

KOMBI

KONTINUIERLICHES ON-BOARD MONITORING DER BAHN INFRASTRUKTUR

ERGEBNISBERICHT

DOCUMENT ID: MEE035-013.05
DOCUMENT STATUS: RELEASED
DOCUMENT AUTHOR: KREILMEIER M., LANZ C., MATTANOVICH C., REISNER C.

IMPRESSUM:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 Bundesministerium
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 ÖBB
INFRA

Für den Inhalt verantwortlich:

Mission Embedded GmbH
Gutheil-Schoder-Gasse 8-12
A – 1100 Wien

 MISSION EMBEDDED
MEMBER OF THE FREQUENTIS GROUP

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 FFG
Forschung wirkt.

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Kontakt: DI Florian Saliger; florian.saliger@oebb.at

Auftragnehmer:

Mission Embedded GmbH
Kontakt: Michael Kreilmeier, MSc MBA; krm@mission-embedded.com

DOKUMENTENVERLAUF

REVISION	DATUM	ÄNDERUNGEN	AUTOR
0.1	30.10.2018	Dokument erstellt	Lanz Christoph
0.2	01.11.2018	Use Case Analyse erstellt	Lanz Christoph, Mattanovich Christine
0.3	23.11.2018	Erhebung und Entwicklung anderer Bahnen erstellt	Lanz Christoph
0.4	19.03.2019	Sensortechnologie Analyse Bewertung erstellt	Lanz Christoph, Reisner Clemens
0.5	22.04.2019	Sensorevaluierung	Lanz Christoph, Reisner Clemens, Kreilmeier Michael
0.6	01.07.2019	Integrationskonzept und Gesamtkonzept erstellt	Lanz Christoph, Reisner Clemens, Mattanovich Christine
0.7	09.09.2019	Kostenbewertung	Lanz Christoph, Mattanovich Christine, Kreilmeier Michael
0.8	17.12.2019	Anpassung an FFG Formatvorlage	Mattanovich Christine

DOKUMENT STATUS

STATUS	NAME / UNTERSCHRIFT	DATUM
Überprüft	Clemens Reisner	23.09.2019
Überprüft	Christine Mattanovich	17.12.2019
Genehmigt	Michael Kreilmeier	18.12.2019

DOKUMENTEIGENSCHAFTEN

EIGENSCHAFT	WERT
Dokument ID	MEE035-013.05
Dateiname	KOMBI_report.0.7.docx
Vorlagen-ID	IMS-4001.11_TMP_Document.dotm

© 2019 Mission Embedded GmbH
 Gutheil-Schoder-Gasse 8-12, 1100 Vienna, Austria, <http://www.mission-embedded.com/>
 Vienna Commercial Court: FN 410566 z, VAT ID: ATU68709007

All rights reserved. No part of the document may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, for any purpose, without the written permission of Mission Embedded GmbH.

Company or product names mentioned in this document may be trademarks or registered trademarks of their respective companies.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	8
1.1	Zielsetzung.....	8
1.2	Zielgruppe.....	8
1.3	Projekttablauf und Dokumentenstruktur.....	8
2	Use Case Analyse.....	10
2.1	Weichen.....	10
2.1.1	UC1.1 Weichensensorik.....	10
2.1.2	UC1.2 Weichenherz.....	11
2.1.3	UC1.3 Abrieb der Weichenzunge.....	12
2.1.4	UC1.4 Ausbruch.....	13
2.1.5	UC1.5 Bruch der Kriechschutzvorrichtung.....	13
2.1.6	UC1.6 Beschädigung an Antrieb und Komponenten.....	14
2.1.7	UC1.7 Hydrostar Abdeckungen.....	15
2.2	Schiene.....	15
2.2.1	UC2.1 Schienenbruch.....	15
2.2.2	UC2.2 Head Checks.....	16
2.2.3	UC2.3 Gleisverwerfung.....	17
2.2.4	UC2.4 Mangel im Schweißprozess.....	17
2.2.5	UC2.5 Squats.....	18
2.2.6	UC2.6 Wheel Burns.....	19
2.2.7	UC2.7 Eindrückungen.....	20
2.2.8	UC2.8 Ausbröckelungen der Schiene.....	21
2.2.9	UC2.9 Ausbruch.....	22
2.2.10	UC2.10 Schlupfwellen.....	23
2.3	Umgebung.....	24
2.3.1	UC3.1 Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts.....	24
2.3.2	UC3.2 Fehlende Kleinteile.....	24
2.3.3	UC3.3 Beschädigte Schwellen.....	25
2.3.4	UC3.4 Flora und Fauna.....	26
2.4	Bewertung der Use Cases.....	26
2.5	Benötigte Funktionen zur Erkennung der Use Cases.....	28
3	Sensortechnologie Analyse & Bewertung.....	30
3.1	Anforderungen.....	30
3.1.1	Sensordatenverarbeitung.....	31
3.1.2	Datenverbindung.....	31

3.1.3	Verortung	31
3.2	Kamera Sensorik.....	31
3.2.1	Montagevarianten	33
3.2.2	Kommentare	36
3.3	Beschleunigungssensoren	37
3.3.1	Achslagerbeschleunigung	37
3.3.2	Im gefederten Bereichen	37
3.3.3	Kommentare	37
3.4	LIDAR-Sensor	38
3.4.1	Kommentare	38
3.5	Ultraschall	38
3.5.1	Kommentare	39
3.6	Wirbelstromprüfung.....	39
3.6.1	Kommentare	39
3.7	RADAR	39
3.7.1	Kommentare	40
3.8	Zusammenfassung.....	40
4	Erhebung & Bewertung der Entwicklungen anderer Bahnen	43
4.1	Kontaktierte Bahnbetreiber.....	43
4.2	Fragenkatalog	43
4.3	Zusammenfassung Befragungen	44
4.3.1	Deutsche Bahn.....	44
5	Sensorevaluierung	45
5.1	Systembeschreibung.....	46
5.2	Messkampagne.....	48
5.3	Datenanalyse und Bewertung	49
5.3.1	Kamerasensorik	49
5.3.2	Verortung	56
5.3.3	Beschleunigungssensor	59
5.3.4	LIDAR-Sensor	60
5.4	Zusammenfassung.....	60
5.4.1	Highlights der Sensorevaluierung.....	60
6	Gesamtkonzept	71
6.1	Einleitung	71
6.1.1	Bewertung bezüglich Use Cases.....	72
6.2	Technisches Konzept.....	74
6.3	Operatives Konzept.....	78

7	Integrationskonzept	80
7.1	Sensorik am Fahrzeug	80
7.1.1	Basissystem	80
7.1.2	Verarbeitungseinheit	82
7.1.3	Kommunikationseinheit	82
7.1.4	Beschleunigungssensor	82
7.1.5	Erweiterungen	82
7.2	Integration in Betreiber IT-Infrastruktur	83
7.3	Integration in betriebliche Wartungsabläufe	84
8	Kostenbewertung	85
9	Zusammenfassung	86
10	Akronyme und Abkürzungen	88
11	Quellenverzeichnis	89

ABBILDUNGEN

Abb. 1: starres Herzstück, ohne Verformung [1].....	11
Abb. 2: Weichenherzen mit Ausbrüchen [2].....	11
Abb. 3: Weichenzunge mit Abrieb [3]	12
Abb. 4: Ausbruch an der Weiche [4].....	13
Abb. 5: Bruch einer Kriechschutzvorrichtung [4].....	13
Abb. 6: Weiche mit intakten Abdeckungen [5]	14
Abb. 7: Schienenbruch [7].....	15
Abb. 8: Head Checks [4] [7]	16
Abb. 9: Gleisverwerfung [8].....	17
Abb. 10: Squats [4].....	18
Abb. 11: Wheel Burns [4]	19
Abb. 12: Eindrückungen [4]	20
Abb. 13: Abblättern der Schiene [4].....	21
Abb. 14: Ausbruch [6].....	22
Abb. 15: Schlupfwellen [4].....	23
Abb. 16: Fehlende Schrauben [3].....	24
Abb. 17: Lockere Schraube in brüchiger Holzschwelle (links) gebrochene Schwellen (rechts) [3]	25
Abb. 18: Bewuchs am Gleiskörper [3]	26
Abb. 19: Field-of-View	33
Abb. 20: Mögliches Field-of-View	34
Abb. 21: Field-of-View nach unten, mit zwei Kameras.....	35
Abb. 22: Field-of-View steil nach unten, zwei mögliche Positionen.....	36
Abb. 23: Kamerasystem, LIDAR-Sensor und RADAR - Zug Unterseite.....	46
Abb. 24: Beschleunigungssensor an der Achse	46
Abb. 25: Tracking Kamera im Zug.....	47
Abb. 26: In Fahrerkabine eingesetzte Kamera mit Halterung	47
Abb. 27: Systemaufbau im Zug	48
Abb. 28: Aufnahme der Kamera Zugunterseite, Originalbild.....	49
Abb. 29: entzerrtes Bild von Weiche mit erkannten Weichenherzen.....	50
Abb. 30: Durchgehendes, entzerrtes Streckenbild.....	51
Abb. 31: Originalbilder der linken und rechten Kamera	52
Abb. 32: Entzerrte Bilder der linken und rechten Kamera	52
Abb. 33: Berechnete Tiefenkarte	53
Abb. 34: Tiefenkarte nach Filterung	53
Abb. 35: Nahe-Infrarot-Foto	54
Abb. 36: 3D-Tiefenbild	55
Abb. 37: Bild des Schienenverlaufs.....	56
Abb. 38: RADAR Doppler Werte korrelieren mit dem Geschwindigkeitssignal.....	58
Abb. 39: Beschleunigungssensor an Radachse	59
Abb. 40: entzerrtes Bild mit erkanntem Bruch	61
Abb. 41: Holzschwellen mit Abnutzungserscheinungen, entzerrte Bilder.....	62
Abb. 42: entzerrtes Bild von Weiche mit erkannten Weichenherzen.....	63
Abb. 43: Entzerrte Bilder mit erkannten Weichen-Schaltkästen.....	64
Abb. 44: mögliche fehlende Schraube, entzerrtes Bild	65
Abb. 45: Bewuchs am Gleiskörper, entzerrtes Bild mit erkanntem Bewuchs	66
Abb. 46: Gelöste Spannklemmen und Winkelführungsplatten, entzerrtes Bild mit erkannten Objekten	67

Abb. 47: Totes Tier, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt.....	67
Abb. 48: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt	68
Abb. 49: Flasche links im Bild, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt	68
Abb. 50: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt	69
Abb. 51: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt	69
Abb. 52: Schraube zur Befestigung der Schiene	70
Abb. 53: KOMBI Sensorik am Zug	74
Abb. 54: Gesamtkonzept.....	76
Abb. 55: Mögliche Heatmap	78
Abb. 56: Abläufe im operativen Konzept	79

TABELLEN

Tab. 1: Bewertung der Use Cases	27
Tab. 2: Use Cases und Funktionen	29
Tab. 3: Übersicht der Technologien	42
Tab. 4: Sensorevaluierung	60
Tab. 5: Use Case Abdeckung	72
Tab. 6: Kostenbewertung - Basissystem	85
Tab. 7: Kostenbewertung - Erweiterungen	85

1 EINLEITUNG

1.1 ZIELSETZUNG

Dieses Dokument erläutert die im KOMBI-Projekt durchgeführten Arbeiten und fasst die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

1.2 ZIELGRUPPE

Das Projektteam der ÖBB Infrastruktur und Mission Embedded.

1.3 PROJEKTABLAUF UND DOKUMENTENSTRUKTUR

Das KOMBI-Projekt hat Rahmenbedingungen, Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung neuer und kosteneffizienter Sensorik-Systeme untersucht, welche auf Regelzügen montiert werden können, um damit Teile der Eisenbahn-Infrastruktur nahezu kontinuierlich zu überwachen.

Unter Verwendung der Technologie-Roadmapping Methode werden auf Basis von gemeinsam mit dem Auftraggeber definierten Use Cases unterschiedlichste Sensortechnologien und -systeme untersucht und betreffend Verwendbarkeit bewertet. Außerhalb des Projektumfanges wurde außerdem eine Messkampagne durchgeführt. Verschiedene Sensoren wurden auf einen Messzug montiert und bei einer Testfahrt getestet. Die Ergebnisse dieser Messkampagne sind in die Evaluierung eingeflossen und in diesem Dokument nachzulesen.

Ergänzend erfolgten eine Erhebung und Bewertung derartiger Ansätze bei anderen Bahnen sowie auch im Rahmen nationaler und internationaler F&E-Programme. Basierend auf den Ergebnissen erfolgen Erarbeitung und Bewertung möglicher Gesamtkonzepte, aus denen schließlich ein Integrationskonzept erstellt wurde.

In dieses Dokument sind Ablauf und Ergebnisse des KOMBI-Projekts dargestellt. In Kapitel [2](#) werden Use Cases von auftretenden Schäden am und um den Gleiskörper dargestellt und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Infrastrukturbetreiber bewertet. Zusätzlich dazu werden die Funktionen besprochen, die notwendig sind, um diese Use Cases mit Sensorik erkennen zu können. Darauf basierend werden in Kapitel [3](#) Technologien diskutiert, die diese Funktionen erfüllen und somit zur Erkennung der relevanten Use Cases eingesetzt werden können.

Kapitel [4](#) stellt die Methodik zur Datenerhebung bei anderen Bahninfrastrukturbetreibern und die Ergebnisse der Recherchen und geführten Interviews dar.

Die bei der durchgeführten Messkampagne eingesetzten Sensoren, und die Analyse der gesammelten Daten, werden in Kapitel [5](#) beschrieben.

In Kapitel [6](#) wird das für KOMBI entwickelte Gesamtkonzept vorgestellt und dargestellt, wie die empfohlene Sensorik die relevanten Use Cases abdecken kann und wie das System technisch und operativ umgesetzt wird. Kapitel [7](#) erklärt wie die einzelnen Sensoren am Zug integriert werden können, und wie sich das gesamte System in die IT-Infrastruktur und die betrieblichen Abläufe der Bahninfrastrukturbetreiber eingliedert.

In Kapitel [8](#) wird das empfohlene Gesamtkonzept bezüglich des Kostenstandpunktes bewertet. Kapitel [9](#) fasst die im KOMBI-Projekt durchgeführten Arbeiten und die daraus gewonnen Erkenntnisse nochmals zusammen.

2 USE CASE ANALYSE

Dieser Abschnitt enthält die Definition und Beschreibung der relevanten Schadensformen. Jede Schadensform beschreibt eine beobachtungswerte negative Veränderung des Gleiskörpers und stellt somit einen Use Case für dieses Projekt dar.

Die Use Cases sind nach ihrem Auftreten in drei Abschnitte aufgeteilt: Weichen, Schiene und Umgebung des Gleiskörpers. Jeder Use Case enthält neben einer kurzen Beschreibung die für den Use Case notwendigen Funktionen: diese beschreiben was muss getan werden, um den Use Case erkennen zu können. Verortung ist dabei eine für jeden Use Case notwendige Funktion, und deshalb nicht mehr explizit angegeben, sondern wie folgt für alle Use Cases beschrieben.

VERORTUNG

Alle erfassten Schäden müssen verortet werden, um später gegebenenfalls eine zielgerichtete Handlung setzen zu können. Verortung ist somit eine Funktion, die für alle nachfolgenden Anwendungsfälle essenziell ist.

Zur Positionsbestimmung kann bei Verfügbarkeit eines Signals ein Navigationssatellitensystem, wie zum Beispiel GPS oder GLONASS verwendet werden, oder die Lokalisierung von schon am Zug vorhandenen Systemen, wie z.B. von der railpower box, übernommen werden. Wenn stellenweise kein Signal verfügbar ist, wie z.B. in Tunnelabschnitten, kann die Verortung durch andere Systeme weitergeführt werden: Radodometrie, visuelle Odometrie, oder durch ein inertiales Navigationssystem, kurz INS.

2.1 WEICHEN

2.1.1 UC1.1 WEICHENSENSORIK

Beschreibung:

Wenn eine elektrifizierte Weiche umgestellt wird, sendet ein Sensor ein Signal, ob sich die Weiche tatsächlich verriegelt hat. Bei negativem Signal muss die Bahnstrecke gesperrt und die Weiche überprüft werden. Das kann passieren, wenn Schnee und Eis die Weiche so blockieren, dass sie nicht korrekt verriegelt. Durch eine kontinuierliche Überwachung könnte man feststellen ob vorhandenes Eis oder Schnee in späterer Folge zum Problem werden kann.

Notwendige Funktion:

- F01 Erkennung von Schnee, Eis und Fremdkörper

2.1.2 UC1.2 WEICHENHERZ



Abb. 1: starres Herzstück, ohne Verformung [1]



Abb. 2: Weichenherzen mit Ausbrüchen [2]

Beschreibung:

Das Weichenherz ist die Stelle der Weiche, die am stärksten belastet wird. Bei Befahren gegen die Spitze wird nach Überqueren der Herzstückklücke dem Herzstück von jedem darüberfahrenden Rad ein Schlag versetzt. Durch diese im Betrieb ständig auftretende Belastung kommt es häufig zu Verformungen oder gar zum Ausbruch ganzer Teile des Weichenherzes.

Notwendige Funktion:

- F02 Vermessen der Form
- F03 Vergleich mit Referenzform

2.1.3 UC1.3 ABRIEB DER WEICHENZUNGE



Abb. 3: Weichenzunge mit Abrieb [3]

Beschreibung:

Die Weichenzungen werden kontinuierlich belastet. Da sie im Vergleich zur normalen Schiene sehr dünn zulaufend sind, entstehen Schäden an Weichenzungen häufiger. Übermäßiger Verschleiß verursacht eine kritische Profilschwächung und kann zum Ausbruch von Teilen oder zum Gesamtbruch der Weichenzunge führen.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)

2.1.4 UC1.4 AUSBRUCH



Abb. 4: Ausbruch an der Weiche [4]

Beschreibung:

Über die Zeit kann es an besonders belasteten Teilen der Weiche zu Rissen bis hin zum Ausbruch von Bruchstücken kommen.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)

2.1.5 UC1.5 Bruch der Kriechschutzvorrichtung



Abb. 5: Bruch einer Kriechschutzvorrichtung [4]

Beschreibung:

Dieser Defekt ist durch einen Bruch einer Kriechschutzvorrichtung in Weichen gekennzeichnet. Das kann zu Behinderung von Zügen, Problemen bei der Bewegung von Weichen, falscher

Ausrichtung der Weichenzungen und infolgedessen zu Erfassungsfehlern in der Sensorik führen.

Der Defekt passiert selten, kann aber vorkommen.

Notwendige Funktion:

- F02 Vermessen der Form
- F03 Vergleich mit Referenzform

2.1.6 UC1.6 BESCHÄDIGUNG AN ANTRIEB UND KOMPONENTEN



Abb. 6: Weiche mit intakten Abdeckungen [5]

Beschreibung:

Generell sollten die Abdeckungen von Weichen überprüft werden: d.h. ob alle Verkleidungen vollständig sind, und ob Verkleidungen Beschädigungen aufweisen. Falls schon bei den Abdeckungen etwas nicht mehr in Ordnung ist, kann man eine Überprüfung der Komponenten darunter sinnvoll sein, da eine Beschädigung der Komponenten unter der Abdeckung nicht ausgeschlossen werden kann.

