

BAFU/BAV Projekt-Bericht

Abschlussbericht

Projekt-Nr.:	1337000430
Projektbeginn:	01.09.2019
Projektdauer	36 Monate
Bericht verfasst am:	17.10.2022
Titel:	Messsystem für die Schienenrauheit
Auftragnehmer:	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung ETH Zürich
Auftraggeber:	Schweizerische Eidgenossenschaft, vertreten durch die Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV)
Stand nach:	Abschluss (36 Monate)

Auftraggeber:	Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV) CH-3003 Bern Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer:	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung ETH Zürich
Autor/Autorin:	Florian Mauz Michal Kuffa
Begleitung BAFU/BAV:	Franz Kuster Fredy Fischer Robert Attinger Christoph Dürig
Hinweis:	Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist alleine der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Organisatorisches & Projektverlauf	4
1.1 Personell.....	4
1.2 Zeitplan.....	4
1.3 Kosten.....	5
2. Arbeitspakete.....	6
2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen an das Messsystem und die Datenauswertung	6
2.2 Arbeitspaket 2: Stand der Technik, Evaluation der Sensoren und des Datenerfassungssystems.....	7
2.3 Arbeitspaket 3: Prüfstandaufbau, Design des Messgeräts.....	8
2.4 Arbeitspaket 4: Evaluation der Datenverarbeitungsmethoden	10
2.5 Arbeitspaket 5: Praktische Evaluation der ausgewählten Sensorik und Auswertung am Prüfstand	11
2.6 Arbeitspaket 6: Umsetzung und Optimierung am Messwagen/Zug	12
2.7 Arbeitspaket 7: Vergleichsmessungen auf einer Referenzstrecke.....	14
2.8 Arbeitspaket 8: Normative Vorschriften für das Messsystem	16
2.9 Fazit & Ausblick.....	18
Referenzen	19

1. Organisatorisches & Projektverlauf

1.1 Personell

Das Projekt wurde IWF-intern durch Herrn Kuffa geleitet. Zu Beginn des Projekts wurde das Projekt von Herrn Frey als wissenschaftlicher Mitarbeiter bearbeitet. Dies wurde ab Mitte des Jahres 2020 durch Herrn Mauz übernommen.

Im Rahmen ihrer Studienarbeiten bzw. Tätigkeit als Hilfsassistent waren verschiedene Studenten an der Projektarbeit beteiligt:

- **Herr Remo Wigger (Bachelorarbeit, FS 2020):** Simulative Untersuchung der Möglichkeit der Sensor Fusion zur Kompensation von externen Störungen (Verschiebungen & Verkipnungen) des Messaufbaus.
- **Frau Alexia Voser (Bachelorarbeit, FS 2020):** Untersuchung der Erhöhung der Abtastfrequenz durch die Verwendung mehrerer Sensoren.
- **Frau Eshna Anand (Semesterarbeit, HS 2020):** Entwicklung einer automatischen Fahrlösung für den Schienenprüfstand.
- **Herr Remo Wigger (Praktikum FS 2021 & Hilfsassistent bis Projektabschluss):** Durchführung von Versuchen, Unterstützung der Projektarbeit, Begleitung Messfahrten, Weiterentwicklung des Programms zur Datenauswertung.
- **Frau Lea Kotthoff (Bachelorarbeit, FS 2021):** Entwicklung des Messgerätprototypen inklusive Schutzgehäuse für die Sensoren.
- **Frau Eshna Anand (Masterarbeit, FS 2021):** Entwicklung eines zusätzlichen skalierten Rad-Schiene-Prüfstandes zur Untersuchung indirekter Messmethoden im Labor.
- **Herr Jan Vincent Spitzer (Masterarbeit, FS 2022):** Entwicklung eines Prüfstandes zur Erprobung der Sensorfusion & Durchführung von Versuchsreihen (inklusive indirektem Messverfahren).

1.2 Zeitplan

Das Projekt konnte trotz der Corona-Pandemie fristgerecht zum 31.08.2022 abgeschlossen werden.

Das Arbeitspaket Nr. 4 zur Evaluation der Datenverarbeitungsmethoden wurde um neun Monate verlängert. Im Projektverlauf (Von Laborversuchen zu Feldversuchen) wurden weitere Anforderungen und Untersuchungen notwendig. Diese Änderung kollidierte nicht mit anderen Arbeitspaketen.

Die Möglichkeit Feldversuche auf Zügen durchführen zu können, hing von den Möglichkeiten und der Bereitschaft der Projektpartner ab. Da nicht zu Beginn des Projekts ein Projektpartner auf der Anwenderseite (bspw. SBB) fest eingebunden war, konnte nicht der geplante Umfang der Feldversuche realisiert werden.

1.3 Kosten

Aufgrund der Möglichkeit die Basis des Prüfstandes inklusive eines bereits vermessenen Referenzschienenstücks von Scheuchzer übernehmen zu können, konnte eine Einsparung von Materialkosten erfolgen. Dem gegenüber steht der personelle Mehraufwand aufgrund der Projektübergabe während des Projektverlaufs (Herr Frey und Herr Mauz). Aufgrund des grösseren Stundeneinsatzes (Zeitweise parallele Beschäftigung von Hr. Frey & Hr. Mauz) wurden die überschüssigen Mittel für Material zur Deckung der Lohnkosten aufgewendet.

Das Kostendach wurde gesamthaft nicht überschritten.

2. Arbeitspakete

2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen an das Messsystem und die Datenauswertung

Das Arbeitspaket 1 hatte zum Ziel die grundlegenden Anforderungen an das Messgerät bzw. dessen Entwicklung zu definieren. Die folgenden Zielsetzungen wurden bei der Bearbeitung verfolgt:

- Absprache der Anforderungen mit SBB / BLS / Scheuchzer / Speno / BAFU/BAV
- Definition der Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit
- Festlegung des zu messenden Wellenlängenspektrums

Die Zielsetzungen konnten erreicht werden. Die definierten Anforderungen sind im Zwischenbericht Nr.1. [1] des Projektes zusammengestellt zu finden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene **Normen aus dem Bereich der Schienenlängsprofilmessung** analysiert. Als Grundlage für die Messungen der akustischen Rauheit dient die EN 15610 [2]. Die Anforderungen wurden im Zwischenbericht Nr. 2 [3] aktualisiert und erweitert. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 1: Anforderungen an das Messsystem bezüglich Design & Betrieb, Performance und die Sensorik.

