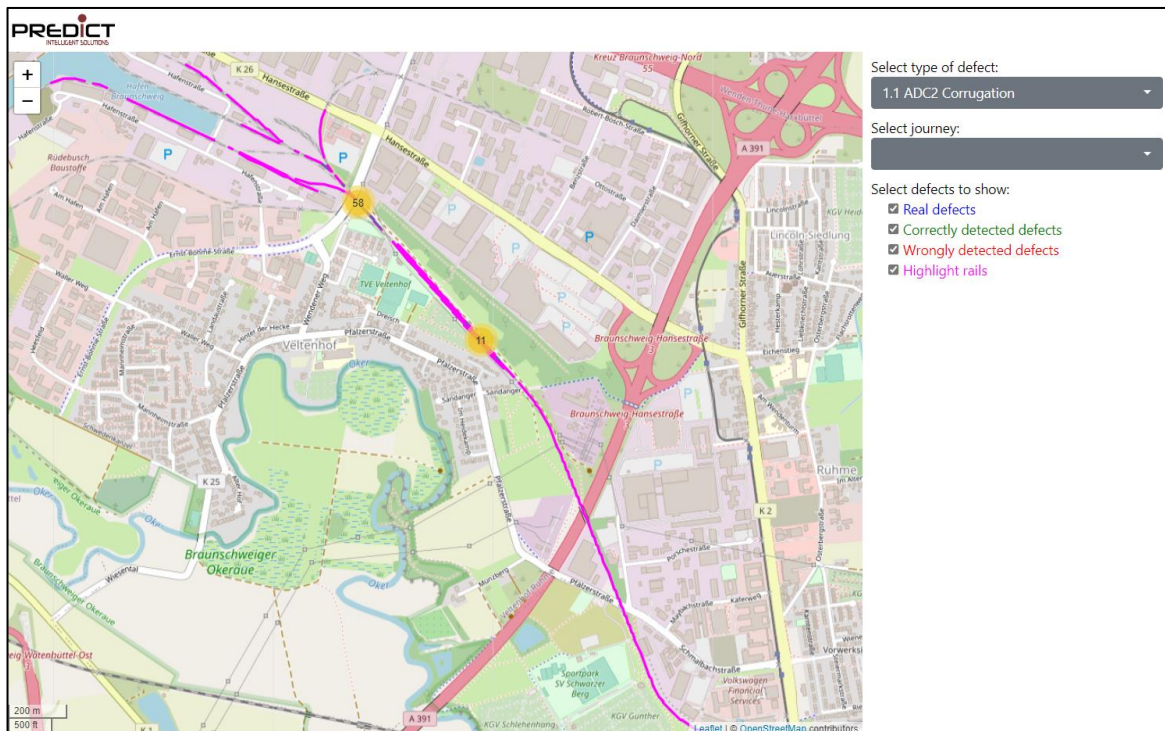


Abbildung 75: Überblick über Fehlzustände (gefiltert) Hintergrundkarte: ©Open Street Map

Durch Zoom In-Funktionalität können Details für kleine Gleisabschnitte angezeigt werden, wie die folgende Grafik aufzeigt:

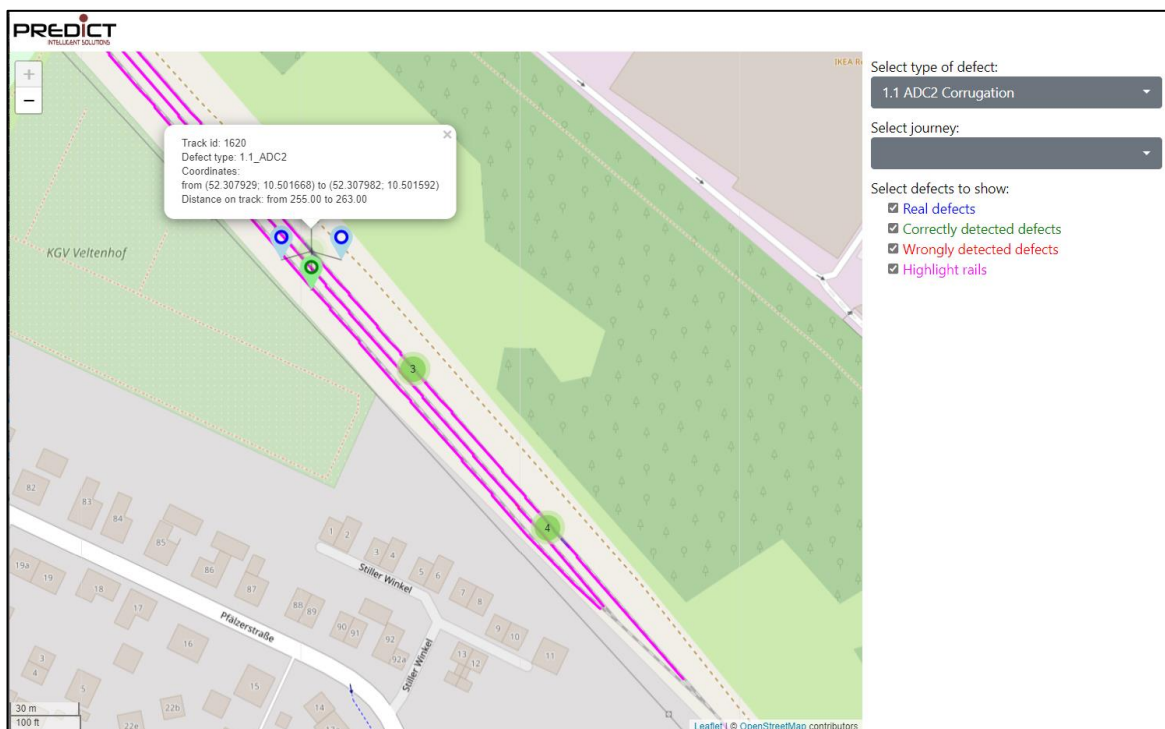


Abbildung 76: Details zu Fehlzuständen (gefiltert) Hintergrundkarte: ©Open Street Map

Die interaktive Visualisierung wurde für das gesamte Schienennetz des Braunschweiger Hafens dargestellt, mit Detailanalyse pro Gleis oder auch pro Fahrt.

4.3.2.2. Visualisierung mit Fokus operativer Wartungsbetrieb (mapl-e)

Um die Analyseergebnisse des Braunschweiger Hafens mit tiefen neuronalen Netzen in dem Produkt mapl-e von Vossloh zu integrieren, wurde eine Schnittstelle definiert und realisiert, die pro Fehlstellentyp und Gleis-ID eine Datei erzeugt. In dieser Datei sind pro Meter die Fehlstellen und die entsprechenden Analyseergebnisse aufgelistet. Jede Gleis-ID benötigt eine GPX-Datei, um die Fehlstellen der Gleisinfrastruktur des Hafens zuzuordnen.

Integration in Vosslohs „mapl-e“



5. Arbeitspakt 5: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.1. Vorgehensweise

In AP 5 erfolgte gemeinsam mit den Häfen eine Charakterisierung des **Ausgangszustands** bezüglich des gegenwärtigen Zustands der Infrastruktur, den in der Vergangenheit aufgetretenen Fehlzuständen sowie der aktuellen betrieblichen Praxis bei Inspektion und Instandhaltung der Gleisinfrastruktur. Diese Erhebung erfolgte anhand der von den Häfen Braunschweig und Hamburg beantworteten Fragebögen (siehe AP 1) sowie mehrerer gemeinsamer Workshops. Weiterführend erfolgte eine Bewertung des möglichen **Mehrwerts** der eingebetteten Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur im Vergleich zur bisherigen herkömmlichen Instandhaltungsplanung. Dies beinhaltet eine Bewertung des **Kosteneinsparungspotentials** für die Hafenbahnbetreiber und Betrachtung der **Wirtschaftlichkeit** unter Berücksichtigung der Investitionskosten. Darauf aufbauend erfolgte abschließend eine Bewertung der **Erfolgsaussichten** einer nachgelagerten Produktentwicklung.

Die konkrete Untersuchung erfolgte am Beispiel der Hafenbahn in Braunschweig.

