

HITWK

Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Schlussbericht mFUND – Förderlinie 1

Laserbasierte Detektion von Lockerungen im Straßenbahngleis

– LaDeLok –

Förderkennzeichen:

HTWK Leipzig: 19F1120A

BitCtrl Systems GmbH: 19F1143B

Kontakt:

Projektleiter: Prof. Mathias Rudolph (HTWK Leipzig)

E-Mail: mathias.rudolph@htwk-leipzig.de

Telefon: +49 (0)341 3076 4150

Stand 30.11.2024

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Kurze Darstellung</i>	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.3	Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn	8
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2	<i>Eingehende Darstellung</i>	11
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen	11
2.1.1	Messgeräteentwicklung	11
2.1.2	Laboraufbau, Inbetriebnahme und Laboruntersuchungen	13
2.1.3	Felduntersuchungen	19
2.1.4	Datenanalyse	21
2.1.5	Machbarkeitsabschätzung aus Sicht des Messgeräts und der Datenanalyse.....	28
2.1.6	Ende-Zu-Ende Implementierung	28
2.2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	34
2.4	Voraussichtlicher Nutzen	34
2.5	Veröffentlichung der Ergebnisse	35
3	<i>Literaturverzeichnis</i>	35

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Balkenplan und Meilensteine im Forschungsprojekt "LaDeLok".....</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2: CAD-Aufbau des Laboraufbaus</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 3: Blockschaltbild zur Messgerätekonfiguration.....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 4: Umgesetzter Laboraufbau.....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 5: Setup-Tab der graphischen Benutzeroberfläche des API-Pi-Programms</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 6: Szenario 1: Versuchsaufbau zur Präzision und Wiederholgenauigkeit (Parallelendmaß)</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Szenario 1: Versuchsaufbau zur Präzision und Wiederholgenauigkeit (Lagerbock brünier). </i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 8: Szenario 2: Einstrahlungen des Lasers bei 60°, 45° und 30°</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 9: Szenario 2: re. Messbereich und ROI, li. Sensorwinkel- und Höheneinstellungen.....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 10: Szenario 3: Versuchsaufbau bei den Outdoor-Messungen (frühe Phase des Prototyps)...</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 11: Szenario 1: Boxplots li. Parallelendmaß (H=60mm), re. Lagerbock (H=24,97mm)</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 12: Szenario 2: Beispielmessung für 30°.....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 13: Szenario 2: Vergleich der Winkeleinstellungen anhand von je einer Bsp.-messung</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 14: Szenario 3: Profil-Messungen bei direkter Sonneneinstrahlung</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 15: Spezifischer Messpunkt zur Erfassung der 2D-Profile (MK 3).....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 16: 100 cm langes 3D-Profil mit einem 2D-Profilabstand von 5 cm (MK 2 und 3).....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 17: Konzept zur automatischen Klassifikation von Fugenvergusschäden.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 18: 20 Profile der li. Schiene des MP 1 aus MK 1 (li.) und Messsituation vor Ort (re.)</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 19: Interpoliertes Profil aus 20 Profilen der li. Schiene des MP 1 aus der MK 1</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 20: Profilvergleich des Profils der li. Schiene des MP 1 aus der MK 1 mit dem Sollprofil</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 21: Spurweite des MP1 der MK1.....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 22: Ausprägungen der Spurweiten.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 23: Datenverarbeitungskonzept</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 24: LRV-Data-Hub.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 25: Für LaDeLok vom Hersteller modifizierter MS-700.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 26: Mapping der GNSS-Rohdaten</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 27: Vorbereitung Ergebnis-Darstellung</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 28: Arbeitshypothese Homogenisierung der Prozesse und Daten</i>	<i>33</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Auflistung der Projekt- und Arbeitstreffen</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 2: Studentische Projekt- und Graduierungsarbeiten</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 3: Übersicht zu den durchgeführten Messkampagnen</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 4: Klassifizierung und Definition der Fugenvergusszustände</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 5: Durchschnittliche Cross-Validation-Genauigkeit je Modell</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 6: Durchschnittliche Modellgenauigkeiten bei „gut-schlecht“-Klassifizierung</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 7: Durchschnittliche Modellgenauigkeiten bei Klassifizierung gemäß Schadenskatalog</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 8: Statistische Untersuchung der Spurweitenausprägungen</i>	<i>27</i>

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Der Ausbau des schienengebundenen ÖPNV nimmt durch die Urbanisierung und energiepolitischer Trends zu. Damit steigt auch die zeitliche und örtliche Belastung auf die Straßenbahninfrastruktur. Angesichts starr-periodischer Instandhaltungsstrategien wird es daher schwerer werden, Sicherheit, Akzeptanz und Pünktlichkeit für die Fahrgäste und Anwohner zu gewährleisten. Für eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie bedarf es demnach neuer innovativer Überwachungsverfahren.

Das Projektziel ist die Evaluierung einer kontinuierlichen sowie automatisierten Zustandsüberwachung der Schienen mit einem laserbasierten Messsystem. Dessen Einsatz soll später im regulären Linienbetrieb an Straßenbahnen erfolgen. Im Fokus stehen die Erforschung geeigneter Messverfahren zur Erkennung und Erfassung von Lockerungen an Schienen (z. B. fehlende Vergussmassen) sowie kritische geometrische Abweichungen der Spurweite unter mechanischer Belastung durch das Fahrzeug selbst.

In den Forschungsarbeiten wird ein labortechnischer Prototyp mit Lasermesstechnik entwickelt und für den späteren mobilen Einsatz an der Straßenbahn spezifiziert. Zur Ansteuerung der Messtechnik sowie zur Übertragung und Datenmengenbeherrschung der hochabgetasteten 2D/3DProfilmesswerte wird ein Mockup zur Simulation des IT-Straßenbahnboardsystems erstellt. Zur zuverlässigen Erkennung der Lockerungen werden die in statischen Felduntersuchungen erfassten Schienenschäden mit KI analysiert.

Im Ergebnis des beantragten Projekts entsteht ein Prototyp, der das Potential besitzt Gleislockerungen durch die direkte Applikation an die Straßenbahn kontinuierlich zu erfassen. Letztlich stehen Datensätze zu den erfassten Schienenzuständen in der Mobilithek bereit. Das Projekt ist als Vorstudie vorgesehen und bildet die Grundlage für nachfolgende Forschungen zur mobilen Schienenzustandsüberwachung an Straßenbahnen mit Geo-Visualisierung für Gleismeterobjekte.

1.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt lief von 1. Januar 2023 bis zum 30. September 2024 (kostenneutrale Verlängerung von 1. Juli bis 30. September 2024 aufgrund von

Schwierigkeiten bei der Stellenbesetzung von wissenschaftlichem Personal zu Projektbeginn) und es erfolgte in Kooperation zwischen den Partnern BitCtrl Systems GmbH und HTWK Leipzig. Für den Anwendungsbezug und für beratende Tätigkeiten standen die Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB) GmbH (Straßenbahn) und die Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG als assoziierte Partner kostenneutral zur Verfügung. Das Projekt war in 6 Arbeitspakete (AP) und drei Meilensteine (M1 „Der Prototyp liegt vor“; M2 „Validierung des Messverfahrens“; M3 „Erfolgreiche Durchführung der Feldmessungen“) zur Projektfortschrittskontrolle eingeteilt (s. Abbildung 1).

Projektmonat		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Kalendermonat		J 23	F 23	M 23	A 23	M 23	J 23	J 23	A 23	S 23	O 23	N 23	D 23	J 24	F 24	M 24	A 24	M 24	J 24	J 24	A 24	S 24	
Arbeitspaket (AP)-Nr. und Titel	Partner																						
AP 0: Projektmanagement, Teilnahmen an Begleitforschung, mFUND-Veranstaltungen	HTWK	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
	BitCtrl	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
AP 1: Applikationsspezifische Präzisierung der Anforderungen	HTWK	0,98	0,98	0,49																			
	BitCtrl	0,24	0,24																				
	LVB	0,00																					
	µEpsilon	0,00																					
AP 2: Realisierung eines Laboraufbaus	HTWK			0,49	0,98	0,98	0,49	0,49															
	BitCtrl			0,24	0,24	0,24																	
AP 3: Inbetriebnahme und Test des Prototyps sowie Mockup der IT-Komponenten der Straßenbahn	HTWK						0,49	0,49	0,98	0,98													
	BitCtrl						0,24	0,24	0,24	0,24													
	µEpsilon						0,00	0,00															
AP 4: Felduntersuchungen für statische Messungen am Gleis und Datenanalyse	HTWK										0,98	0,98	0,98	0,98	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49				
	BitCtrl										0,24	0,24	0,24	0,24	0,12	0,12	0,12	0,06	0,06				
	LVB										0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
AP 5: Dokumentation, Machbarkeitsabschätzungen und mCloud	HTWK																				0,49	0,98	0,98
	BitCtrl																				0,24	0,24	0,24
	LVB																				0,00	0,00	0,00
								M1		M2					M3								

Abbildung 1: Balkenplan und Meilensteine im Forschungsprojekt "LaDeLok"

Zur Koordinierung des Projekts wurden Projekt- und Arbeitstreffen mit allen Partnern (Verbundprojektpartner und assoziierte Partner) durchgeführt. Ergänzend dazu fanden alle zwei bis vier Wochen ein regelmäßiger Serientermin (Dauer 30-45 Minuten) ausschließlich zwischen den Kooperationspartnern statt (s. Tabelle 1). Zur Dokumentation der abgearbeiteten Arbeitspakete und erreichten Meilensteine wurden die Ergebnisse der Arbeitsstände und die Entscheidungen der Projekttreffen protokollarisch festgehalten. Im Verlauf des Projekts wurde an den öffentlichen mFUND-Formaten und den Veranstaltungen der Begleitforschung mPACT (Konferenzen, Auftaktveranstaltungen, Informationsveranstaltungen, PulseTalk und Workshops) teilgenommen.

Tabelle 1: Auflistung der Projekt- und Arbeitstreffen

Lfd. Nr.	Beschreibung	Datum
1	Orientierungstreffen	16.01.2023
2	Serientermin	06.02.2023
3	Arbeitstreffen	13.02.2023
4	Kick-off	27.02.2023
5	Serientermin	03.04.2023
6	Arbeitstreffen	02.05.2023
7	Serientermin	15.05.2023
8	Arbeitstreffen	30.05.2023
9	Serientermin (Meilenstein M1 erklärt)	07.08.2023
10	Serientermin	04.09.2023
11	Serientermin	16.10.2023
12	Projekttreffen	13.11.2023
13	Serientermin (Meilenstein M2 erklärt)	27.11.2023
14	Serientermin	22.01.2024
15	Serientermin	18.03.2024
16	Serientermin (Meilenstein M3 erklärt)	15.04.2024
17	Serientermin	13.05.2024
18	Arbeitstreffen	14.05.2024
19	Arbeitstreffen	22.05.2024
20	Arbeitstreffen	29.07.2024
21	Projekttreffen	12.08.2024
22	Projekttreffen	30.09.2024
23	Abschlusstreffen	12.24

Im Projektverlauf wurden studentische Projekt- und Graduerungsarbeiten (Bachelor- und Masterarbeiten) mit unmittelbarem Projektbezug bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen (s. Tabelle 2). Besonders hervorzuheben ist die Masterarbeit von Herrn Lucas Nierobisch, die mit dem Johann-Andreas-Schubert-Preis in der Kategorie beste Masterarbeit in Marienberg am 5. August 2024 ausgezeichnet wurde [1]. Im Weiteren wurde am HTWK-internen Fotowettbewerb ([2]) und am „Deutschen Verkehrswendepreis“ ([3]) teilgenommen.

Tabelle 2: Studentische Projekt- und Graduiierungsarbeiten

Lfd.	Thema	Bearbeiter	Art	Datum
1	Mechanische Konstruktion einer Messapparatur für Lasertriangulationssensoren zur flexiblen Applikation an Straßenbahn und Gleis	Meik Dunker	Bachelorarbeit	2023
2	Entwicklung einer laserbasierten Messapparatur zur zuverlässigen Erfassung von Lockerungen am Straßenbahngleis	Lucas Nierobisch	Masterarbeit	2023
3	Automatisierte Klassifikation des Fugenverguss bei Straßenbahnschienen zur Schadensidentifikation	Elena Richter	Masterprojektarbeit	2024

1.3 Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

Die Zustandsdiagnose an Straßenbahnschienen beschränkt sich nicht nur auf halbjährliche zyklische visuelle Inspektionen durch einen Schienenläufer [4]. Mobile automatisierte und schwingungsbasierte Verfahren ([5], [6], [7]) oder halbautomatische Ultraschall- und Wirbelstromprüfungen [8] sind gut erforschte Bereiche, bei denen lediglich die Diagnose der Schienenkopftopologie mit kurzwelligen Schadenseigenschaften (Riffel, Wellen, Brüche etc.) als Ziel haben. Im Gegensatz dazu können langwellige und die Fahrdynamik maßgeblich beeinflussende Schienenfehler (Spurweitenänderungen/-fehler), die sich erst unter dem Einfluss der Straßenbahnlast zeigen, nicht erfasst oder vorhergesagt werden.