Kriterium	Angaben
Design & Betrieb	
Montage am Zug	1 Kalibrierung/Messung
Kontinuierliche Messung	
Möglichst autonomer Betrieb	
Einzelne Profillinie soll gemessen werden	
Schutz gegen Umwelteinflüsse	
Performance	
Abzudeckendes Wellenlängenspektrum	10 – 250 [mm]
Streckenlänge, die kontinuierlich gemessen werden muss	Mindestens 1000 [mm]
Sensor	
Minimale Abtastrate	5 [kHz]
Auflösung	1 [µm]
Messbereich	20 [mm]
Geschwindigkeitsbereich	Bis zu 120 [km/h]
Wiederholgenauigkeit	[-]

Darüber hinaus wurden die Anforderungen während dem gesamten Projektverlauf weiter aktualisiert (mit weiteren Industriekontakten & Feldversuch). Bspw. wird ein grösserer Messbereich und Messabstand im Vergleich zur ursprünglichen Anforderung (20 mm) benötigt um die Dynamik des Fahrzeugs ausreichend zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Anforderungen an das Messsystem bezüglich Daten & Datenerfassung, Umgebungsbedingungen und Validierung.

Kriterium	Angaben
Daten & Datenerfassung	
Separate Datenerfassung	National Instruments cRIO
Filter & Datenverarbeitung	Zu definieren
Umgebung	
Temperaturbereich	-10 – 30 [°C]
Arbeitszeit	Tag & Nacht
Widerstand gegen Umwelteinflüsse	[-]
Validierung	
Verfahren	Vergleich mit CAT Gerät (lange Messung), Validierung gemäss 13231-2

Es handelt sich hier um Anforderungen für den Prototypen. Für eine weitere Entwicklung des Messsystems hin zu einer industriellen Lösung, werden diese nochmals aktualisiert und erweitert werden müssen.

2.2 Arbeitspaket 2: Stand der Technik, Evaluation der Sensoren und des Datenerfassungssystems

Das Arbeitspaket zwei hatte zum Ziel den Stand der Technik für Systeme zur Messung der akustischen Rauheit zu evaluieren. Zudem sollten geeignete Datenerfassungssysteme und Sensoren ausgewählt werden. Folgende Zielsetzungen wurden im Einzelnen verfolgt:

- Momentan eingesetzte Systeme, Vergleich und Beurteilung von diesen Systemen mit Auflistung der Performance, der Vor- und Nachteile
- Recherche nach neuen Messmethoden
- Entscheidung darüber wie viele Sensoren sind überhaupt nötig
- Evaluation der Messgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit der betrachteten neuen Sensoren
- Evaluation des Frequenzbereichs der neuen Sensoren
- Auswahl geeigneter physikalischer Prinzipien

- Sensor auswählen, der die Anforderungen erfüllt

Details zur Untersuchung des Standes der Technik, sind im zweiten Zwischenbericht [3] des Projekts zusammengefasst (insbesondere der Vergleich direkter und indirekter Messmethoden). Es wurden verschiedene Messmethoden analysiert und auf dem Markt erhältliche Messtechniken miteinander verglichen. Es wurde entschieden eine **direkte** Messmethode, die **Sehnenmethode**, einzusetzen. Die Kombination mehrerer Sehnenmethoden zur Verbesserung des Messergebnisses sollte im weiteren Projektverlauf untersucht werden. Es wurde ein direkter Vergleich zwischen den folgenden optischen Messprinzipien im Labor durchgeführt:

- Induktive Sensoren
- Kapazitive Sensoren
- Laser-Triangulation
- Konfokale Sensoren
- Profilometer
- Time-of-flight
- Interferometer

Der Vergleich ergab die **Laser-Triangulation** als auszuwählende Messtechnik. Es wurde der Sensor 2300-10LL von Micro-Epsilon für die Projektarbeit ausgewählt. Für zukünftige Einsätze kann ein Sensor mit grösserem Messabstand (20LL mit 50 mm, 50LL mit 70 mm) beschafft werden. Die grundsätzliche **Machbarkeit** eines optischen Messaufbaus konnte im Rahmen der Sensortests auf der **vertikalen Drehbank** aufgezeigt werden. Die Datenerfassung soll extern und analog erfolgen. Es wurde ein **cRIO 9045** Gerät von National Instruments ausgewählt, welches die Anforderungen bezüglich der Messgeschwindigkeit erfüllt.

2.3 Arbeitspaket 3: Prüfstandaufbau, Design des Messgeräts

Ziel war es, einen Prüfstand für die Laboruntersuchungen des Messaufbaus zu realisieren. Dieser sollte es ermöglichen eine Erprobung des Konzeptes unter Laborbedingungen und definierten Störeinflüssen durchzuführen. Die folgenden Zielsetzungen wurden beim Aufbau verfolgt:

- Lange Messstrecke (notwendige Länge sollte aus AP1 hervorgehen)
- Damit auch bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten gemessen werden kann, ist eine ringförmige rotierende Strecke von Vorteil.
- Es sollte möglich sein immer wieder die gleiche Strecke zu messen (Trigger) um die Wiederholbarkeit zu testen
- Störeffekte wie Verschmutzung, Feuchtigkeit, Vibrationen sollten aufgebracht werden können
- Aus einer Referenzmessung sollte Rauheit/Welligkeit der Prüfstrecke bekannt sein.

Als Basis für den Prüfstand konnte ein bereits existierender Aufbau mit einem 3.3 m Referenzschienensegment der Firma Scheuchzer verwendet werden. Aufgrund der Länge konnte der anvisierte Wellenlängenbereich zwischen 10 mm und 250 mm ausgewertet werden. Das Referenzsegment wurde von METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie) taktil vermessen. Der Aufbau ist mit einer zusätzlichen Linearführung (Bewegung wurde zusätzlich automatisiert) ausgestattet, welche für den Messaufbau verwendet wurde. Der realisierte Schienenprüfstand ist in Abbildung 1 dargestellt.