Deren insbesondere für Binnenhäfen charakteristische Merkmale sind:

- Vergleichsweise kleines Netz (< 50 Streckenkilometer). Eine regelmäßige visuelle Inspektion aller Abschnitte durch Streckenbegehungen kann noch realisiert werden.
- Eingebettet in urbane Mischgebiete mit überwiegendem Gewerbeanteil. (Belastung von Anwohnern durch Lärm vorhanden, aber begrenzt)
- Wenige stark befahrene Rangiergleise (Gleise 1-7), viele Abstellgleise
- Sehr langsamer Verkehr (< 25 km/h, dadurch geringe Anforderungen an den Gleisoberbau bezüglich Querprofil und Längswelligkeit)
- Rangierbetrieb nur mit eigenen Loks (bis auf Gl. 1-3 u. 91) (dadurch ist grundsätzlich eine direkte Meldekette vom Lokführer an den Betriebsleiter bei Auffälligkeiten gegeben)
- Für Bau und Wartung der Gleisanlage werden regelmäßig altbrauchbare Materialien (z. B. auf der Vollbahn ausgemusterte Schienen) genutzt. Dies führt zu vergleichsweise vielen Schweißstellen und insgesamt zu einem Einsatz vieler unterschiedlicher Materialien.

5.2. Ausgangszustand

In den folgenden Unterabschnitten werden die Ergebnisse zur Erhebung des Ausgangszustandes im Braunschweiger und Hamburger Hafen zusammengefasst dargestellt.

5.2.1. Relevante Eigenschaften der Hafenbahn Braunschweig

- Die meisten Auffälligkeiten/Fehlzustände treten in den häufig befahrenen **Rangiergleisen** auf, in Abstellgleisen werden lediglich rottende Holzschwellen beobachtet.
- Relevante Fehlzustände der **Schiene** sind extreme Gratbildung, massiver Schienenkopfverschleiß und Schleuderstellen sowie schlechte Längs- und Querprofile der Schienen.
- Bis zum sukzessiven flächendeckenden Austausch gegen Betonschwellen in den vergangenen Jahren kam es häufig zu Verrottung an **Holzschwellen**, mit negativem Einfluss auf die Gleislage (Spurweite und Hohllage). Über das Langzeitverhalten der Betonschwellen liegen noch keine Erfahrungen vor.
- Die häufigsten Auffälligkeiten treten in **Weichen** auf (Radlenker, A_R-Maß, Verschleiß im Herzstück, Spiel der Zunge)
- **Spurverengungen** werden regelmäßig überraschend bei den mehrjährig stattfindenden Gleisgeometrie-Inspektionen mit Trolley-Messsystemen festgestellt. Ursächlich ist häufig eine Gratbildung an den Schienen, insbesondere in Gleisbögen. Als Instandhaltungsmaßnahmen wird eine Gratentfernung durch Schienenschleifen erforderlich.
- **Gleisverwindung** tritt ca. alle 5 Jahre auf, verursacht durch Schottersetzungen, Kaninchenbaue (insbesondere in sandigen Bereichen) sowie Unterspülungen.
- **Prellböcke** müssen innerhalb eines vorgegebenen Bereiches der Abstellgleise mit hinreichend großen Abständen zum tatsächlichen Gleisende stehen, um ein sicherheitskritisches Herausschieben der Prellböcke aus dem Gleis bei Anprall zu verhindern. Die Position muss kontrolliert und ggf. korrigiert werden. In Abstellgleisen sind verschobene Prellböcke aufgrund der seltenen Rangieraktivität sehr selten, im Bereich der Containerverladung (Gleis 6/7) dagegen aufgrund des regelmäßigen Rangierbetriebes häufiger.
- **Lärm** führt regelmäßig zu Anwohnerbeschwerden und führt zu Restriktionen des Betriebs durch Behördenauflagen sowie zusätzlichen Lärmgutachten bei Neubaumaßnahmen.

Die relevantesten Lärmquellen sind (nach Bedeutung geordnet)

- Betriebliche Geräusche (Kuppeln, Motor, Pfeifen),
- Pflegezustand der Güterwagen (Quietschen, Flachstellen, Radrauheit).
- Zustand der Infrastruktur (Schleuderstellen, Schweißungen, Riffel).

Die relevantesten Ursachen für Lärm aus der Infrastruktur sind

- Auswaschungen an Schweißstößen wg. unterschiedlicher Härten.
- Schleuderstellen (entstehen häufig durch ferngesteuerte Rangierloks bzw. traktionsstarke Streckenloks).

Über einen Zeitraum von etwa 15 Jahren erfolgte eine sukzessive Erneuerung von ca. 10 Streckenkilometern mit Betonschwellen. In den vergangenen 6 Jahren wurden außerdem 20 Weichen getauscht. In den vergangenen ca. 10 Jahren gab es 5 Entgleisungen, vornehmlich an Weichen und überwiegend aufgrund von Bedienfehlern.

5.2.2. Inspektion/Instandhaltung in Braunschweig

Zur Wahrnehmung der Verkehrssicherungspflicht und Erhaltung der Anlage wird im 2- Jahres-Rhythmus eine Gleis-/Weicheninspektion durch unabhängige, externe Prüfsingenieure vorgenommen. Die durchzuführenden Prüfungen werden durch die Gesellschaft für Landeseisenbahnaufsicht (LEA) GmbH, Hannover vorgegeben. Dies beinhaltet maßgeblich die Inspektion der Gleisgeometrie (insb. Höhenlage, Spurweite) mit handgeschobenen oder handgetragenen Messgeräten sowie die visuelle Erfassung von Fehlstellen. Diese regelmäßigen Inspektionen werden in Form eines Berichts mit Hinweisen zu erforderlichen Maßnahmen dokumentiert. Zusätzlich fertigt die Eisenbahnbetriebsleitung des Hafen Braunschweig monatlich einen eigenen Inspektionsbericht für einen Teil der Hafenbahn an. Dieser basiert auf Streckenbegehungen der Eisenbahnbetriebsleitung und Meldungen des Rangierpersonals. Insbesondere melden Lokführer neu aufgetretene oder verschlechterte Zustände, sofern diese bei Befahrung der Strecke wahrnehmbar sind.

Die bei den verschiedenen Inspektionsmaßnahmen sowie im Eisenbahnbetrieb festgestellten Auffälligkeiten oder Fehlzustände werden bewertet und priorisiert. Für die Priorisierung sind der Schweregrad des Fehlzustandes, dessen Sicherheitsrelevanz sowie die Häufigkeit der Befahrung relevant. Sicherheitskritische Zustände werden kurzfristig ad-hoc behoben. Wo immer möglich werden Instandhaltungsmaßnahmen zusammen mit Baumaßnahmen (z. B. Umrüstung auf Betonschwelle) oder möglichst en-bloc abgearbeitet. Das Budget für Bau-/ Instandhaltungsmaßnahmen beträgt ca. 100 – 150 T€ pro Jahr.

5.2.3. Außerordentlicher Aufwand

Außerordentliche, nicht eingeplante Aufwände/Kosten entstehen insbesondere im Zuge von Unfällen und Entgleisungen. Kosten entstehen unmittelbar insbesondere durch

- Wiederaufgleisung der Fahrzeuge,
- Betriebsbehinderungen im Hafen,
- Reparatur von Infrastruktur und Fahrzeugen,
- Schadensersatz,
- sowie ggfs. Bußgeldern.

Längerfristig verursachen Unfälle und Entgleisungen erhöhte Aufwände weiterhin durch ggfs. verschärfte Auflagen für Inspektionen sowie eine Steigerung der Versicherungskosten.

Die ständige Aufrechterhaltung eines sicheren Zustands der Infrastruktur ist ein maßgeblicher Beitrag zur Vermeidung von Unfällen und Entgleisungen. Insbesondere die rasche Aufdeckung kurzfristig eingetretener, sicherheitskritischer Fehlzustände (z. B. Schienenbruch oder Ausbrüche an Weichen) ist diesbezüglich von Bedeutung. Hier besteht ein hohes Interesse der Hafenbahnbetreiber an einer eingebetteten, automatischen Zustandsüberwachung zur Risikoreduktion. Bezüglich

Nachweises der wahrgenommenen Sorgfaltspflicht und etwaiger Kosten für Schadensersatz, Bußgelder oder Versicherungskosten ist weiterhin eine umfassende Dokumentation des vorschriftsgemäßen Zustands der Gleisinfrastruktur von besonderer Bedeutung. Auch diesbezüglich wird der eingebetteten Zustandsüberwachung ein hohes Potenzial für effektivere und effizientere betriebliche Abläufe beigemessen.