Bestehende Verfahren zur mobilen laseroptischen Erfassung der Spurweite existieren bisher nur für den Bahnsektor (Vignolschiene) mit einem separaten (Schleif-)Servicefahrzeug bei erneuertem Schienenkopf [8]. Für den Straßenbahnsektor existiert ein stark manuell geprägtes, nicht ergonomisches und auf Muskelkraft basierendes Verfahren namens „TramCloud“ [9] zur Analyse von kurzen Streckenabschnitten. Dieses Messsystem wird ausschließlich zur Erfassung des Schienenkopfprofils und der Spurweite genutzt. Die Erfassung der Spurweite, die unter Einwirkung der Straßenbahnmasse entsteht und ein Indikator für den Steifigkeitsverlust des Oberbaus ist, kann damit nicht durchgeführt werden. Selbst für den Einsatz des bestehenden

Verfahrens [9] an der Straßenbahn fehlt zusätzliche Sensorik zur Beherrschung des Einflusses des Sinuslaufs der Straßenbahn.

Ein wichtiges Indiz und zugleich die Ursache von Lockerungen sind fehlende oder eingefallenen Vergussmassen (Bitumen) links und rechts des Rillenschienenkopfes, die zur erhöhten Schienenerosion und damit zu Gleislockerungen (Spurweitenänderungen) führen. Darüber hinaus können sich lösende Vergussmassen auf dem Radkranz aufwickeln und auf den Schienenkopf gepresst werden, was nicht zuletzt in Karlsruhe [10] zum Stillstand des gesamten Fuhrparks führte. Bei nicht idealem Rad-Schiene-Kontakt kann die Entgleisung einer Straßenbahn eine weitere Folge sein. Der links- und rechtsseitige Zustand der Vergussmassen stellt somit eine wichtige Basis zur frühzeitigen Erkennung von lockeren Gleisstellen dar, an denen lastabhängige Spurweitenänderungen auftreten können.

mFUND-Projekte, die Schnittmengen mit dem Projekt „LaDeLok“ besaßen, analysierten ebenfalls Zustandsdaten von Schienen [11], [12]. Hierbei handelt es sich um akustische Daten und Umweltdaten (Körper- und Luftschall, Temperatur, Dehnung) am Zug selbst oder die durch den Rad-Schiene-Kontakt entstehen. In eigenen Vorarbeiten [7] wurde ein Diagnosesystem für Straßenbahnschienen entwickelt, das basierend auf Körperschall- und Umweltdaten den Schienenkörperzustand analysiert. Dem Gleismeterobjekt (besitzt spezifische ID) wird auf Basis von mobil erfassten Straßenbahn-Geo-Daten und einer auf KI-basierenden Messdatenanalyse je Überfahrt eine Zustandsinformation zugewiesen und in einer Kartenansicht (GIS-Daten) visualisiert. Eine zugehörige Instandhaltungsstrategie mittels rotierendem Schleifverfahren wurde entwickelt [7]. Thematisch daran anschließende Vorarbeiten geben einen tieferen Einblick in die Historie zur Zustandsüberwachung an Straßenbahnfahrzeugen und deren Infrastruktur [13–20].

Das Alleinstellungsmerkmal des hier beantragten Projekts ist das Potential die Spurweite zukünftig im Linienbetrieb unter realen Linienfahrzeuglasten kontaktlos zu erfassen und Lockerungen durch die Detektion fehlender Vergussmassen frühzeitig zu erkennen. Damit werden die bisherigen Forschungsarbeiten und der Stand der Technik um weitere Messmethoden sowie detektier- und vorhersagbarer Schäden (lockerer Gleisstellen) erweitert.

Im weiteren Sinne konnten Synergieeffekte mit den mFUND-Projekte „AIFRI“ [12] und „DEEB-INFRA“ [21] identifiziert werden. Unter Kombination der Erkenntnisse aus den Messungen mit dem Messsystem „AIFRI“ und dem hier entwickelten Messsystem könnten mögliche Zusammenhänge aus der Schienenschadenstiefe und einer vorhandenen Gleislockerung bzgl. möglicher Erscheinungsursachen analysiert werden. Mögliche Synergien mit „DEEB-INFRA“ bestünden in der Analyse des Schadensfortschritts von Gleislockerungen in Abhängigkeit der variablen Fahrzeuglasten.

Das Projekt „LaDeLok“ besitzt, bspw. gegenüber dem Projekt „SPRaDA“ [22], in dem die Gleislage mittels Smart Phone bewertet wird, den Mehrwert fehlende Vergussmassen zu identifizieren. Fehlende Vergussmassen können schließlich die Ursache für die Entwicklung eines Gleislagefehlers (erkennbar durch Lockerungen) sein.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Projekt „LaDeLok“ ist bereits im Kapitel 1.2 beschrieben und betrifft die Kooperationspartner, die assoziierten Projektpartner, die studentisch Mitarbeitenden sowie der Austausch mit Interessenten innerhalb der beschriebenen mFUND-Formate (Begleitforschung etc.). Darüber hinaus fand bilateraler Austausch mit Dritten im Rahmen von Arbeitstreffen und Messeauftritten/-besuchen statt.

Die nähere Zusammenarbeit mit den assoziierten Partnern innerhalb des Projekts bestand insbesondere im fachlichen Austausch sowie in der kostenfreien Nutzung der Straßenbahninfrastruktur der LVB, zur Erfassung der notwendigen Messdaten, und in der kostenfreien Nutzung von (zur späteren konkreten Applikation ähnlichen) 2D-Laserprofilsensoren von μ Epsilon zur Verifikation der wissenschaftlichen Fragestellung zu Projektbeginn.

Ohne die sehr erfolgreiche Zusammenarbeit der Kooperationspartner mit den assoziierten Projektpartnern wären die erzielten Ergebnisse nicht möglich gewesen, weshalb die Kooperationspartner den assoziierten Partnern sehr dankbar sind.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

2.1.1 Messgeräteentwicklung

Der erste Schritt der Geräteentwicklung bestand in der Analyse der Anforderungen. Die Anforderungen, die an die Gerätekonstruktion bestehen, unterteilen sich in hardwareseitige- und softwareseitige Anforderungen. Hierbei sind die hardwaretechnischen Anforderungen wie folgt eingeteilt: Rahmenkonstruktion, Sensoren, Rechentechnik und Datenschnittstellen. Die softwaretechnischen Anforderungen unterteilen sich in Programmierung, Programm, Speicherkonzept und Sensoren. Die Anforderungen sind so festgelegt und gewählt, dass sie den unterschiedlichen Use-Cases gerecht werden. Hierbei handelt es sich um 3 Anwendungsbereiche: 1. statische Messungen im Labor (soft- und hardwareparametervariables Messgerät), 2. quasistatische Messungen im Straßenbahngleis (portables Handmessgerät), 3. dynamische bzw. mobile Messungen an der fahrenden Straßenbahn (festverbautes, hochautomatisiertes Analysegerät; findet im Projekt „LaDeLok“ nicht statt). Das portable Hand-Messgerät ist ebenso für die Applikation an der Straßenbahn geeignet (Anwendungsbereich übergreifend identische Messhöhen zwischen Lasersensorunterkante und Schienenkopf). Diese Haupteigenschaft erlaubt die Verwendung der in diesem Projekt erfassten und gelabelten Datensätze als Lerndaten für (Klassifikations-)Modelle, die in einem weiteren Verwertungsschritt (bspw. innerhalb eines FuE-Projekts der mFUND Förderlinie 2) die unbekanntens Datensätze (welche während der mobilen Messungen erfasst werden) klassifiziert. Die Konstruktion des Geräte Rahmens erfolgte über ein parametrisches Konzept, sodass eine Anpassung an andere Spurweiten über das Projekt „LaDeLok“ hinaus grundsätzlich möglich ist. Über das Prinzip der methodischen Konstruktion wurden verschiedene Lösungsvarianten entwickelt, wobei die vielversprechendste Lösungsvariante weiterverfolgt wurde (s. Abbildung 2).

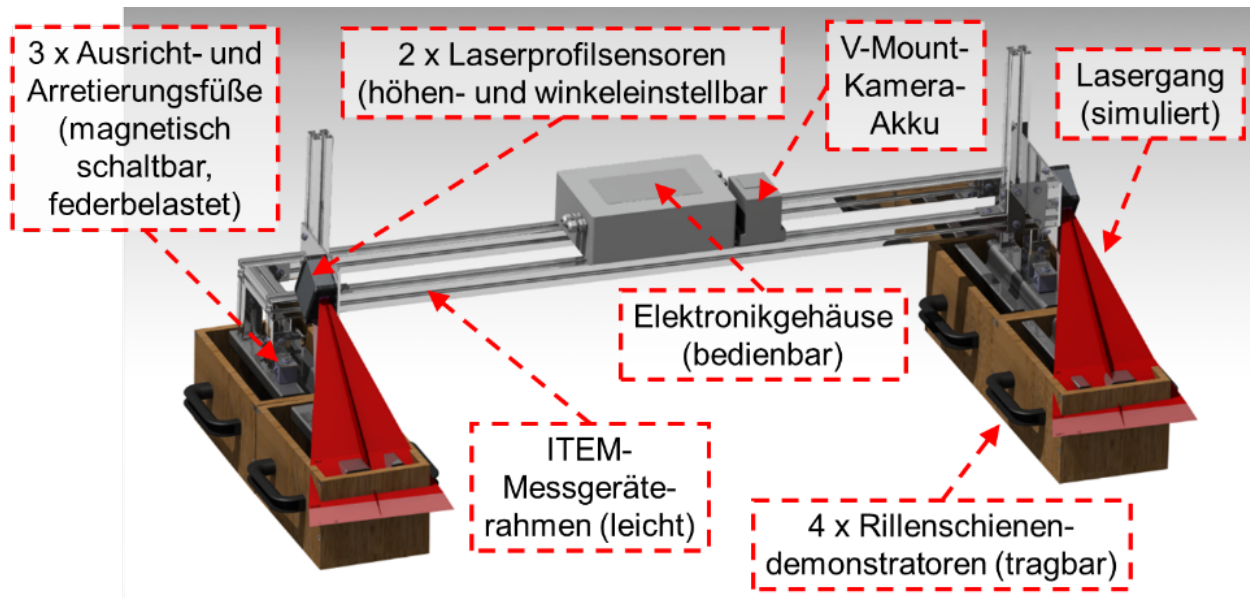


Abbildung 2: CAD-Aufbau des Laboraufbaus

Die Messgerätekonfiguration (s. Abbildung 3) sieht ein staub- und spritzwassergeschütztes Kunststoff-Elektronikgehäuse auf Basis einer DIN-Hutschienenmontage vor. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt über einen Kamera-Akku (Ein/Aus Messgerät). Das Spannungsniveau des Akkus beträgt 15 V. Er versorgt die Laserprofilsensoren und zwei Spannungswandler (Ausgangsspannung 5 V). Das Messgerät besitzt 2 miniaturisierte PCs (Raspberry PI). Das „Mess-PI“ ist für die Ansteuerung der Laser-Profilsensoren integriert. Das „API-PI“ dient der Gerätebedienung (für die Anwendungsbereiche 1 und 2). Daran ist ein Touch-Bildschirm gekoppelt. Das „API-PI“ wird für den Anwendungsbereich 3 durch den straßenbahninternen LRV-DataHub (zertifizierter ARM-basierter Bordrechner für den Einsatz in Straßenbahnen) ersetzt. Alle Mini-PCs und Sensoren sind über ein Netzwerk mit einem Switch verbunden. Dieser besitzt einen weiteren freien Port für die softwaretechnische Gerätewartung. Die Messdatenspeicherung erfolgt über eine interne Micro-SSD, welche von den Mini-PC-Datenspeichern entkoppelt vorliegt. Für einen einheitlichen und aktuellen Zeitstempel der Messungen wird eine Real-Time-Clock (RTC) verwendet.