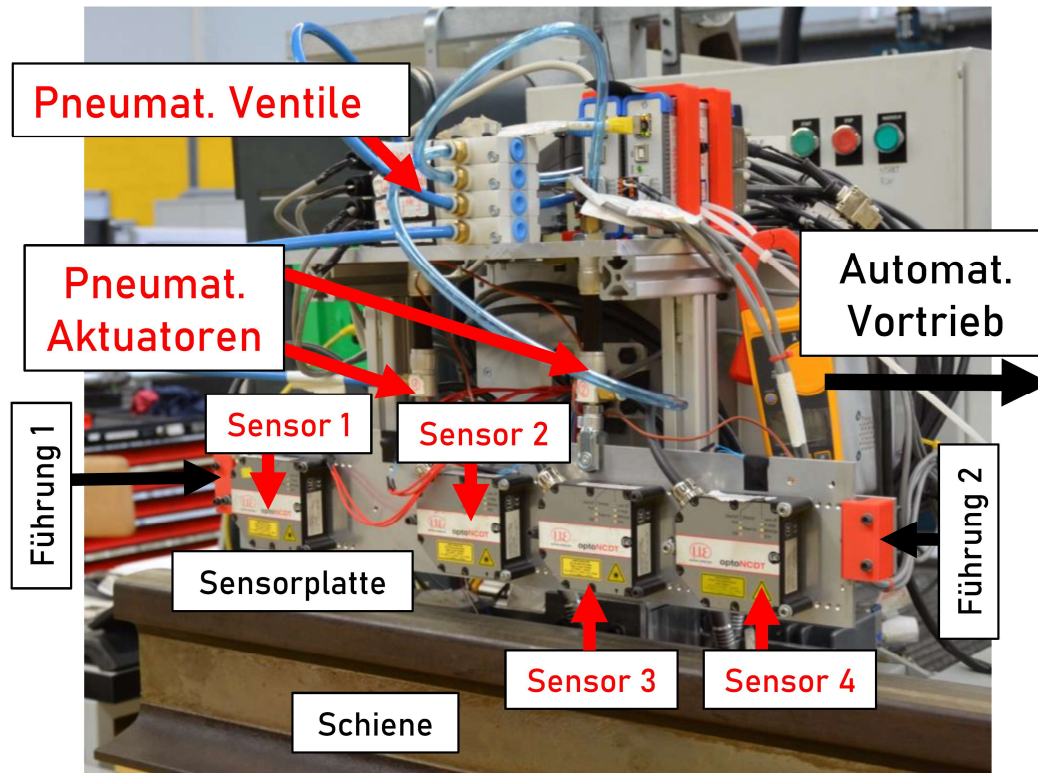


Abbildung 1: Installierter Schienenprüfstand, inklusive Pneumatik und Sensorik.

Der Aufbau wurde mit dem in Arbeitspaket 2 ausgewähltem Datenerfassungssystem ausgestattet. Der erstellte Messaufbau ermöglichte die Messung (Arbeitspaket 5) unter **verschiedenen Bedingungen**:

- Verschiebungen
- Verkippen
- Vibrationen
- Wasser und Staub auf der Schiene

Der Zustand der nassen bzw. der mit Staub verschmutzten Schiene ist in Abbildung 2 dargestellt.

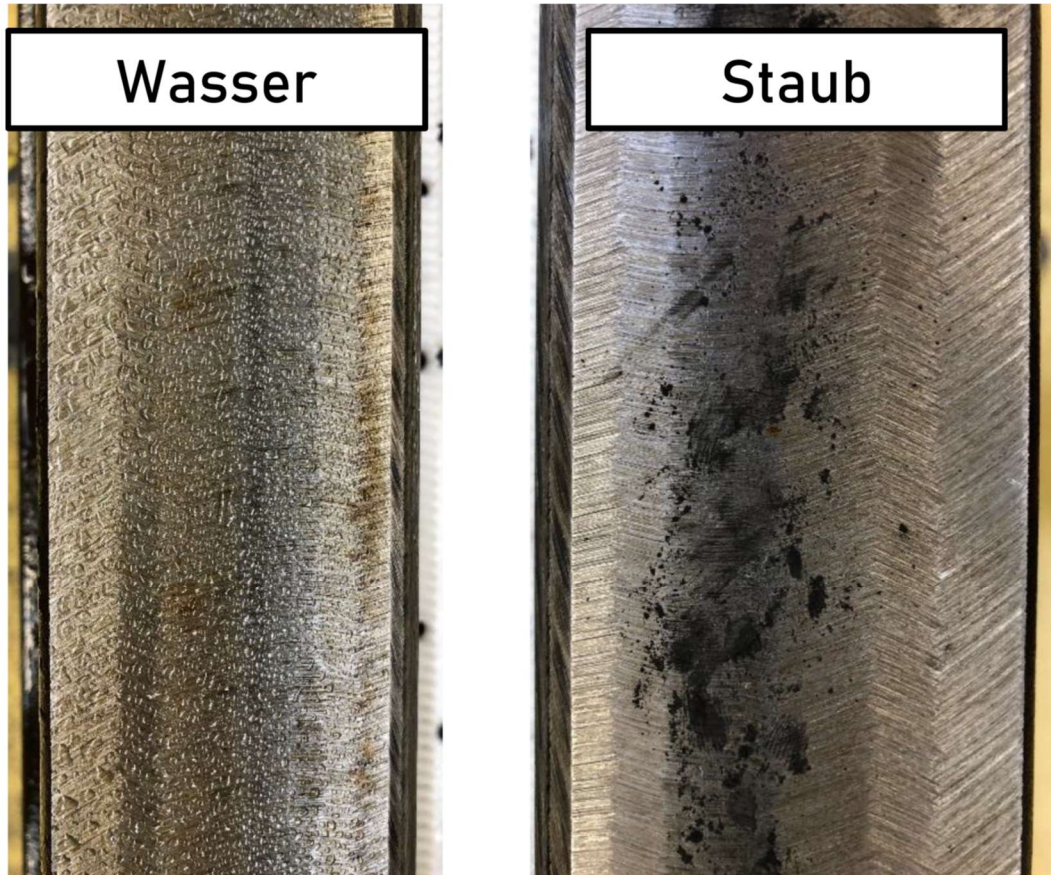


Abbildung 2: Wasser und Staub auf der Schienenoberfläche als externer Störeinfluss.