5.2.4. Ausgangszustand bei der Hafenbahn Hamburg

Das Gleisnetz der HPA umfasst ca. 300 km an Rangier- und Abstellgleisen. Im Unterschied zur Hafenbahn Braunschweig erfolgt die Umsetzung des Eisenbahnbetriebs auf der Infrastruktur nicht durch den Hafen selbst, sondern durch eine Vielzahl von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU). Dies führt zum Einsatz einer großen Anzahl (> 300) von unterschiedlichen Loks und Rangierfahrzeugen. Viele der EVU verwenden geleaste Loks oder befahren regelmäßig nur einen Teil der Gleisanlage. Die HPA selbst verfügt lediglich über ein kleines 2-achsiges Rangierfahrzeug, welches nur gelegentlich zum Einsatz kommt (z. B. abschleppen schadhafter Waggons). Die Kunden im Hafen Hamburg fordern eine sehr hohe Verfügbarkeit, deshalb beschäftigt die HPA deutlich über 100 eigene Mitarbeitende für die Instandhaltung, davon 10 nur für die Inspektion der Gleisanlagen. Mit diesen Personalen können ad hoc Entstörungen und Reparaturen zeitnah vorgenommen werden. Das Netz ist diesbezüglich aufgeteilt in drei Anlagenkategorien von A (höchste Verfügbarkeit, häufigste Nutzung) bis C (geringste Anforderung an die Verfügbarkeit). Gleise der Kategorie A werden entsprechend am häufigsten inspiziert. Die Inspektion erfolgt ausschließlich durch Personal im Gleis mit Handmessgeräten, ein dezidiertes eigenes Inspektionsfahrzeug ist nicht vorhanden. Wegen schnellerer Fahrgeschwindigkeiten und höherer Zugdichte im Vergleich zu kleineren Hafenbahnen wie im Braunschweiger Hafen erfordert eine Inspektion von Gleisen/Schienen mit Handmessgeräten einen Sicherheitsplan und die Begleitung durch Sicherungsposten. Die Inspektion erfolgt dadurch durchweg geplant und führt auf Gleisen der Kategorie A in der Regel zu Betriebseinschränkungen und Störungen des Bahnbetriebs. Die HPA nutzt das Instandhaltungs-Managementsystem „MR.pro“ zur Dokumentation von Gleis-/Schienen-/Weichenfehlern und von Instandhaltungsmaßnahmen. In MR.pro werden die Ergebnisse der vorgeschriebenen Fristenuntersuchungen aber auch andere Gleismessungen eingepflegt und sind zentral abrufbar. Das dichte Inspektionssystem ist effektiv. Entgleisungen passieren sehr selten und gehen zum überwiegenden Anteil auf betriebliche Fehler (Rangierfehler, Grenzzeichen nicht beachtet, Signal überfahren) zurück.

5.3. Mehrwert der eingebetteten Zustandsüberwachung

Im Folgenden werden die erkannten möglichen Mehrwerte einer eingebetteten Zustandsüberwachung zusammengefasst und bewertet. Bezüglich der Mehrwerte wird nach der Sensorik zur Erfassung der fahrdynamischen Reaktionen (Beschleunigungssensoren an den Achslagern) sowie der optischen Erfassung (Kameras zur Erfassung der Fahrersicht) unterschieden. Beide Ansätze können sowohl eigenständig als auch in Kombination eingesetzt werden.

5.3.1. Sensorik zur Erfassung der fahrdynamischen Reaktionen

Die Ergebnisse von AP 3 und 4 zeigen, dass mit Hilfe der Sensoren zur Erfassung der Achslagerbeschleunigungen (ABA-Sensorik) Auffälligkeiten mit Einfluss auf den Rollkontakt erkannt und bewertet werden können. Dies betrifft insbesondere die für Hafenbahnen relevanten Schienenriffel, Spurweitenänderungen, Schleuderstellen, Schienenstöße sowie Ausbrüche an der Schiene. In AP4 wurde ferner gezeigt, wie solche Auffälligkeiten bewertet und in einer interaktiven digitalen Karte angezeigt werden können. Die Visualisierung zeigt der zuständigen Eisenbahnbetriebsleitung Problemstellen auf einen Blick, verortet sie anschaulich und präzise und lässt tiefere Einblicke in Details zu. Wenngleich heute der Datenaustausch und die Auswertung noch manuelle Tätigkeiten erfordern, so ist eine vollständige Automatisierung des Datenaustauschs und der -bewertung im Zuge einer Entwicklung zur Marktreife technisch umsetzbar, sodass ein regelmäßiger Blick auf den aktuellen Zustand möglich wäre. Die Datenhaltung kann als Nachweis einer durchgehenden Kontrolle der Gleisanlage gegenüber der Landes-Eisenbahnaufsicht (LEA) dienen. Inwiefern eine derartige Datenhaltung den regelmäßigen Bericht an die LEA langfristig ersetzen könnte, wäre auf Grundlage einer längerfristigen Pilotphase unter Einbindung der LEA zu untersuchen. Mit Hilfe der ABA-Daten kann weiterhin die Verschmutzung von Rillenschienen sehr gut detektiert werden (siehe Abbildung 72). Damit kann im Bereich von Schüttgutbeladung am Kai dem Risiko einer Entgleisung wirkungsvoll entgegengewirkt werden. Durch die hochgenaue Verortung der Messdaten auf der Lok kann auch deren Position ständig und in Echtzeit abgerufen und anschaulich in einer Karte dargestellt werden. Dies vereinfacht die Disposition der Lok und die Überwachung von Rangierarbeiten insbesondere für kleinere Hafenbahnen erheblich. Die Nutzung der fahrdynamischen Reaktionen erscheint weiterhin aussichtsreich zur Erkennung weiterer bei Hafenbahnen besonderer relevanter Fehlzustände der Gleislage (Gleisverwindung, Schwellenhohllagen), der Schiene sowie der Weichen. Die Entwicklung entsprechender Analyseverfahren erfordert weitere umfassende Forschungstätigkeit.

5.3.2. Videoerfassung des Gleisumfeldes

Die vorgenommene Videoanalyse des „Lokführerblicks“ kann mit selbstlernenden Algorithmen Gleise, Weichen und Schienen erkennen, außerdem die Stellung der Weiche, Hindernisse im Gleis, mit Einschränkungen auch die Verschmutzung von (eingebetteten) Schienen (siehe AP 3). Als Mehrwert für die Eisenbahnbetriebsleitung wurde die automatische Fotodokumentation festgestellter Auffälligkeiten / Fehlzustände erkannt. Eine Bereitstellung entsprechender Fotos erlaubt weiterhin eine rasche visuelle Erstbeurteilung durch die Eisenbahnbetriebsleitung ohne Gleisbegehung.

Ergänzend können Prellböcke und Waggons in Nachbargleisen als solche erkannt werden - verschobene Prellböcke und Gleisbelegung könnten darüber automatisch erfasst werden.