Notwendige Funktion:

- F02 Vermessen der Form
- F03 Vergleich mit Referenzform

2.1.7 UC1.7 HYDROSTAR ABDECKUNGEN

Beschreibung:

Spezialfall von UC1.6, der im Workshop mit der ÖBB als eigener Use Case definiert wurde.

Speziell bei HYDROSTAR Weichen kann man überprüfen, ob sie ordnungsgemäß abgedeckt sind: die Abdeckungen der Weichen befinden sich zwischen den Schienen.

Notwendige Funktion:

- F02 Vermessen der Form
- F03 Vergleich mit Referenzform

2.2 SCHIENE

Schäden an der Schiene führen im schlimmsten Fall zu Schienenbruch. Bevor es dazu kommt, können verschiedene Schäden erkennbar sein, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

2.2.1 UC2.1 SCHIENENBRUCH



Abb. 7: Schienenbruch [7]

Beschreibung:

Unter Schienenbruch versteht man das vollständige Brechen der Schiene. Ein Schienenbruch kann zu einer Entgleisung führen. Er kann mitunter noch für einige Zeit befahren werden, ohne bemerkt zu werden. Eine kontinuierliche Überwachung könnte Schienenbrüche oder Schäden, die zu eben diesen führen könnten, feststellen bevor er für einen Triebfahrzeugführer bemerkbar wird oder sogar zu einer Entgleisung führt.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F10 Erfassen von Achslagerbeschleunigungen (Schläge)

2.2.2 UC2.2 HEAD CHECKS

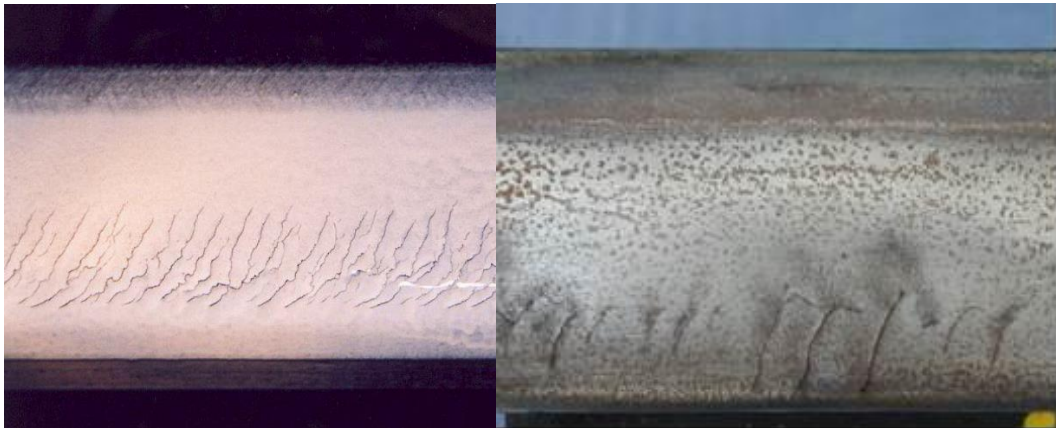


Abb. 8: Head Checks [4] [7]

Beschreibung:

Head Checks sind feine parallele Oberflächenrisse, die im Abstand von 2-7mm auftreten. Sie entstehen meist an der Fahrkante der Außenschiene in Kurven mit Radien von 400–1500 m, was auch als Fahrkantenrisse bezeichnet wird. Head Checks werden durch Rollkontaktermüdung verursacht. Abhängig von den Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene liegen die Risse in einem Winkel von 35 ° bis 70 ° (bis zu 90 ° für hohe Traktion) bezogen auf die Schienenlängsachse.

Nicht behandelte Head Checks wachsen in das Innere der Schiene, wo sich die Risse vereinigen können, so dass es zu größeren Materialausbrüchen und des Weiteren dann zu einem Schienenbruch kommen kann. Um die Tiefe der Risse zu begrenzen, müssen Maßnahmen wie das Schleifen der Schiene erfolgen, bevor die Risse zu tief werden.

Notwendige Funktion:

- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.2.3 UC2.3 GLEISVERWERFUNG



Abb. 9: Gleisverwerfung [8]

Schienen dehnen sich bei Erwärmung aus. Wenn die Kräfte vom Oberbau nicht mehr aufgenommen werden können, können Gleisverwerfungen entstehen. Dabei verschiebt sich der gesamte Gleisrost zur Seite. Eine Gleisverwerfung kann sich im Augenblick des Befahrens ausbilden, da zusätzliche dynamische Kräfte durch das Schienenfahrzeug auf ein bereits stark belastetes Gleis wirken.

Notwendige Funktion:

- F07 Erfassen des Schienenverlaufs über den Weg
- F08 Lageänderung des Fahrzeugs

2.2.4 UC2.4 MANGEL IM SCHWEIßPROZESS

Beim Zusammenschweißen der Schienen können Probleme auftreten, die zu Schweißfehlern führen. Wenn diese nicht rechtzeitig entdeckt und korrigiert werden, kann es zu einem Schienenbruch kommen.

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten, wie Fehlern entstehen können:

- Mangel im Schweißprozess führen zu einer Mulde. Diese Fehler entstehen beim Zusammenschweißen, d.h. nicht im laufenden Betrieb
- Unstetigkeiten aufgrund der nicht-Erreichung der Schienenhärte: diese führen dann im Betrieb zu Fehlern

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.2.5 UC2.5 SQUATS



Abb. 10: Squats [4]

Beschreibung:

Squats sind am Schienenkopf sichtbare Verbreitungen und örtlich begrenzte Eindruckstellen, begleitet von einem dunklen Fleck mit halbkreis- oder v-förmigen Rissen. Die Risse breiten sich im Schienenkopf aus, zunächst in einem flachen Winkel zur Oberfläche. Wenn sie circa 3-5mm Tiefe erreichen, breiten sie sich auch quer dazu aus und können zu Schienenbruch führen.

Es gibt mehrere Theorien über ihre Entstehung. Mögliche Ursachen sind hohe Kontaktspannungen, lokale Mikrostrukturänderungen, die durch Mikroschlupf der Räder usw. verursacht werden.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.2.6 UC2.6 WHEEL BURNS



Abb. 11: Wheel Burns [4]

Beschreibung:

Das Schleudern einer Antriebsachse kann einen Materialabtrag bzw. eine Gefügeänderung an der Schiene verursachen. Diese Beschädigung kann sich weiterentwickeln und verursacht an der Schiene bzw. an allen folgenden Rädern extrem hohe dynamische Lasten, sodass im Extremfall auch Schienen- bzw. Radbrüche nicht ausgeschlossen werden können.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung
- F10 Erfassen von Achslagerbeschleunigungen (Schläge)

2.2.7 UC2.7 EINDRÜCKUNGEN

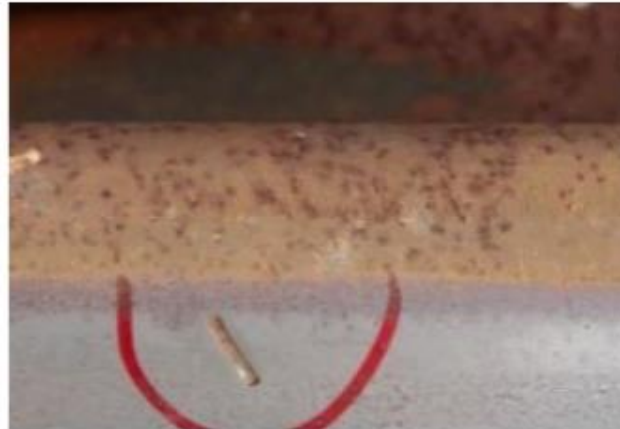


Abb. 12: Eindrückungen [4]

Beschreibung:

Dieser Defekt tritt hauptsächlich in regelmäßigen Abständen auf mehreren aufeinanderfolgenden Schienenabschnitten auf, manchmal über eine beträchtliche Entfernung. Wenn der Aufdruck ein scharfes Profil hat, kann er aufgrund der Kerbwirkung zu Rissen und im schlimmsten Fall zu Schienenbrüchen führen.

Mögliche Ursachen sind Defekte durch beschädigte Räder, Ballastabdrücke und Fremdkörper.

Notwendige Funktion:

- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.2.8 UC2.8 AUSBRÖCKELUNGEN DER SCHIENE



Abb. 13: Ablättern der Schiene [4]

Beschreibung:

Dieser Defekt tritt häufig an der Fahrkante und auf der Fahrfläche am Schienenkopf oder auch im Radübergabebereich der Weiche auf. Hauptsächlich findet man den Defekt dort, wo Züge häufig beschleunigen.

Mögliche Ursachen sind hohe Kontaktspannungen, die zu Rissbildung an der Oberfläche führen und durch anschließendes Zusammenwachsen Ausbröckelungen verursachen. Hohe Belastung kann durch nicht optimale Rad-Schiene-Geometrie bzw. hohe Traktionskräfte entstehen.

Notwendige Funktion:

- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.2.9 UC2.9 AUSBRUCH



Abb. 14: Ausbruch [6]

Beschreibung:

Über die Zeit kann es an besonders belasteten Teilen zu Rissen bis hin zum Ausbruch von Bruchstücken kommen.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)

2.2.10 UC2.10 SCHLUPFWELLEN



Abb. 15: Schlupfwellen [4]

Beschreibung:

Schlupfwellen sind periodische Oberflächenunebenheiten die je nach Art unterschiedliche Längen, Abstände und Tiefen aufweisen. Die Tiefe kann zwischen 0,01–1 mm und der Abstand zwischen 20 und 300mm variieren.

Mehrere Möglichkeiten bestehen, die Schlupfwellen hervorrufen können. Unter anderem das Durchrutschen des Rads oder die Kombination aus Verschleiß und plastischen Verformungen. Meist spielen die Resonanzfrequenzen des Antriebstranges eine Rolle. Slipstick-Effekte im Rad-Schiene-Kontakt führen dann zu Schlupfwellen.

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe, Profil)
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung
- F08 Lageänderung des Fahrzeugs (Vibrationen)
- F10 Erfassen von Achslagerbeschleunigungen

2.3 UMGEBUNG

2.3.1 UC3.1 NENNENSWERTE ABSENKUNG DES GLEISBETTS

Beschreibung:

Durch Effekte wie Untergrundbewegungen oder mangelnde Entwässerung kann sich das Gleisbett in der Lage verändern. Wenn man über eine solche Stelle fährt, merkt man dies an einem Stoß von unten. Ein Triebfahrzeugführer kann auch Feinteile im Schotter bemerken, welche aufgeschleudert werden und aus dem Gleisbett spritzen („Spritzstelle“).

Notwendige Funktion:

- F04 Vermessen (Höhe)

F08 Lageänderung des Fahrzeugs

2.3.2 UC3.2 FEHLENDE KLEINTEILE



Abb. 16: Fehlende Schrauben [3]

Beschreibung:

Schrauben, Federn oder andere Kleinteile zur Befestigung von Schienen und Weichen können sich lockern oder sogar lösen. Gründe dafür sind beispielsweise falsche Materialwahl, falsche Befestigung oder zu hohe dynamische Kräfte und Vibrationen durch den Fahrbetrieb.

Wenn sich Schrauben aus den Schwellen lösen können die Schienen auseinander kippen oder die Schalterkennung bei Weichen beeinträchtigt werden.

Notwendige Funktion:

- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.3.3 UC3.3 BESCHÄDIGTE SCHWELLEN



Abb. 17: Lockere Schraube in brüchiger Holzschwelle (links) gebrochene Schwellen (rechts) [3]

Beschreibung:

Holzschwellen, die verrotten, oder Betonschwellen, die springen, können dazu führen, dass sich Schrauben lösen. Siehe UC3.2.

Mehrere aufeinanderfolgenden Schwellen können beispielsweise durch größere auf den Gleiskörper fallende Felsbrocken beschädigt werden.

Notwendige Funktion:

- F03 Vergleich mit Referenzform
- F05 Erfassen der Oberfläche
- F06 Mustererkennung

2.3.4 UC3.4 FLORA UND FAUNA



Abb. 18: Bewuchs am Gleiskörper [3]

Beschreibung:

Falls auch die erweiterte Umgebung überwacht werden soll, ergeben sich weitere Anwendungsfälle.

Bäume oder Büsche, die ins Lichtraumprofil wachsen oder durch umfallen zu einer Gefahr werden können, können visuell überwacht werden. Vor allem durch Schneelast im Winter können dabei Bäume zu einer Gefahr werden.

Notwendige Funktion:

- F09 Erfassen von Bewuchs der sich dem Lichtraumprofil nähert

2.4 BEWERTUNG DER USE CASES

Die Use Cases und die sich daraus ergebenden notwendigen Funktionen, wurden im Zuge eines Workshops zusammen mit Mitarbeitern der ÖBB vorgestellt und danach gemeinsam bewertet.

Betrachtet wurde die Häufigkeit, Impact, Priorität, und die Konsequenz bei Nichterkennung der einzelnen Use Cases. Daraus und aus der nachfolgenden Diskussion haben sich Use Cases mit besonders hoher Dringlichkeit ergeben, die daher in weiterer Folge in dieser Studie näher betrachtet werden:

- Schienenbruch
- Gleisverwerfungen
- Fehlende Kleinteile
- Beschädigte Schwellen
- Ausbruch (bei Weichen kritischer als bei Schiene)

- Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts

Die folgende Tabelle zeigt die Bewertung aller Use Cases, wobei Use Cases mit mittlerer (~) oder niedriger (-) Priorität in den weiteren Kriterien nicht mehr beurteilt wurden. Die Bewertung der Priorität wurde von den teilnehmenden ÖBB Experten entsprechend ihrer Wahrnehmung für die betriebliche Erkennungsnotwendigkeit in einem On-Board-Monitoring-System vorgenommen.

	USE CASE	PRIORITÄT	HÄUFIGKEIT	IMPACT	KONSEQUENZ BEI NICHTERKENNUNG
Weiche					
	Weichensensorik	+	-	-	Streckensperre
	Weichenherz	+	-	+	Entgleisung
	Abrieb der Weichenzunge	-			Entgleisung
	Ausbruch	+	~	+	Fahrzeugschaden, ev. Entgleisung
	Bruch der Kriechschutzvorrichtung	+	-	-	Meldung wäre gut, Entgleisung
	Beschädigung an Antrieb und Komponenten	+	-	~	Meldung wäre gut, Entgleisung
	Hydrostar Abdeckungen	+	-	~	Meldung wäre gut, Entgleisung
Schiene					
	Schienenbruch	+	+	+	Ev. Entgleisung
	Head-Checks	-			Schienenbruch
	Gleisverwerfungen	+	~	+	Entgleisung
	Mangel im Schweißprozess	~			
	Squats	-			
	Wheel Burns	+	-	~	Fahrzeug und Infrastrukturschäden
	Eindrückungen	+	~	-	Fahrzeug und Infrastrukturschäden
	Ausbröckeln der Schiene	-			
	Ausbruch	+	-	~	Fahrzeug und Infrastrukturschäden
	Schlupfwelle	-			
Umgebung					
	Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts	+	-	+	Entgleisung
	fehlende Kleinteile	+	~	~	Bis zu Entgleisung
	Beschädigte Schwellen	+	~	~	Bei mehreren aufeinanderfolgenden: Entgleisung möglich
	Flora und Fauna	+	-	-	Gering, aber Meldung wichtig

Tab. 1: Bewertung der Use Cases

2.5 BENÖTIGTE FUNKTIONEN ZUR ERKENNUNG DER USE CASES

Um die Use Cases durch Sensortechnologie erkennen zu können, muss die Sensortechnologie gewisse Funktionen erfüllen, die die Use Cases erfassen kann. Als ersten Schritt wurde gemeinsam mit dem Projektpartner in einem Workshop erarbeitet, welche Funktionen benötigt werden, um die Use Case abdecken zu können. Im nächsten Projektabschnitt werden verschieden verfügbare Sensortechnologien betrachtet und danach beurteilt, ob sie die benötigten Funktionen erfüllen können.

Die folgende Tabelle stellt die Use Cases den dafür benötigten Funktionen gegenüber. Jene Use Cases, die in einem Workshop zusammen mit den Experten der ÖBB und dem Projektteam der ME für weitere Analysen herangezogen werden, sind hier **blau** markiert. Die für diese Use Cases benötigten Funktionen wurden herangezogen, um zu ermitteln welche Technologien benötigt werden, um die geforderten Use Cases zu erkennen.

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Use Cases und den zur Erkennung notwendigen Funktionen ist zur Übersicht in Tabelle [2](#) auf der nächsten Seite dargestellt.

		USE CASE	ERKENNUNG V. VERSCHMUTZUNG	VERMESSUNG DER FORM	VERGLEICH MIT REFERENZFORM	VERMESSEN (HÖHE, PROFIL)	ERFASSEN D. OBERFLÄCHE	MUSTER-ERKENNUNG	ERFASSEN DES VERLAUFS ÜBER DEN WEG	LAGEÄNDERUNG DES FZ	ERFASSEN DES LICHT-RAUMPROFILS	UMFELD
Weichen												
	UC1.1	Weichensensorik	x									
	UC1.2	Weichenherz		x	x							
	UC1.3	Abrieb der Weichenzunge				x						
	UC1.4	Ausbruch				x	x					
	UC1.5	Bruch der Kriechschutzvorrichtung		x	x							
	UC1.6	Beschädigung an Antrieb und Komponenten		x	x	x		x				
	UC1.7	Hydrostar Abdeckung		x	x	x		x				
Schiene												
	UC2.1	Schienenbruch				x	x					
	UC2.2	Head-Checks					x	x				
	UC2.3	Gleisverwerfungen							x	x		
	UC2.4	Schweißfehler				x	x	x				
	UC2.5	Squats				x	x	x				
	UC2.6	Wheel Burns				x	x	x				
	UC2.7	Imprint					x	x				
	UC2.8	Abblättern der Schiene					x	x				
	UC2.9	Ausbrüche				x	x					
	UC2.10	Schlupfwelle				x	x	x		x		
Umgebung												
	UC3.1	Absenkung des Gleisbetts				x				x		
	UC3.2	fehl. Kleinteile					x	x				
	UC3.3	Beschädigte Schwellen			x		x	x				
	UC3.4	Flora und Fauna									x	x

Tab. 2: Use Cases und Funktionen

3 SENSORTECHNOLOGIE ANALYSE & BEWERTUNG

In der nächsten Phase des Projektes wurden Sensortechnologien und Sensoren, die kontinuierliches On-Board Monitoring der Bahn Infrastruktur für die für KOMBI relevanten Use Cases ermöglichen, analysiert und bewertet.

Wir beschreiben die Kriterien, nach denen wir die geeigneten Sensortechnologien und Sensoren ausgewählt haben, sowie eine Analyse der Eigenschaften und spezifische Stärken und Schwächen der relevant erscheinenden Sensoren, unter besonderer Berücksichtigung des anspruchsvollen Umfelds im Bahnbetrieb und der definierten Use Cases.