Zusätzlich zum Schienenprüfstand, wurde ein **Rad-Schiene-Teststand** zur Untersuchung **indirekter Messmethoden** erstellt. Des Weiteren wurde ein Prüfstand zur Erprobung des Konzeptes der **Sensor Fusion** (Konzept erläutert in Zwischenbericht Nr. 2 [3]) erstellt. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein Prototyp für den unter dem Zug zu installierenden **Messgerätkörper** entwickelt. Für Details zu den erwähnten Prüfständen wird auf die Zwischenberichte Nr.3 [4], Nr. 4 [5] und Nr.5 [6] verwiesen.

2.4 Arbeitspaket 4: Evaluation der Datenverarbeitungsmethoden

Das Arbeitspaket sollte die Datenverarbeitung der Messdaten definieren und geeignete Verarbeitungsmethoden auswählen. Zusammengefasst wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Verschiedene Filterungsverfahren müssen evaluiert werden
- Unterschiedliche Messmethoden sind zu vergleichen
- Selektion der Mess- und Signalverarbeitungsmethode, die das reale Schienenlängsprofil am besten beschreibt

- Optimierung in der Messkette

Die Herangehensweise wie die gemessenen Daten zu weiterverarbeitet werden, wurde untersucht und für das Projekt definiert. Es wurde ein Vorschlag zur Optimierung des Messergebnisses mithilfe der Messung mit vier Sensoren erarbeitet. Es wurde im Besonderen die **Auswertung der akustischen Rauheit nach EN 15610** [2] untersucht. Details zu den Untersuchungen, sowie des Ansatzes der Messung mit vier Sensoren können dem dritten [4] und vierten [5] Zwischenbericht entnommen werden.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der akustischen Rauheit (Implementierung) kann in einer Publikation [7] zusammengefasst nachvollzogen werden.

2.5 Arbeitspaket 5: Praktische Evaluation der ausgewählten Sensorik und Auswertung am Prüfstand

Ziel war es, die Laboruntersuchungen auf dem im dritten Arbeitspaket erstellten Schienenprüfstand durchzuführen. Dies beinhaltete folgende Punkte:

- Hardwaremässige Realisierung des in AP3 designten Prüfstands
- Ausrüstung des Prüfstands mit den notwendigen Sensoren und Datenerfassung (aus AP4)
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit dieser messtechnischen Lösung am Prüfstand

Es wurden verschiedene Szenarien, welche im betrieblichen Ablauf auf eine Messung am Zug auftreten können, betrachtet. Die verschiedenen **Szenarien/Versuchsreihen** sind in Abbildung 3 zusammengefasst.



Abbildung 3: Durchgeführte Versuchsreihen, wobei in jeder Versuchsreihe ein Störeinfluss untersucht wurde.

Die Sehnenmethode erweist sich als geeignet um **Verschiebungen, Verkippungen und Vibrationen zu kompensieren** und um ein auszuwertendes Messergebnis bereitzustellen. Die Auswirkungen der **Störeinflüsse Wasser und Staub** wurden im Labor quantifiziert. Diese Einflüsse haben signifikanten Einfluss auf das Messergebnis besonders für **kleine Wellenlängen**.

Details zur Auswertung der Versuchsreihen sind in den Zwischenberichten Nr. 4 [5] und Nr. 5 [8] aufgeführt. Die gewonnen Erkenntnisse wurden in einer Publikation zusammengefasst [9].

2.6 Arbeitspaket 6: Umsetzung und Optimierung am Messwagen/Zug

Ziel war es, das im Labor erprobte Messkonzept auf dem Zug zu installieren und weitere Verbesserungen bzw. Anpassungen durchzuführen. Im Einzelnen beinhaltet dies:

- Konstruktion einer Halterung für die Sensoren, die für den Zug geeignet ist
- Ein FEM Modell der Halterung oder des gesamten Wagens um potentielle Schwachstellen zu erkennen
- Infos über die möglichen Schwachstellen → Verbesserungspotenzial
- Suche und Kontaktaufnahme zu den potentiellen Umsetzungspartnern: SBB/BLS/SOB/DB
- Prototypaufbau

Es wurde der Kontakt zu verschiedenen Partnern aufgenommen:

- **SBB:** Eine Messfahrt mit dem Diagnosefahrzeug konnte während des abgeschlossenen Projekts nicht durchgeführt werden.
- **SOB:** Die Möglichkeit zur Messung scheiterte am geringen Grundabstand des Sensors von der Schienenoberkante.
- **ZB:** Die Messfahrt für den Feldversuch konnte an einem Fahrzeug der Zentralbahn durchgeführt werden.
- **Scheuchzer:** Es konnte eine erste Messung am Schleifzug durchgeführt werden. Ein weiterer Feldversuch konnte nicht mit Scheuchzer aufgrund von Terminkollisionen und Verfügbarkeiten nicht mehr durchgeführt werden.

Es wurde eine erste Messung auf einem Schleifzug von Scheuchzer durchgeführt um die Messkette im realen Umfeld eines Zuges zu testen. Die Messung erfolgte bei niedriger Geschwindigkeit von 3 km h^{-1} . Für diese Messfahrt wurde eine **eigene Anbindung** konstruiert. Für den im Rahmen des siebten Arbeitspaketes durchgeführten Feldversuch mit der Zentralbahn, wurde ebenfalls eine separate Anbindung konstruiert. Je nach Zug-Typ variieren die Anbindungsmöglichkeiten der **temporären** Installationen. Daher wurde auf ein **FEM Modell** und weitere Detailuntersuchungen der Anbindungen vorerst verzichtet. Das **Drehgestell** eines Zuges (insofern vorhanden), wurde als präferierter Anbindungspunkt definiert. Einerseits ist hier die beste laterale Position des Zuges auf der Schiene zu erwarten und andererseits ist hier

lediglich der dynamische Einfluss der Primärfederung vorhanden (Sekundärfederung ausgenommen). Der installierte Messaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