5.3.3. Bewertung durch den Hafen Braunschweig

Der Hafen Braunschweig beurteilt eine Erfassung und Darstellung der oben genannten Zustandsdaten generell als wert- und sinnvoll mit einem signifikanten Potenzial zur Verbesserung der betrieblichen Prozesse. Aufgrund der Durchführung des Eisenbahnbetriebs maßgeblich mit eigenen Loks ist eine Überwachung mit eingebetteten Sensoren gut realisierbar. Es wird darauf hingewiesen, dass Gleislage-Auffälligkeiten (Verwindung, Hohllage und Schienenbrüche) sowie Fehlzustände der Weiche möglichst auch erfasst und abgebildet werden sollten, weil diese für die Sicherheit der Anlage von höherer Bedeutung sind als die Schienengeometrie. Die Detektion von Riffeln ist im Hafen Braunschweig von untergeordneter Bedeutung, weil die erkannten Riffeln durch den Einbau von altbrauchbarem Material „importiert“ wurden und nicht durch den Bahnbetrieb entstanden sind. Ferner ist bei den geringen Fahrgeschwindigkeiten der durch die Riffel entstehende Lärm von geringer Bedeutung und tritt hinter den durch den Rangierbetrieb entstehenden Lärm (Flachstellen, Pufferstöße, Pfeifen, Motor im Stand und in der Fahrt) klar zurück. Bei größeren Hafenbahnen wie im Hamburger Hafen werden hingegen längere Streckenabschnitte auch mit höheren Geschwindigkeiten (bis zu 60 km/h) befahren. Verriffelungen auf solchen Streckenabschnitten führen zu einem erhöhten Schienenlärm und ziehen insbesondere in urbanen Gebieten entsprechende Anwohner-Beschwerden nach sich. In Braunschweig tritt ein Verschieben der Prellböcke nur in zwei Gleisen und nur selten auf, insofern ist eine automatische Erfassung von untergeordneter Bedeutung, zudem gelangen die Loks nur sehr selten in die Nähe der Prellböcke, weil die Waggons in besagte Gleise hineingedrückt werden. Die Gleisbesetzung ist in Braunschweig nur bedingt über Video zu dokumentieren, weil zu Abstellgleisen häufig keine parallelen Nachbargleise vorliegen oder diese ebenfalls Abstellgleise sind, die nicht oder eingeschränkt oder nur selten durch die Lok befahren werden. Die Dokumentation von Auffälligkeiten an Gleis und Schiene durch begleitende Videoaufnahmen wird als wertvolle Ergänzung zu den Zustandsdaten angesehen, weil Fehler dadurch rasch bestätigt und auch leicht wiedergefunden werden können. Sie erleichtert die Entscheidung zu einer Gleisbegehung und würde Sicherheit und Effizienz deutlich verbessern. Daten-Upload und -Verarbeitung müssen für ein marktfähiges Produkt voll-automatisiert sein. Der Nutzer soll sich auf die Durchsicht von aufgezeigten relevanten Auffälligkeiten mit anwendergerecht aufbereiteten Darstellungen beschränken. Von besonderem Interesse ist der Zustand von Weichen bezüglich folgender Fragestellungen:

- Wie liegt die Weichenzunge an der Backenschiene an?
- Wie ist der Verschleiß am Radlenker?
- Stimmt das Maß zwischen Radlenker und Flügelschiene (Führungsschienenabstand A_F)?
- Deuten Auffälligkeiten im Fahrspiegel darauf hin, dass das Herzstück bald ausgewaschen ist und getauscht werden muss?

Der Hafen Braunschweig weist darüber hinaus mit Blick auf den demographischen Wandel auf die Bedeutung eines zeitgemäßen Arbeitsplatzes sowie effektive, digitalisierte Arbeitsprozesse hin, um

junge, digital-orientierte Mitarbeitende für die verantwortungsvollen Tätigkeiten im Bereich der Eisenbahnbetriebsleitung anzusprechen und zu gewinnen.

5.3.4. Bewertung durch den Hafen Hamburg

Eine eingebettete fahrzeugseitige Zustandsüberwachung bietet grundsätzlich große Potenziale für eine verbesserte Beobachtung der Zustandsentwicklung auf hochbelasteten Streckenabschnitten ohne Betriebsstörungen sowie der frühzeitigen Aufdeckung von kurzfristig eingetretenen Schäden. Der Nutzung / Verfolgung dieses Ansatzes steht jedoch hemmend entgegen, dass der Eisenbahnbetrieb durch von der HPA unabhängige EVU erbracht wird. Für die Nutzung fahrzeuggetragener Sensoren für die Infrastruktur fehlen die für den Austausch von Daten und Informationen notwendigen Infrastrukturen einschließlich standardisierter Formate sowie insbesondere die Möglichkeit zur Umsetzung der dafür erforderlichen datenökonomischen Geschäftsmodelle. Entsprechende Lösungen sind bislang am Markt nicht verfügbar. Ohne diese Grundlagen ist eine Ausrüstung von Fahrzeugen mit Sensoren zur Überwachung der Gleisinfrastuktur für die verkehrenden EVU jedoch nicht attraktiv.

5.4. Kosteneinsparpotential

In den folgenden Abschnitten werden die Einsparpotenziale für kleinere und größere Hafenbahn am Beispiel der Häfen Braunschweig bzw. Hamburg qualitativ bewertet und, wo möglich, grob hinsichtlich der erwartbaren Größenordnungen quantifiziert.

5.4.1. Einsparpotentiale im Hafen Braunschweig

Die bei kleinen Hafenbahnen wie der Braunschweiger Hafenbahn direkt anfallenden Kosten für die Gleisüberwachung sind vergleichsweise gering. Bei solchen Bahnanlagen ist die Gleislänge des Netzes mit 10-50 km moderat, so dass die Gleise mit noch vertretbarem Aufwand durch geeignetes Fachpersonal regelmäßig abgelaufen und inspiziert werden können. Aufgrund des dominierenden Rangierbetriebs bei Fahrgeschwindigkeiten unter 25 km/h sind die auftretenden dynamischen Lasten vergleichsweise gering, so dass zahlreiche Fehlerarten selten auftreten. Das Betreten der Gleise zu Inspektionszwecken ist weiterhin mit geringer Gefahr und wenig Aufwand verbunden, weil die Züge langsam und die Zugpausen lang sind. Sicherungspersonal, Sicherungspläne und lange Vorlaufzeiten sind i. d. R. unnötig. Eine Lärmproblematik und die Notwendigkeit zur Riffelbeseitigung ist zudem üblicherweise gering, da kaum oder keine längeren Streckenabschnitte häufig bzw. regelmäßig mit Geschwindigkeiten über 30 km/h befahren werden. Bezüglich der Lärmbelastung dominieren daher Betriebsgeräusche (Motor/Lüfter der Loks, Pfeifen, Pufferstoß) ohne Bezug zur Gleisinfrastuktur bzw. deren Zustand.

Zur Verkehrssicherungspflicht und Erhaltung der Anlage fallen im Falle der Braunschweiger Hafenbahn folgende Untersuchungen / Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen an:

- Zwei-jährliche Gleis-/Weichenprüfung durch unabhängige, externe Prüfengeure, 2 Tage für ca. 17 km Gleis, ca. 4.000 €.
- Inspektionsbericht des Eisenbahnbetriebsleiters für einen Teil der Hafenbahn. Der Aufwand dafür wird mit ca. 100 h/Jahr angegeben, das entspricht ca. 2 Std. pro Woche, bzw. 6.000 €/a.

Insgesamt fallen in Braunschweig also gegenwärtig ca. 8.000 € für Inspektion, Gleisbegehung und Dokumentation pro Jahr an. Diese Aufwendungen könnten durch Einsatz einer eingebetteten Zustandsüberwachung evtl. halbiert werden, weil Verwaltungsaufwand reduziert und Gleisinspektionen gezielter und seltener durchgeführt werden können. Nicht bewertet werden konnte in Braunschweig der Einspareffekt durch rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen aufgrund von frühzeitiger Fehlererkennung, die größere Fehler und größere Instandhaltungsmaßnahmen vermeiden helfen. In den meisten Gleisabschnitten seien langsam wachsende Fehler häufig nicht kritisch (Riffel, Gratbildung, Ausbrüche). Inwieweit relevante kritische Fehler wie Spurverengungen aufgrund von Gratbildung oder Hohllagen/Gleisverwindung z. B. durch Absackungen des Bahndamms durch Kaninchenbauten durch eine eingebettete Zustandsüberwachung frühzeitig erkannt werden können, kann mit dem gegenwärtigen Stand der Forschung und Entwicklung noch nicht abschließend beantwortet werden und bedarf weiterer Forschung. Insbesondere eine frühzeitige Erkennung von beginnender Spurverengung böte ggfs. Einsparpotenziale durch frühzeitigere Instandhaltungsmaßnahmen geringeren Umfangs zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit.