Alle Sensortechnologien wurden in einem Workshop mit dem Projektteam der ÖBB Infrastruktur diskutiert und nach ihrer Eignung für den Einsatz für kontinuierliches Infrastruktur-Monitoring beurteilt.

Zielsetzung:

- Auswahl geeigneter Sensortechnologien und Sensoren
- Beschreibung der Eigenschaften und spezifischen Stärken und Schwächen der ausgewählten Sensoren

3.1 ANFORDERUNGEN

Die speziellen Gegebenheiten bei der Bahn, ergeben Anforderungen an das System.

Bahn Normen: Alle Sensoren und weiteren Teile des Systems müssen für den Einsatz in Zügen geeignet sein, d.h. die entsprechenden Bahnnormen erfüllen.

Geschwindigkeit: die verbauten Systeme müssen die maximalen Betriebsgeschwindigkeiten der für den KOMBI-Einsatz geplanten Züge ohne Probleme überstehen. Die verbaute Sensorik muss bei diesen Geschwindigkeiten auch noch sinnvolle Daten liefern. Die maximale Betriebsgeschwindigkeit beträgt je nach eingesetzten Lokomotiven laut ÖBB bis zu 100, bis zu 160 oder bis zu 230 km/h.

Einbaugröße: Sensoreinheiten müssen auf bestehenden Fahrzeugen verbaut werden können. Die meisten Sensoren zur Gleisüberwachung müssen außen am Zug montiert werden können, d.h. meist unten am Zug Platz finden und somit nicht zu groß sein. Auch die im Zug verbaute Sensorik muss klein genug sein, um auf den bestehenden Zügen nachgerüstet werden zu können.

Kosten: die Kosten sollen möglichst geringgehalten werden, auch um ausreichend viele Fahrzeuge für eine gute Netzabdeckung ausstatten zu können. Die eingesetzten Sensoren sollen aus bereits existierender, handelsüblicher Sensortechnologie bestehen, d.h. keine neue Sensorik wird entwickelt, um die Entwicklungskosten gering zu halten.

All diese Anforderungen wurden bei der Auswahl der Sensorik in den folgenden Abschnitten berücksichtigt. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die einzelnen Sensortechnologien im Detail.

Unabhängig von den eingesetzten Sensoren werden noch folgende in den nächsten Unterabschnitten beschriebene Komponenten zur Sensordatenverarbeitung, Datenübermittlung

und Verortung der Sensordaten benötigt. Diese wurden im KOMBI-Projekt nicht näher untersucht, da Mission Embedded hier über geeignete Komponenten im Produktportfolio verfügt.

3.1.1 SENSORDATENVERARBEITUNG

Zum Betreiben der Sensorik benötigen wir eine bahntaugliche Sensorintegrations- und Verarbeitungseinheit, die für den Einsatz am Zug zugelassen sind. Die Sensoren sind mit dieser Einheit verbunden, die Daten werden gesammelt und können zum Teil auch schon ausgewertet und weiterverarbeitet werden. Die Einheit muss mit einer ausreichend großen Festplatte ausgestattet sein, um Daten bis zum nächsten Datenabgleich lokal speichern zu können.

Von der Einheit werden die Rohdaten vorverarbeitet, um nur mehr detektierte Vorfälle in die Zentrale schicken zu müssen und somit die zu übermittelnde Datenmenge gering zu halten.

3.1.2 DATENVERBINDUNG

Ein Router zum mobilen Upload von Nachrichten oder Daten, über Mobilfunknetze oder WLAN wo vorhanden, sollte ebenso Teil dieses Setups sein oder vorhandene Infrastruktur wie die railpower box wird genutzt.

3.1.3 VERORTUNG

Zur ausreichend genauen Verortung der Daten wird mit dem System ein eigener GNSS-Sensor verbaut oder mit einem GNSS-System des Zuges oder der railpower box verbunden. Für die Verortung ohne GNSS-Signal kommt weitere Sensorik dazu: möglich wären Rad- oder visuelle Odometrie, Bodenradar, oder ein Inertial Navigation System (INS).

3.1.3.1 GESCHWINDIGKEIT

Zur absoluten Verortung der Sensordaten wird ein GNSS-Signal verwendet. An manchen Stellen wie Tunneln oder dicht verbautem Gebiet ist kein solches Signal verfügbar. Dort wird die gefahrene Strecke seit dem letzten absoluten Verortungssignal aus einem Geschwindigkeitssignal berechnet, um so die Sensordaten auch ohne vorhandenes GNSS-Signal verorten zu können.

Das dafür benötigte Geschwindigkeitssignal kann aus mehreren Quellen kommen:

- Rad-Odometrie vom Fahrzeug, wenn ein entsprechendes Signal verfügbar ist
- von einem im Rahmen von KOMBI verbauten Bodenradar
- visuelle Odometrie von verbauten Kameras in Fahrtrichtung

Die Entwicklung dieses Systems wurde nicht durchgeführt, da sie außerhalb des Scopes des Projekts war. Die einzelnen Sensoren wurden im Zuge der Messkampagne jedoch auf ihre Funktion getestet.

3.2 KAMERA SENSORIK

Die Kameras zur Beobachtung des Gleiskörpers müssen je nach Ausrichtung eine ausreichende Auflösung und Bildwiederholfrequenz (Bilder pro Sekunde) aufweisen. Um damit den Gleiskörper bei maximaler Geschwindigkeit des Zuges ausreichend, für die nachgelagerte Bildverarbeitung, erfassen zu können.

Die Kameras müssen hierfür folgenden Eigenschaften vorweisen:

- Bildwiederholrate: die Kamera muss Bilder in ausreichend hoher Frequenz aufnehmen können. Die jeweils für den Anwendungsfall nötigen Wiederholraten werden in den folgenden Unterabschnitten näher definiert.
- Die Kameras müssen über einen Global-Shutter verfügen
- Der Zeitpunkt der Bildakquisition der einzelnen Kameras muss durch ein external Signal synchronisierbar sein.
- Belichtungszeit: Kamera muss kurz genug belichten können, um Bewegungsunschärfe zu vermeiden
- Machine-Vision: die Kamera ist für den Einsatz im computergestützten Bildverstehen entwickelt
- Dynamikumfang: die Kameraumfang muss über einen Dynamikumfang von zumindest 70dB besitzen, um für die Außenanwendung geeignet zu sein.
- Kamera muss Bahnnormen erfüllen (EN 50155, EN 45545, etc.) und ist somit für den Einsatz am Fahrzeug geeignet

3.2.1 MONTAGEVARIANTEN

3.2.1.1 STEILER WINKEL, DIREKT AUF SCHIENE GERICHTET

Die einzelne Kamera wird vorne am Triebfahrzeug montiert. Erster Ansatz dafür ist Montage hinter der Windschutzscheibe, möglichst direkt auf den Gleiskörper nach unten gerichtet. Wenn die Montage innen nicht möglich ist, auch denkbar in der Nähe des Berner Raums.

Jedes Kamerabild soll einen in Fahrtrichtung circa 2 Meter langen Streifen erfassen, sowie den Gleiskörper in voller Breite. • Winkel: nach unten möglichst direkt auf den Gleiskörper gerichtet. Bis zu 50° nach unten bei Railjets möglich, siehe Abbildung. Bei mindestens 15° Öffnungswinkel werden 2m in Fahrtrichtung abgedeckt

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen für das Sichtfeld und die Bildfrequenz der Kamera:

Geschwindigkeit: bis zu 230 km/h, d.h. circa 64 m/s:

- Auflösung von 3000x2000 Pixel

Bildwiederholfrequenz von bis zu 35 Bildern pro Sekunde

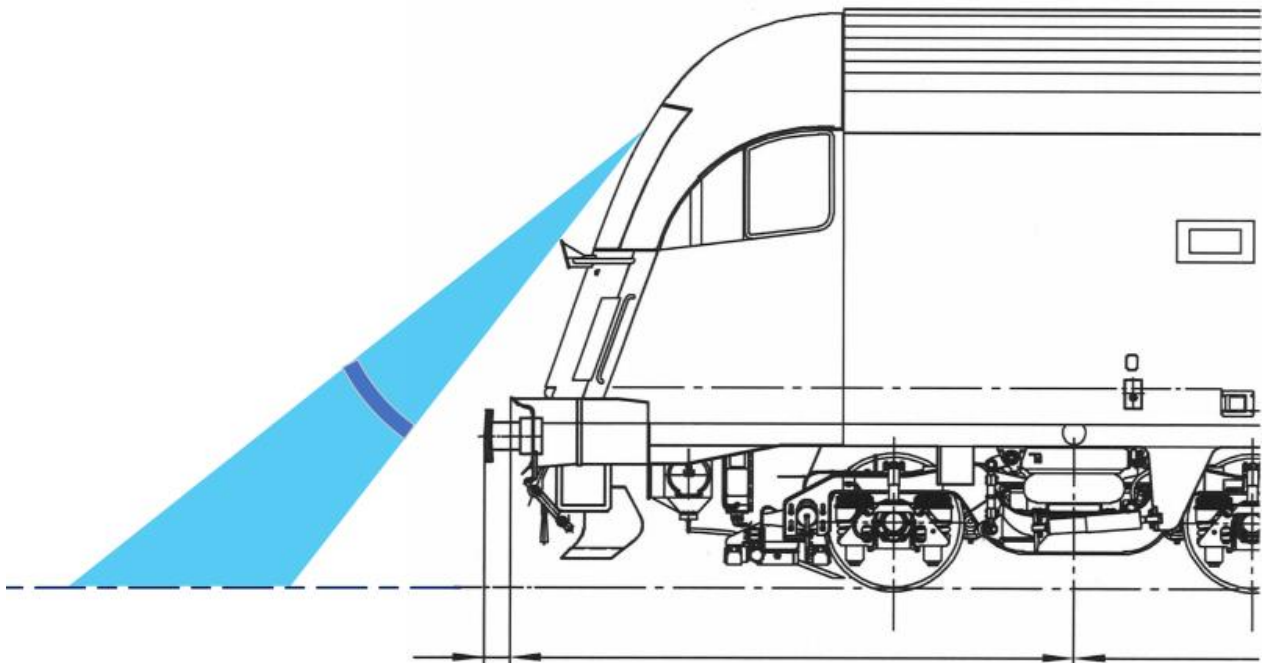


Abb. 19: Field-of-View

3.2.1.2 FLACHER WINKEL, NACH VORNE/HINTEN

Eine Kamera wird vorne bzw. hinten in einem flachen Winkel am Fahrzeug montiert. Ziel ist es, in bzw. gegen Fahrtrichtung den Gleiskörper und das Lichtraumprofil zu erfassen. Insbesondere soll der Gleisverlauf in Fahrtrichtung aufgenommen werden. Der Öffnungswinkel der Kamera wird sehr klein gewählt, z.B. 5 bis 10° horizontaler Öffnungswinkel. Somit werden der Gleisabschnitt 100m bis 300m vor dem Fahrzeug derart aufgenommen, so dass Gleisverwerfung sichtbar ist.

Geschwindigkeit: bis zu 230 km/h, d.h. circa 64 m/s:

- Auflösung von 2500x2000 Pixel
- Bildwiederholfrequenz von bis zu 10 Bildern pro Sekunde

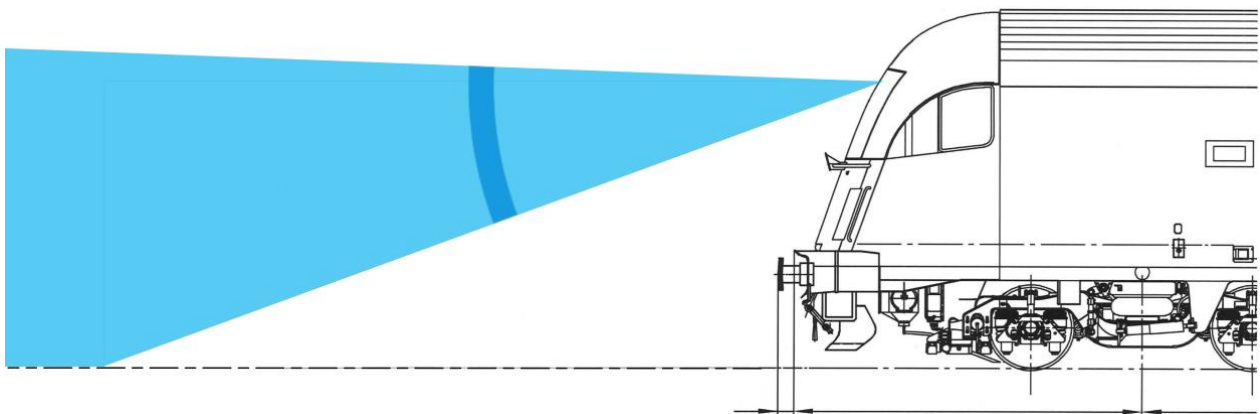


Abb. 20: Mögliches Field-of-View

3.2.1.3 DIREKT NACH UNTEN GERICHTET

Falls die Montage unten am Triebfahrzeug oder unten an den Waggons möglich ist, ergibt das eine Montagehöhe je nach Position von circa 0.5 bis 1m Höhe. Es werden zwei Kameras benötigt, wobei jeweils eine Kamera direkt über der linken und über der rechten Schiene platziert werden.

Je nach Öffnungswinkel der Kameras und möglicher Montagehöhe variiert die Anzahl der benötigten Kameras, jedoch kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass zwei Kameras notwendig sind, um beide Schienen, sowie die Schwellen dazwischen vollständig erfassen zu können. Die Kameras sind hierbei direkt vertikal auf die jeweilige Schiene ausgerichtet.

Aufgrund der Außenmontage sollten die Kameras vor Witterung geschützt verbaut werden. Außerdem ist damit zu rechnen, dass es im Betrieb zu Verschmutzungen der Kameraobjektive kommt. Damit die Kameras unter allen Bedingungen verwertbares Bildmaterial aufzeichnen können müssen entweder konstruktive oder operative Maßnahmen gesetzt werden. Der dadurch entstehende Aufwand zum Reinigen der Kameras ist im Betrieb schwer umsetzbar.

Geschwindigkeit: bis zu 160 km/h, d.h. circa 45 m/s

- Auflösung von 2000x1500 Pixel pro Kamera
- Bildwiederholfrequenz von bis zu 45 Bildern pro Sekunde
- Aktive Beleuchtung

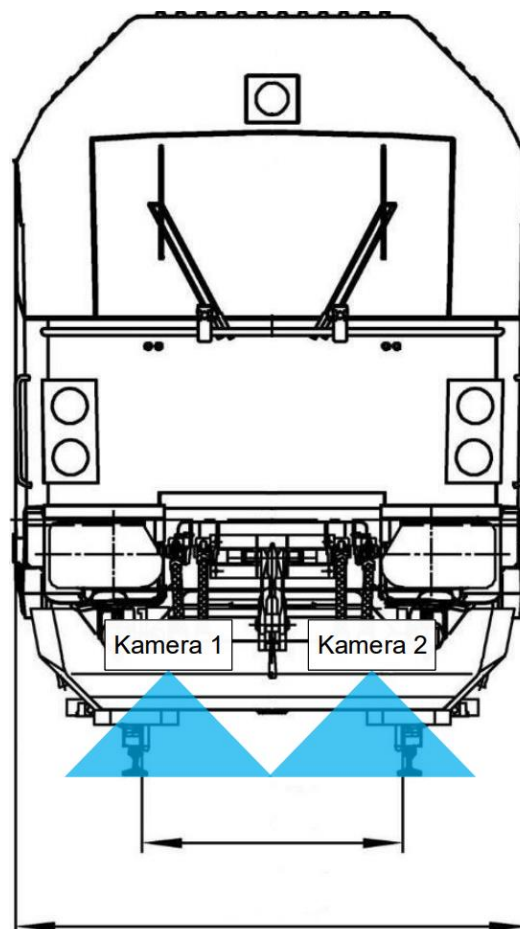


Abb. 21: Field-of-View nach unten, mit zwei Kameras

3.2.1.4 STEILER WINKEL, AUSSENMONTAGE

Abwandlung der vorigen Variante „Direkt nach unten gerichtet“: Montage ebenfalls außen am Zug. Aber die beiden Kameras werden so montiert, dass sie nicht senkrecht auf das Gleis ausgerichtet sind, sondern in steilem Winkel auf das Gleis, je nach verfügbarem Platz. Dadurch wird von der Kamera eine größere Fläche am Gleiskörper erfasst.

Montageposition je nach möglichem Platz entweder nahe dem Berner Raum oder an der Zugunterseite.

Geschwindigkeit: bis zu 160 km/h, d.h. circa 45 m/s

- Auflösung von 2500x1500 Pixel pro Kamera
- Bildwiederholfrequenz von bis zu 45 Bildern pro Sekunde
- Aktive Beleuchtung, falls Montage an Fahrzeugunterseite

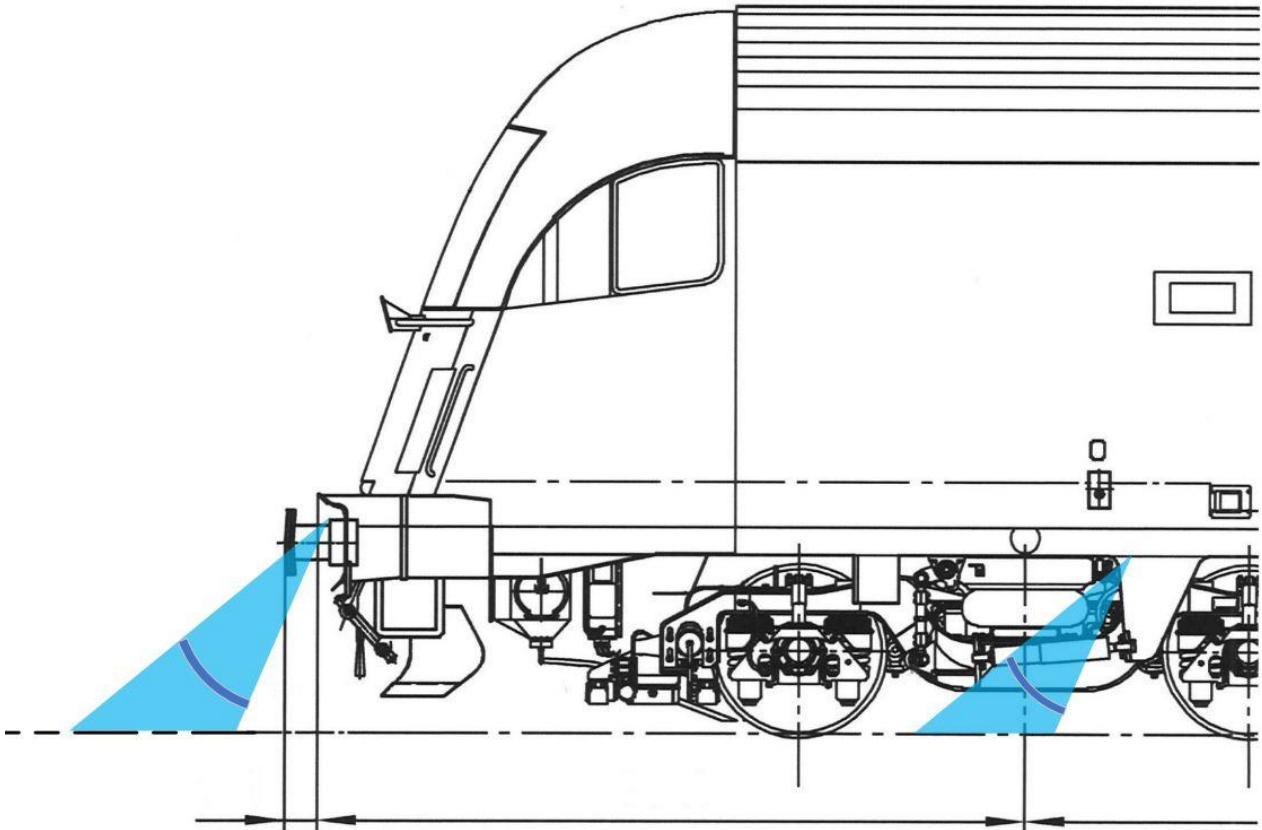


Abb. 22: Field-of-View steil nach unten, zwei mögliche Positionen

3.2.2 KOMMENTARE

Die verschiedenen Kamerapositionen wurden in einem Workshop mit den Projektpartnern der ÖBB Infrastruktur besprochen. Die Montage hinter der Windschutzscheibe ist aus derzeitiger Sicht auszuschließen, da eine Anbringung zusätzlicher Gerätschaften in der Kabine des Triebfahrzeugführers seitens des Betreibers generell nicht erwünscht ist. Damit kommt nur die Montage außen am Fahrzeug infrage. Die vierte Variante (Steiler Winkel, Außenmontage) wurde als die für das KOMBI-Projekt mögliche Variante beschlossen.