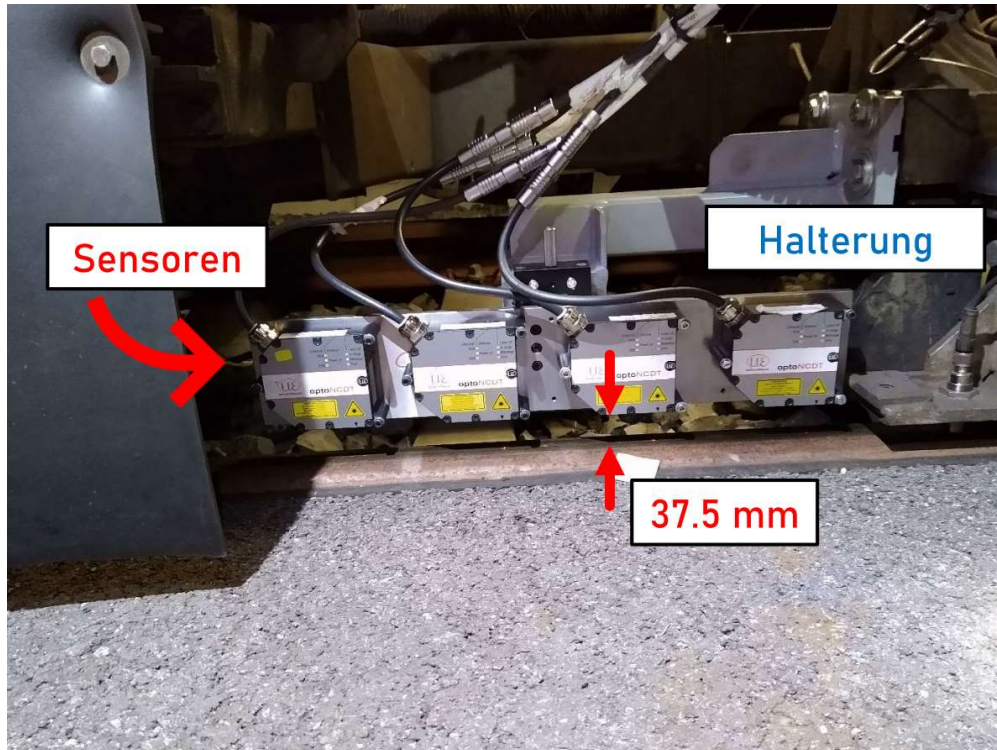


Abbildung 4: Messaufbau aus dem Labor, montiert am Schleifzug (Grizzly 106) für die erste Messung.

Die erste Messung ergab **nutzbare Datensätze** für die Testung der Messkette und Datenverarbeitung. Eine parallele Referenzmessung (Vergleich mit taktiler Messung) wurde nicht durchgeführt. Dies wurde im Arbeitspaket Nr. 7 nachgeholt. Die Erkenntnisse aus der ersten Messung mündeten in der **Nachoptimierung des Messaufbaus**, was insbesondere die Erweiterung der Kabellänge für die einzelnen Sensoren betrifft. Die optimierte Messkette ist in Abbildung 5 schematisch gegeben.

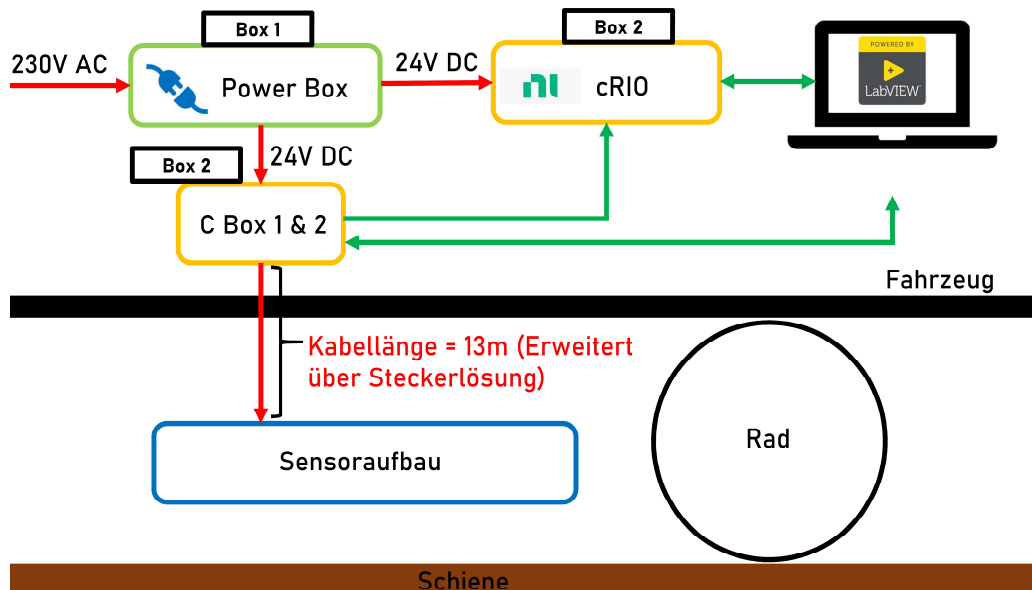


Abbildung 5: Aufbau der Messkette und deren Komponenten sowie Position auf dem Fahrzeug.

Weiterführende Beschreibungen zur Umsetzung am Zug sind in den Zwischenberichten Nr. 4 [5], Nr. 5 [8] und Nr. 6 [10] zu finden.

2.7 Arbeitspaket 7: Vergleichsmessungen auf einer Referenzstrecke

Aufbauend auf die erstmalige Installation am Zug im Rahmen des Arbeitspakets Nr. 6 sollten Referenzmessungen (Abgleich zu taktilem Messgerät) durchgeführt werden. Weiterführend, war eine Erweiterung auf netzweite Messungen geplant. Die folgenden Zielsetzungen wurden verfolgt:

- Auswahl einer Referenzstrecke
- Einsatz des neuen Messsystems auf der Referenzstrecke mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten
- Vergleich der gemessenen Werte mit Ergebnissen ermittelt mit bewährten, vorhandenen Messsystemen
- Evtl. Nachoptimierung der Messhardware und der Datenverarbeitung und Auswertung
- Systematische Vermessung des Schienennetzes unter verschiedenen einzelnen Umwelteinflüssen
- Quantifizieren von Messfehlern und Einflüssen
- Netzweite Messung
- Auswertung zur Tauglichkeit des neuen Messsystems

Der Prototyp des Messaufbaus konnte an einem Zug der Zentralbahn montiert werden. Es handelt sich ebenfalls um einen **temporären Anbau**. Die Anbindung wurde spezifisch für das Fahrzeug und den Aufbau erstellt. Der am Zug installierte Messaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