Hohes Potential für Kosteneinsparungen hätte eine effektivere Instandhaltung von Weichen, die bei fortgesetztem Verschleiß an Herzstückspitze und Zungenvorrichtung nicht repariert, sondern ausgetauscht werden müssen.

Die größten Kosten sind deshalb mit Unfällen/Entgleisungen verbunden, die aufgrund von nicht erkannten Gleis-/Schienenfehlern eintreten können. Selbst wenn diese selten sind und wegen der geringen Geschwindigkeiten im Netz häufig glimpflich ausgehen, fallen außerordentliche Kosten an. Diese - wie auch die Risikoreduktion durch die eingebundenen Sensoren - sind allerdings schwierig zu quantifizieren und hängen maßgeblich vom Ausmaß des Unfalls ab. Mit Kosten > 100.000 € pro Schadensereignis ist jedoch zu rechnen. Unter der Annahme, dass eine Entgleisung wegen nicht rechtzeitig vorgenommener Instandhaltung alle 5 Jahre passiert, muss somit mit außerordentlichen Kosten von 20.000 €/a gerechnet werden.

Die im Zweijahresrhythmus durchzuführenden Fristenuntersuchungen zu Spurweite und Verwindung und deren Kosten würden mit der Einführung von eingebetteten Zustandsüberwachungen nicht entfallen, über eine Verlängerung der Frist könnte erst nachgedacht werden, wenn das neue System sich über Jahre bewährt und seine Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt hat. Somit ergibt eine Schätzung des Einsparpotentials am Beispiel der Hafenbahn Braunschweig einen mittleren 4-stelligen Betrag pro Jahr bei den laufenden Kosten und bis zu 20 T€ bei den außerordentlichen Kosten. Hinzu kommen nicht bewertbare Effekte durch Früherkennung und weitere Vorteile (Verortung der Lok, digitaler Arbeitsplatz) bei Einführung einer eingebetteten Zustandsüberwachung.

5.4.2. Einsparpotential bei der HPA

Die HPA betreibt einen hohen personellen Aufwand, um die hohe Verfügbarkeit der Gleisanlage sicherzustellen. Dieser ist effektiv, denn Unfälle aufgrund von Inspektions- oder Instandhaltungsmängeln sind sehr, sehr selten. Die HPA sieht kaum Möglichkeiten, den Instandhaltungsaufwand durch Früherkennung zu senken, weil eine hinreichend frühe Erkennung von Fehlern durch das bestehende Inspektionsregime bereits gewährleistet sei und man Arbeiten im Gleis aufgrund der damit verbundenen Betriebseinschränkungen in der Regel zusammenfasst. Es besteht allerdings deutliches Potential, den Inspektionsaufwand durch fahrzeuggetragene Systeme zu senken, in dem

der Aufenthalt von Personen im Gleis und Sperrpausen reduziert werden. Insbesondere auf intensiv befahrenen Abschnitten der Kategorie A (z. B: Hausbruch-Hansaport) könnte der Aufwand für Inspektionen so halbiert werden. Wie bereits beschrieben, steht dem Einsatz einer eingebetteten fahrzeuggetragenen Zustandsüberwachung entgegen, dass der Bahnbetrieb nicht durch die HPA selbst sondern durch zahlreiche EVU getätigt wird. Grundsätzlich könnte ein Bezug von Zustandsinformationen von EVU gegen Entgelt oder Reduzierung der Nutzungsgebühren zukünftig Einsparpotenziale bieten. Wie bereits dargestellt, fehlen für die Umsetzung solcher neuartigen datenökonomischen Geschäftsmodelle jedoch noch die technischen, regulativen und organisatorischen Grundlagen.

5.4.3. Einsparpotentiale in anderen Hafenbahnanlagen

Die Ausführungen oben zeigen, dass die Einsparpotentiale dann groß sind, wenn

- ... Infrastruktur und Rangierbetrieb gemeinsam betrieben werden
- ... das Gleisnetz ausgedehnt, intensiv befahren und somit für Messungen mit Handprüfgeräten nur bedingt geeignet ist (Zeitaufwand, Sicherheitsbedarf).
- ... das Risiko von Unfällen (Schwere, Wahrscheinlichkeit) hoch ist.

Diese Voraussetzungen gelten nicht nur für Hafen-, sondern insgesamt für Industriebahnen. Es ist erneut anzumerken, dass sich der Mehrwert einer eingebetteten Zustandserfassung nicht alleine auf unmittelbare monetäre Einsparungen bei den Inspektions- und Instandhaltungsaufwendungen beschränkt.

5.5. Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems soll hier aus dem Blickwinkel der Anwender, also der Infrastrukturbetreiber, untersucht werden, nicht aus dem von Systemlieferanten, die ein solches System entwickeln. Die Einführung einer eingebetteten Zustandsüberwachung durch einen Kunden erfordert nicht nur die Beschaffung und Installation der Sensorik und der Datenverarbeitung, sondern impliziert auch eine deutliche Umstellung der Arbeitsweise und zugehörigen betrieblichen Prozesse. Die Einführungskosten gliedern sich in:

- Beschaffung/Installation der Sensorik in 1 bis n Lok(s)/Fahrzeuge(n)
- Beschaffung/Installation von Software/Hardware für Datenhaltung/-verarbeitung und -Darstellung
- Schulungskosten und Systemeinführung bei den Mitarbeitern

Diese Beschaffungskosten könnten aktiviert und über mehrere Jahre abgeschrieben werden. Hinzu kommen jährliche Betriebskosten für Software-Updates, Wartung und Ersatzteile der Sensorik.

Wirtschaftlich ist die Einführung, wenn die Kosten den Mehrwert unterschreiten. Angesichts der gegenwärtig nur grob abschätzbaren Beträge für Kosten und Mehrwert für die teilweise sehr unterschiedlich aufgestellten Häfen, kann eine quantitative Wirtschaftlichkeitsrechnung hier nicht vorgenommen werden. Die Aussagen der Hafenbetreiber zeigen ein klares Interesse an dem System und eine Anerkennung des Mehrwerts, vorausgesetzt, die Kosten halten sich in Grenzen. Somit steht und fällt die Wirtschaftlichkeit mit den Preisen der Systemlieferanten. Bei einem solchen System lassen sich die Kosten für die Hardware nicht beliebig senken. Die Sensorik muss aus verschiedenen Industriekomponenten zusammengestellt werden, deren Kosten auch durch Skaleneffekte oder eine künftige Preisentwicklung nur mäßig gesenkt werden können. Die Sensorik muss zudem langlebig sein und den Anforderungen zur Montage an ein Schienenfahrzeug genügen. Für Software und Schulung ist der Spielraum der Lieferanten zur Preisgestaltung größer, z. B. durch einen modularen „Baukasten“, aus dem die Netzbetreiber das System nach ihren jeweiligen Bedürfnissen zusammenstellen können oder durch online oder e-learning Methoden. Nach Auswertung der vorliegenden Daten/Aussagen dürfte die Zielgröße der jährlichen Kosten zum Betrieb des Systems (Abschreibung und Wartung/Ersatzteile) einen 4-stelligen Euro-Betrag insbesondere für kleinere Hafenbahnen nicht übersteigen.

Eine positive Perspektive hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer eingebetteten Zustandsüberwachung ergibt sich durch die insgesamt voranschreitende Digitalisierung des Hafenbetriebs. Insbesondere Systeme zum automatischen/autonomen Rangieren und Warenumschlag werden für die Bereitstellung der Automatisierung über umfassende Sensorik verfügen. Die für die Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur erforderliche Sensorik wird in diesen Systemen bereits vorhanden sein (z. B: Kameras) oder kann mit vergleichsweise geringen Mehraufwänden ergänzt werden (z. B: Beschleunigungssensoren). In diesem zukünftig zu erwartendem Szenario würden sich Mehrkosten für die eingebettete Zustandsüberwachung maßgeblich auf die Software zur Gewinnung der entsprechenden Informationen anhand der für andere Automatisierungszwecke vorhandenen Hardware und IT-Hintergrundsysteme beschränken.