Bei einer Besichtigung eines ÖBB Messwagens wurden Montagepositionen nahe dem Berner Raum oder unten am Messwagen evaluiert. Das Testsystem wird an einer freien Position unten am Zug montiert, da es dort vor Umwelteinflüssen geschützt montiert werden kann.

Das Einbauvolumen einer einzelnen Kamera im Fahrzeuginnenen kann mit 150mmx50mmx50mm angenommen werden. Für eine Außenmontage kann pro Kamera mit 200mmx100mmx100mm gerechnet werden.

3.3 BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN

Je nach Montageposition sind Beschleunigungssensoren verschiedenen Kräften ausgesetzt. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen.

3.3.1 ACHSLAGERBESCHLEUNIGUNG

Eine Montageposition an der Achse ermöglicht es, möglichst wenig gefederte Beschleunigungen zu messen. Der Sensor muss auch kurze Schläge gut erfassen können, um Schienenbruch und andere Schäden zu erkennen.

Anforderungen an den Sensor:

- 1D-Sensor: misst Beschleunigung in vertikaler Richtung, entlang einer Achse
- Die auftretenden Kräfte sind hoch, da der Sensor direkt am Achslager montiert ist. Auftretende Kräfte bis 50G und mehr dürfen kein Problem darstellen (Schläge bei Überfahrt von Weichen oder Schienenbruch^[11])
- Hohe Abtastrate, um kurze Schläge wahrnehmen zu können.

3.3.2 IM GEFEDERTEN BEREICHEN

Bei einer Montage in Bereichen die mehrfach gefedert sind, ergeben sich folgende Anforderungen:

- 3D-Sensor: misst Beschleunigung entlang von drei Achsen
- Möglich wäre auch ein Gyrosensor, der die Drehung auf den drei Achsen misst.
- Abtastrate kann langsamer sein als bei 1D-Sensoren, aber gut genug für die Anwendung im Zug mit 230 km/h

3.3.3 KOMMENTARE

Im Workshop mit den Projektpartnern der ÖBB Infrastruktur hat sich ergeben, dass die Montage direkt am Achslager nicht möglich ist. Außen am Rad, eine zweifach-gefederte Position, gibt es eine Montagemöglichkeit. In der Kabine wäre eine Montage zwar möglich, aber da diese bereits stark gefedert ist, können hier laut ÖBB weniger Beschleunigungsdaten gemessen werden.

Weiters sind die Daten eines 1D-Sensors nicht interessant, aber die 3D-Sensorik ist interessant und wird genauer evaluiert.

Die Einbaugröße des Sensors ist vergleichbar mit einer Zigarettenschachtel.

3.4 LIDAR-SENSOR

LIDAR-Sensoren sollen die Profile der Schienenköpfe erfassen.

Anforderungen an diese Sensoren:

- Ausreichende Abtastrate bei 230 km/h (vgl. Shinkansen: bis 275 km/h möglich). Mindestens 1000 Hz (ergibt ca.1 Messpunkt pro 6.5cm), je nach gewünschter Dichte der Messpunkte auch deutlich mehr (bis 4000 Hz).
Bei 1D und 2D LIDAR-Sensoren wird der Bereich zwischen den Messpunkten/-linien nicht abgedeckt.
- Montagehöhe: 50cm bis 1m über dem Gleis.
Je nach Montagehöhe ergibt sich das mögliche Sichtfeld des Sensoraufbaus für 2D und 3D Sensoren.
- Aufgrund von möglichen Verschmutzungen:
 - Sensorik muss regelmäßig überprüft werden.
 - Reinigung bei Bedarf notwendig, aufgrund der Außenmontage.
 - Benachrichtigung bei Verschmutzung: System sollte sich melden, wenn es zu verschmutzt ist.

LIDAR-Sensoren gibt es als 1D-, 2D- und 3D-Ausführung. Diese drei Varianten unterscheiden sich folgendermaßen:

- 1D-Sensor: misst punktförmig den Abstand vom Sensor zur Stelle wo der Laser auf den Gleiskörper trifft
- 2D-Sensor: misst Höhenprofil entlang der projizierten Lichtline
- 3D-Sensor: misst Höhenprofil einer ganzen Fläche, rechteckig

1D-LIDAR-Sensoren können nur den Abstand zum Gleiskörper direkt unter dem Sensor erfassen, 2D- und 3D-LIDAR-Sensoren auch die Profilform. Mit 3D-LIDAR-Sensoren und ausreichender Abtastrate können die einzelnen Messungen überlappend gemacht und somit ein durchgehendes Bild des Gleiskörpers erstellt werden.

3.4.1 KOMMENTARE

Die Einbaugröße des Sensors ist vergleichbar einer Zigarettenschachtel.

Im Workshop wurde festgehalten, dass 1D-LIDAR-Sensoren für KOMBI nicht interessant sind. 2D- oder 3D-LIDAR-Sensoren könnten interessant sein und werden noch weiter evaluiert.

3.5 ULTRASCHALL

Anforderungen an Ultraschallsensoren für KOMBI:

- Einsatzgeschwindigkeit: Sensoren müssen für folgende Geschwindigkeiten einsetzbar sein
 - Railjet: Bis 230 km/h
 - Taurus: bis 100 km/h
 - Regionaltriebwagen: bis 160 km/h

Der Ultraschall-Schienenprüfzug der DB hat eine maximale Messgeschwindigkeit von 100 km/h^[9]. Laut [10] ist es nicht ratsam, solche Sensoren bei Geschwindigkeiten über 90 km/h zu betreiben, da die Instandhaltungskosten und der Verschleiß sonst zu groß werden.

- Direkter Kontakt mit dem Gleis: entsprechende Montage muss möglich sein
- Koppelmittel: zwischen Sensor und Schiene wird ein Koppelmittel aufgetragen. Wenn der Vorrat an Koppelmittel aufgebraucht ist, muss der Koppelmittelbehälter nachgefüllt bzw. ausgetauscht werden. Im Rahmen von KOMBI ist dies schwer durchführbar.

Anmerkung: Es gibt Entwicklungen für eine Kombination von Laser und Ultraschall Sensoren. Diese brauchen keinen direkten Kontakt mit dem Gleis und somit auch kein Koppelmittel, da sie stattdessen das Gleis mit Laser anregen und dann mittels Ultraschall Risse erkennen können. Die Sensoren müssen trotzdem nahe am Gleis montiert sein und sind für den Einsatz auf fahrenden Zügen gedacht, aber nicht für Geschwindigkeiten bis 230 km/h. Die Technologie ist aktuell noch in Entwicklung und wird schon im Labor getestet. Wegen den hohen Kosten und dem hohen Wartungsaufwand kommt diese Technologie für KOMBI nicht in Frage.

3.5.1 KOMMENTARE

Die Einbaugröße des Sensors ist vergleichbar mit einem Koffer.

Im Workshop wurde festgestellt, dass Ultraschall Sensoren für KOMBI nicht infrage kommen, da sie zu teuer und zu aufwändig im Betrieb sind.

3.6 WIRBELSTROMPRÜFUNG

Anforderungen an Wirbelstromsensoren für KOMBI:

- Direkter Kontakt mit Gleis: Sensoren sollten direkt in dem Bereich anliegen, in dem Rollkontakte auftreten
- Einsatzgeschwindigkeit: Sensoren müssen für folgende Geschwindigkeiten einsetzbar sein
 - Railjet: Bis 230 km/h
 - Taurus: bis 100 km/h
 - Regionaltriebwagen: bis 160 km/h

Laut [ST2] ist es nicht ratsam, solche Sensoren bei Geschwindigkeiten über 90 km/h zu betreiben, da Instandhaltungskosten und Verschleiß sonst zu groß werden. Weiters ergibt sich durch den direkten Kontakt am Gleis auch die Notwendigkeit regelmäßiger Wartung der Sensoren, was im Rahmen von KOMBI als ungeeignet anzusehen ist.

3.6.1 KOMMENTARE

Die Einbaugröße des Sensors ist vergleichbar mit einem Koffer.

Die Kosten pro Sensor liegen im fünf bis sechsstelligen Eurobereich.

Im Workshop wurde festgestellt, dass die Wirbelstromsensoren ähnlich wie die Ultraschall Sensoren für KOMBI nicht infrage kommen. Sie sind für die Anwendungsfälle nicht passend, zu aufwändig im Betrieb und zu teuer.

3.7 RADAR

Anforderungen an Radarsensoren zur Überwachung des Gleiskörpers:

- Abtastrate: ausreichend, damit auch bei bis zu 230 km/h der Gleiskörper durchgehend erfasst wird

- Auflösung: ausreichend hoch, um Schienenfehler erkennen zu können
- Montageposition: Zugunterseite, direkt auf den Gleiskörper gerichtet (ähnlich dem LIDAR-Sensor oder der nach unten gerichteter Kamera)

Der Vorteil von Radarsensoren gegenüber optischen Sensoren ist die Unabhängigkeit von Licht- und Wetterverhältnissen. Die für das Erkennen von Gleisschäden notwendige Auflösung ist mit Radarsensoren allerdings schwerer zu erreichen als mit optischen Sensoren. Zum Vergleich: ein Radarsensor liefert von mehreren hundert, bis zu einigen tausend Messpunkte des Gleiskörpers. Ein Kamerabild liefert Millionen von Messpunkten und somit mehr Information. Durch (Infrarot-)Beleuchtung können mangelnde Lichtverhältnisse für die Kamera verbessert werden, und bei passender Montage ist auch die Kamera relativ unabhängig von Wetterverhältnissen.

Es gibt Georadar Systeme zur Überprüfung von Schotter und Untergrund, die bis 300 km/h einsetzbar sind. Diese Systeme werden vorne am Zug über die gesamte Gleisbreite montiert und sind für den Einsatz auf Messwagen wie dem Railchecker gedacht.

3.7.1 KOMMENTARE

Die Einbaugröße des Sensors ist vergleichbar mit einer Schuhschachtel.

Im Workshop wurde festgestellt, dass Radarsensoren für die Erkennung von Schäden an der Infrastruktur nicht geeignet sind, da sie nicht über eine ausreichende bildgebende Auflösung verfügen.

Ein Bodenradar kann jedoch zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden, um ein zuverlässiges Odometriesignal zu erhalten.

3.8 ZUSAMMENFASSUNG

Gemeinsam mit den Experten der ÖBB und Sensorexperten der Mission Embedded hat ein Workshop zu den besprochenen Sensortechnologien stattgefunden. Dabei wurden die unterschiedlichen Sensoren wie in nachfolgender Tabelle hinsichtlich unterschiedlicher Parameter bewertet. Manche Parameter (Größe, Kosten) wurden zu diesem Zeitpunkt bewusst ungenau gehalten, da im Vordergrund der Diskussion nicht die Diskussions, sondern eine gut greifbare Größenordnung wichtig war, auch um eine Beeinflussung durch teilweise bekannte oder noch nicht bekannte Detailparameter zu vermeiden.

Im Workshop wurden folgende Sensortechnologien als für den KOMBI-Einsatz interessant erarbeitet:

- Bodenkamera: Kamera Sensorik mit der Montagevariante „steiler Winkel“.
- Beschleunigungssensor 3D
- LIDAR-Sensor in 2D oder 3D (je nachdem welche Vorteile der 3D gegenüber dem 2D hat)

Die drei ausgewählten Sensortechnologien werden im weiteren Projekt näher betrachtet und für den Einsatz in den KOMBI Anwendungsfällen beurteilt.

Zur Übersicht in folgender Tabelle noch einmal alle betrachteten Sensortechnologien im Vergleich. Die für KOMBI relevanten Technologien sind **blau** hervorgehoben.

Erklärung zu den einzelnen Spalten der Tabelle:

- Werte für Einbaugröße: Zigarettenpackung, Schuhschachtel, Koffer
- Position:
 - A: Im Zug beliebige Position
 - B: Im Zug dezidiert positioniert
 - C: Zugunterseite, punktförmig
 - D: Zugunterseite, Gleisbreite
- Verkabelung: innen, außen
- Sensorentwicklung TRL=„Technology Readiness Level“ bzw. Technologie-Reifegrad:
 - 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8–15 Jahre)
 - 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
 - 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (5–13 Jahre)
 - 4: Versuchsaufbau im Labor
 - 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
 - 6: Prototyp in Einsatzumgebung
 - 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)
 - 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
 - 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes
- Kosten: Größenordnung in Euro

	EINBAUGRÖßE	POSITION	KOMMENTAR	VERKABELUNG	INTEGRATION	REINIGUNG	TRL	KOSTEN
Kamera Sensorik								
Steiler Winkel, direkt auf die Schiene gerichtet	Zigarettenpkg	B	Front, hinter Windschutzscheibe oder außen in ausreichender Höhe	innen	Windschutzscheibe	-	6	10 ²
Flacher Winkel, nach vorne/ hinten	Zigarettenpkg	B	Front, hinter Windschutzscheibe oder außen in ausreichender Höhe	innen	Windschutzscheibe	-	6	10 ²
Direkt nach unten gerichtet	Zigarettenpkg	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	ja	4	10 ²
Steiler Winkel, Außenmontage	Zigarettenpkg	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	ja	4	10 ²
1D Beschleunigungssensor	Zigarettenpkg	C	Am Achslager	außen	Achslager	-	9	10 ²
3D Beschleunigungssensor	Zigarettenpkg	D	in Railpower box möglich, sinnvoll außen da weniger gefedert	innen	beliebig	-	8	10 ³
LIDAR-Sensor 1D	Schuhschachtel	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	ja	5	10 ³
LIDAR-Sensor 2D	Schuhschachtel	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	ja	5	10 ³

	EINBAUGRÖßE	POSITION	KOMMENTAR	VERKABELUNG	INTEGRATION	REINIGUNG	TRL	KOSTEN
LIDAR-Sensor 3D	Schuhschachtel	D	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	ja	5	10 ⁴
RADAR	Schuhschachtel	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden	-	4	10 ³
Ultraschall	Koffer	C	Flüssigkeit Nachfüllen	außen	Unterboden gleisnah	ja	6	10 ⁵
Laser-Ultraschall	Koffer	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden gleisnah	ja	4	10 ⁵
Wirbelstromprüfung	Koffer	C	Außenmontage unterm Zug	außen	Unterboden gleisnah	ja	6	10 ⁴⁺
Verortung GNSS	Schuhschachtel	A	in Railpower box möglich, plus Antenne	innen	GNSS-Antenne	-	9	10 ²
Verortung Sensor-fusion	Schuhschachtel	A	Radodometrie außen, INS & Kartographie innen teilweise außen montiert	Innen oder außen	beliebig	-	6	10 ³
Verarbeitungseinheit	Schuhschachtel	A	Position: innen, beliebig	innen	beliebig	-	8	10 ³

Tab. 3: Übersicht der Technologien

4 ERHEBUNG & BEWERTUNG DER ENTWICKLUNGEN ANDERER BAHNEN

Ein Teil des KOMBI-Projekts ist auch die Erhebung der Entwicklungen bei anderen Bahnen. Ziel der Erhebungen war es, einen aktuellen Überblick zum relevanten Stand der Technik bei anderen Bahn-Infrastrukturbetreibern zu bekommen. Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse dieser Erhebungen dar.

4.1 KONTAKTIERTE BAHNBETRIEBER

Betreiber von Bahninfrastruktur und Bahnbetrieb operieren den EU Marktbestimmungen folgend in den meisten der betrachteten Länder getrennt. Deshalb wurden grundsätzlich die Infrastrukturbetreiber kontaktiert, da diese für die im Projekt betrachteten Teile des Gleiskörpers zuständig sind. Im Rahmen des KOMBI-Projekts wurden geeignete Ansprechpartner bei den europäischen Betreibern online recherchiert, oder mithilfe von etablierten Kontakten und internen Weiterempfehlungen der Projektpartner ermittelt. Dazu wurde zu folgenden Infrastrukturbetreibern Daten gesammelt:

- DB Netz AG, Deutschland
- Network Rail, Großbritannien
- Irish Rail, Irland
- SBB Infrastruktur, Schweiz
- SNCF Réseau, Frankreich
- Adif, Spanien
- Infrabel, Belgien
- PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Polen
- CFL, Luxemburg

Die Betreiber sollten zu ihrem Interesse an bzw. ihrem aktuellen Entwicklungsstand von kontinuierlicher Infrastrukturüberwachung befragt werden, mithilfe des im folgenden Abschnitt beschriebenen Fragenkatalogs.

4.2 FRAGENKATALOG

Es wurde ein Fragenkatalog erarbeitet, um Bahn-Infrastrukturbetreiber gezielt befragen zu können. Nach einer kurzen Vorstellung der KOMBI Projektziele wurden mithilfe dieses Fragenkatalogs folgende Punkte erörtert:

- Ist kontinuierliche Infrastrukturüberwachung (schon) ein Thema?
- Welche Probleme soll(t)en aktuell damit gelöst werden?
 - Aktueller Stand der Gleiskörperüberwachung
 - Welche Gleisschäden werden beobachtet & wie oft
 - Wie werden gemessene Daten verortet
 - Werden Daten live analysiert
 - Datensammlung und -verarbeitung
- Was ist schon in Umsetzung?
- Was ist in Entwicklung?

Die Fragen wurden in deutscher und englischer Sprache erarbeitet, um international möglichst viele Betreiber damit befragen zu können. Die Ergebnisse der Befragungen sind im Folgenden beschrieben.