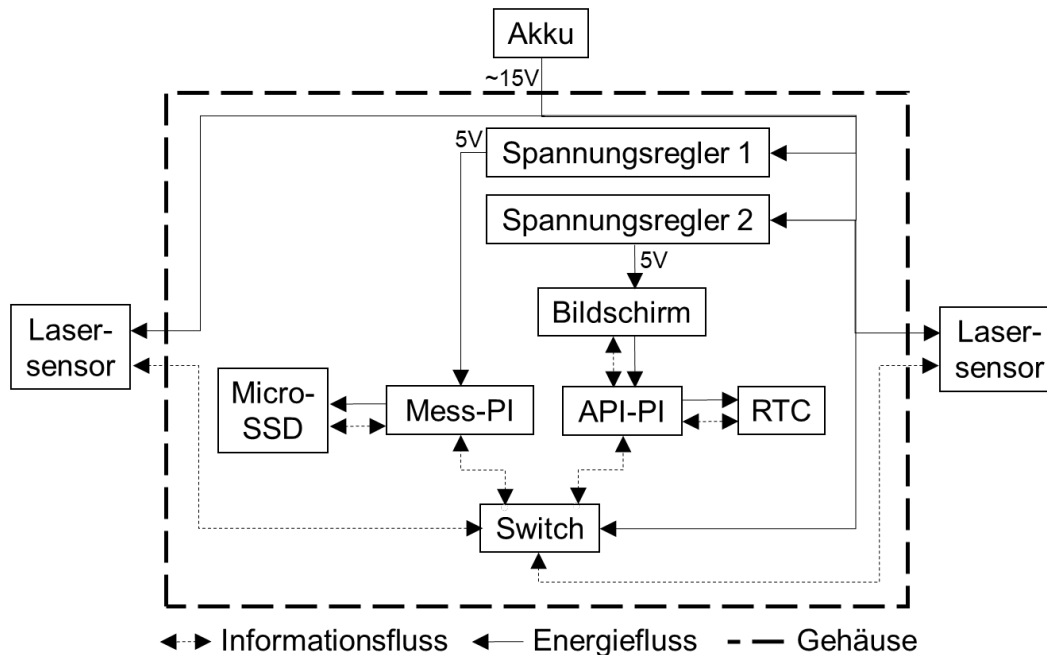


Abbildung 3: Blockschaltbild zur Messgerätekonfiguration

2.1.2 Laboraufbau, Inbetriebnahme und Laboruntersuchungen

Für den Anwendungsbereich 1 wurde ein Laboraufbau umgesetzt (s. Abbildung 4). Der Aufbau besitzt vier tragbare Straßenbahnschienen-Demonstratoren. In den tragbaren Kisten befinden sich 4 Schienenstücke (je 300 mm lang; kostenlose Überlassung des assoziierten Partners LVB). Bei der eingebrachten Vergussmasse handelt es sich um kostenlose Materialproben der Firma Dortmunder Gußasphalt GmbH Co. KG. Die verwendeten Materialien sind BIGUMA®- BAB 20 ZTV: „ZTV“ und BIGUMA®- BAB 20 EL: „EL“. Als zusätzliches Vergleichsobjekt wurde ein Schienendemonstrator mit bituminöser Spachtelmasse ausgestrichen.

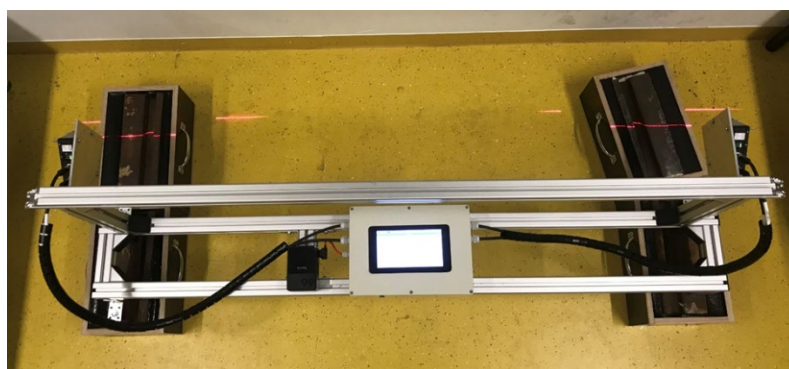


Abbildung 4: Umgesetzter Laboraufbau

Die Bedienung des Handgeräts erfolgt über das Touch-Display und eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) (s. Abbildung 5). Für den Anwendungsbereich 3 ist vorgesehen, dass die Bedienung des Geräts automatisiert über einen bereits im Projekt „LaDeLok“ als DAKO (Datenkonzentrator) pilotierten und weitersendeten LRV-DataHub über eine neue API via TCP/IP in Kopplung erfolgen wird.

Die GUI ist in eine Statusanzeige und 3 Tabs eingeteilt: Home-Tab (Einrichtung der Verbindung mit den Sensoren und Shutdown des Messgeräts), Setup-Tab (Anpassung von Sensoreinstellungen, Durchführung einer Testmessung und Anzeige von Test-Plots des linken und rechten Schienenprofils) und Measurement-Tab (Durchführung der Messung und Initiierung des Messvorgangs).

Gerätebedienung über API und grafische Benutzeroberfläche (GUI):

- Strukturierung:
 1. 3 Tabs (Home, Setup und Measurement)
 2. Konsole für Statusupdates
- Beispiel „Setup-Tab“
 3. Anpassungen von Sensoreinstellungen
 4. Test-Button für Test-Plots
 5. Test-Plot von Profilen



Abbildung 5: Setup-Tab der graphischen Benutzeroberfläche des API-Pi-Programms

Zur Findung geeigneter Einstellungen und zur weiteren Untersuchung des Mess- und Funktionsprinzips wurden Labormessungen durchgeführt. Hierbei wurde in drei Messszenarien unterschieden. Das Messszenario 1 betrachtete die „Präzision und Wiederholgenauigkeit“ der gesamten Messapparatur, indem die Höheninformation von geometrisch bestimmten Messobjekten erfasst wurden. Bei den Messobjekten handelte es sich um drei ebene Parallelendmaße (Ist-Maße: 60/80/100 mm) und einem brünierten Lagerbock (Ist-Maß: 24,97 mm) (s. Abbildung 6 und Abbildung 7).

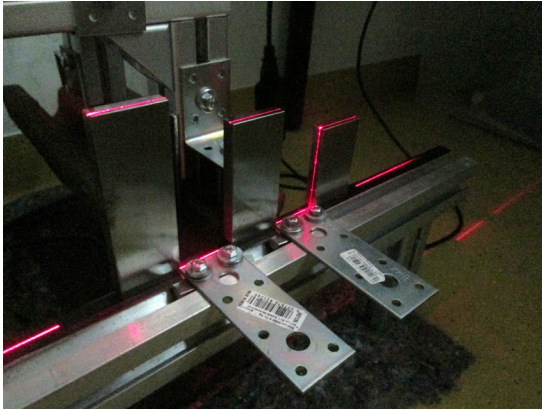


Abbildung 6: Szenario 1: Versuchsaufbau zur Präzision und Wiederholgenauigkeit (Parallelendmaß)

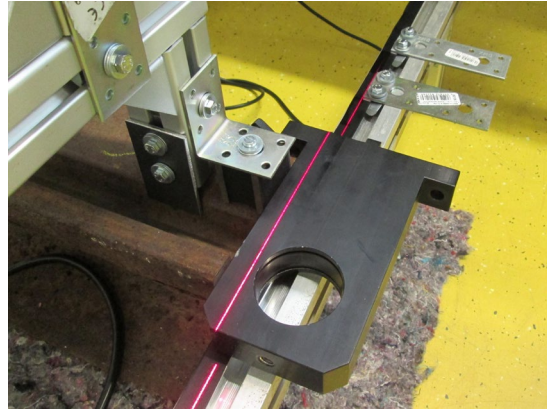


Abbildung 7: Szenario 1: Versuchsaufbau zur Präzision und Wiederholgenauigkeit (Lagerbock brünier)

Im Messszenario 2 „Winkelposition“ wurde unter Variation des Einstrahlungswinkels des Sensors die Messergebnisse bzgl. einer Rücktransformation untersucht bzw. der Winkeleinfluss auf die Messkoordinaten. Das Messobjekt ist ein Schienendemonstrator (mit Vergussmasse). Die Messdurchführung und der Aufbau sind der Abbildung 8 und der Abbildung 9 zu entnehmen.



Abbildung 8: Szenario 2: Einstrahlungen des Lasers bei 60°, 45° und 30°

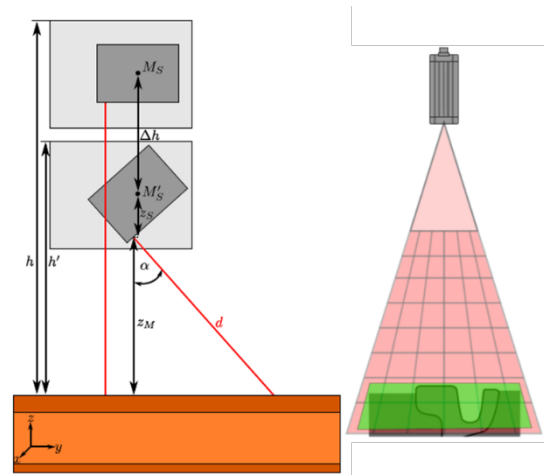


Abbildung 9: Szenario 2: re. Messbereich und ROI, li. Sensorwinkel- und Höheneinstellungen

Das Messszenario 3 untersucht den Einfluss von „externen Lichtquellen“. Hierbei wurden wieder Messungen am Schienendemonstrator vorgenommen: Im Labor bzw. indoor (künstliches Licht) und outdoor unter Sonneneinstrahlung und bei künstlicher Verschattung unter Verwendung eines lichtundurchlässigen Sonnenschirms (keine direkte Einstrahlung des Sonnenlichts). Der Versuchsaufbau ist der Abbildung 10 zu entnehmen.

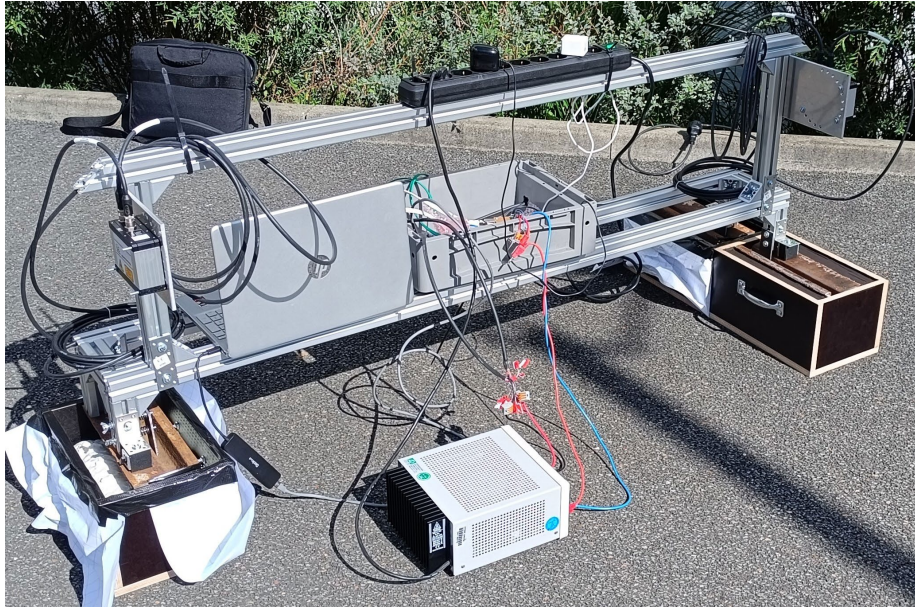


Abbildung 10: Szenario 3: Versuchsaufbau bei den Outdoor-Messungen (frühe Phase des Prototyps)

Im Folgenden werden die drei beschriebenen Messszenarien analysiert und ausgewertet. Im Messszenario 1 zeigten die Parallelendmaße aufgrund des reflektierenden Untergrunds eine geringe Präzision mit Abweichungen von ca. 7 bis 8 mm, aber eine hohe Wiederholgenauigkeit, was für einen systematischen Einfluss spricht (s. Anhang Abbildung 10 für das Parallelendmaß mit 60 mm Höhe). Bei reduzierter Reflexion des Untergrunds (brüniertes Lagerbock) zeigte sich eine deutlich verbesserte Präzision mit Abweichungen kleiner als 0,5 mm und eine hohe Wiederholgenauigkeit (s. Abbildung 11 für den brünierten Lagerbock). Ähnliche Ergebnisse konnten bei Parallelendmaßen mit reduzierter Reflexion des Untergrunds nachgewiesen werden.