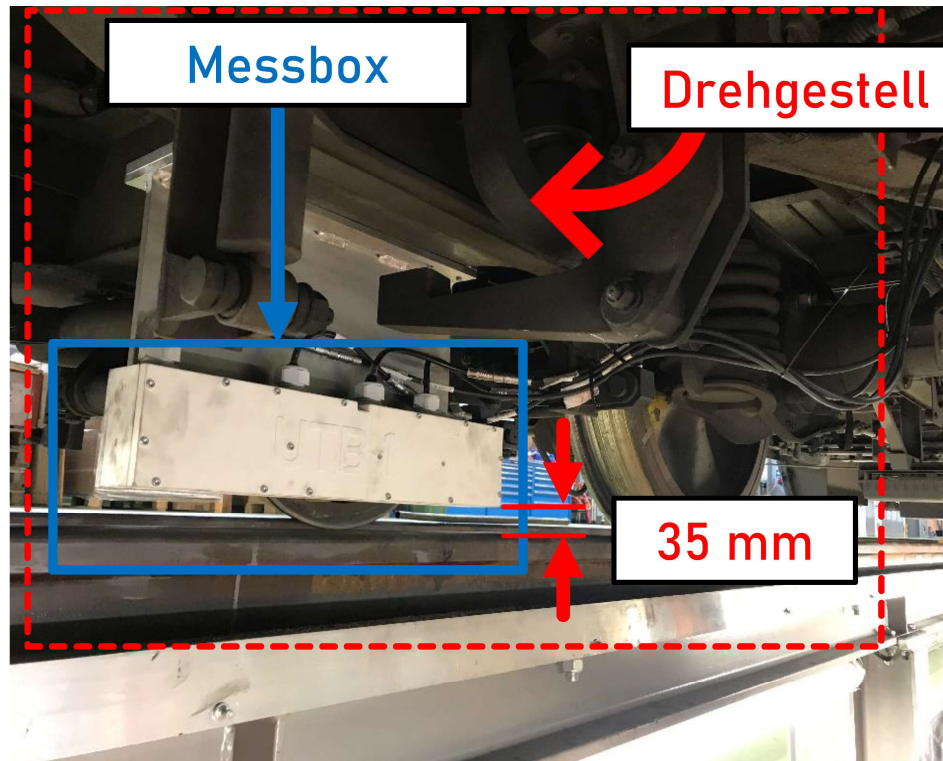


Abbildung 6: Messaufbau/Prototyp (inklusive Verschaltung/Messbox der Sensoren), montiert am Zug der Zentralbahn für den Feldversuch.

Die Messung fand auf dem Netz der **Zentralbahn** statt. Es konnte bei Fahrgeschwindigkeiten bis zu 80 km h^{-1} (je nach Streckenabschnitt) gemessen werden. Eine Referenz wurde mit einem **taktilen Messgerät** der SBB (Vogel & Plötscher RM 150 HR) auf zwei Abschnitten gemessen. Der Prototyp konnte dem ersten Feldversuch unterzogen und die **grundsätzliche Machbarkeit** des Konzeptes aufgezeigt werden. Es wurden Vergleiche mit Messungen auf **verschiedenen Streckensegmenten** ausgewertet. Eine **netzweite Messung** konnte ohne Umsetzungspartner nicht durchgeführt werden. **Schneefall und Regen** zum Zeitpunkt der Messung verfügen über einen grossen Einfluss auf das Messergebnis insbesondere für Pegel der **kleineren Wellenlängen**. Die Störeinflüsse konnten im Versuch nicht voneinander separiert werden. Für eine Weiterentwicklung des Prototypen sind **wiederholte Messungen** auf dem gleichen Streckenabschnitt zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit notwendig. Zudem ist der **notwendige Mindestabstand** zwischen Sensorlinse und Schienenoberkante zu vergrössern. Weitere Optimierungen beziehen sich auf die Sensorabstände und eventuelle Addition von Beschleunigungssensoren. Der Feldversuch selbst und die ermittelten Messergebnisse sind in den Zwischenberichten Nr. 6 [10] und Nr. 7 [11] beschrieben. Der Vergleich des Spektrums der

akustischen Rauheit zwischen der Referenzmessung und einer Messung auf freier Strecke ist in Abbildung 7 dargestellt.