4.3 ZUSAMMFASSUNG BEFRAGUNGEN

Alle Infrastrukturbetreiber haben spezielle Gleismessfahrzeuge im Einsatz. Diese können wie der ÖBB Railchecker den Gleiskörper sehr exakt vermessen, sind aber nicht im Regelverkehr integriert. Die Betreiber besitzen teils keinerlei Regelzüge, da diese von anderen Firmen betrieben werden. Network Rail und Irish Rail haben etwa laut den Aussagen der im Rahmen von KOMBI geführten Interviews momentan keine Möglichkeit, Sensorik auf Regelzügen anzubringen, und deshalb momentan keine Möglichkeiten für kontinuierliches on-board Monitoring der Infrastruktur. Die speziellen Gleismessfahrzeuge sammeln detaillierte Daten zu den Gleiskörpern, aber kontinuierliche Überwachung des Gleiskörpers durch Regelzüge ist bisher noch nicht im Einsatz. Eine Ausnahme bildet die Deutsche Bahn, die Beschleunigungssensoren aktiv im Einsatz hat, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

4.3.1 DEUTSCHE BAHN

Im Rahmen von KOMBI wurden dazu die DB Netz AG kontaktiert.

Die Deutsche Bahn hat Gleismessfahrzeuge im Einsatz, die ähnlich dem ÖBB Railchecker das Schienennetz exakt vermessen, aber nicht im Regelbetrieb unterwegs sind.

Zusätzlich arbeitet die Deutsche Bahn an einem reduzierten KOMBI-Ansatz zum kontinuierlichen Zustandsmonitoring (CTM= Continuous Track Monitoring) der Bahninfrastruktur. Der Fokus liegt auf Erkennungsmöglichkeiten mit Beschleunigungssensoren.

Diese Sensoren sind auf vier Regelzügen (ICEs und ICs) montiert und sollen Abweichungen in der Längshöhe erfassen, um Gleislagefehler frühzeitig zu erkennen und eingreifen zu können, bevor es zu größeren Schäden kommt. Das wird derzeit auf Fernverkehrsstrecken erprobt. Erkannte potenzielle Schäden werden an zuständige Personen weitergeleitet, die dann die entsprechenden Stellen des Gleiskörpers auch visuell inspizieren müssen und weitere Maßnahmen einleiten können.

5 SENSOREVALUIERUNG

Im Rahmen der Projektworkshops ergab sich die Chance, Sensoren am ÖBB Messwagen anzubringen und diese bei einer 3-wöchigen Messkampagne mitfahren und Daten sammeln zu lassen. Ein Messkampagne zur Sensorevaluierung war nicht Teil des ursprünglichen KOMBI Antrags, aber die Projektpartner von ÖBB Infrastruktur und Mission Embedded stimmten darin überein, die engere Auswahl der in KOMBI besprochenen Sensortechnologien direkt am Zug erproben.

Die dabei gesammelten Sensordaten wurden anschließend in Bezug auf die KOMBI Use Cases evaluiert.

In Abstimmung mit dem Projekt Team der ÖBB Infrastruktur wurde der Schwerpunkt des KOMBI Projekts auf folgende Sensortechnologien gesetzt:

- Bodenkamera: Hochgeschwindigkeits-Stereokamera in Montagevariante „steiler Winkel“.
- Fahrwegkamera: Kamera Sensorik in Fahrerkabine in Montagevariante „flacher Winkel“
- Beschleunigungssensor 3D
- LIDAR-Sensor 2D

Diese Technologien decken folgende Funktionen ab:

- Bodenkamera:
 - Vergleich mit Referenzform
 - Vermessen (Profil)
 - Mustererkennung
 - Erfassen der Gleisbettoberfläche
 - Erfassen der Schienenkopfoberfläche
- Fahrwegkamera
- Beschleunigungssensor 3D
 - Vermessen der Absenkung
 - Erfassen des Schienenverlaufs über den Weg
 - Lageänderung des Fahrzeugs
- LIDAR-Sensor 2D
 - Vermessen der Absenkung
 - Vermessen (Profil)
 - Erfassen der Schienenkopfoberfläche

Für die Verortung wurden folgende Technologien eingesetzt:

- Das Geschwindigkeitssignal vom Zug wird verarbeitet
- RADAR, misst die Geschwindigkeit
- GNSS Empfänger
- Eine Tracking Kamera, visuelle Odometrie

5.1 SYSTEMBESCHREIBUNG

Auf der Zug Unterseite wurde ein Kamerasystem, der LIDAR-Sensor und ein RADAR montiert. Zusätzlich wurden zwei Scheinwerfer montiert, um genügend Licht für die Kameras in schlecht ausgeleuchteten Umgebungen zu erzeugen.

Der Beschleunigungssensor wurde an der Radachse montiert, da hier möglichst ungedämpfte Signale aufgenommen werden können.

Die Tracking Kamera wurde seitlich an einer Fensterinnenseite montiert, um die Geschwindigkeit zu messen.

Die Kamera in der Fahrerkabine wurde hinter der Windschutzscheibe montiert, um den Gleiskörper im flachen Winkel nach vorne gerichtet beobachten zu können.

Der GNSS Empfänger wurde am Dach des Zuges montiert.



Abb. 23: Kamerasystem, LIDAR-Sensor und RADAR - Zug Unterseite



Abb. 24: Beschleunigungssensor an der Achse



Abb. 25: Tracking Kamera im Zug



Abb. 26: In Fahrerkabine eingesetzte Kamera mit Halterung

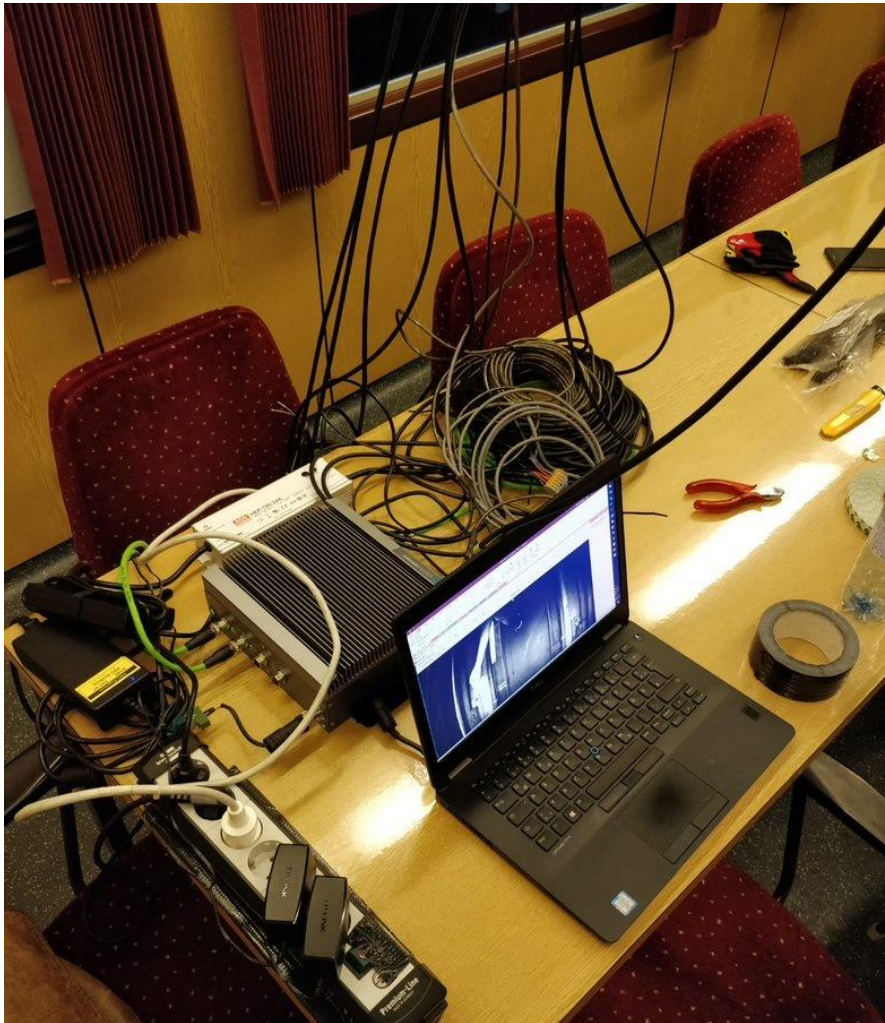


Abb. 27: Systemaufbau im Zug

5.2 MESSKAMPAGNE

Für die Messkampagne war das System drei Wochen auf einem Messwagen der ÖBB montiert und in ganz Österreich unterwegs. Der Messwagen fuhr an 14 Tagen und legte dabei mehr als 4300 Kilometer zurück. Die verbaute KOMBI Sensorik ist in dieser Zeit jedes Mal automatisch hochgefahren, sobald der Messwagen mit Strom versorgt war. Die Datenaufzeichnung wurde gestartet, und abhängig von der Geschwindigkeit wurden Messdaten zum Gleiskörper gesammelt. Die KOMBI Sensorik war an diesen 14 Tagen über 100 Stunden im Einsatz.

Bei dieser Datensammelkampagne fand noch keine Echtzeitanalyse statt. Die Daten wurden auf Datenträger im Zug gespeichert. Das Mission Embedded Team hatte Fernzugriff zum System, zur Überwachung der Aufzeichnung und zum manuellen Download von Rohdaten, um schon während der Kampagne erste Analysen durchzuführen. Alle aufgezeichneten Daten wurden am Zug gespeichert und nach der Kampagne von Mission Embedded analysiert.

5.3 DATENANALYSE UND BEWERTUNG

Nach und teilweise während der mehrwöchigen Testfahrt wurden die vorhandenen Daten analysiert.

5.3.1 KAMERASENSORIK

Die folgende Abbildung zeigt die Perspektive des unten am Zug montierten Stereokamerasystems (2 Kameras verbaut). Während der Fahrt am Messwagen wurden durchgehend Stereobilder in dieser Perspektive aufgezeichnet.

Die Kameras sind ausgelegt auf eine Geschwindigkeit von bis zu 120 km/h. Aufnahmen wurden auch bei dieser Geschwindigkeit durchgeführt.



Abb. 28: Aufnahme der Kamera Zugunterseite, Originalbild

Die Abbildung zeigt die Aufnahme so wie von den Kameras aufgenommen und noch nicht entzerrt. Die Verzerrung im Bild ergibt sich aus den verwendeten Objektiven. Diese Weitwinkelobjektive wurden ausgewählt, um den kompletten Gleiskörper im Rahmen der Sensorevaluierung möglichst gut abdecken zu können.

Die Bilder werden in der Verarbeitung im ersten Schritt automatisch entzerrt und dann weiter analysiert. In den weiteren Abbildungen sind prototypisch entzerrten Bilder zu sehen.

5.3.1.1 BILDENTZERRUNG

Im Versuchsaufbau für die Messkampagne wurden die Kameras aus Zeitgründen nach der Montage nicht mehr kalibriert. Daher liefern nachfolgende Darstellungen keine komplett entzerrten Bilder und es sind auch nach dem automatischen Entzerrungsalgorithmus noch leichte Verzerrungsartefakte zu erkennen. In einem Serienaufbau oder auch einem Versuchsaufbau mit mehr Vorlauf- und Montagezeit wäre dies nicht mehr wahrzunehmen.

5.3.1.2 2D BILDANALYSE

Das aufgezeichnete Bildmaterial wurde offline und automatisiert auf Servern der Mission Embedded analysiert, mit besonderem Augenmerk auf die für KOMBI interessanten Use Cases. Die Erkennung von relevanten Use Cases lieferte gute Ergebnisse. Hier ein Beispiel:



Abb. 29: entzerrtes Bild von Weiche mit erkannten Weichenherzen

Weitere Beispiele von der Messkampagne sind im Kapitel [5.4.1](#) angeführt.

Eine Erkenntnis aus der Messfahrt ist, dass die zwei eingesetzten Kameras besser platziert werden sollten. Aus praktikablen Gründen wurden die Kameras während der Evaluierung in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Für eine Weiterentwicklung bietet es sich an, die beiden Kameras weiter voneinander entfernt, jeweils eine Kamera über dem rechten und eine über dem linken Gleis, zu positionieren.

5.3.1.2.1 DURCHGÄNGIGES BILD DER STRECKE

Die Kameras sind so geschaltet, dass Aufnahmen des Gleiskörpers überlappend vorhanden sind. D.h. die Kameras machen geschwindigkeitsabhängig hinreichend viele Aufnahmen, um ein Bild des ganzen Gleiskörpers zu bekommen.

Nachdem die aufgenommenen 2D-Bilder entzerrt wurden, kann ein durchgehendes Bild der Strecke erstellt werden. In der folgenden Abbildung ein Beispiel für einen Abschnitt eines solchen durchgehenden Streckenbildes.



Abb. 30: Durchgehendes, entzerrtes Streckenbild

Das Bild der Strecke kann mit Ortsdaten von GNSS oder anderer Verortung gespeichert werden. Die Entwicklung über die Zeit kann dann für jede Stelle des Gleiskörpers beobachtet werden.

5.3.1.3 PASSIVE STEREOKAMERA

Das Ziel der Analyse der Stereobilder war es festzustellen, ob die aufgezeichneten Bilder genug Information enthalten, um aus der 3D-Tiefeninformation der Bilder für KOMBI-relevante Use Cases erkennen zu können.

Die aufgezeichneten Bilder wurden dazu zuerst entzerrt und im Anschluss daran ein 3D-Tiefenbild erstellt.

Im Folgenden ein paar Beispiel-Bilder dazu, um den Prozess der passiven Stereokamera darzustellen. Dabei werden zwei durch die versetzten Kameras gleichzeitig aufgenommene Bilder zu einem Stereobild zusammengesetzt.

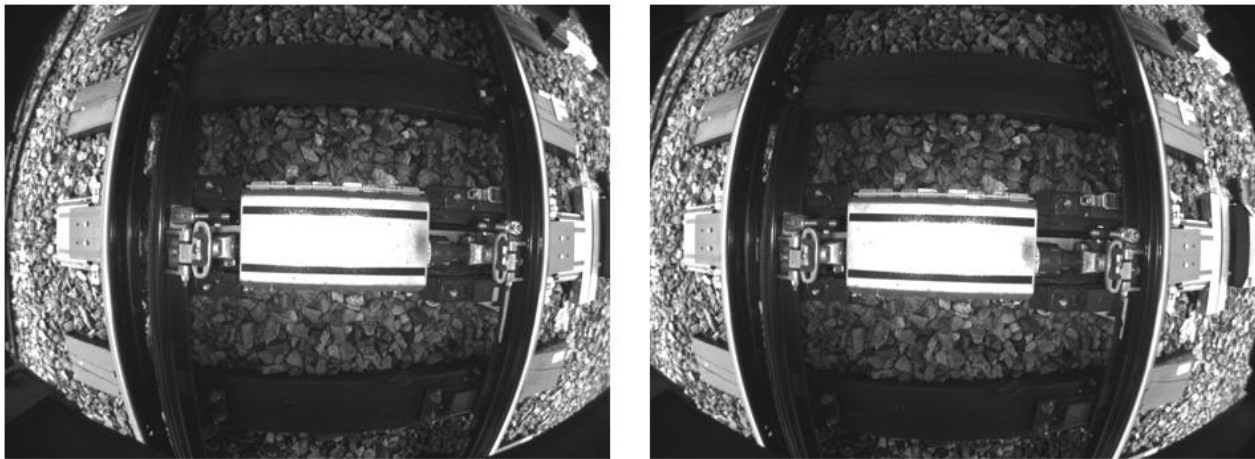


Abb. 31: Originalbilder der linken und rechten Kamera



Abb. 32: Entzerrte Bilder der linken und rechten Kamera



Abb. 33: Berechnete Tiefenkarte

Die Tiefeninformation wird aus zwei gleichzeitig aufgezeichneten Stereobildern berechnet. Je dunkler, desto weiter von der Kamera entfernt ist ein Punkt im Bild, d.h. weiß bedeutet näher, schwarz weiter entfernt.

Zusätzlich kann man die Tiefeninformation nochmals filtern. Dadurch wird die Information gröber, aber einige Elemente des Bildes leichter erkennbar.



Abb. 34: Tiefenkarte nach Filterung

Nach Auswertung einer größeren Anzahl berechneter Tiefenkarten zeigt sich, dass die Auflösung der Tiefeninformation zu gering ist, um Details für die für KOMBI relevanten Use Cases zu erkennen. Durch eine andere Dimensionierung des Kamerasystems könnte die Auflösung zwar erhöht werden, aber trotzdem ist eine exakte Vermessung des Gleiskörpers nicht durchführbar. Der Nutzen der Tiefenkarte für KOMBI ist daher gering.

Das bedeutet für die weitere Entwicklung, dass entweder mit der 2D-Bildanalyse weitergearbeitet wird oder ein anderes Sensorsystem zum Einsatz kommen muss, falls die 3D-Bildanalyse weiterverfolgt wird.

5.3.1.4 AKTIVE STEREOKAMERA

Aktive Stereokameras unterscheiden sich von passiven dadurch, dass sie auch aktiv mit Infrarotlicht Muster in den Bildbereich der Kamera projizieren. Das ermöglicht eine höhere laterale und verbesserte Tiefenauflösung der Stereobilder. Als Nachteil ist diese Methode aber auch empfindlich gegenüber Fremdlicht, da die projizierten Muster dadurch beeinflusst werden.

Am Messwagen wurde für die Testkampagne auch so eine aktive Stereokamera verbaut, um zu testen, ob diese schon ohne weitere Verarbeitung für die KOMBI Use Cases benutzbare 3D-Bilder liefern kann. Im Folgenden eine beispielhafte Aufnahme von dieser aktiven Stereokamera: ein Nahe-Infrarot-Foto und ein von der Kamera berechnetes Tiefenbild.



Abb. 35: Nahe-Infrarot-Foto

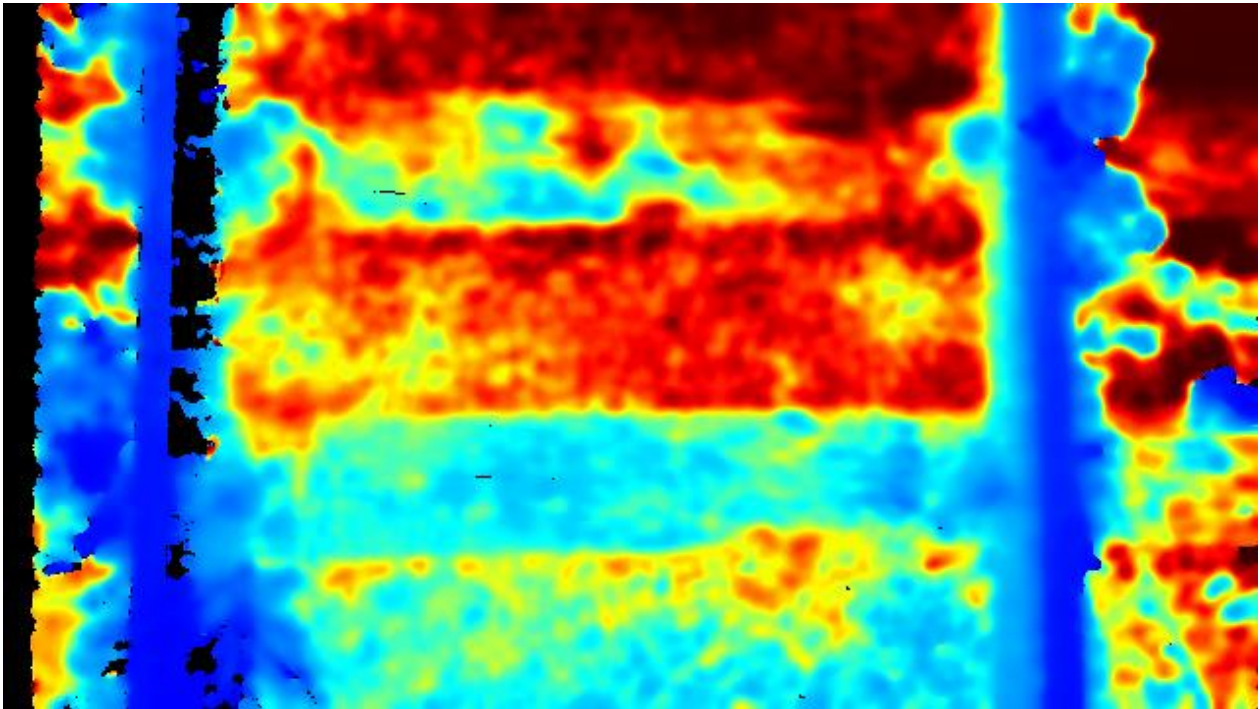


Abb. 36: 3D-Tiefenbild

Der Farbverlauf stellt die Entfernung zur Kamera dar: Blautöne für die Bildpunkte, die der Kamera am nächsten sind, bis zu Rottönen für die Bildpunkte mit der größten Entfernung.