5.6. Erfolgsaussichten für eine nachgelagerte Produktentwicklung

5.6.1. Ausstehende Entwicklung

Für die Produktreihe stehen folgende Funktionalitäten noch aus:

- Automatischer Daten-Upload vom Messsystem des Fahrzeuges in eine Datenbank/Cloud
- Vollautomatische Vorverarbeitung der Daten
- Erkennen und Aussondern von Fehlmessungen

Die im Projekt entwickelten und prototypisch implementierten Algorithmen müssen für eine Produktentwicklung weiter stabilisiert werden, um den Anforderungen einer Standardsoftware zu genügen.

Eine sinnvoll (und gewünschte) Produkterweiterung erfordert darüber hinaus noch Forschungstätigkeit zur Entwicklung von Datenanalyseverfahren für die automatische und zuverlässige Erkennung von:

- Gleishohllagen
- Schienenbrüchen
- Gleisverwindung
- Auffälligkeiten an Weichen (Herzstück, Zungenvorrichtung)

Ein Videosystem, das zu Auffälligkeiten im Gleis ein entsprechendes Bildmaterial liefert, stieß auf großes Interesse und könnte die Notwendigkeit zu Gleisbegehungen weiter senken, den Anlagenverantwortlichen damit viel Zeit und eine potentielle Gefährdung ersparen. Erforderlich wäre eine smarte Datenhaltung, um den Speicherbedarf in Grenzen zu halten.

Das on-board Sensorsystem, bestehend aus Sensoren, AD-Wandler, Messrechner, Antennen und Kabeln muss in kompakter, robuster und kostengünstiger Weise, evtl. durch Integration von Komponenten auf eine einzelne Platine, konzipiert und für eine (Klein-)Serien-Produktion vorbereitet werden.

5.6.2. Technische Erfolgsaussichten

Die technische Realisierbarkeit der ausstehenden Aufgaben erscheint in den meisten Fällen gegeben. Die Automatisierung der Datenverarbeitung ist eine Produktentwicklung mit geringen Risiken (wenn auch großem Aufwand, um diese robust und ausfallsicher zu gestalten) Schienenbrüche dürften ein deutliches Signal an die ABA-Sensoren liefern, das vermutlich dem Signal anderer Fehler (z. B. lockerer Laschungen) ähnelt und eine Differenzierung nur über eine zeitliche Betrachtung ermöglicht. Die Messung des Rad-Schiene-Kontakts mittels ABA-Sensoren in Weichen zur Beurteilung von Fehlern erscheint aussichtsreich, erfordert jedoch weitere Forschungsarbeiten. Herausfordernd ist Erkennung und Unterscheidung der Vielzahl an möglichen Fehlzuständen (im Herzstück, am Radlenker, in der Zungenvorrichtung). Die Erkennung von Gleislagefehlern (Hohllagen und Verwindung) mittels ABA-Sensoren kann für schnell fahrende Züge (< 50 km/h) auf Vollbahnen als gelöst angesehen werden. Für die Erkennung mit langsam fahrenden Rangierlokomotiven ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

5.6.3. Kommerzielle Erfolgsaussichten

Wie oben festgestellt wurde, hängt der kommerzielle Erfolg des Gesamtsystems maßgeblich davon ab, dass die on-board Sensorik als robustes und kostengünstiges Nachrüstsystem realisiert werden kann oder die erforderliche Sensorik zukünftig in moderne autonome Rangierfahrzeuge mit integriert werden kann. Ein Erfolgsfaktor wäre die gleichzeitige Nutzung des Sensorsystems auch für ein Fahrzeug-Diagnosesystem, bzw. umgekehrt die Integration der Fahrwegüberwachung in ein Diagnosesystem für Lokomotiven, z. B. unter geteilter Nutzung von Messrechner und Datenübertragung. Es darf damit gerechnet werden, dass in den kommenden Jahren nahezu alle neu hergestellten Lokomotiven mit solchen Systemen ausgerüstet sein werden.

5.7. Zusammenfassung

Der Mehrwert einer eingebetteten Zustandsüberwachung für die Instandhaltung der Hafenbahnen wird von den Hafenbetreibern als gegeben gesehen. Die Sammlung von Zustandsdaten hängt maßgeblich davon ab, dass mindestens ein mit der Sensorik ausgestattetes Fahrzeug dauerhaft einen wesentlichen Anteil des Netzes befährt. Deshalb würde der Einsatz des Messsystems vor allem in solchen Anlagen Sinn machen, wo Netz und Betrieb in einer Hand sind. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Systems für die Anlagenbetreiber ist dann gegeben, wenn die Sensorik hinreichend kostengünstig beschafft/betrieben werden kann. Das wäre insbesondere dann gegeben, wenn Anlagen-Diagnose und Fahrzeug-Diagnose mit einem einzigen System vorgenommen werden kann. Neben den unmittelbar mit den Inspektion- und Instandhaltungsaufwänden verbundenen Einsparpotenzialen böten entsprechende Systeme darüber hinaus Vorteile durch effektivere und effizientere digitalisierte Betriebsprozesse sowie attraktivere Arbeitsplätze.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan.....	4
Abbildung 2: Blockschaltbild des für HavenZuG entworfenen Systems für die Erfassung von ABA-, Kamera- und Positionsdaten	17
Abbildung 3: Verschiedene Ansichten des Messsystems. Oben auf ist der Industrierechner zu sehen.....	20
Abbildung 4: Die externen Sensoren. IMU (oben links), Kamera (oben rechts), ABA-Sensor (unten links), Kameragehäuse (unten rechts)	20
Abbildung 5: Am Fahrzeug angebrachter Beschleunigungssensor (Schraub-Klebe-Befestigung). ..	24
Abbildung 6: Auf der rechten und linken Fahrzeugseite angebrachte Beschleunigungssensoren ..	25
Abbildung 7: Kabellegung im Maschinenraum der Lok	25
Abbildung 8: Messsystem ohne externe Sensoren im Industriekoffer	26
Abbildung 9: Kameragehäuse mit Magnethalterung, Inbetriebnahme auf der Lok	26
Abbildung 10: Links: Positionen des Messstarts auf Gleis 1 (Referenzdatenerhebung 2020), linke und rechte Schiene (orange); Projektion auf das digitale Gleisnetz (braun). Rechts: Markierungen der Endpunkte der Messungen während der Messkampagne 2020. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.	29
Abbildung 11: Spurweitenmessungen auf Gleis 2 aus den Jahren 2019 (orange) und 2020 (blau). Oben: Ursprüngliche Positionsinformation auf Basis der Referenzpunkte und Odometer der Messgeräte. Unten: Korrigierte Positionsinformation unter Einbezug der Daten aus beiden Jahren und daraus abgeleiteten Korrekturen.	31
Abbildung 12: Längsprofilmessungen auf Gleis 91 (1,5 km Länge) aus den Jahren 2019 und 2020. Oben: Ursprüngliche Positionsinformation auf Basis der Referenzpunkte und Odometer der Messgeräte. Unten: Korrigierte Positionsinformation nach Auflösung diskreter Abweichungen, bspw. an Bahnübergängen, und nach Anpassung der Messlänge an die Länge auf dem Gleis. Farbliche Unterscheidungen innerhalb eines Jahres markieren Messabschnitte oder -Dateien. ...	32
Abbildung 13: Spurweite auf Gleis 5. Zwischen den Referenzmessungen in den Jahren 2019 und 2020 wurden hier Schleifarbeiten an der Schiene zur Gratentfernung durchgeführt.....	32
Abbildung 14: RMF Rohdaten aus 2019 und 2020 (Gleis 91, linke Schiene) (oben), aligniert mittels Methode <i>Varianz der Differenzen</i> mit erkennbarer Dehnung (oben) und <i>Abschnittsweise Varianz der Differenzen</i> mit korrigierter Dehnung (unten).	34
Abbildung 15: Lok 6 während einer Messfahrt im Hafen Braunschweig, November 2020.	35
Abbildung 16: Anzahl der Befahrungen der Gleise, pro m. Datengrundlage: Positionen aus der Georeferenzierung des Zeitraums bis Anfang Juli 2020. Gezählt wurde die Anzahl der Journeys, in denen die Position befahren wurde. Der Datensatz beinhaltet alle Fahrten, in denen die Positionen durch die Georeferenzierung als befahren registriert wurden (auch Fahrten, in denen bspw. die Fahrtrichtung nicht eindeutig bestimmt werden konnte oder in denen es zu fehlerhaften Aufzeichnungen von ABA-Daten kam). Farblegende: Anzahl der Überfahrten. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.	37