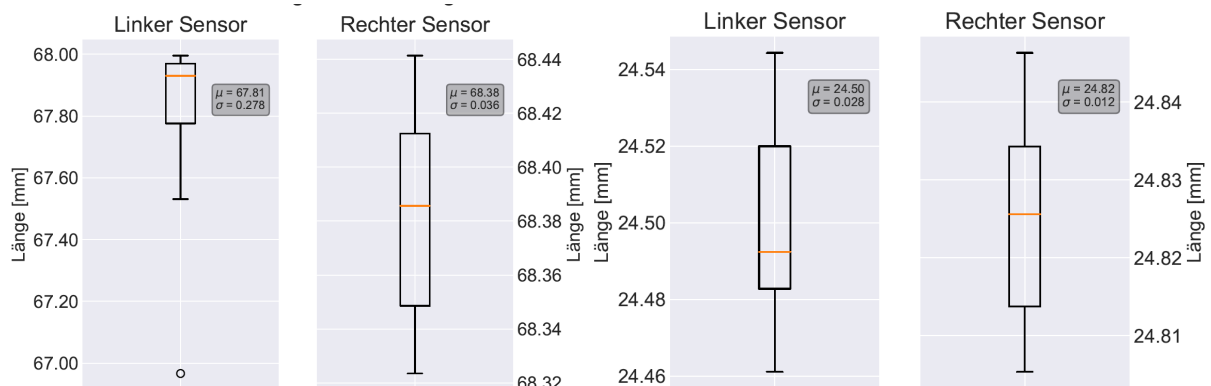


Abbildung 11: Szenario 1: Boxplots li. Parallelendmaß (H=60mm), re. Lagerbock (H=24,97mm)

Im Messszenario 2 wurden die gemessenen Querschnitte (von Schiene und Vergussmasse) bei verschiedenen Einstrahlungswinkeln untersucht. Mit der Zunahme des Einstrahlungswinkels fand eine Streckung des Profils in z-Richtung statt (s. Abbildung 12 und Abbildung 13). Die Streckung ist das Resultat aus dem verlängerten Messabstand d (s. Abbildung 9), wenn die Messhöhe h nicht korrigiert wird (Korrektur auf h'). Weiterhin ist ein „Rechts-Drift“ bei steigenden Einbauwinkeln des Sensors zu erkennen, was das Resultat von ungenau zueinander ausgerichteten Schienendemonstratoren (hinterer und vorderer Demonstrator) ist. Dieser Effekt hat auf die quasistatischen Messungen im Gleis und die mobilen Messungen keinen Einfluss, da er das Resultat aus dem Versuchsaufbau ist.

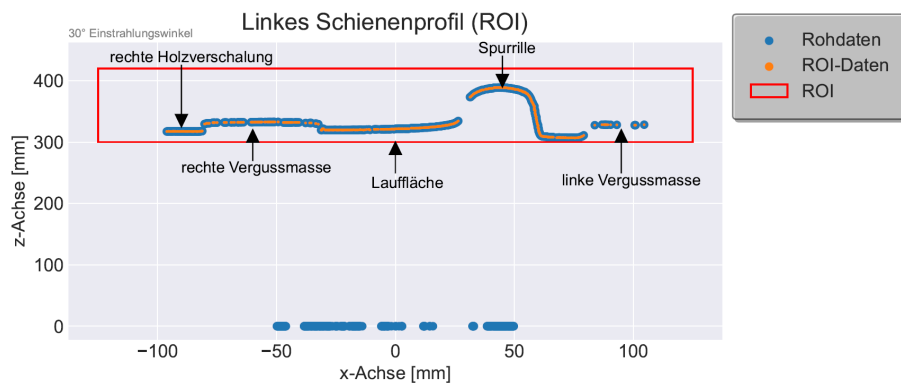


Abbildung 12: Szenario 2: Beispielmessung für 30°

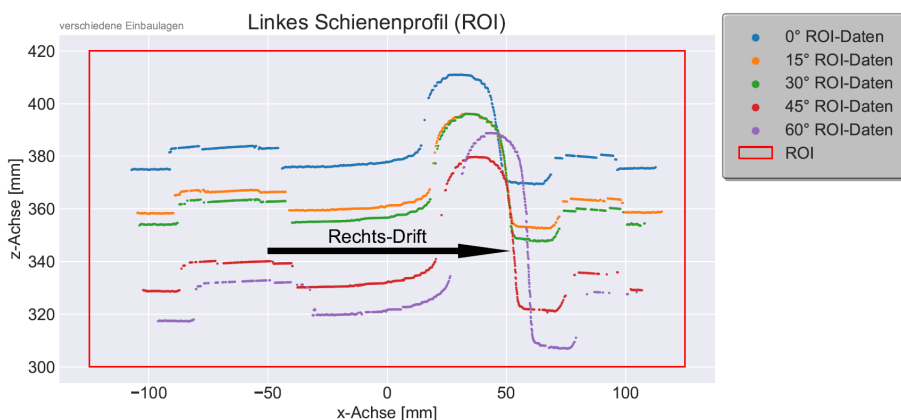


Abbildung 13: Szenario 2: Vergleich der Winkeleinstellungen anhand von je einer Bsp.-messung

Aus den Messungen des Messszenarios 3 lassen sich u. a Aussagen zu den Geräte-/Sensorparametern generieren. Die Messungen bei direkter Sonneneinstrahlung wurden bei einer Einstrahlung von 500-600 W/m² am Messtag durchgeführt. Grundsätzlich fand eine starke Streuung des Laserlichts statt. Kein vollständiges Profil wurde bei den

Sensoreinstellungen „reduzierte Laserhelligkeit“ und „minimale Sensitivität“ erreicht. Das beste Profil wurde bei „volle Laserhelligkeit“ und „minimale Sensitivität“ erreicht, vgl. Abbildung 14. Höhere Sensitivität führt zur Überbelichtung.

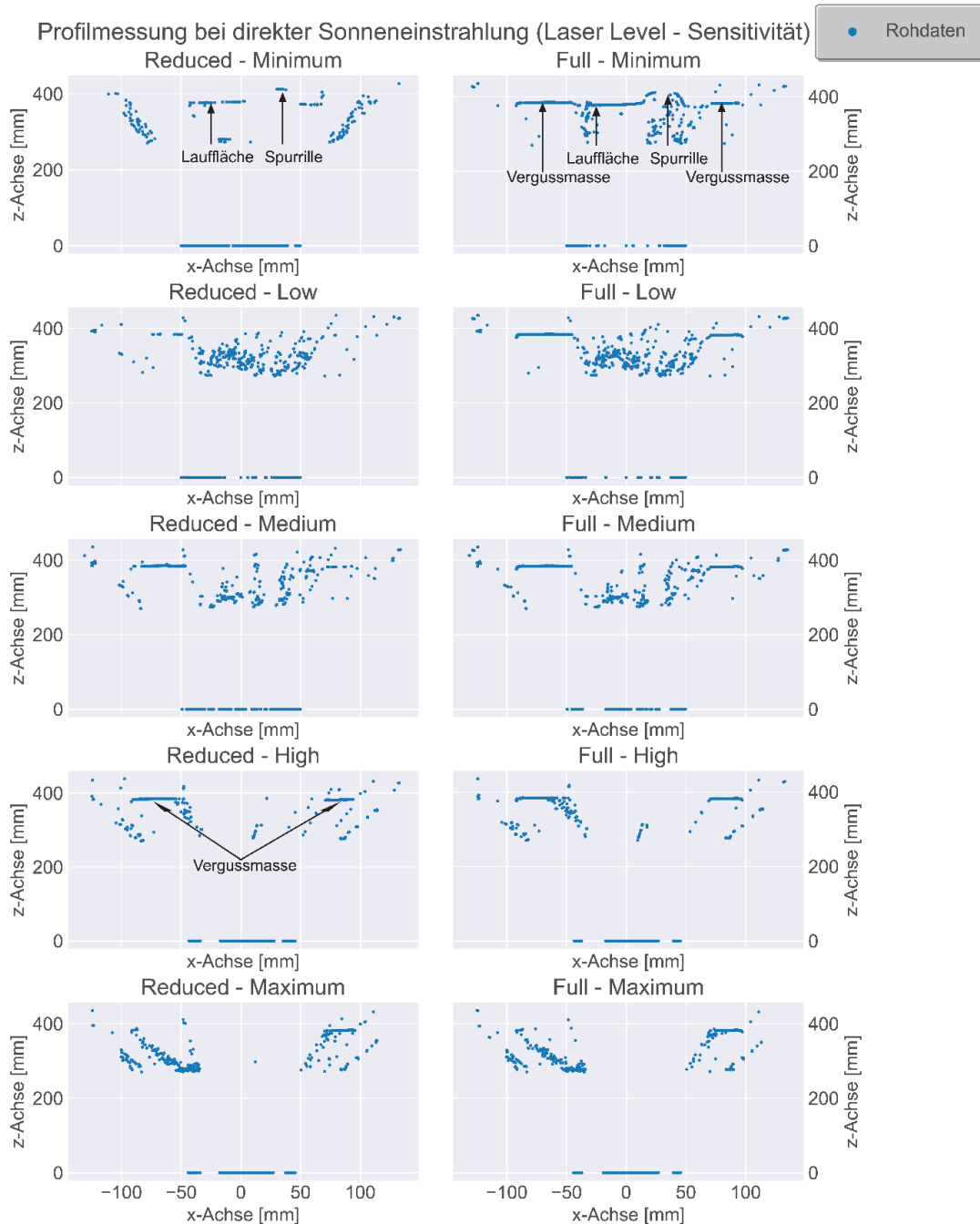


Abbildung 14: Szenario 3: Profil-Messungen bei direkter Sonneneinstrahlung

2.1.3 Felduntersuchungen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden 3 Messkampagnen (MK) im Sperrschatten von baulichen Maßnahmen im Leipziger Straßenbahngleis durchgeführt. Hierfür ist es zwingend erforderlich, dass es nicht regnet und die Temperatur nicht unter 5 Grad C liegt. Besonders anzumerken ist der ungeplante Einsatz bei 10-minütigen Nieselregen während MK 3. Ein Ausfall der Messtechnik war unter den rauen Umgebungsbedingungen nicht zu beobachten. Eine Übersicht zu den durchgeführten Messkampagnen ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Insgesamt wurden 2944 Profildatensätze erfasst (linke und rechte Schiene).

Tabelle 3: Übersicht zu den durchgeführten Messkampagnen

Messkampagnen Nr.	Datum	Messpunkteanzahl	Profildatensatzanzahl (li+re.)
MK 1	19.02. 24	4 MP	2 x 93
MK 2	27.02.24	8 MP	2 x 665
MK 3	14.06.24	39 MP	2 x 714

Der Messaufbau und die verwendete Gerätekonfiguration (Messhöhen und Sensorrotationswinkel) sind der Abbildung 15 zu entnehmen. Grundsätzlich wird das Messsystem in Fahrtrichtung ausgerichtet, um das linke und rechte Schienenprofil eindeutig zu benennen. Zusätzlich zu den Laserprofilsensordaten werden das Datum und die Uhrzeit, die Geo-Position des Messgeräts (GPS-Daten) und Bilddaten zu jedem Messpunkt erfasst. Die Bilddaten werden so erfasst, dass diese als eigene Metadaten ebenfalls Geo-Daten (GPS) besitzen. Über die Metadaten Datum, Uhrzeit und Geo-Daten der Bild- und Profildaten wurden diese im Postprozess einander zugeordnet. Parallel zur Datenerfassung wurde der Vergussmassenzustand an jedem Messpunkt festgehalten, woraus im Postprozess ein Label für die spätere überwachte Klassifikationsaufgabe erstellt wurde. In Abbildung 16 ist ein beispielhafter Messpunkt aus MK 2 (zudem auch in MK 3, wobei hier die einzelnen Profilschnitte in Messpunkte unterteilt wurden) dargestellt, an dem mehrere Profile hintereinander erfasst wurden. Insbesondere an diesem Messszenario lassen sich die späteren Messdaten-Analysetätigkeiten simulieren, die notwendig sind, um mobil (an der Straßenbahn) erfasste Messdaten auszuwerten.



Abbildung 15: Spezifischer Messpunkt zur Erfassung der 2D-Profile (MK 3)



Abbildung 16: 100 cm langes 3D-Profil mit einem 2D-Profilabstand von 5 cm (MK 2 und 3)

Im Rahmen des Projekts wurde ein Schadenskatalog für bituminösen Fugenverguss erstellt. Er beinhaltet eine Auflistung der analysierten Schäden, eine Beschreibung dieser sowie eine Bilddokumentation. Die Kooperationspartner haben vier Zustände (eine Normalklasse und drei Fehlerklassen) definiert (vgl. Tabelle 4)

Tabelle 4: Klassifizierung und Definition der Fugenvergusszustände

Klasse	Benennung	Erläuterung
1	„Offen“ oder „Eingefallen“	Fugenverguss nicht vorhanden oder abgesenkt
2	„Spalt“ oder „Abgelöst“	schmaler, tiefer Bereich im Fugenverguss bzw. Ablösung des Fugenverguss von der Schiene
3	„Überquellend“ oder „nicht eindeutiger Fehler“	Fugenverguss (oder Asphalt) reicht über die Soll-Vergusshöhe hinaus
4	„in Ordnung (i.O.)“	keine Fehlstellen; Fugenverguss reicht bis zur Soll-Höhe (Bemessung: Schienen- und Spurrillenkopf)

Eine ausschließliche „gut-schlecht“-Klassifizierung (binäre Klassifikation) besitzt das Potenzial durch eine vermeintlich weniger komplexe Klassifizierung auffällige Gleisabschnitte zügig und sicher zu identifizieren. Um jedoch die Höhe des Schadenspotenzials und den Umfang von – im Idealfall automatisiert abgeleiteten – Wartungsarbeiten besser abzuschätzen, ist eine Mehrklassen-Klassifizierung zu priorisieren.