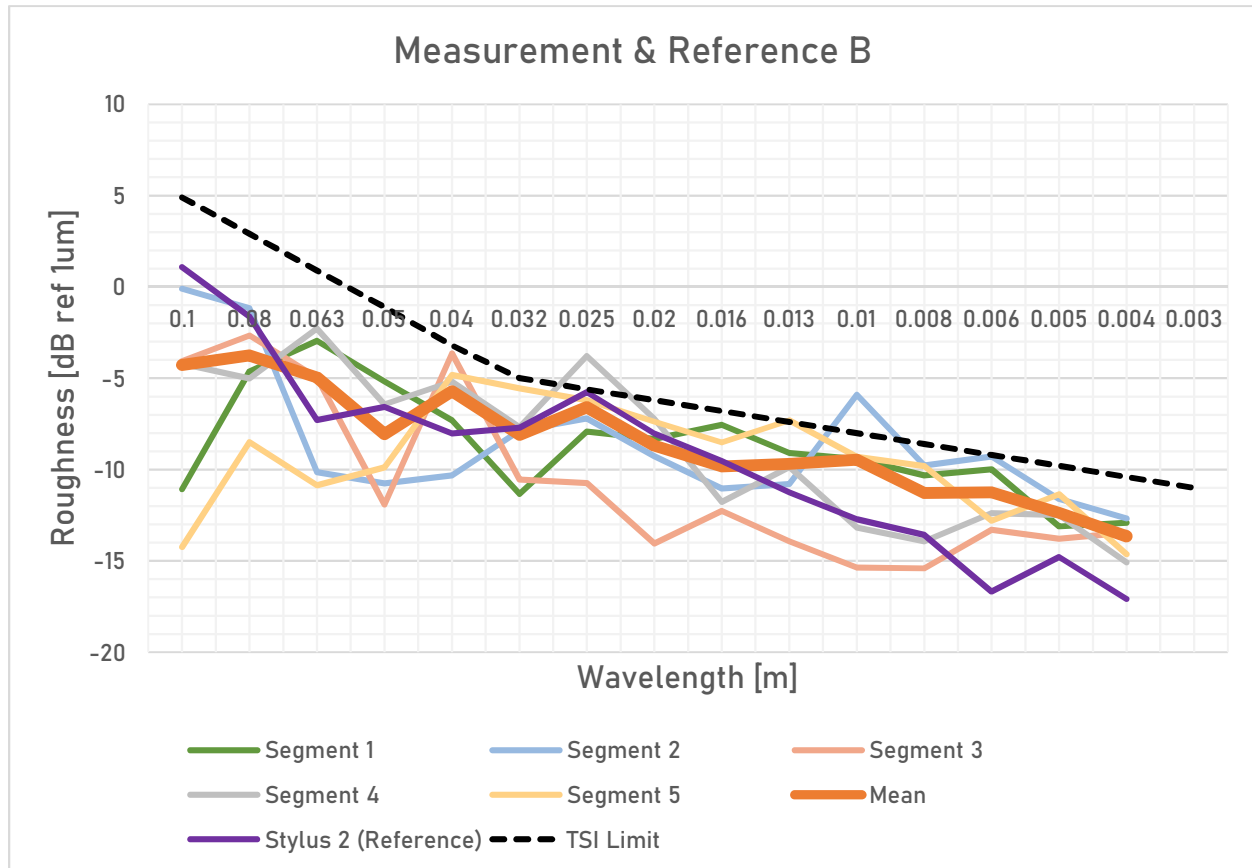


Abbildung 7: Spektrum der akustischen Rauheit für eine Messung bei 50 km h^{-1} auf freier Strecke, verglichen mit dem Referenzsegment B.

2.8 Arbeitspaket 8: Normative Vorschriften für das Messsystem

Die Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete sollten zusammengefasst und Empfehlungen für die Weiterentwicklung und den Betrieb des Messaufbaus formuliert werden. Folgende Zielsetzungen wurden verfolgt:

- Begleitend zu den vorherigen Arbeitspaketen wäre eine normative Weisung vom Bund wünschenswert
- Wie können Mess- und Auswerteverfahren möglichst korrekt beurteilt werden, Referenzstreckenwerte und Referenzmessverfahren
- Klare Vorschriften für zulässige Messprinzipien, Mess- und Auswertemethoden, Kompensation von Umwelteinflüssen auf das Messmittel
- Definition der Abnahmekriterien für ein geeignetes Messsystem

- Festlegung der Grenzwerte für die Rauheit/Welligkeit der Schiene unter Berücksichtigung von Geodaten und eingesetzter Verkehrsmittel
- Validierung, ob festgelegte Ziele erreicht werden
- Detailuntersuchungen bei Bedarf
- Generierung von Schleifaufträgen

Es wurden **Vorschriften/Empfehlungen** für das Messkonzept ausgearbeitet. Die Datenauswertung bzw. die Berechnung des Spektrums der akustischen Rauheit, speziell mit Hinblick einer optischen Messmethode, wurde analysiert. Beispielhaft hierfür ist die Notwendigkeit zur **Standardisierung der Auswertungslänge** für welche ein Spektrum der akustischen Rauheit gemäss EN 15610 [2] berechnet wird. Ein **Vorschlag für das Abnahmeverfahren und mögliche Abnahmekriterien** eines Messgerätes wurden auf Basis der EN 13231-2 [12] und EN 15610 [2] formuliert. Kern des Verfahrens sind **wiederholte Messungen** über einen klar definierten Streckenabschnitt (je Fahrtrichtung eine dreimalige Wiederholung der Messung), was in Abbildung 8 schematisch dargestellt ist.

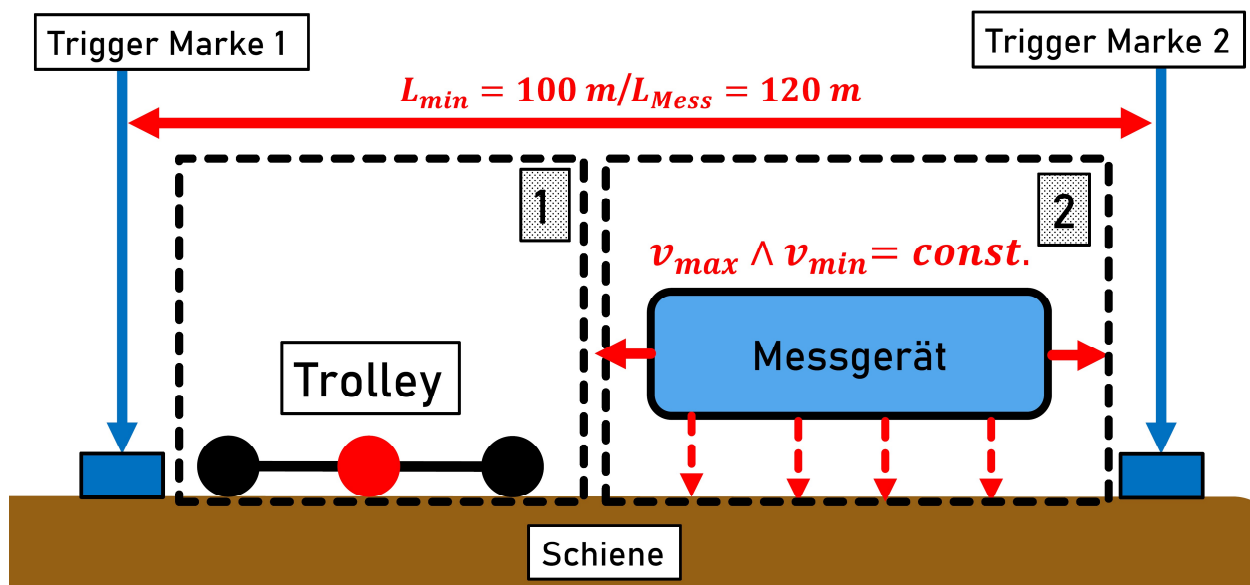


Abbildung 8: Schema des Verfahrens zur Abnahme des/Validierung des Messaufbaus auf definiertem Streckenabschnitt und Gegenüberstellung einer Trolley-Referenz.

Grenzwerte für die Rauigkeit/Welligkeit der Schiene konnten nicht definiert werden, da netzweite Messungen nicht erfolgten. Die Generierung von Schleifaufträgen ist nicht möglich, da neben der akustischen Rauheit weitere Parameter bzw. Schleifstrategien für den Netzbetreiber relevant sind.