Abbildung 17: Mittlere gefahrene Geschwindigkeiten auf Gleispositionen, pro m. Datengrundlage: Positionen aus der Georeferenzierung des Zeitraums bis Anfang Juli 2020, vgl. Abbildung 16. Farblgende: Geschwindigkeit in m/s. Luftbildkarte: Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation.....	38
Abbildung 18: Konzept der Cloud-Verarbeitung	39
Abbildung 19: Struktur der ABA-Daten im HDF-5 Format.....	39
Abbildung 20: Datenprozessierung von Beschleunigungsdaten	40
Abbildung 21: Vertikale Beschleunigung an einer auffälligen Schweißnaht auf Gleis 4 für mehrere Überfahrten.....	41
Abbildung 22: Alignierung Varianz der Differenzen. Oben zwei leicht versetzte Datenverläufe, unten nach Alignierung	42
Abbildung 23: Abschnittsweise Alignierung Varianz der Differenzen. Der blaue Datenverlauf wurde aufgeteilt und lokal in den roten Verlauf eingepasst.	43
Abbildung 24: Vertikale Beschleunigungsdaten zweier Überfahrten.	45
Abbildung 25: Roh- und verschobene Daten zum Ankerpunkt 426.5m. Im unteren Bild wurden die Rohdaten um zirka 0.1862m verschoben	46
Abbildung 26: Riffel auf Gleis 4, Begehung am 9.12.2020.	47
Abbildung 27: Längsprofil für linke und rechte Schiene auf Gleis 4 (Messungen des RMF). Verriffelte Bereiche (bis Meter 65, ab Meter 72) grenzen an in dieser Hinsicht intakte Bereiche.	48
Abbildung 28: Oben: Alignierte Längsprofile aus ABA-Daten, Gleis 1 (linke Schiene bzgl. Nordwesten). Unten: Zugehöriges gemessenes Längsprofil (RMF).	50
Abbildung 29: Nahaufnahme von Abbildung 28.	50
Abbildung 30: Längsprofil und Schweißungen auf Gleis 4. Oben: Aus ABA-Daten abgeleitetes Längsprofil der rechten Schiene. Unten: Gemessenes Längsprofil (RMF) der rechten Schiene. Gestrichelte vertikale Linien: Protokollierte Schweißnähte (Begehung im Dezember 2020).....	51
Abbildung 31: Prozessierte ABA-Daten (erhaltenes Längsprofil) für insgesamt zehn Fahrten auf Gleis 4, aufgeteilt auf die linke und rechte Seite. Oben: Linke Seite der Lok, unten: Rechte Seite der Lok. Links: Das in dunkelgrau, nicht gestrichelt dargestellte Längsprofil zeigt die Referenzfahrt (ABA). Rechts: In hellgrau sind die in den Referenzmessungen (RMF) gemessenen Längsprofile abgebildet.	51
Abbildung 32: Prozessierungskette der ABA-Daten. Von oben nach unten: (1) Rohdaten (vertikale Beschleunigungen in m/s ²) für eine Fahrt. (2) Aus (1) abgeleitetes Höhenprofil in mm. (3) Höhenprofil aus ABA-Daten nach Alignierung für mehrere Fahrten. (4) Gefiltertes Längsprofil aus (3), Wellenlängen 3-8 cm. (5) Einhüllende der Daten aus (4). Gezeigt werden Fahrten auf Gleis 4, Sensor auf der rechten Schiene.	52
Abbildung 33: Riffelidentifizierung mit Hilfe der Standardabweichung innerhalb eines Fensters +/- L	55
Abbildung 34: Verlauf der Standardabweichung von gefilterten ABA-Daten (alle Messfahrten in hellblau, Zusammenfassung per Median in rot).....	56
Abbildung 35: Riffelidentifizierung aus ABA-Daten	56

Abbildung 36: Riffelidentifikation mit Cutoff-Wert: 0,41E-3 mm (links) und 0,55E-3 mm (rechts), $L = 300$ mm, $b = 20$ mm.	56
Abbildung 37: Projektvorgehen.....	57
Abbildung 38: Rauschen in den Daten durch Transformation reduzieren	59
Abbildung 39: Bewertung anhand Precision, Recall und F1 score.....	60
Abbildung 40: Einordnung in den Schienenkontext von „true“, „false“, „positive“ und „negative“	61
Abbildung 41: Gleisabschnitt mit Riffeln / Schlupfwellen (© Vossloh Rail Services).....	62
Abbildung 42: Analyseergebnis Riffel / Schlupfwellen	62
Abbildung 43: Gleisabschnitt mit Ausbruch (Copyright Vossloh).....	63
Abbildung 44: Analyseergebnis: Ausbrüche trotz seitlicher, nicht erfassbarer Ausbrüche und Überlappungen mit anderen Fehlertypen.....	64
Abbildung 45: Schleuderstelle auf Gleis 91 der Braunschweiger Hafenbahn	64
Abbildung 46: Analyseergebnis Schleuderstellen.....	65
Abbildung 47: Schematische Darstellung Spurverengung (Copyright Vossloh)	65
Abbildung 48: Messungen der Spurbreite (2019 und 2020)	66
Abbildung 49: Analyseergebnis Spurverengung.....	66
Abbildung 50: Erkannte Weichen und Weichenzeichen im Hafen Braunschweig.....	70
Abbildung 51: Erkannte Prellböcke im Hafen Braunschweig (Containerterminal).....	70
Abbildung 52: Erkannte Bahnübergänge im Hafen Braunschweig	71
Abbildung 53: Konfusionsmatrix für die Erkennung der Witterungsbedingungen.....	73
Abbildung 54: Keine Anomalien erkannt.	74
Abbildung 55: Notebook als Anomalie entdeckt.	75
Abbildung 56: Kohle auf Gleis 7 des Braunschweiger Hafens.	76
Abbildung 57: Erkannte Verschmutzungen auf Gleis 6 im Bereich der Schrottverladung.s	77
Abbildung 58: Ergebnisse auf den Gleis 5 für die Anomalie-Erkennung	77
Abbildung 59: Falsch-Positive Erkennung auf Gleis 7 auf den eingebetteten Schienen.....	78
Abbildung 60: Bildausschnitt des DLR Web-Frontend (https://bahnserver.ts.dlr.de/). Hintergrundkarte: OpenStreetMap.....	79
Abbildung 61: Bewertung von Messdatenverläufen über variable Toleranzbänder und Darstellung in Karte	81
Abbildung 62: Darstellung der Längswelligkeit in mapl-e gemäß Analyse von IS Predict	81
Abbildung 63: Darstellung der Längswelligkeit in mapl-e gemäß Analyse von DLR	82
Abbildung 64: Oben: Ergebnis der prozessierten ABA-Daten für mehrere Überfahrten in Vorwärtsrichtung, Sensor auf der linken Schiene, d.h. Mittelwerte der der letzten Zeile aus Abbildung 20 entsprechenden Daten der linken Seite über Fenster von 2 m mit 50% Überlapp (bunt); Mittelwert über die Fahrten (orange); analog prozessierte RMF-Daten (schwarz). Mitte: Mittelwert über die prozessierten ABA-Daten der verschiedenen Überfahrten (orange, s. oben), Klassifikation in verriffelte und nicht-verriffelte Bereiche auf Basis eines Schwellwerts (rot/grün). Unten: Analog prozessiert RMF-Daten der linken Schiene (schwarz) und zugehörige Beurteilung	