Bei der Analyse ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Analyse der Stereobilder, die wie im letzten Abschnitt beschrieben aus zwei Kamerabildern zusammen berechnet wurden:

Die aktive Stereokamera ermöglicht eine höhere Auflösung der Tiefenbilder als die passive, wodurch mehr Details zu erkennen sind. Allerdings bringt auch diese Auflösung noch keinen verwertbaren Nutzen für die KOMBI Anwendungen.

5.3.1.5 KAMERA IN FAHRERKABINE

Mit einer hinter der Windschutzscheibe montierten Kamera wurden hochauflösende Bilder des Schienenverlaufs vor dem Zug aufgezeichnet. Solche Bilder können unabhängig von der Fahrtrichtung aufgezeichnet werden, um Gleisverwerfungen (UC2.3) erkennen zu können.

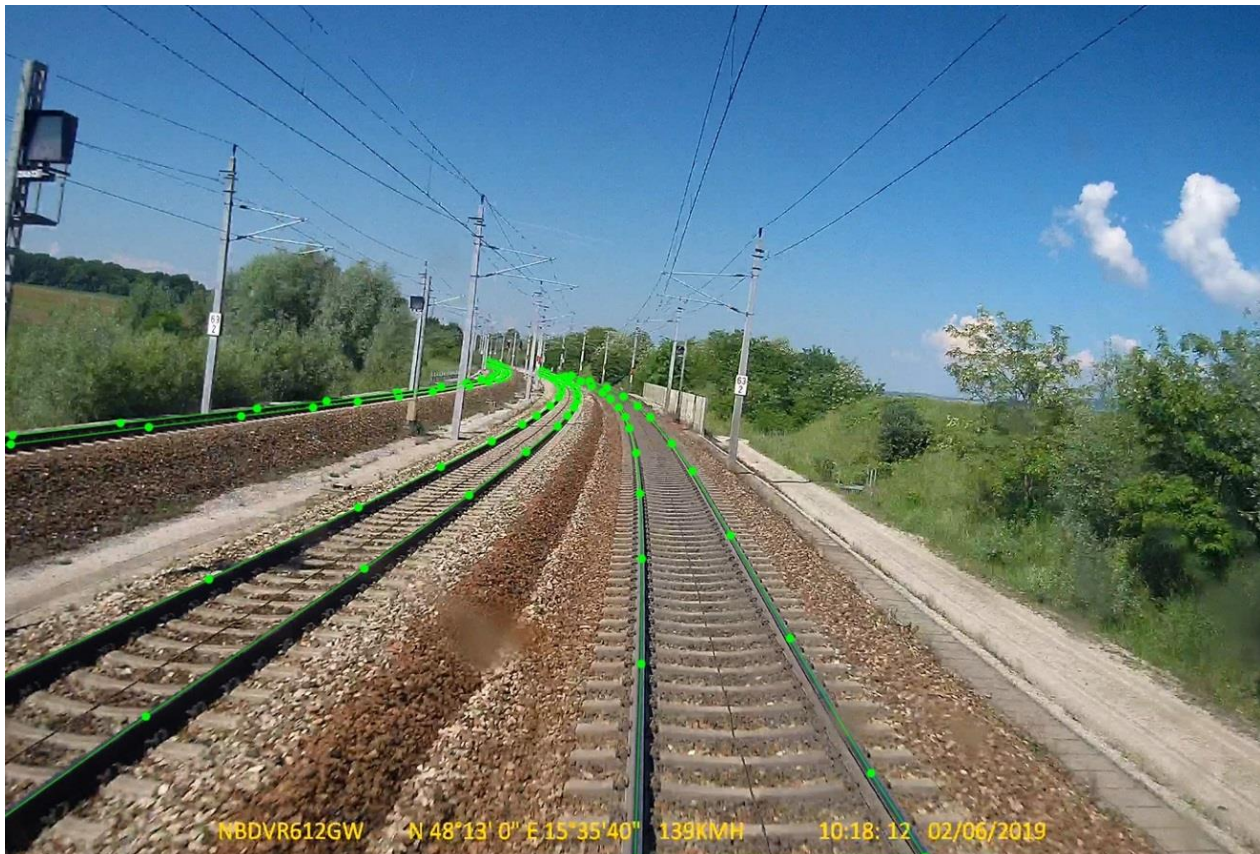


Abb. 37: Bild des Schienenverlaufs

Schienen können wie in der Abbildung ersichtlich automatisch erkannt werden. So wird der Schienenverlauf erfasst. Entstehende Gleisverwerfungen (UC2.3) und nennenswerte Absenkungen des Gleisbetts (UC3.1) können im Verlauf über die Zeit beobachtet werden. Bei erkannter signifikanter Abweichung zur letzten Aufnahme kann das System Warnungen ausgeben, und Mitarbeiter der ÖBB Infrastruktur können dann anhand der Warnung und der dazugehörigen hochauflösenden Fotos über weitere Maßnahmen entscheiden.

- Vorteil: Entwicklung von Gleisverwerfungen kann automatisiert erkannt werden
- Nachteil: Montageposition für Blickwinkel der Kamera nach vorne/hinten wäre im Führerstand am Einfachsten, aber der Einbau im Führerstand hat ein strenges Genehmigungsverfahren.

Wenn also die Montage einer solchen Kamera möglich ist, kann diese zur Entdeckung relevanter Use Cases verwendet werden.

5.3.2 VERORTUNG

Für alle gesammelten Sensordaten gilt: sinnvolle Weiterverarbeitung ist nur möglich, wenn die Daten korrekt verortet werden können. Jeder erkannte potenzielle Use Case braucht exakte Ortsdaten. Zusammen mit diesen kann über weitere Maßnahmen entschieden oder die Entwicklung über die Zeit beobachtet werden.

Die folgenden Unterabschnitte beschreiben die Vor- und Nachteile der verschiedenen für KOMBI in Betracht gezogenen Verortungstechnologien.

5.3.2.1 GNSS

Im Rahmen der KOMBI Datensammelkampagne am Messwagen wurde ein GPS-Sensor am Dach des Messwagens montiert. Die gesammelten Daten können zu Verortung und Geschwindigkeitsmessung verwendet werden.

- Vorteil: Verortung absolut
- Nachteile: Signal nicht immer verfügbar, nicht immer genau

Die GNSS Daten sollten mit einer der nachfolgend beschriebenen Technologien fusioniert werden, um durchgehende Verortung aller Sensordaten zu gewährleisten.

5.3.2.2 RAD-ODOMETRIE

Im Rahmen der KOMBI Datensammelkampagne konnte das im ÖBB-Messwagen verfügbare Geschwindigkeitssignal als Input aufgezeichnet werden. Für dieses Signal wird die Geschwindigkeit aus Radumdrehungen berechnet. Überfahrene Palisen können zur Korrektur von Messungenauigkeiten verwendet werden.

Wenn so ein Signal für KOMBI verfügbar ist, kann die Geschwindigkeit damit sehr genau aufgezeichnet werden.

- Vorteil: beste/genaueste Geschwindigkeitsmessung
- Nachteil: nicht auf allen Fahrzeugen verfügbar bzw. mit Integrationsaufwand pro Fahrzeug verbunden

Die Kombination von absoluter Lokalisierung mittels GNSS and relativer Lokalisierung durch Integration des Geschwindigkeitssignals ermöglicht eine hochgenaue Lokalisierung im Streckennetz. Umgebungsbedingungen, die für GNSS ein Problem darstellen, wie z.B. die Abschattung der Satellitensignale durch Vegetation, Gebäude oder Tunnel, können so teilweise kompensiert werden.

5.3.2.3 VISUELLE ODOMETRIE

Am Messwagen wurde eine Tracking Kamera verbaut, um zu evaluieren, wie gut damit die Zuggeschwindigkeit gemessen werden kann. Die Tracking Kamera muss seitlich am Zug montiert werden, mit Blickwinkel auf die vorbeiziehende Landschaft. Daraus berechnet die Kamera die Geschwindigkeit des Zuges.

Für bestmögliche Ergebnisse sollte der Blickwinkel der Kamera gut ausgeleuchtet sein. Das ist am Zug kaum möglich, da ein Scheinwerfer seitlich auf die Landschaft gerichtet werden müsste.

- Vorteil: günstigste Variante, einfach zu integrieren
- Nachteil: Ergebnisse nur teilweise brauchbar.
 - Messung funktioniert bei geringen Geschwindigkeiten und guten Lichtverhältnissen.
 - Bei schlechten Lichtverhältnissen kein brauchbares Geschwindigkeitssignal mehr
 - Probleme bei Veränderung der Szene, die nicht durch Eigenbewegung des Zugs verursacht werden (z.B. entgegenkommender Zug im Blickwinkel)

Die Technologie der Tracking Kamera hat das Potential, ähnlich gute Ergebnisse wie die Radodometrie zu liefern. Der derzeitige Stand der Technik ist aber noch nicht ausgereift genug für einen verlässlichen Einsatz am Zug.

5.3.2.4 RADAR

RADAR Sensorik wird seit längerer Zeit auch im Eisenbahnbereich zur schlupffreien Messung von Wegstrecke und Geschwindigkeit eingesetzt, wobei meist mittels Doppler-RADAR Messverfahren im Frequenzbereich um 24 GHz gearbeitet wird. Solche Radarmodule sind für den KOMBI-Einsatz zu teuer. Die technologische Entwicklung im Automotive-Bereich – Stichwort Fahrerassistenzsysteme – hat zur Entwicklung von sehr kosteneffizienten Radarmodulen geführt. Aus diesen kann auch für die Geschwindigkeitsmessung im Bahnbereich kosteneffizientere Sensorik entwickelt werden.

Ein von Mission Embedded GmbH entwickelter Radarsensor wurde am Messwagen schräg auf den Gleiskörper gerichtet verbaut. Dieser Sensor war in anderen Projekten schon mehrere Monate außen an einer Lokomotive verbaut, ist also für den Einsatz am Zug geeignet und hat in den vorhergehenden Projekten verwertbare Ergebnisse geliefert.

Die Daten wurden während der Messfahrt gesammelt, um festzustellen, ob der Sensor für Geschwindigkeitsmessung anhand der Bewegung des Bodens relativ zum Sensor geeignet ist. Die gemessenen Werte wurden mit dem vom Zug ausgegebenen Geschwindigkeitssignal verglichen. In der folgenden Abbildung ist der lineare Zusammenhang der vom RADAR gelieferten Doppler-Werte mit dem Geschwindigkeitssignal gut erkennbar.

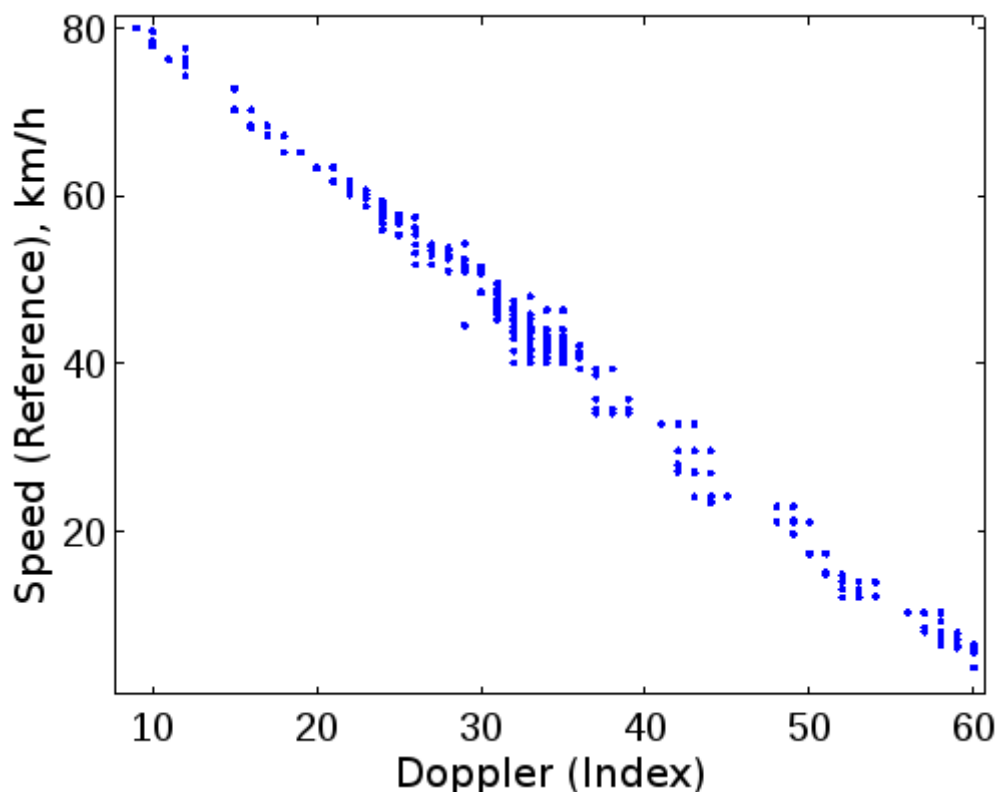


Abb. 38: RADAR Doppler Werte korrelieren mit dem Geschwindigkeitssignal

Der Doppler-Wert ist ein vom RADAR-Sensor gemessener Wert, der über die Zeit gemittelt aufgezeichnet wird.

Die gemessenen Werte korrelieren mit dem Geschwindigkeitssignal des Zuges, d.h. das Bodenradar liefert Messdaten, welche in einem statisch modellierbaren Zusammenhang mit der tatsächlichen Fahrzeuggeschwindigkeit stehen. Ein solcher Sensor kann zur Geschwindigkeitsmessung am Zug verwendet werden.

- Vorteile: als autarke Box integrierbar, verwertbare Ergebnisse
- Nachteile: weniger verlässlich als Rad-Odometrie, noch nicht so erprobt

5.3.3 BESCHLEUNIGUNGSSENSOR

Für das KOMBI Projekt wurde von Mission Embedded ein triaxialer Beschleunigungssensor ausgewählt und am Messwagen für die Datensammelkampagne montiert. Die Idee war es zu beurteilen, ob durch die messbaren aufgetretenen Beschleunigungen Rückschlüsse auf Schäden am Gleis gezogen werden können, wie Schienenbruch, Absenkungen oder Gleisverwerfungen. Dazu wurde der Beschleunigungssensor möglichst nahe der Radachse montiert, wo die auftretenden Beschleunigungen noch möglichst ungefedert auftreten.

Der triaxiale Beschleunigungssensor wurde wie in der folgenden Abbildung ersichtlich montiert.

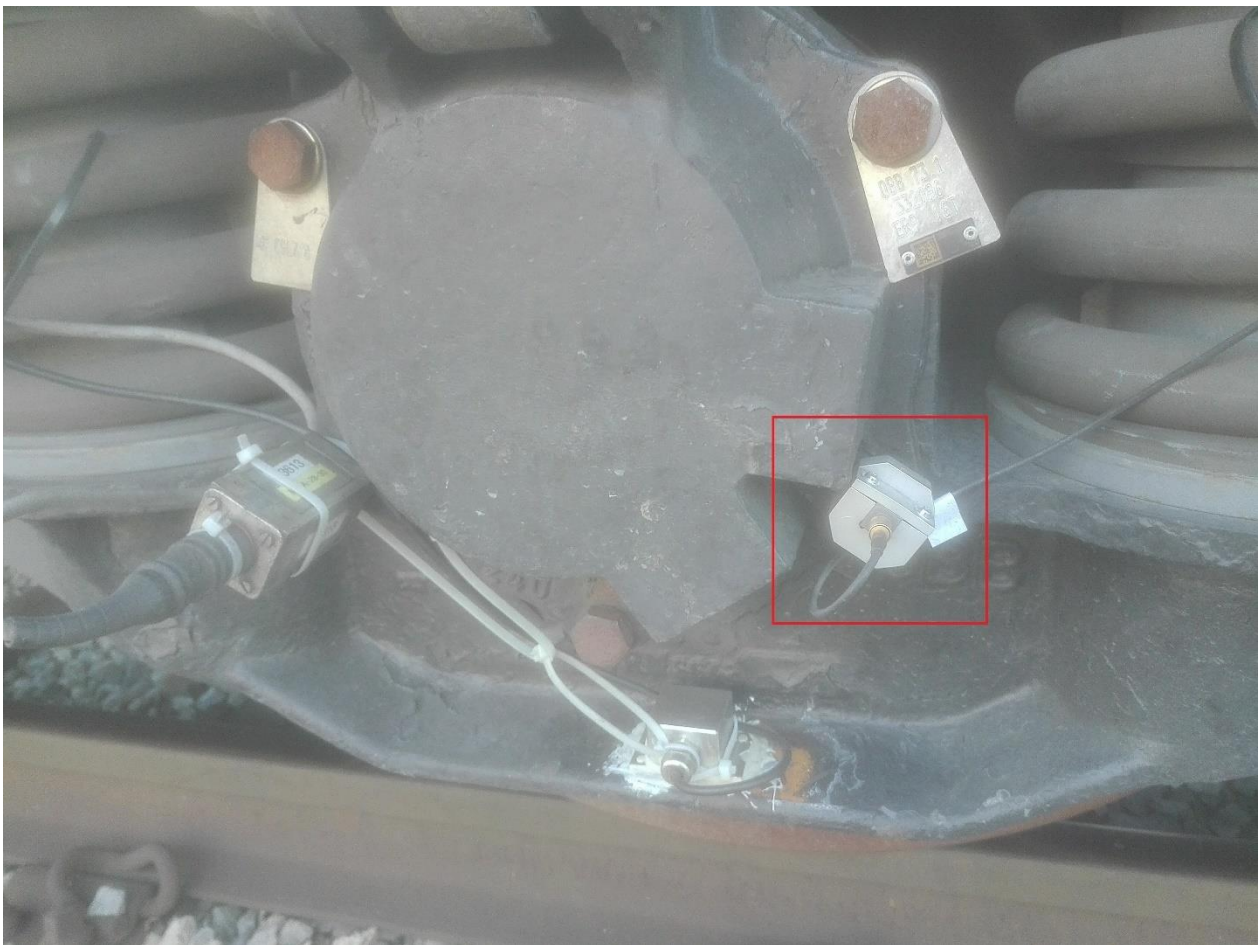


Abb. 39: Beschleunigungssensor an Radachse

Der Sensor selbst wurde kurzfristig vor Beginn der Datensammelkampagne an Mission Embedded geliefert. Die Sensorik konnte vor Einbau nur mehr eingeschränkt getestet werden. Während der Integration am Zug wurden Probleme bei der elektrischen Integration festgestellt, welche bis zum Ende der Datensammelkampagne nicht mehr behoben werden konnte. Die aufgezeichneten Daten sind daher nicht verwertbar und es können keine weiteren Analysen durchgeführt werden.