2.1.4 Datenanalyse

2.1.4.1 Klassifikation des Fugenvergusses

Für die Entwicklung einer automatisierten Klassifikation des Fugenvergusszustands wird das Konzept aus Abbildung 17 verfolgt.

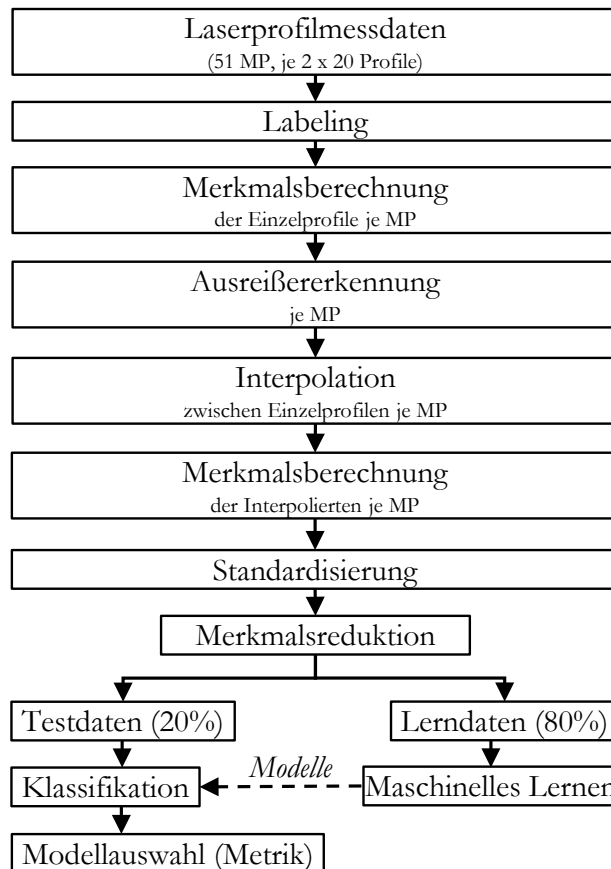


Abbildung 17: Konzept zur automatischen Klassifikation von Fugenvergusschäden

Um schlussendlich eine überwachte Klassifikation durchzuführen werden die vorliegenden *Laserprofilmessdaten* zunächst um ein Label (*Labeling*) ergänzt. Die Datenvorverarbeitung beginnt mit der *Merkmalsberechnung* (merkmalsbasierte Klassifikation) für jedes Profil. Bereits mit diesem Schritt reduziert sich die Datenmenge für ein Profil von 1024 Datenpunkte auf lediglich 16 spezifische Merkmale, was die Klassifikationsaufgabe bzgl. rechentechnischer Ressourcen deutlich vereinfacht. An einem Messpunkt (visuell betrachtet handelt es sich um einen Schnitt durch das Gleis) stehen je linker und rechter Schiene i. d. R. 20 Profile zur Verfügung (s. Abbildung 18).

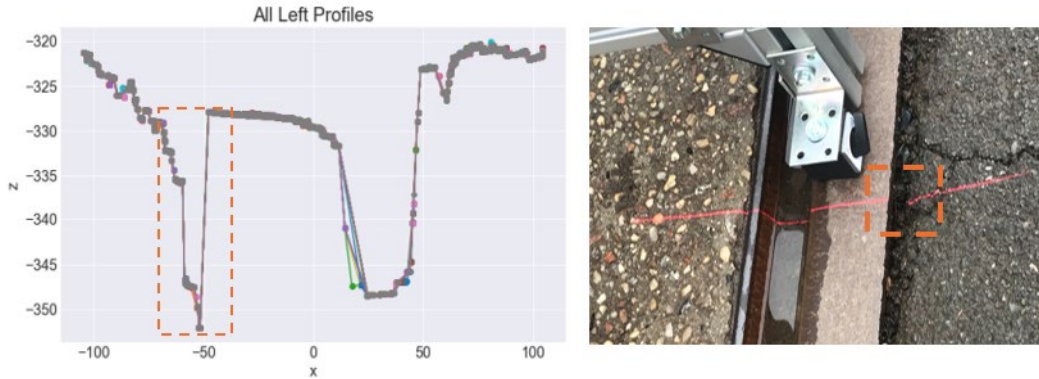


Abbildung 18: 20 Profile der li. Schiene des MP 1 aus MK 1 (li.) und Messsituation vor Ort (re.)

Profile, die sich von den anderen Profilen stark unterscheiden, werden über eine multivariate *Ausreißererkennung* eliminiert. Die verbleibenden Profile werden über eine *Interpolation* zusammengefasst (s. Abbildung 19). Auf Basis des interpolierten Profils werden in einer neuerlichen *Merkmalsberechnung* die gleichen 16 Merkmale berechnet. Auf dieser Basis bildet jedes interpolierte Profil ein Objekt, das durch die 16 Merkmale beschrieben wird. Je Messpunkt existieren demnach zwei Objekte – jeweils eines für die linke und rechte Schiene.

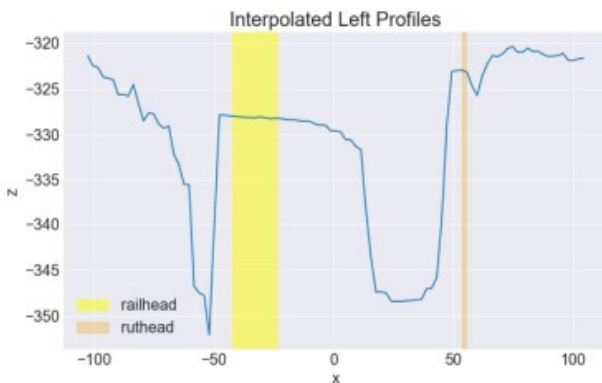


Abbildung 19: Interpoliertes Profil aus 20 Profilen der li. Schiene des MP 1 aus der MK 1

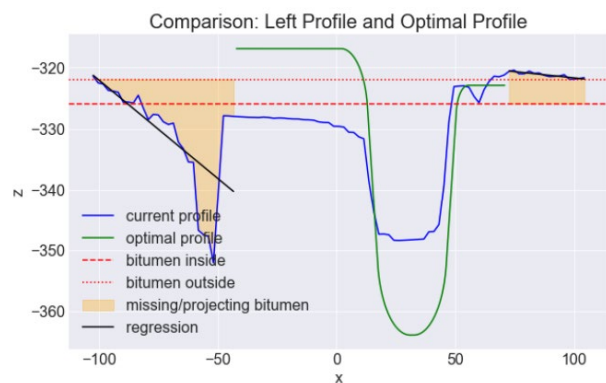


Abbildung 20: Profilvergleich des Profils der li. Schiene des MP 1 aus der MK 1 mit dem Sollprofil

Die Basis zur Berechnung der spezifischen Merkmale (bspw. Abstände und Flächen zwischen Ist- und Soll-Profil in x- und z-Richtung) bildet die Detektion des Schienenkopfs und des Spurrillenkopfs. Für jedes dieser geometrischen Bestandteile der Schiene gleiten zwei Fenster mit jeweils unterschiedlicher Breite über ein bestimmtes Intervall („Region Of Interest“) der Profilmessdaten (in x-Richtung). Da der Schienenkopf und der Spurrillenkopf gegenüber den anderen Profilschnitten annähernd horizontal und eben verlaufen, wird ihre Position in den Profilmessdaten durch die minimale Varianz der

Daten (vertikale bzw. z-Richtung) detektiert (vgl. Abbildung 19, gelbe und orangefarbene Bereiche). Mit dieser Information und ausgehend davon werden die übrigen Profildbereiche (bspw. Bereiche des Fugenverguss) identifiziert und durch Merkmale beschrieben.

Das gemessene Profil der Schiene und des Fugenverguss wird am Spurrillenkopf mit einem Soll-Profil des Schienenquerschnitts ausgerichtet. In Abbildung 20 ist das Ergebnis der Ausrichtung abgebildet. Beim gemessenen Profil handelt es sich um eine ältere Schiene. Einerseits ist diese Eigenschaft am Höhenunterschied zwischen Soll- und Ist-Schienenkopf erkennbar und andererseits an den eingefallenen Vergussmassen im linken Bildbereich. Eine Besonderheit zeigt sich im Grund der Spurrille des Ist-Profiles, wobei sich dort Wasser ansammelte. Die Notwendigkeit der richtigen Profilausrichtung wird durch die hohe Anzahl von Einflussfaktoren auf die zu analysierende Geometrie des Ist-Profiles umso wichtiger. Die Informationen über den Ort des Schienenkopfs ist relevant, wenn die Spurweite berechnet werden soll. Sie befindet sich 14 mm unterhalb des Schienenkopfs. Die Verschränkung der beiden Profile (links, rechts) erfolgt über den bekannten Abstand zwischen den Koordinatensystemen der beiden Laserprofilssensoren (s. Abbildung 21).

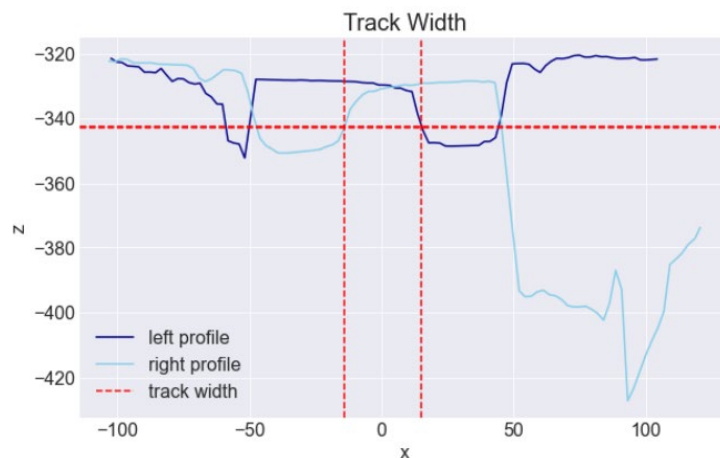


Abbildung 21: Spurweite des MP1 der MK1

Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Merkmale eines Objekts werden diese einer *Standardisierung* unterzogen. Der Grund hierfür besteht im Vorliegen von unterschiedlichen Skalenlängen der Merkmale.

Der Schritt der *Merkmalsreduktion* ist aus unterschiedlichen Gesichtspunkten notwendig und wird durch statistische Analysen (bspw. Hauptkomponentenanalyse) erreicht. Einerseits wird die Anzahl von redundanten Merkmalen verringert und zu mehr oder

weniger unkorrelierten Merkmalen zusammengefasst. Die Effekte daraus spiegeln sich in drei wesentlichen Eigenschaften wieder: erstens tritt durch die Reduktion der Redundanz keine Verzerrung in der späteren Erfolgsrate des Klassifikators auf, zweitens lassen sich in ihrer Anzahl reduzierte Merkmale optisch besser für weitere statistische Betrachtungen visualisieren und drittens können erhebliche Ressourcen beim Finden der Hyperparameter eines spezifischen ML-Algorithmus (bspw. Rechenzeit und -energie) eingespart werden.

Zum Aufbau und Test der zu entwickelnden Klassifikatoren wird der Datenvorrat in zwei Untermengen im Verhältnis von 80/20 aufgeteilt. Die *Lerndaten* dienen dem Anlernen von Klassifikationsmodellen. Hierfür werden Algorithmen des *Maschinellen Lernens* verwendet. Die betrachteten Algorithmen waren „Decision Tree“, „Random Forest“, „K-Nearest Neighbors“, „MLP“ und „GradientBoosting“. Um die richtige Ausprägung der Modell-Hyperparameter zu finden, werden sie miteinander kombiniert. Aus der optimalen Kombination der Hyperparameter resultiert das beste Klassifikationsergebnis. Für die Suchaufgabe wird „GridSearchCV“ des Python-Pakets „Scikit-learn model selection“ angewendet. Zur Beurteilung wird die Cross-Validation-Genauigkeiten herangezogen, wobei ihr Wert mindestens 80 % betragen sollte (s. Tabelle 5). „Decision Tree“, „Random Forest“ und „MLP“ erzielen die höchsten durchschnittlichen Cross-Validation-Genauigkeiten und stehen im Fokus der weiteren Betrachtungen.

Tabelle 5: Durchschnittliche Cross-Validation-Genauigkeit je Modell

Modell	Durchschnittliche Cross-Validation-Genauigkeit
Decision Tree	83,43%
Random Forest	84,57%
K-Nearest-Neighbors	80,86%
MLP	82,86%
Gradient Boosting	82,00%

Die Klassifikation der *Testdaten* beurteilt die Leistungsfähigkeit der Klassifikations-*Modelle*, wobei diese Daten den Klassifikatoren unbekannt sind und diesen zuvor nicht präsentiert wurden. Schließlich ist es damit möglich die Klassifikationsmodelle von unterschiedlichen Algorithmen des Maschinellen Lernens über eine *Metrik* miteinander zu vergleichen. Eine Metrik ist die Modellgenauigkeit. Sie entspricht dem Prozentsatz der

Testdaten, die korrekt klassifiziert wurden. Schließlich findet eine *Modellauswahl* statt, wobei dieses gewählte Modell die später vorliegenden und vom Zustand her unbekanntes Laserprofilmessdaten sicher klassifizieren soll.