Die Auflistung der Vorschläge zur Weiterentwicklung & Standardisierung sind im Zwischenbericht Nr. 6 [10] gegeben. Die detaillierte Beschreibung des Vorschlags zur Validierung des Messkonzepts ist im siebten Zwischenbericht beschrieben [11].

2.9 Fazit & Ausblick

Bestehende Systeme und Messkonzepte (direkte und indirekte Messverfahren, zugbasierte und nicht-zugbasierte Systeme)) wurden analysiert. Es konnten die **Anforderungen** an ein optisches Messsystem zur direkten Messung der akustischen Rauheit aufgestellt werden. Basierend darauf wurde die entsprechende **Sensorik** und das externe **Datenerfassungssystem** für das Messkonzept ausgewählt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Sensortechniken miteinander verglichen, wobei die **Laser-Triangulation** ausgewählt wurde. Die **Sehnenmethode** wurde als Basis für das Messkonzept verwendet.

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Messkonzeptes unter Laborbedingungen wurde ein **Schienenprüfstand** errichtet. Der Prüfstand ermöglichte die **experimentelle Erprobung** des Messkonzeptes auf dem Prüfstand und die Untersuchung von Störungseinwirkungen. Zusätzlich wurden Prüfstände zur Untersuchung der indirekten Achslagermethode und zur Erprobung der Sensor Fusion aufgebaut.

Die **Datenauswertung** bzw. die Ermittlung der **akustischen Rauheit** gemäss EN 15610 [2] wurde untersucht und um Notwendigkeiten für das optische Messkonzept erweitert. Es wurden verschiedene Filtermöglichkeiten und Implementierungen analysiert.

In einer ersten Messung am Schleifzug wurde die Messkette aus dem Labor erprobt. Und auf Basis der Erkenntnisse angepasst. Die **Machbarkeit** des optischen Messkonzeptes konnte im Feldversuch aufgezeigt werden. Messungen zur **Wiederholgenauigkeit** und Identifikation relevanter Einflüsse auf die Messqualität sind in Zukunft durchzuführen. Im Bereich **kleiner Wellenlängen** ist das Messergebnis zu verbessern. Empfehlungen für die **Weiterentwicklung bzw. Verbesserungen** des Prototyps wurden auf Basis der Erkenntnisse aus dem Feldversuch formuliert. Ein Vorschlag zur Validierung des Messkonzeptes auf Basis des in EN 13231-2 [12] beschriebenen Vorgehens wurde formuliert.

Im Laufes des abgeschlossenen Projekts erwies sich der **Grundabstand** zwischen der Schiene und dem Sensor als kritische Grösse. Ausgehend von den bisherigen 35 mm Abstand sollte dieser **erhöht werden** (Wechsel des Sensormodells innerhalb gleicher Baureihe). Die **Sensorabstände** können nochmals aufgrund veränderter Einbauposition (quer zur Fahrriechung) verringert werden, um eine bessere Abstimmung auf kleine Wellenlängen zu ermöglichen

Um sicherzustellen, dass die Messung stets innerhalb des Fahrspiegels erfolgt, ist die Möglichkeit eines **lateralen Positioniermechanismus** zu prüfen. Zukünftige Untersuchungen sollten die **Wiederholgenauigkeit** des Systems ermitteln, durch konsequente Wiederholungsfahrten bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Der Vorschlag zur **Validierung** des Messgeräts sollte in Kooperation mit einem Umsetzungspartner erweitert und praktisch durchgeführt werden.

Referenzen

- [1] D. Frey und M. Kuffa, «BAFU / BAV Projekt-Bericht zum Arbeitspaket 1: Anforderungen an das Messsystem und die Datenauswertung», S. 1–22.
- [2] *DIN EN 15610. Bahnanwendungen. Akustik. Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen. Deutsche Fassung. EN 15610:2019*, Nr. November. Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [3] D. Frey und M. Kuffa, «BAFU / BAV Projekt-Bericht zum Arbeitspaket 2: Stand der Technik, Evaluation der Sensoren und des Datenerfassungssystems», 2020.
- [4] F. Mauz und M. Kuffa, «BAFU / BAV Projekt-Bericht zum Arbeitspaket 3: Aufbau Prüfstand / Design Messgerät», S. 1–29, 2020.
- [5] F. Mauz und M. Kuffa, «Zwischenbericht Nr. 4 - Messsystem für die Schienenrauheit», Zürich, 2021.
- [6] F. Mauz und M. Kuffa, «Zwischenbericht Nr. 5 - Messsystem für die Schienenrauheit», Zürich, Schweiz, 2021.
- [7] F. Mauz, R. Wigger, T. Wahl, M. Kuffa, und K. Wegener, «Acoustic roughness measurement of railway tracks: Implementation of an optical measurement approach & possible improvements to the standard», <https://doi.org/10.1177/09544097221086487>, Bd. 2022, Nr. 0, S. 1–8, Apr. 2022, doi: 10.1177/09544097221086487.
- [8] F. Mauz und M. Kuffa, «Zwischenbericht Nr. 5 - Messsystem für die Schienenrauheit», Zürich, 2021.
- [9] F. Mauz, R. Wigger, T. Wahl, M. Kuffa, und K. Wegener, «Acoustic Roughness Measurement of Railway Tracks: Laboratory Investigation of External Disturbances on the Chord-Method with an Optical Measurement Approach», *Appl. Sci.* 2022, Vol. 12, Page 7732, Bd. 12, Nr. 15, S. 7732, Aug. 2022, doi: 10.3390/AP12157732.
- [10] F. Mauz und M. Kuffa, «Zwischenbericht Nr. 6 - Messsystem für die Schienenrauheit», Zürich, 2022.
- [11] F. Mauz und M. Kuffa, «Zwischenbericht Nr. 7 - Messsystem für die Schienenrauheit», Nr. 7, S. 1–25, 2022.
- [12] «DIN EN 13231-2. Bahnanwendungen. Oberbau. Abnahme von Arbeiten. Teil 2: Abnahme von reprofilierten Schienen im Gleis, Weichen, Kreuzungen und Schienenausügen. Deutsche Fassung. DIN EN 13231-2: 2020», 2020, doi: <https://dx.doi.org/10.31030/3173596>.