Da die Datenaufzeichnung nicht wie geplant funktioniert hat und sich die aufgezeichneten Daten als nicht auswertbar erwiesen haben, kann der Beschleunigungssensor nach der Datensammelkampagne noch nicht ausführlich beurteilt werden.

5.3.4 LIDAR-SENSOR

Es hat sich gezeigt, dass der LIDAR-Sensor den hohen Belastungen am Zug nicht standhalten konnte. Der verbaute Sensor wurde kurz nach dem Beginn der Datensammelkampagne defekt. Der Sensor hat keine verwertbaren Daten geliefert.

5.4 ZUSAMMENFASSUNG

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Sensorevaluierung nochmals zusammen.

TECHNOLOGIE	BEWERTUNG
2D Bildanalyse	Gute Erkennung von Use Cases
Passive Stereokamera	Tiefenauflösung zu gering
Aktive Stereokamera	Abtastrate zu langsam
Kamera in Fahrerkabine	Gute Erkennung Schienenverlauf
GNSS	Notwendig für Verortung und Geschwindigkeit
Rad-Odometrie	Notwendig für Geschwindigkeitssignal
Visuelle Odometrie	Derzeit verfügbare Technologie nicht robust genug für Einsatz am Zug
RADAR	Möglich für Geschwindigkeitssignal
Beschleunigungssensor	Bedarf weiterer Evaluierung (kein Ergebnis im Rahmen der Sensorevaluierung)
LIDAR-Sensor	Nicht für Einsatz unter Zug geeignet

Tab. 4: Sensorevaluierung

Aus der Sensorevaluierung ergeben sich Empfehlungen für folgenden Technologien zum Einsatz im Rahmen von KOMBI:

- 2D Bildanalyse
- Kamera in Fahrerkabine
- GNSS
- Rad-Odometrie; falls nicht verfügbar, muss ein Geschwindigkeitssignal aus anderen Quellen, z.B. Bodenradar, zur Verfügung stehen
- Beschleunigungssensor

Diese Empfehlungen fließen in das für KOMBI erstellte Gesamtkonzept ein, das im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

5.4.1 HIGHLIGHTS DER SENSOREVALUIERUNG

Die Ergebnisse der Analyse der im Rahmen der Messkampagne aufgezeichneten Daten sind sehr gut. In den Daten wurden mehrere relevante Use Cases gefunden, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

5.4.1.1 GEBROCHENE SCHWELLE

Eine gebrochene Betonschwelle. Diese könnte mit Foto von KOMBI an die für diesen Gleisabschnitt verantwortlichen Entscheidungsträger weitergeleitet werden.



Abb. 40: entzerrtes Bild mit erkanntem Bruch

Die Bruchstelle kann von einem System automatisch erkannt und markiert werden.

5.4.1.2 ABNUTZUNG AN HOLZSCHWELLEN

Im Folgenden zwei Aufnahmen von älteren Holzschwellen, an denen schon Abnutzung erkennbar ist. Die Aufnahmen können gespeichert und über die Zeit verglichen werden, um festzustellen, ob sich der Zustand verschlechtert.

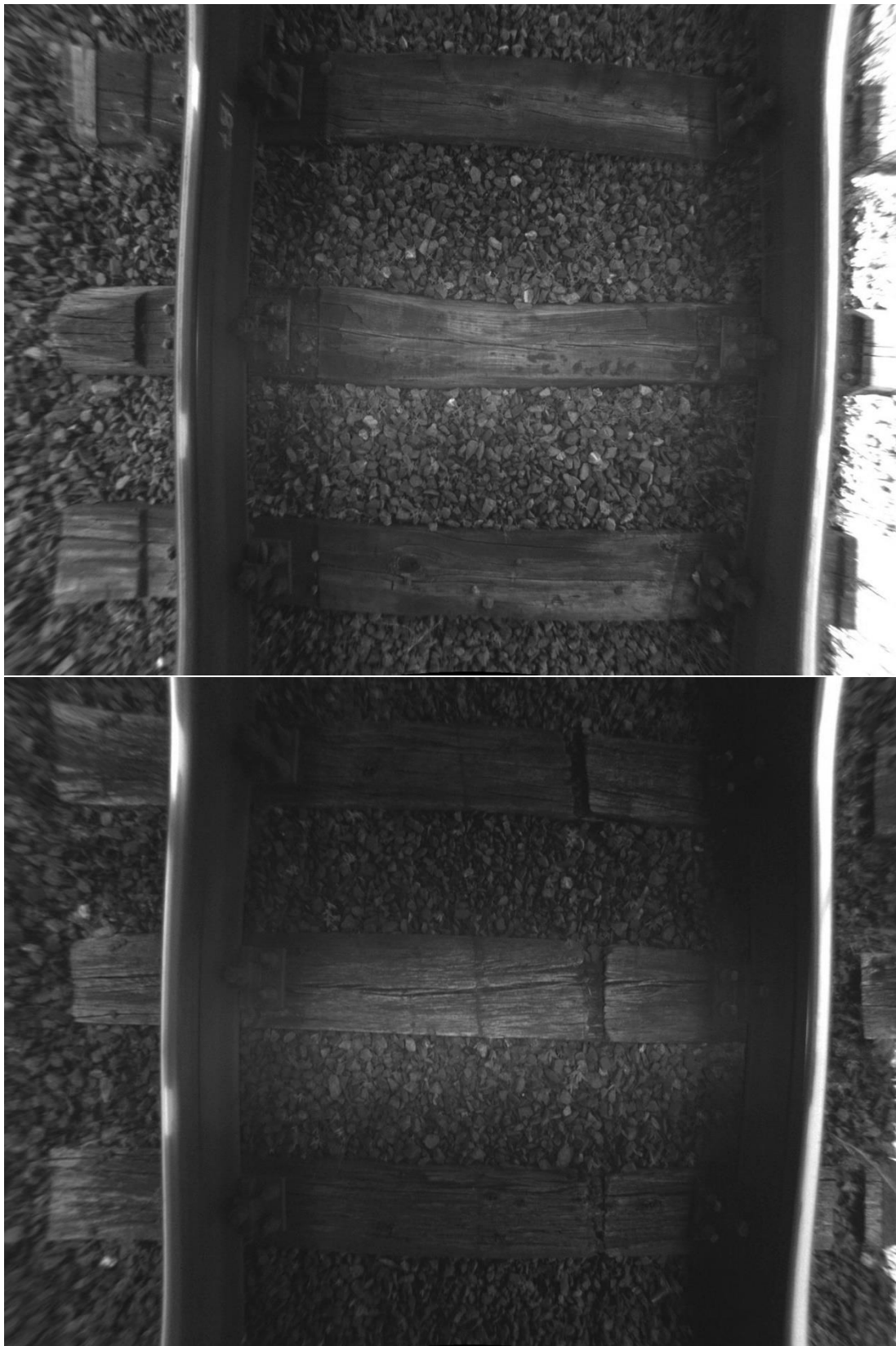


Abb. 41: Holzschwellen mit Abnutzungserscheinungen, entzerrte Bilder

5.4.1.3 WEICHEN

Weichen bzw. Weichenteile können automatisch erkannt werden. Der Zustand der Weichen kann über die Zeit mit älteren Aufnahmen verglichen werden, oder im Fall eines erkennbaren Schadens gleich automatisch mit dem Foto an die für diesen Gleisabschnitt verantwortlichen Entscheidungsträger weitergeleitet werden.

Die folgenden Aufnahmen zeigen die vom System entzerrten Bilder, auf denen die erkannten Weichenteile wie Weichenherz und Schaltkästen markiert sind.



Abb. 42: entzerrtes Bild von Weiche mit erkannten Weichenherzen



Abb. 43: Entzerrte Bilder mit erkannten Weichen-Schaltkästen

5.4.1.4 MÖGLICHE FEHLENDE SCHRAUBE

Bei erkannten fehlenden Schrauben und anderen Kleinteilen könnte das System eine Meldung mit Foto erstellen, die zur Überprüfung an die für diesen Gleisabschnitt verantwortlichen Entscheidungsträger weitergeleitet werden.

In der nächsten Abbildung ist links oben im Bild ein Schraubloch mit fehlender Schraube zu sehen, wobei das in diesem Fall noch kein Problem darstellen muss. Solche fehlenden Schrauben können von einem System erkannt und weitergemeldet werden.



Abb. 44: mögliche fehlende Schraube, entzerrtes Bild

5.4.1.5 BEWUCHS

Bewuchs am Gleiskörper kann vom System automatisch erkannt und markiert werden. Die Aufnahmen können gespeichert und über die Zeit verglichen werden, um festzustellen, in welchem Ausmaß sich der Bewuchs entwickelt. Erkannter Bewuchs kann vom System automatisch mit Foto an die für diesen Gleisabschnitt verantwortlichen Entscheidungsträger weitergeleitet werden, die dann über die Notwendigkeit von weiteren Maßnahmen entscheiden.



Abb. 45: Bewuchs am Gleiskörper, entzerrtes Bild mit erkanntem Bewuchs

5.4.1.6 OBJEKTE AM GLEISKÖRPER

Die folgenden Abbildungen zeigen verschiedene Fremdkörper, die sich am Gleiskörper befinden. Solche erkannten Fremdkörper können von einem System automatisch mit Foto an die für diesen Gleisabschnitt verantwortlichen Entscheidungsträger weitergeleitet werden, die dann über die Notwendigkeit von weiteren Maßnahmen entscheiden.



Abb. 46: Gelöste Spanklemmen und Winkelführungsplatten, entzerrtes Bild mit erkannten Objekten



Abb. 47: Totes Tier, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt



Abb. 48: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt



Abb. 49: Flasche links im Bild, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt



Abb. 50: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt



Abb. 51: Fremdkörper am Gleis, entzerrtes Bild mit erkanntem Objekt

5.4.1.7 REGULÄRE SCHRAUBE

Im Folgenden, ein Bild einer die Schiene fixierenden Schraube. Falls diese vom System erkannt und gemeldet wird, kann die zuständige Person anhand des Bilds erkennen, dass kein Problem vorliegt und nichts weiter unternommen werden muss.



Abb. 52: Schraube zur Befestigung der Schiene

6 GESAMTKONZEPT

In diesem Abschnitt wird zunächst ein mögliches technisches und operatives Gesamtkonzept beschrieben. Die Auswahl der Sensorik und Systemkomponenten hängt von zahlreichen Faktoren und Anforderungen ab. Die zuvor identifizierten Use Cases für solch ein System legen hierbei die Grundlage für die abgeleiteten und adressierten Anforderungen. Weiters sollten die Sensordaten hochgradig automatisiert gesammelt und ausgewertet werden, das System wartungsarm und robust funktionieren, sowie eine Datenvorverarbeitung am Fahrzeug ermöglichen damit nur noch reduzierte Datenmengen an die Leitstelle übertragen werden müssen.

Ein Integrationskonzept und eine Kostenbewertung wird anschließend an das Gesamtkonzept vorgestellt.

6.1 EINLEITUNG

Das Ziel des KOMBI-Projekts ist es ein Konzept für ein Sensorik-System auszuarbeiten, das auf Regelzüge montiert werden kann und damit die nahezu kontinuierliche Überwachung von Teilen der Eisenbahn-Infrastruktur ermöglicht. Die vorgeschlagene Sensorik wird nach Verwendbarkeit und Kosten beurteilt, ebenso wie für den Betrieb notwendige On-Board-Komponenten und weitere Komponenten zur Datenverdichtung, Datenübertragung und Datenverarbeitung.

Am Zug werden Sensordaten, d.h. Kamerabilder und Input der weiteren Sensoren, gesammelt. On-board findet neben der Sensorfusion auch eine erste Datenverdichtung statt, und bereits eine Vorverarbeitung. Das verringert die zu übermittelnden Datenmengen und ermöglicht eine zeitnahe, kontinuierliche Übermittlung an die Leitstelle.

Die Originaldaten können am Zug gespeichert werden, um sie später als Big Data Basis zu verwenden. Da diese jedoch nicht in Real Time benötigt werden reicht es aus, sie lediglich aufzuzeichnen und automatisiert (wireless) etwa im Depot bzw. Bahnhof an einen Server in der Leitstelle zu übertragen.

Die Auswertungen mithilfe von Verfahren aus den Bereichen Big Data und Artificial Intelligence soll in erster Linie automatisiert erfolgen und Ergebnisse in Form von regelmäßigen Berichten an die entsprechenden Abteilungen der ÖBB Infrastruktur liefern. Mitarbeiter dieser Abteilungen können dann aufgrund der Berichte über weitere Maßnahmen entscheiden.

In dem Workshop gemeinsam mit dem Projektteam der ÖBB Infrastruktur wurde festgelegt, dass das KOMBI System aus einem Basis System und möglichen erweiterbaren Komponenten bestehen soll:

Das Basis System besteht aus:

- In einer Sensorbox auf der Unterseite des Fahrzeugs:
 - Kamera- und Beleuchtungssystem
- Im Fahrzeugaum bzw. in der railpower box
 - Onboard- Verarbeitungseinheit
 - Datenübertragung
 - Beschleunigungssensor
- Für die Lokalisierung und Verortung:
 - GNSS
 - RADAR u. Odometriesignal

Mögliche Erweiterungen:

- Beschleunigungssensor auf den Radachsen
- Kamerasystem an der Fahrzeugfront

Diese Sensoren können die relevanten Use Cases abdecken und ergänzen sich darin teilweise. Im Folgenden mehr Details zur Abdeckung der Use Cases.

6.1.1 BEWERTUNG BEZÜGLICH USE CASES

Dieser Abschnitt beschreibt wie die einzelnen Technologien die relevanten Use Cases abdecken.

Dazu die folgende Tabelle als Übersicht zur Abdeckung der relevanten Use Cases durch die fürs Gesamtkonzept empfohlenen Technologien. In den nächsten zwei Abschnitten wird die Abdeckung der einzelnen Use Cases durch jeweilige Technologie näher beschrieben. Die empfohlenen Technologien können wie in Kapitel 3 beschrieben neben den hier beschriebenen relevanten noch weitere Use Cases abdecken.

USE CASE	BODEN-KAMERA	FAHRWEG-KAMERA	BESCHLEUNIGUNGS-SENSOR RADACHSE	BESCHLEUNIGUNGS-SENSOR RAILPOWER BOX
UC1.4 Ausbruch (Weiche)	++	-	+	-
UC1.7 Hydrostar Abdeckungen	++	-	-	-
UC2.1 Schienenbruch	+	-	++	~
UC2.3 Gleisverwerfungen	-	+	+	~
UC2.9 Ausbruch (Schiene)	+	-	+	-
UC3.1 Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts	-	+	++	+
UC3.2 Fehlende Kleinteile	++	-	-	-
UC3.3 Beschädigte Schwellen	++	-	-	-

Tab. 5: Use Case Abdeckung

Erläuterung zu den Symbolen in Tab.5:

- ++: Technologie sehr gut geeignet, um Use Case zu erfassen
- +: Technologie gut geeignet, um Use Case zu erfassen
- ~: Technologie nur mit Einschränkungen geeignet, den Use Case zu erfassen; sollte daher auch durch weitere Technologie erfasst werden
- -: Technologie nicht geeignet, um Use Case zu erfassen

6.1.1.1 KAMERASENSORIK

Die mit den Kameras aufgenommenen Bilder können folgende relevante Use Cases abdecken:

- UC1.4 Ausbruch (Weiche):
Weichen werden automatisch erkannt und ihr Zustand über die Zeit kann somit beobachtet werden. Ein Ausbruch, am Weichenherz und anderen Stellen, kann automatisch erkannt und berichtet werden.
- UC2.1 Schienenbruch:
Bei guter Positionierung der Kamera kann ein Schienenbruch automatisch erkannt und gemeldet werden.
Kein Schienenbruch in den von der Datensammelkampagne aufgezeichneten Daten.
- UC2.3 Gleisverwerfungen:
Gleisverwerfungen können auf Kamerabildern einer nach vorne gerichteten Kamera erkennbar sein, nicht jedoch mit unter dem Fahrzeug verbauten Kameras, die von oben direkt auf den Gleiskörper gerichtet sind.
- UC2.9 Ausbruch (Schiene):
Ein von oben, visuell erkennbarer Ausbruch kann automatisch erkannt und gemeldet werden.
Kein Ausbruch in den von der Datensammelkampagne aufgezeichneten Daten.
- UC3.1 Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts:
Eine signifikante Absenkung des Gleisbetts kann auf Kamerabildern einer nach vorne gerichteten Kamera erkennbar sein, nicht jedoch mit unter dem Fahrzeug verbauten Kameras, die von oben direkt auf den Gleiskörper gerichtet sind.
- UC3.2 Fehlende Kleinteile:
Fehlende Kleinteile wie Spannklemmen oder Schrauben können auf den Kamerabildern gut erkannt werden.
- UC3.3 Beschädigte Schwellen:
Beschädigungen an den Schwellen können auf den Kamerabildern gut erkannt werden.

Im Rahmen der KOMBI Datensammelkampagne konnten einige dieser Use Cases festgestellt werden (UC3.2, UC3.3). Die weiteren Use Cases können mit Kamerasensorik wie beschrieben abgedeckt werden, waren aber in den gesammelten Daten nicht vorhanden.

6.1.1.2 BESCHLEUNIGUNGSSENSOR 3D

Die dreidimensionalen Beschleunigungsdaten können folgende relevante Use Cases abdecken:

- UC2.1 Schienenbruch:
Der Beschleunigungssensor kann Schläge der vertikalen Achse gut messen. Aus diesen Daten kann das System Schienenbruch erkennen.
- UC2.3 Gleisverwerfungen:
Auch Gleisverwerfungen können in den Daten des 3D-Sensors erkennbar sein, da auch horizontale Bewegungen erfasst werden.
- UC2.9 Ausbruch (Schiene):
Ausbruch kann erkannt werden, sofern die ausgebrochenen Schienenteile groß genug sind, um eine Erschütterung in den darüberfahrenden Rädern hervorzurufen.
- UC3.1 Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts:
Absenkungen können in den Beschleunigungsdaten durch die entstehenden Stöße gut erkennbar sein.