Tabelle 6: Durchschnittliche Modellgenauigkeiten bei „gut-schlecht“-Klassifizierung

Modell	Durchschnittliche Modellgenauigkeit
Decision Tree	92,86%
Random Forest	95,00%
MLP	96,43%

Im nächsten Schritt der Modellbewertung wurden die Modellgenauigkeiten bei binärer „gut-schlecht“-Klassifizierung verglichen. Eine korrekte Unterscheidung von „gut“-Objekten und „schlecht“-Objekten ist von entscheidender Bedeutung. Wird ein „schlecht“-Objekt fälschlicherweise als „gut“ klassifiziert, werden keine Maßnahmen zur Behebung des Schadens eingeleitet, was zu Ausfällen führen kann. Obwohl alle verbliebenen Modelle die Anforderungen an die Modellgenauigkeit bei der binären „gut-schlecht“-Klassifizierung erfüllen, wird „Decision Tree“ in dieser Bewertungsrunde ausgeschlossen, da „Random Forest“ und „MLP“ bessere Leistungen erzielen. (Tabelle 7)

Tabelle 7: Durchschnittliche Modellgenauigkeiten bei Klassifizierung gemäß Schadens katalog

Modell	Durchschnittliche Modellgenauigkeit
Random Forest	89,29%
MLP	93,57%

Die zwei verbliebenen Modelle werden folgend anhand der durchschnittlichen Modellgenauigkeit bei der Klassifizierung gemäß Fehlerkatalog bewertet, denn eine reine „gut-schlecht“-Klassifizierung ist nicht ausreichend. Beide Modelle verfügen über eine durchschnittliche Modellgenauigkeit von über 80 % und erfüllen damit die Anforderungen. Der „MLP“ wird als Vorzugsmodell gewählt, da er die höchste durchschnittliche Modellgenauigkeit von 93,57 % liefert.

2.1.4.2 Spurweitenuntersuchungen

Das Ziel der Spurweitenuntersuchungen soll den Zusammenhang zwischen der Spurweite und dem Zustand des bituminösen Fugenverguss zeigen. Hierfür werden die in statischen Feldmessungen erfassten Daten dahingehend analysiert.

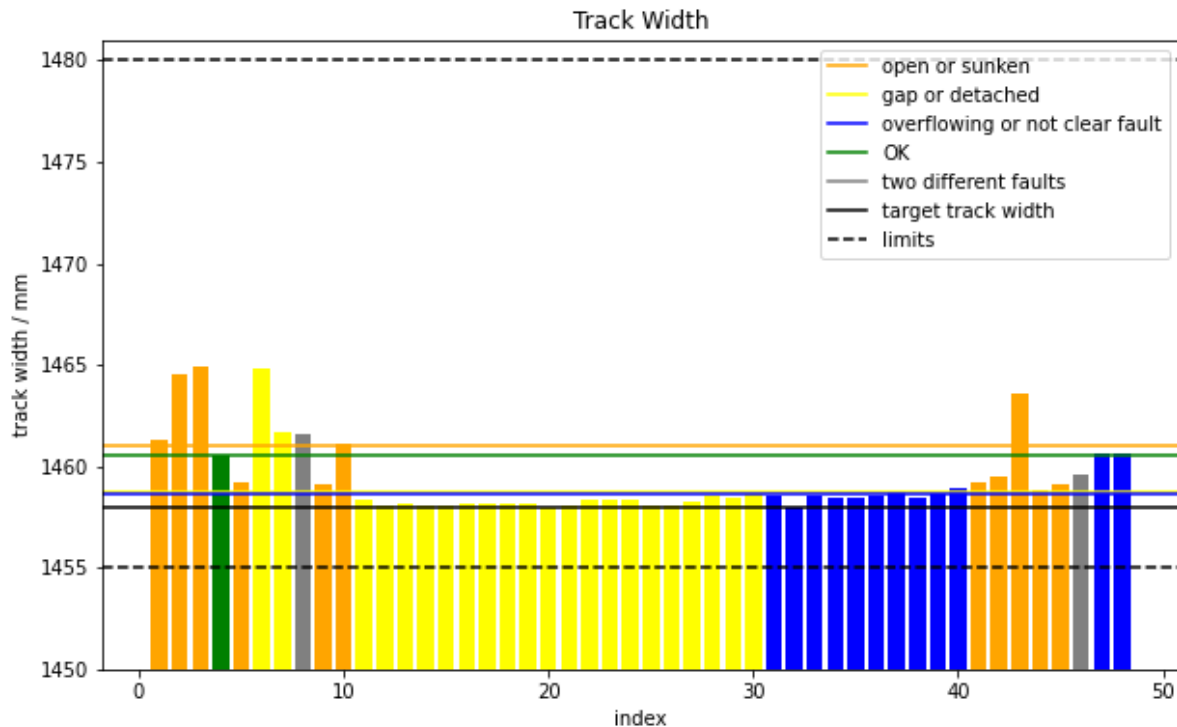


Abbildung 22: Ausprägungen der Spurweiten

Die Abbildung 22 zeigt die Spurweiten (y-Achse) je Profil (x-Achse). Die Säulen sind entsprechend des Labels des betreffenden Profils eingefärbt: die Klasse „Offen“ bzw. „Eingefallen“ ist orange dargestellt, gelb für „Spalt“ bzw. „Abgelöst“, blau für „Überquellend“ bzw. „nicht eindeutiger Fehler“ und grün für „i.O.“. Falls der Fugenverguss auf einer Gleisseite des MP einen Fehler aufweist und auf der anderen Seite zur Klasse „i.O.“ gehört oder auf beiden Seiten des MP der gleiche Fehler detektiert wurde, wird die Säule in der Farbe der entsprechenden Fehlerklasse dargestellt. Bei unterschiedlichen Fehlern auf beiden Seiten erscheint die Säule in Grau. Die farbigen durchgezogenen Linien repräsentieren die Mittelwerte einer bestimmten Klasse, wobei deren Einfärbung analog zu den Säulen erfolgt. Die schwarze durchgezogene Linie im Diagramm markiert die Soll-Spurweite von 1458 mm. Die schwarzen gestrichelten Linien zeigen die Grenzmaße der Spurweite.

Zu erkennen ist, dass kein Objekt die Grenzmaße der Spurweite über- oder unterschreitet. Die Mittelwerte, Varianzen und Standardabweichungen der Spurweiten je Klasse finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Statistische Untersuchung der Spurweitenausprägungen

Klasse	Mittelwert / mm	Varianz	Standardabweichung
1	1460,93	5,02	2,24
2	1458,68	2,43	1,56
3	1458,55	0,71	0,84
4	1460,54	0	0

Die berechneten Werte der „i.O.“-Klasse wurden nicht berücksichtigt. In dieser Untersuchung war nur ein Vertreter dieser Klasse vorhanden, wodurch die entsprechenden Ergebnisse nicht aussagekräftig sind. Die restlichen Werte zeigen einen Zusammenhang zwischen der Spurweite und dem Zustand des Fugenverguss. Die durchschnittlichen Spurweiten jeder Klasse sind größer als die Soll-Spurweite. Das heißt, wenn ein Fehler vorliegt, wird die Spurweite größer, was der Erwartung entspricht. Es kann davon ausgegangen werden, dass je schwerwiegender der vorliegende Fehler ist, desto größer die Spurweite. Dies ist an der deutlich größeren mittleren Spurweite der Klasse 1 „Offen oder Eingefallen“ im Vergleich zur mittleren Spurweite der Klasse 2 „Spalt oder Abgelöst“ zu erkennen. Die Klasse 3 „Überquellend oder nicht eindeutiger Fehler“ kann hinsichtlich der Schwere des Fehlers nicht mit den anderen beiden Klassen verglichen werden, da sich der Fehler der Klasse 3 durch einen zu hohen Fugenverguss äußert, während sich die Fehler der Klasse 1 und 2 durch einen zu niedrigen Fugenverguss, wenn auch nur stellenweise, charakterisieren. Zur Forschungsthese gehört auch, dass umso schwerwiegender der vorliegende Fehler ist, desto größer ist die Schwankung der Spurweite. Die Varianzen und Standardabweichungen der Spurweite sind bei der Fehlerklasse 1 deutlich größer als die der Fehlerklasse 2. Zu beachten ist, dass die Einschätzung der Schwere der Fehler subjektiv vorgenommen wurde.

2.1.5 Machbarkeitsabschätzung aus Sicht des Messgeräts und der Datenanalyse

Die Datenanalysen zeigen, dass die Klassifikation des bituminösen Fugenverguss mittels der Erfassung von 2D-Profilen und einer merkmalsbasierten Mustererkennung möglich ist. Die Einflüsse aus der Messumgebung (bspw. Einstrahlung) werden für den späteren Anwendungsfall (unter der Straßenbahn) als günstiger angesehen, da ein wesentlicher (Strahlungs-)Schutz gegeben ist.

Die Einflüsse des Messgeräts (der Sensoren) wurden weitestgehend analysiert. Die Sensorparameter bieten einen außerordentlichen großen Einstellbereich, um Störeinflüsse aus den Messwert zu kompensieren (bspw. Sensitivität und Laserleistung, Messhöhen und -winkel, unterschiedliche Materialreflexionen).

Die außerordentliche Größe der Datenmengen konnte nur durch Mini-PCs (Raspberry PI) der neusten Generation erfolgreich gehandelt werden. Sie gestatten das lokale Speichern der Messdaten.

Einflüsse aus den Fahrzeugschwingungen sowie der Einfluss der Straßenbahnmasse auf den abgeleiteten Messwert der Spurweite sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Momentan kann davon ausgegangen werden, dass Lockerungen durch die Erkennung von fehlerhaftem Fugenverguss (und dem damit verbundenen Eindringen von Wasser und Festkörpern) früher erkannt werden können. Der geringe Hinweis einer vergrößerten Spurweite bei Vorhandensein von fehlerhaftem Fugenverguss gibt Hinweise darauf. Das spätere Forschungsziel besteht in der Detektion der Lockerungen durch die messtechnische Erfassung der (vergrößerten) Spurweite unter dem Einfluss der Straßenbahnmasse.

2.1.6 Ende-Zu-Ende Implementierung

Die Aufgabenstellung für BitCtrl besteht in der Integration der von der Messeinheit akquirierten Rohdaten aus der berührungslose Zustandsüberwachung von Straßenbahnschienen vom Fahrzeug zum Backend in den mit ① und ② gekennzeichneten Schritten. Hierfür wurde für den Ende-zu-Ende Datenfluss ein Datenverarbeitungskonzept entwickelt.

Das beinhaltet die Konzeption und die Entwicklung geeigneter Schnittstellen, Datenformate, Echtzeitfähigkeit der Messdatenübertragung sowie Management-Funktionen zur Verwaltung und Anbindung der Lasermesstechnik.

Für die prototypische Umsetzung eines Internet der Dinge (Internet of Things - IoT) wurde als Kernkomponente ein Datenkonzentrator (LRV-DataHub) entwickelt. Dafür wurde zertifizierte Standardhardware und ein gehärtetes Betriebssystem Microsoft® Windows® 10 IoT „Embedded System“ ausgewählt.

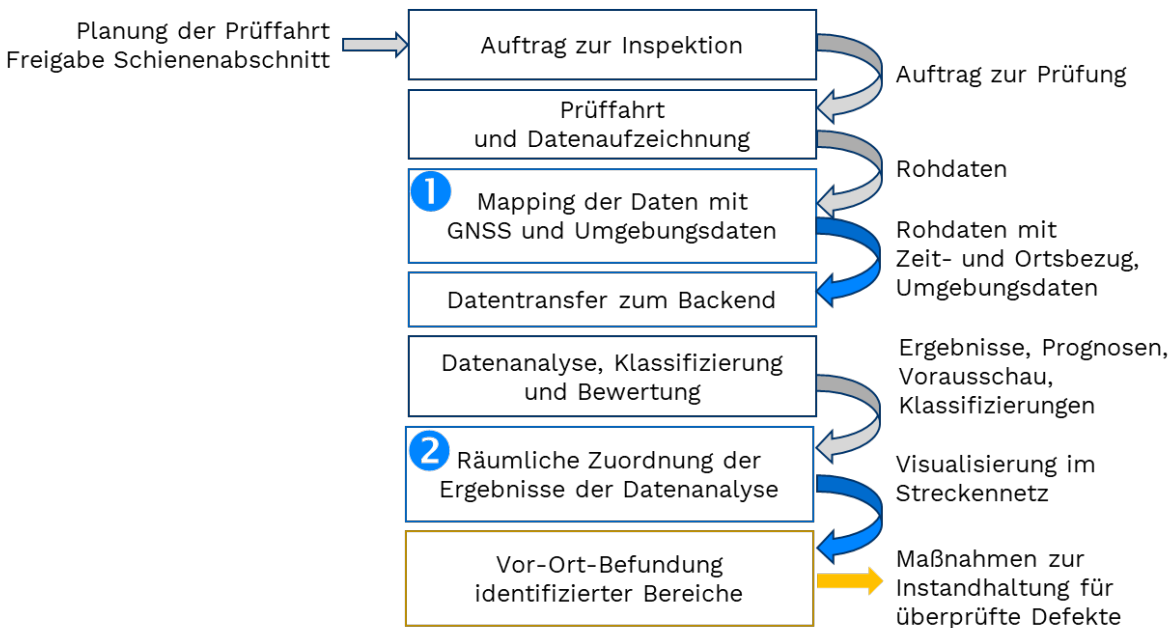


Abbildung 23: Datenverarbeitungskonzept

Dabei handelt es sich um ein für den Betrieb in einer Straßenbahn zugelassenes Industrie-PC MS-700 (E1-Zertifizierung) des Herstellers Vianova Technologies GmbH.