der Qualität in Bezug auf periodische Fehler im angegebenen Wellenlängenbereich auf Basis der Überschreitung des zugehörigen Schwellwerts (rot/grün); prozessierte RMF-Daten der rechten Schiene (türkis).	84
Abbildung 65: Oben: Mittlere Absolutwerte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die Fahrten auf Gleis 1, ABA-Daten, rechte Schiene (bunt); Mittelwert über die Fahrten (grau). Unten: Mittelwert über die Fahrten (grau), analog prozessierte Referenzdaten (blau).	86
Abbildung 66: Oben (1): Maximum der folgenden Werte für linke und rechte Schiene: Skalierter Mittelwert über die Fahrten auf Gleis 1 der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm in Fenstern der Länge 2 m mit 20% Überschneidung, auf Basis der ABA-Daten. Mitte (2): Maximum der Werte für linke und rechte Schiene der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 3-10 cm in Fenstern der Länge 2 m mit 20% Überschneidung. Unten: Werte aus (1) und (2) und Einteilung in schadhaft und intakt auf Basis des Schwellwerts 0.01 mm.	87
Abbildung 67: Quotient aus den mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils über das gesamte Gleis der prozessierten RMF-Daten zu den prozessierten ABA-Daten pro Fahrt (Journey) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für den Wellenlängenbereich 3-10 cm. Legende: Gleis-Identifikator (1620 entspricht Gleis 1, 1632 entspricht Gleis 4). Abgebildet sind alle Gleise, für die ABA-Daten (mindestens eine Fahrt mit Mindestgeschwindigkeit 1 m/s) und RMF-Daten vorliegen.	88
Abbildung 68: Quotient aus der mittleren absoluten Werte des gefilterten Längsprofils über das gesamte Gleis der prozessierten RMF-Daten zu den prozessierten ABA-Daten pro Fahrt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für den Wellenlängenbereich 30-100 cm. Legende: Gleis-Identifikator. Abgebildet sind alle Gleise, für die ABA-Daten (mindestens eine Fahrt mit Mindestgeschwindigkeit 1 m/s) und RMF-Daten vorliegen.	89
Abbildung 69: Oben: Über die Fahrten auf Gleis 1 gemittelte absolute Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 30-100 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die linke und rechte Schiene auf Basis der ABA-Daten und deren Maximum. Mitte: Gemittelte absolute Werte des gefilterten Längsprofils für Wellenlängen 30-100 cm für Fenster der Länge 2 m mit 20% Überschneidung für die linke und rechte Schiene auf Basis der RMF-Daten und deren Maximum. Unten: Verlauf der Maxima der Werte für linke und rechte Schiene für die ABA-Daten (blau) und die RMF-Daten (schwarz).	89
Abbildung 70: Ergebnisse der Bewertung von Gleisabschnitten der Länge 2 m (50% Überschneidung) hinsichtlich der Komponenten des Längsprofils mit Wellenlängen 3 – 10 cm. Bewertet wurde hinsichtlich der Über- bzw. Unterschreitung des Schwellwerts von 0.01 mm. Oben: Bewertungsgrundlage sind die Achslagerbeschleunigungsdaten (ABA). Unten: Grundlage sind die Referenzdaten (RMF). Abgebildet sind die Teile des Netzes, für die sowohl ABA- als auch RMF-Daten vorlagen. Hintergrundkarte: ©Open Street Map	90
Abbildung 71: Charakteristische Muster von Weichenüberfahrten im Längsprofil für mehrere Fahrten, Gleis 1 (orange) und Gleis 2 (türkis).	91

Abbildung 72: Variation der mittleren Amplituden (Wellenlängenbereich 3-10 cm) pro Fenster für Überfahrten auf Gleis 7. Hohe Werte deuten auf eine Gleisverschmutzung hin.	92
Abbildung 73: Visualisierung der Ergebnisse der Analyse der ABA-Daten für Wellenlängen 30 – 100 cm in mapl-e.	93
Abbildung 74: Visualisierung der Ergebnisse der Analyse der ABA-Daten (links) und der RMF-Daten (rechts) auf Gleis 1 im DLR-Frontend, Wellenlängen 3 – 10 cm. Hintergrundkarte: © Open Street Map	93
Abbildung 75: Überblick über Fehlzustände (gefiltert) Hintergrundkarte: ©Open Street Map.....	95
Abbildung 76: Details zu Fehlzuständen (gefiltert) Hintergrundkarte: ©Open Street Map	95
Abbildung 77: Beispiel GPX-Datei und Fehlstellen-Datei für mapl-e	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussfaktoren zur Bestimmung der technischen Anforderungen	8
Tabelle 2: Anwendungsbereiche des Systems aus Sicht der Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig.....	11
Tabelle 3: Aufnahmefrequenz, Kommunikationsart und Übertragungszeitpunkt der verschiedenen aufgenommenen Daten	16
Tabelle 4: Anzahl der Labels pro Klasse für die Objekterkennung.....	68
Tabelle 5: Konfusionsmatrix für die Objekterkennung	69
Tabelle 6: Recall, Präzision und F1-Score für die Objekterkennung.....	69
Tabelle 7: Anzahl der Labels pro Klasse für die Erkennung der Witterungsbedingungen.	72
Tabelle 8: Recall, Präzision und F1-Score für die Erkennung der Witterungsbedingungen	72
Tabelle 9: Konfusionsmatrix für die Anomalie-Erkennung.....	75

Abkürzungsverzeichnis

ABA	Achslagerbeschleunigung (Axle Box Acceleration)
ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog to Digital Converter)
CPU	Prozessor, zentrale Verarbeitungseinheit (Central Processing Unit)
fps	Bilder pro Sekunde (frames per second)
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (Global Navigation Satellite Systems)
GPS.....	Globales Positionsbestimmungssystem (Global Positioning System)
IMU	Inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit)
PoE	Power-over-Ethernet
ROS	Robot Operating System
SBC.....	Single Board Computer
USV	Unterbrechungsfreie Spannungsversorgung

Literaturverzeichnis

- [1] BAASCH, Benjamin ; HEUSEL, Judith ; GROOS, Jörn C. ; SHANKAR, Sangeetha: *Eingebettete Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur: Entwicklung und Erprobung von eingebetteten Multi-Sensor-Systemen für die kontinuierliche Zustandsüberwachung der Gleisinfrastruktur im operativen Betrieb*. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* (2019), Nr. 12, S. 6–8. URL <https://elib.dlr.de/129363/>
- [2] LIEBERENZ, Klaus ; KIPPER, René: *Zum Einfluss des Unterbaus und des Tragsystems auf die Gleislage*. In: *EI – DER EISENBAHNINGENIEUR* (2009), Nr. 8
- [3] ROTH, Michael Helmut: *Kartengestützte GNSS/IMU-Datenfusion mit Kalman-Filter und Co.: Positionierung im Bahnbereich* (Positionierung und Navigation für Intelligente Transportsysteme, POSNAV). Berlin, 2018. URL <https://elib.dlr.de/125258/>
- [4] ROTH, MICHAEL AND HEUSEL, JUDITH AND BAASCH, BENJAMIN AND JAHAN, KANWAL AND SCHULZ, SEBASTIAN AND GROOS, JÖRN CHRISTOFFER: *Intelligent in-service shunters in German harbor railways* (ITS World Congress 2021). Hamburg, Germany, 11.-15.10.2021
- [5] ROTH, Michael Helmut ; BAASCH, Benjamin ; HAVRILA, Patrik ; GROOS, Jörn C.: Map-Supported Positioning Enables In-Service Condition Monitoring of Railway Tracks. In: *International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2018, S. 2346–2353
- [6] JAHAN, Kanwal ; UMESH, Jeethesh Pai ; ROTH, Michael: Anomaly Detection on the Rail Lines Using Semantic Segmentation and Self-supervised Learning. In: *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)* : IEEE, 2021, S. 1–7
- [7] JAHAN, Kanwal ; NIEMEIJER, Joshua ; KORNFIELD, Nils ; ROTH, Michael: Deep Neural Networks for Railway Switch Detection and Classification Using Onboard Camera Images. In: *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)* : IEEE, 2021, S. 1–7
- [8] EN 13231-2. 2020. *Bahnanwendungen - Oberbau - Abnahme von Arbeiten*
- [9] HEUSEL, Judith ; BAASCH, Benjamin ; RIEDLER, Wolfgang ; ROTH, Michael ; SHANKAR, Sangeetha ; GROOS, Jörn C.: Detecting corrugation defects in harbour railway networks using axle box acceleration data. In: *17th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, 14-18 June 2021, London*.