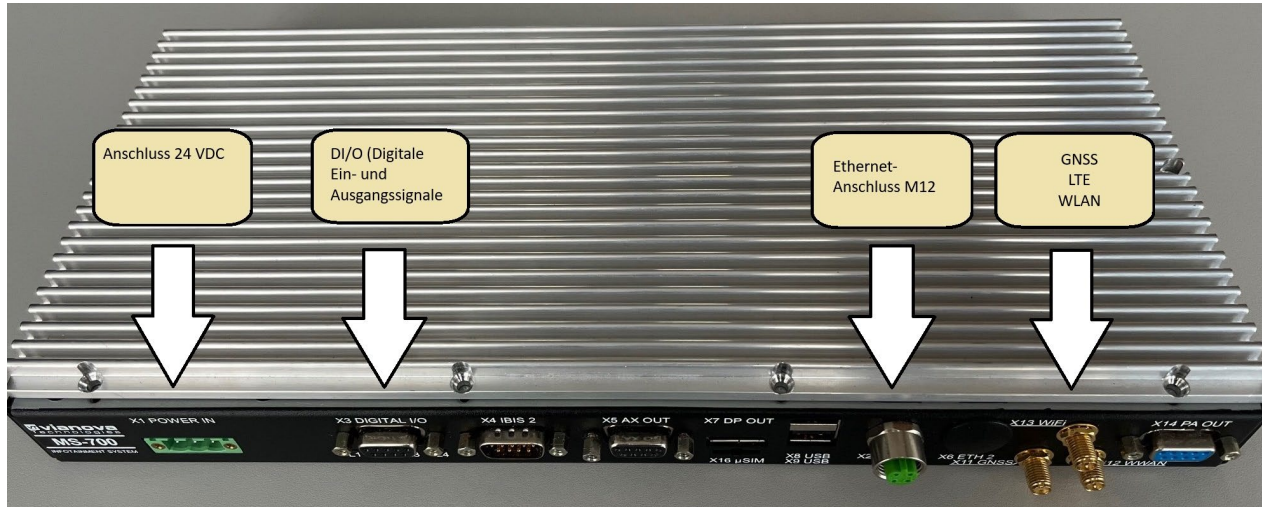


Abbildung 24: LRV-Data-Hub

Diese Komponente wurde speziell für diesen Einsatz im Forschungsprojekt LaDeLok nach Vorgaben der Autoren modifiziert, in dem das System mit mehr Speicherkapazität und leistungsfähigeren Vierkernprozessor bereitgestellt wurde.

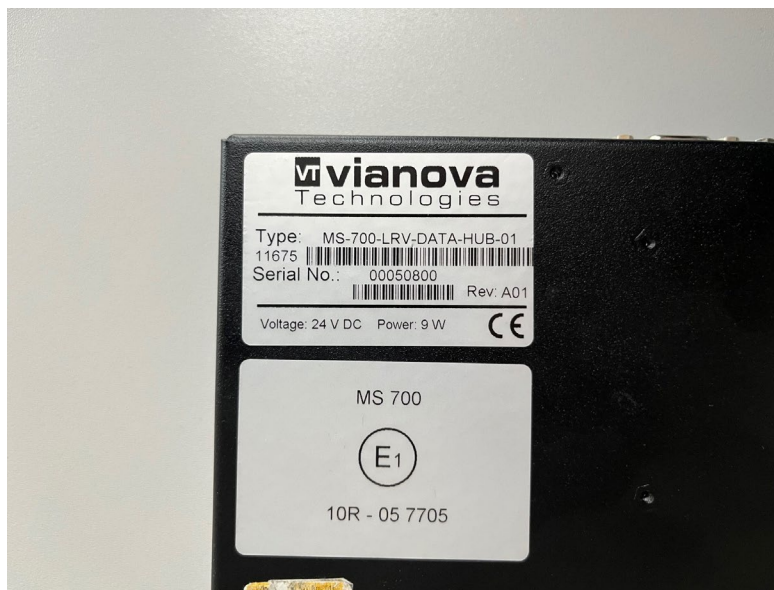


Abbildung 25: Für LaDeLok vom Hersteller modifizierter MS-700

Die Funktionen LRV-Data-Hub bestehen in der Reduktion der zu übertragenden Datenmengen vom Fahrzeug zum backend sowie im Mapping der Rohdaten mit den Schienendaten (Objekt: Schienenmeter) Zeit- und Ortsbezug sowie die zusätzlich erfassten Umgebungsdaten (Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte). Diese zusätzlichen Daten wurden für die Machbarkeitsstudie nicht weiter betrachtet.

Für die Übertragung der Daten zum Backend wurden im Datenkonzept geeignete Schnittstellen, Datenformate unter hohem Niveau auf Stand der Technik an Cybersecurity entwickelt und umgesetzt. Die Sicherung der Datenübertragung erfolgt über eine Multi-Factor Authentication.

Für die weitere Bearbeitung muss eine hochgenaue Georeferenzierung von Messdaten **2** vorgenommen werden. Es wurde für die Aufbereitung der GNSS-Roh-Daten ein mehrstufiges Mapping für den Orts-Zeitbezug entwickelt.

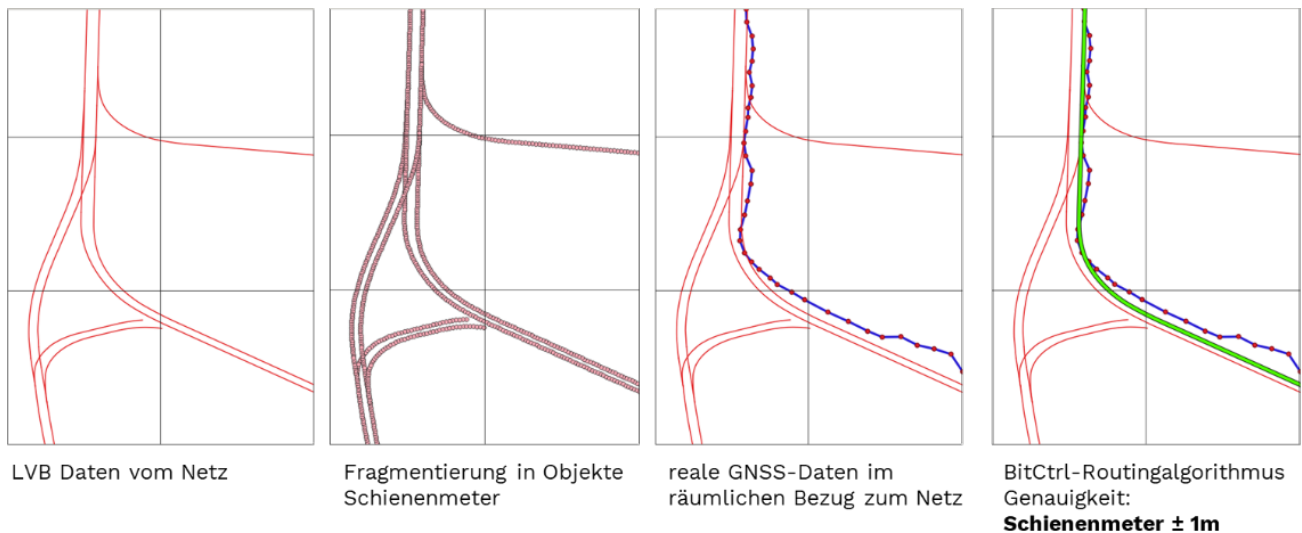
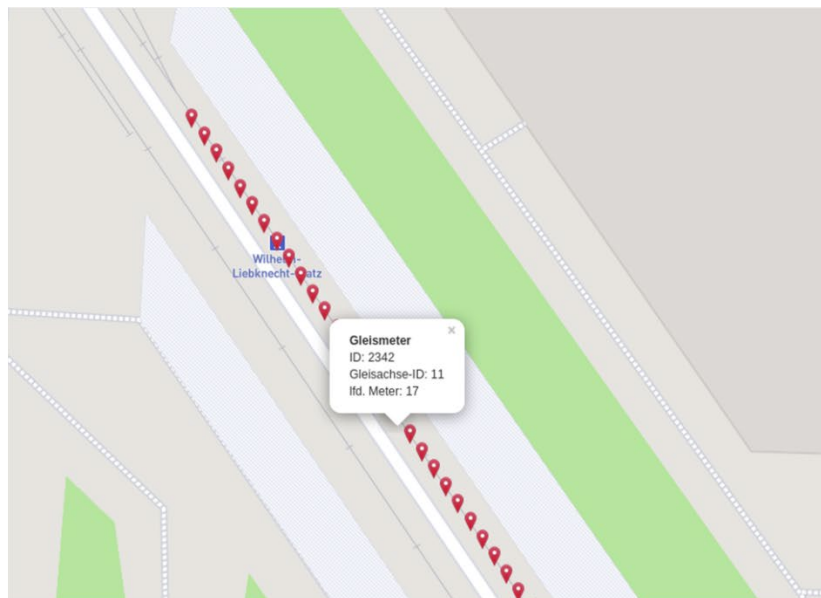


Abbildung 26: Mapping der GNSS-Rohdaten



Label zum Schienenmeter



Kartendarstellung (Großansicht)

Abbildung 27: Vorbereitung Ergebnis-Darstellung

Für eine spätere Nutzung wurde die Ergebnis-Darstellung als Orts-Zeitbezug in einer Karte vorbereitet. Die Kartendarstellungen wurden als Kacheln von OpenStreetMap verwendet.

Die Umsetzung der Machbarkeitsstudie erfolgte unter der strategischen Zielstellung, dass diese Lösung als Bestandteil einer vorausschauenden Wartung und Instandhaltung genutzt werden kann und auch weitere Ergebnisse und Quellen integriert werden können. Der spätere Fokus liegt auf einer bedarfsgerechten sowie zielgenauen, ressourcenschonenden Einsatzplanung.

Die Betreiber haben aktuell sehr fragmentierte Betriebsprozesse und stehen vor der Herausforderung, dass in wenigen Jahren eine große Zahl an Fachexperten in Rente gehen werden. Die Autoren schätzen ein, dass eine Harmonisierung der Betriebsprozesse sowie homogene Daten und Prozesse notwendig werden sich diesen Herausforderungen nachhaltig zu stellen.

Dazu wird es erforderlich sein, dass Expertenwissen gebündelt und über die Grenzen des lokalen Betreibers bereitstehen wird. Ferner werden die Betreiber gezwungen sein, die Kosten für Wartung und Instandhaltung weiter zu reduzieren. Das muss unter den Rahmenbedingungen einer gleichbleibenden hohen Qualität des ÖPNV erfolgen. Auch regulatorische Vorgaben zur Senkung der Energie und des Ressourcenverbrauchs sowie

stetige Verringerung des CO₂-Fußabdrucks werden die Betreiber zu einer bedarfsgerechten sowie zielgenauen, ressourcenschonenden Einsatzplanung zwingen.

Nach Einschätzung der Autoren kann der jeweilige lokale Betreiber nicht mehr seine eigenen Prozesse und Datenschnittstellen entwickeln. Mit dem vorher beschriebenen Hebeln hat das Konzept eines Predictive Maintenance(-as-a-Service) sehr hohe Chancen auf eine Umsetzung.

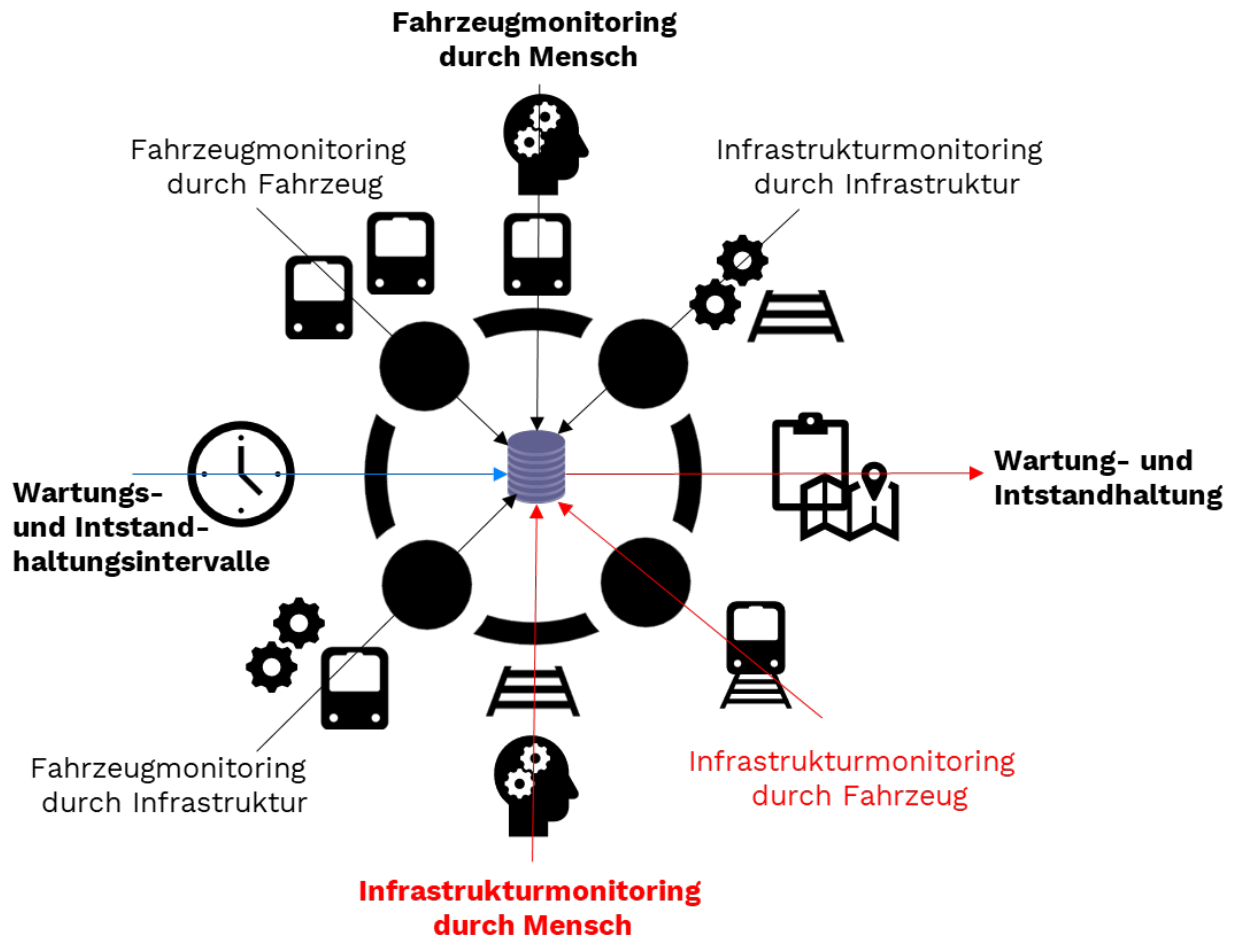


Abbildung 28: Arbeitshypothese Homogenisierung der Prozesse und Daten

2.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für das Projekt gibt es zwei wichtige Positionen der aufkommenden Kosten. Der Großteil der Kosten wird für die Personalmittel der angestellten (wissenschaftlichen) Mitarbeiter

verwendet. Ein weiterer wichtiger Kostenpunkt sind die benötigten Materialien des entwickelten Messsystems.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die beantragten Mittel waren notwendig, weil die Tätigkeiten nicht vollumfänglich durch die Mittel der Fa. BitCtrl bzw. durch den Haushalt der Hochschule finanziert werden konnten. Obwohl es sich bei dem Projekt um ein stark interdisziplinäres und hoch anspruchsvolles Forschungsvorhaben handelte, waren die sparsam eingesetzten Mittel zur Erreichung der erzielten, nachhaltigen und (öffentlich) verwertbaren Ergebnisse angemessen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Projektergebnisse sollen an Straßenbahnen Anwendung finden, nachdem in einem Folgeprojekt eine mobile Diagnosetechnologie für den Linienbetrieb mit zugehöriger Instandhaltungsstrategie auf der Basis eines digitalen Zwillings des Gleisnetzes entwickelt wurde. Eine Präferenz besteht im Straßenbahnsektor, da hier ein höherer wirtschaftlicher Impact seitens der Antragsteller erwartet wird, da das Messsystem dauerhaft an mind. 1 Fahrzeug installiert wird. Diese Notwendigkeit resultiert aus der starken und häufigen Interaktion aller Verkehrsteilnehmer mit der Gleisinfrastruktur, was für den dauerhaften Einsatz spricht. Für den Einsatz an einer Straßenbahn bzw. mehreren Straßenbahnen (Anzahl der Messsysteme abhängig von der Größe des Streckennetzes und der Linienstruktur) spricht vor allem die erhöhte Anzahl von Überfahrten je Tag, ohne dabei den Fahrplan, durch bspw. ein Service-/Wartungsfahrzeug, zu beeinträchtigen. Eine erhöhte Anzahl von Messfahrten führt aus statistischer Sicht zur Verbesserung der Diagnoseaussage und schließlich zu belastbaren Instandhaltungsempfehlungen. Insbesondere führt die Überfahrt mit einer im Betrieb befindlichen Straßenbahn zu realistischeren Untersuchungsbedingungen bzgl. der Achslast und Dynamik (bspw. Sinuslauf). Zumal das „Umsetzen“ / der Austausch von im Betrieb befindlichen Straßenbahnen auf andere Linien ohne weitere Umstände möglich ist. Die Dauer des Einsatzes der Messtechnik richtet sich auch nach den Einschätzungen zu den Inspektionszyklen (z. Z. noch unbekannt).

Nach Einsatz am Untersuchungsgegenstand können Schieneninstandhaltungsarbeiten zeitlich und örtlich detaillierter untersetzt werden und führen zu Materialersparnis bei der

Instandhaltungsdurchführung sowie zur Verlängerung der Schienenlebensdauer. Zudem rückt die Zustandsdiagnose an mobilen Maschinen und deren Infrastruktur zunehmend in den Fokus der Verkehrsbetriebe, womit sich seitens der Antragssteller neue Geschäftsfelder aufbauen lassen.

Die Wirkung des Projekts im öffentlichen Sinne ist nicht sofort sichtbar - viel mehr werden die Auswirkungen langfristig und nachhaltig die Schieneninstandhaltung wirtschaftlicher und ressourcenschonender gestalten. Mit der Stärkung der Elektromobilität im ÖPNV und dem vermehrten Ausbau regenerativer Energieerzeugung, kann der Kohlenstoffdioxidausstoß im innerstädtischen Individualverkehr zudem deutlich gesenkt werden.

Mit der Entwicklung der Diagnosetechnologie werden den Verkehrsbetrieben Werkzeuge zur unmittelbaren Instandsetzung schadhafter Schienen zur Verfügung gestellt, was die Akzeptanz durch reduzierten Lärm, den Fahrkomfort und die Sicherheit durch einen besseren Lauf (Rad-Schiene) fördert.

2.5 Veröffentlichung der Ergebnisse

Neben diesem Forschungsbericht wird ein Teil der Forschungsergebnisse bei einer wissenschaftlichen englischsprachigen Fachtagung mit Tagungsbandbeitrag (IEEE I²MTC 2025 in Chemnitz, peer-review Artikel) eingereicht. Alle Messdaten der drei Messkampagnen stehen mit einer auf Python basierten Visualisierungssoftware auf der Mobilithek unter folgender Adresse für die öffentliche Weiterverwendung zur Verfügung: <https://mobilithek.info/offers/776487305863938048>

3 Literaturverzeichnis

- [1] Schreyer A 2024 *Preis für HTWK-Ingenieurnachwuchs: Lucas Nierobisch von der Fakultät Ingenieurwissenschaften erhält Förderpreis der sächsischen Metall- und Elektroindustrie für seine Masterarbeit.* <https://fing.htwk-leipzig.de/fakultaet/newsdetail18/artikel/johann-andreas-schubert-preis-geht-an-htwk-ingenieursnachwuchs> (accessed 1 Nov 2024)

- [2] Haase K 2024 *Forschungsperspektiven 2024 – Call for Pictures* <https://www.htwk-leipzig.de/hochschule/aktuelles/newsdetail/artikel/forschungsperspektiven-2024-call-for-pictures> (accessed 1 Nov 2024)
- [3] Allianz pro Schiene e. V. 2024 *Deutscher Verkehrswendepreis* <https://www.allianz-pro-schiene.de/wettbewerbe/deutscher-verkehrswendepreis/> (accessed 1 Nov 2024)
- [4] Bundesministerium für Digitales und Verkehr 1987 *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab)*
- [5] Slovak B 2013 *Fahrzeugseitige Schienenbruchererkennung, Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit mittels Auswertung von Beschleunigungssignalen am Achslager eines U-Bahnfahrzeuges*
- [6] Jones M and Southcombe J 2015 *Track condition monitoring using service trains* (Melbourne, Victoria, Australia)
- [7] Wolf M, Rudolph M, Leutritz U, Köllner J, Günther A and Zschocke D 2022 *Cloudbasierte Zustandsdiagnose von Straßenbahnschienen* *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **117** 300–4
- [8] Vossloh AG 2020 *Prüfservice* https://www.vossloh.com/de/produkte-und-loesungen/produktfinder/produkt_11136.php (accessed 1 Nov 2024)
- [9] TramCloud GmbH *Einfache Verschleißdokumentation mit TramCloud* <https://www.tramcloud.net/features/> (accessed 1 Nov 2024)
- [10] Müller-Witt V *Schienen-Fiasko in Karlsruhe: Fugenguss-Experte sieht Materialfehler als Ursache* <https://www.karlsruhe.de/region/karlsruhe/Karlsruhe~/schienen-fiasko-in-karlsruhe-fugenguss-experte-sieht-materialfehler-als-ursache;art6066,2669729> (accessed 1 Nov 2024)
- [11] mFUND-Projekt *Onboard-Daten für die Erkennung von Gleisfehlstellen – OnboardEU* <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/onboardeu.html> (accessed 1 Nov 2024)
- [12] mFUND-Projekt *KI-basierte Analyse von Schienenprüfdaten für eine optimierte Instandhaltungsplanung – AIFRI* <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/aifri.html> (accessed 1 Nov 2024)

- [13] Wolf M, Rudolph M and Kanoun O 2019 Concept for an event-triggered wireless sensor network for vibration-based diagnosis in trams *Vibroengineering PROCEDIA* **27** 55–60
- [14] Wolf M, Hund S, Rudolph M. and Kanoun O 2018 Design of a Wireless and Energy Autonomous Sensor Network for Condition Monitoring of Tram Drive Components *2411-9660* **2** 50
- [15] Wolf M, Rudolph M, Köllner J and Holstein P 2019 Gleisbasierte Schwingungsdiagnose an Straßenbahnen – mit komplementärer Sensorik *ZWF* **114** 278–83
- [16] Wolf M, Rudolph M and Köllner J 2017 Schwingungsdiagnostische Untersuchung von Straßenbahn-Antriebskomponenten *ZWF* **112** 62–7
- [17] Rudolph M and Wolf M 2015 Damit die Straßenbahnen zuverlässig rollen. Lagerdiagnose mit automatisierter Entscheidungsfindung. *Mobile Maschinen* 22–4
- [18] Gallin P, Wolf M, Rudolph M and Braumann U-D 2019 Fahrzeugnummernidentifikation auf Basis einer Mustererkennung – Konzeptentwicklung und rechen-technische Implementierung. „Die hybride Fabrik – menschliche und künstliche Intelligenz im Einklang“, *VPP2019 - Vernetzt planen und produzieren (Chemnitz)* ed R Riedel and A C Bullinger-Hoffmann (Institut für Print- und Medientechnik der TU Chemnitz) pp 187–96
- [19] Wolf M, Holstein P, Köllner J, Münch H-J, Zschocke D, Günther A and Rudolph M 2020 Akustische Diagnose an Straßenbahnen *DAGA 2020 - 46. Jahrestagung für Akustik „Fortschritte der Akustik“ (Hannover, 2020-03-16)* ed Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA)) pp 1047–50
- [20] Wolf M, Hofbauer J and Rudolph M 2016 Diagnostics using self-sufficient wireless sensor network for a condition-based maintenance strategy strategy for tram bearing diagnostics *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)* pp 518–22
- [21] mFUND-Projekt *Datenbasiertes Extrapolationsmodell für die Restlebensdaueranalyse von Eisenbahninfrastrukturanlagen - DEEB-INFRA*
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/deep-infra.html>
 (accessed 1 Nov 2024)

[22] mFUND-Projekt *Smart Phone based Rail Data Acquisition – SPRaDA*
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/sprada.html>
(accessed 1 Nov 2024)