Diese Annahmen konnten in der Datensammelkampagne nicht verifiziert werden, da keine verwertbaren Daten des Beschleunigungssensors aufgezeichnet wurden.

6.2 TECHNISCHES KONZEPT

Im Folgenden eine schematische Darstellung des Gesamtkonzepts für die mögliche KOMBI Hardware.

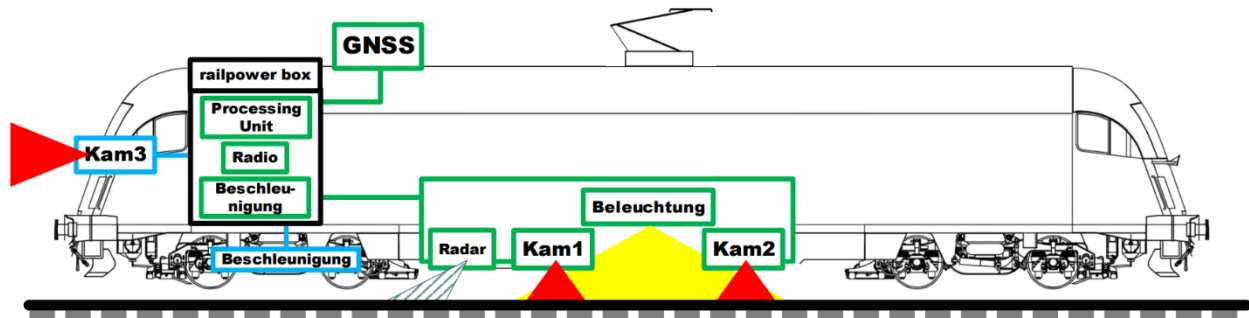


Abb. 53: KOMBI Sensorik am Zug

Das für den KOMBI-Einsatz erarbeitete System besteht aus verschiedenen am Zug montierten Komponenten, wie in der Abbildung schematisch dargestellt. Das System soll aus einer fixen Basiseinheit und wählbaren Erweiterungen bestehen.

Basis System: in der Abbildung **grün** dargestellt

- Sensorbox Unterseite inklusive:
 - Hochauflösendes Kamerasystem (Kam1 & Kam2)
 - Beleuchtungssystem: Infrarot Scheinwerfer
 - RADAR
- Integriert in die railpower box
 - Processing Unit=Verarbeitungseinheit (Onboard Datenverarbeitung)
 - Radio (Datenübertragung)
 - Beschleunigungssensor
- GNSS (Global Navigation Satellite System)

Erweiterungen: in der Abbildung **blau** dargestellt.

- Beschleunigungssensor auf den Radachsen
- Fahrwegkamera (Kam3: Kamerasystem Vorderseite)

Diese Komponenten decken folgende Funktionen ab:

- Geschwindigkeitsmessung:
 - Rad-Odometrie vom Fahrzeug: laut Expertenteam der ÖBB sehr genaues Signal, aber wahrscheinlich kann es auf den meisten Zügen nicht zur Verfügung gestellt werden
 - RADAR: Fahrzeuggeschwindigkeit anhand der Bodenbewegung messen
 - Visuelle Odometrie
 - GNSS
- Verortung
 - GNSS-Sensor zur Verortung
 - Wegsignal: aus fusionierten Geschwindigkeitssignalen berechnet

- Vermessung von Absenkungen, Lageänderungen und Erfassung des Schienenverlaufs:
 - 3D Beschleunigungssensor
- Vermessung Profil, Erfassen der Schienenkopf- und Gleisbettoberfläche:
 - Kam1, Kam2: hochauflösende Kameras, jeweils über einer Schiene montiert. Bildbereich deckt den ganzen Gleiskörper ab.
 - Beleuchtung: zusätzlich werden Naheinfrarotscheinwerfer zur Beleuchtung des Gleiskörpers direkt neben den Kameras mit gleicher Blickrichtung verbaut. Günstigere Variante wäre sichtbares Licht. Da das im Betrieb stören kann, werden Schweinwerfer im Naheinfrarotbereich empfohlen.
- Kommunikation zur Leitstelle:
 - Radio: Funkeinheit zur Kommunikation mit der Leitstelle. LTE zur Real Time-Datenübertragung, WLAN zur Übertragung im Depot/Bahnhof
- Mustererkennung, Vergleich mit Referenzform, generell Vorverarbeitung und Weiterleiten der gesammelten Daten:
 - Processing Unit (PU): Verarbeitungseinheit. Datenaufzeichnung, Vorverarbeitung am Zug, Weiterleitung relevanter Daten zur Leitstelle

Je nach geplanter Netzabdeckung sollen verschiedene Teile der Flotte mit KOMBI-Systemen ausgestattet werden. In Workshops mit der ÖBB wurden die Ausstattung folgender Züge diskutiert:

- Szenario 1: Railjets
60 Fahrzeuge
Geschwindigkeiten bis zu 230 km/h
decken fast das ganze A-Netz ab
- Szenario 2: Taurus Loks
180 Fahrzeuge (ohne Railjets)
Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h (Güterzüge)
decken fast das ganze A-Netz ab
- Szenario 3: Regionaltriebwagen
300 Fahrzeuge
Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h (Durchschnittsgeschwindigkeit deutlich weniger)
decken A- & B-Netz ab bis auf Arlberg (Landeck-Bludenz)

Bei den Tests im Rahmen der Sensorevaluierung wurden Daten bei Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h aufgezeichnet und verarbeitet. Das hier vorgestellte Gesamtkonzept ist zunächst auf Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h ausgelegt. Ein Ausbau auf höhere Geschwindigkeiten ist möglich, erfordert aber teurere Sensorik und Processing Unit.

Die mit KOMBI-Systemen ausgestattete Flotte arbeitet wie in folgender Abbildung dargestellt:

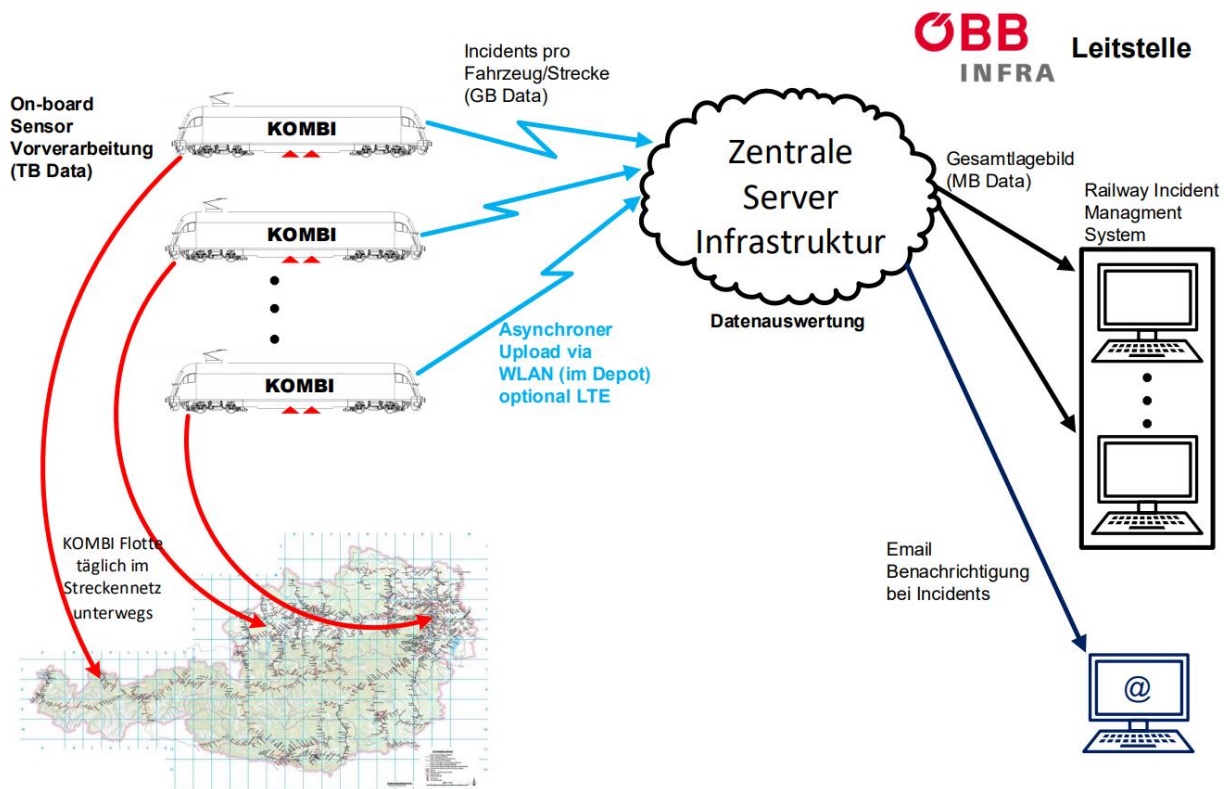


Abb. 54: Gesamtkonzept

Die KOMBI-Systeme sind auf Zügen installiert und täglich im Streckennetz in ganz Österreich unterwegs.

Jedes System sammelt Sensordaten, wodurch je nach abgefahrener Strecke, in zwei bis drei Wochen Daten bis zur Größenordnung Terabyte (TB) – mehr als für die Übertragung per Mobilfunk möglich – entstehen. Die Daten werden von der Processing Unit gesammelt und on-board, d.h. direkt am Zug, vorverarbeitet: die Daten der verschiedenen Sensorsysteme werden zusammengeführt und jene, die für eine weitere Betrachtung interessante sind, werden ausgewählt.

Vorverarbeitung Verortung: Auf der Processing Unit wird aus dem Geschwindigkeitssignal des Bodenradars oder anderen Sensoren wie der visuellen Odometrie, ein durchgehendes Geschwindigkeitssignal abgeleitet und mit der via GNSS durchgeführten Lokalisierung fusioniert. Diese Information wird mit allen gespeicherten und Übertragenen Ereignissen verknüpft, damit alle gemessenen Daten genau verortet werden können. Eine auf der Processing Unit hinterlegte Karte des Streckennetzes hilft dabei, dass die Verortung noch genauer wird.

Vorverarbeitung Kameras: Die Einzelbilder der Videodatenströme der Kameras werden auf der Processing Unit in Echtzeit klassifiziert, danach ob sie relevante Information für eine tiefere Bildanalyse beinhalten (Weiche, Schienenbruch bzw. Ausbruch, Bewuchs, fehlende Kleinteile, unbekannte Teile am Fahrweg). Die klassifizierten Einzelbilder werden mit Positionsdaten und Zeitstempel für die Übertragung zur Leitstelle vorgehalten.

Alternativ kann mit den Kameras und den Verortungs- und Zeitstempeln ein durchgehendes zusammengeführtes Bild des Gleiskörpers erstellt und auf der Processing Unit gespeichert werden. Dieses zusammengeführte Bild kann später in der Cloud ebenso für die tiefere

Auswertung herangezogen werden. Aufgrund der hierbei entstehenden Datenmengen eignet sich dieses Verfahren aber nur für gewisse Streckenabschnitte und nicht für den Dauerbetrieb.

Vorverarbeitung Beschleunigungssensor: Die Beschleunigungswerte werden über ein gewisses Zeitfenster in einem Ringspeicher aufgezeichnet. Wird ein erhöhter Beschleunigungswert festgestellt, wird das komplette Zeitfenster inklusive Positionsdaten, Bilddaten und Zeitstempel für die Übertragung zur Cloud vorgehalten.

Die so am Fahrzeug vorverarbeiteten Daten werden auf Cloud Server übertragen. Die Datenübertragung erfolgt per WLAN wo verfügbar, wenn der Zug im Depot oder Bahnhof steht. Optional können die Systeme auch schon auf der Strecke Daten per LTE übertragen. WLAN hat den Vorteil einer höheren Datenübertragungsrate, aber die entsprechende Infrastruktur muss in Bahnhöfen oder Depots vorhanden sein bzw. aufgebaut werden. Übertragung per LTE ist schmalbandiger, dafür durchgehender verfügbar als nur in Bahnhöfen/Depots, wobei Kosten der Netzbetreiber für die operativen Kosten zu berücksichtigen sind.

Daten in der Größenordnung Gigabyte (GB) werden automatisiert auf Cloud Server geladen. Diese Server können Teil von Rechenzentren der ÖBB Infrastruktur sein oder Teil einer extern in der Cloud angemieteten Infrastruktur. Dort findet tieferegehende Datenauswertung statt: Die Einzelbilder bzw. das durchgängige zusammengeführte Bild der Strecke mit genauer Verortung werden entsprechend der definierten Use Cases ausgewertet. Verfahren aus den Bereichen Big Data und Artificial Intelligence werden hier angewendet. Erkannte Probleme in der Infrastruktur können mit schon gesammelten früheren Daten über die Zeit verglichen werden. Aus den Veränderungen abgeleitete Trends können für Prognosen zur Entwicklung der Streckeninfrastruktur herangezogen werden.

Das System der tieferegehenden Datenauswertung erstellt in den von ÖBB Infrastruktur gewünschten Intervallen automatisch Berichte über gefundene Use Cases. Diese Berichte zur Gesamtlage des Gleiskörpers werden an ein Railway Incident Management System wie zum Beispiel Frequentis REM (Rail Emergency Management) weitergeleitet, wobei hier Daten in der Größenordnung von Megabyte (MB) übertragen werden. Dort kann geschultes Personal die Berichte ansehen und anhand der mitgelieferten Daten über mögliche weitere Maßnahmen entscheiden.

Unabhängig von den regelmäßigen Berichten werden in der Verarbeitung erkannte Incidents per E-Mail-Benachrichtigung an von ÖBB Infrastruktur definierte Adressen geschickt, um zeitnah Entscheidungen treffen zu können.

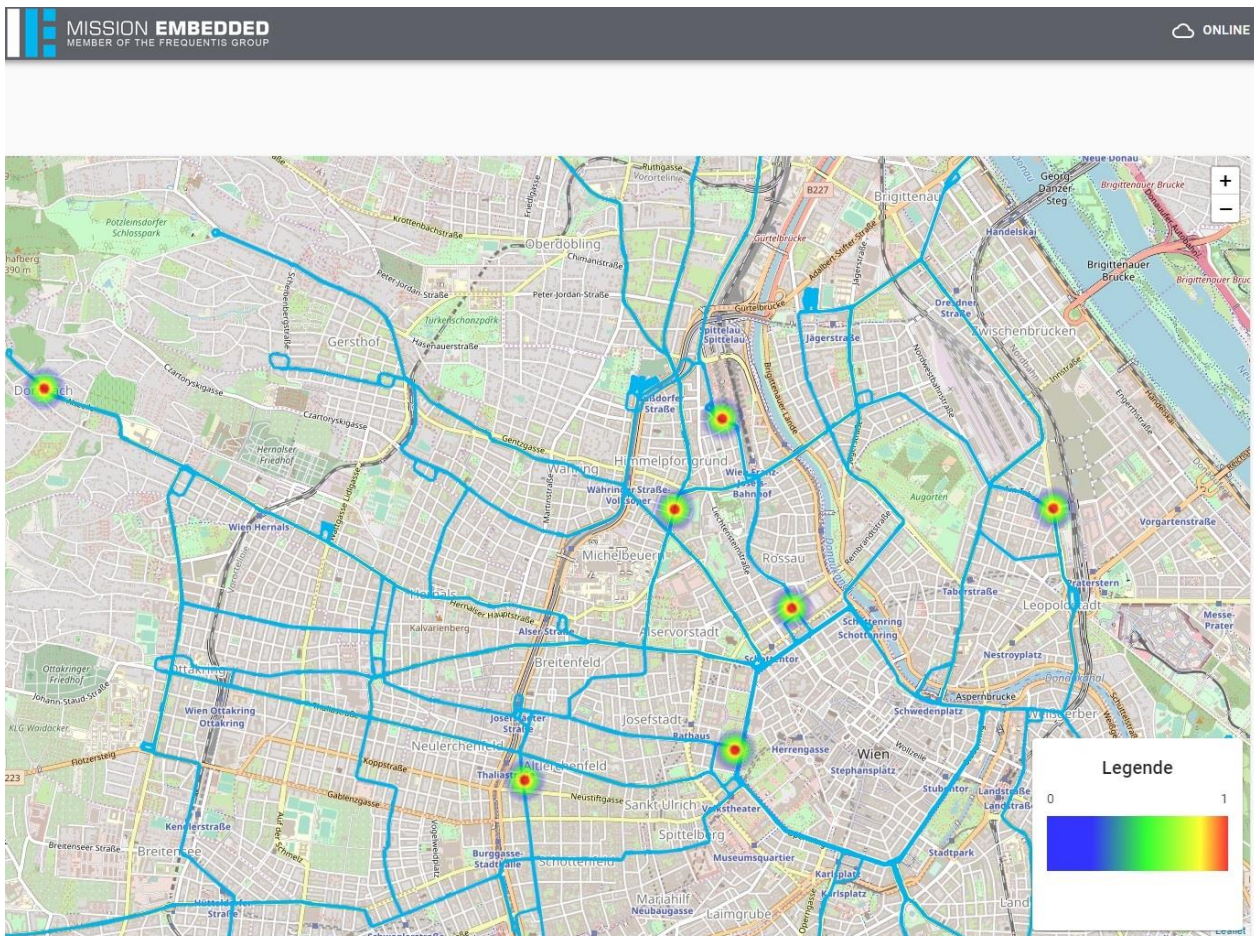


Abb. 55: Mögliche Heatmap

Die vom System erkannten Use Cases können unter anderem auf der Streckennetzkarte visualisiert werden. Die Abbildung zeigt eine schematische Darstellung aus einem von Mission Embedded umgesetzten Projekt für die Wiener Linien: dabei werden von auf Bahnen montierten Systemen automatisch erkannte Vorfälle auf einer Netzkarte dargestellt. Der Farbverlauf stellt dabei die Häufigkeit der berichteten Messungen dar. Für KOMBI könnte so das Auftreten der einzelnen Use Cases visualisiert werden.

6.3 OPERATIVES KONZEPT

Die KOMBI Sensorik soll auf Regelzügen verbaut werden, inklusive Möglichkeit zum Datenaupload ähnlich der schon von der ÖBB entwickelten railpower box. Nach Einbau ist der operative Einsatz dieses Systems wie folgt möglich:

- Das KOMBI-System sammelt automatisiert Daten, teilweise werden diese schon am Zug weiterverarbeitet
- Das KOMBI-System lädt Daten automatisiert an die Cloud weiter
- Daten werden in der Cloud automatisiert verarbeitet
- Mitarbeiter der ÖBB Infrastruktur erhalten regelmäßig Berichte und entscheiden anhand der präsentierten Daten/Use Cases, welche weitere Maßnahmen nötig sind
- Dringende bzw. vom Betreiber als wichtig definierte Ereignisse werden sofort an die Leitstelle gemeldet

- Die Daten werden in der Leitstelle auch über die Zeit gespeichert, um automatisierte Big Data Analysen über den Zeitverlauf zu ermöglichen

Im Betrieb werden von Mitarbeitern nur die regelmäßigen Berichte gelesen und zur Entscheidungsfindung verwendet. In diesen meldet das System auch, wenn Wartungsbedarf besteht (z.B. bei Sensorausfall).

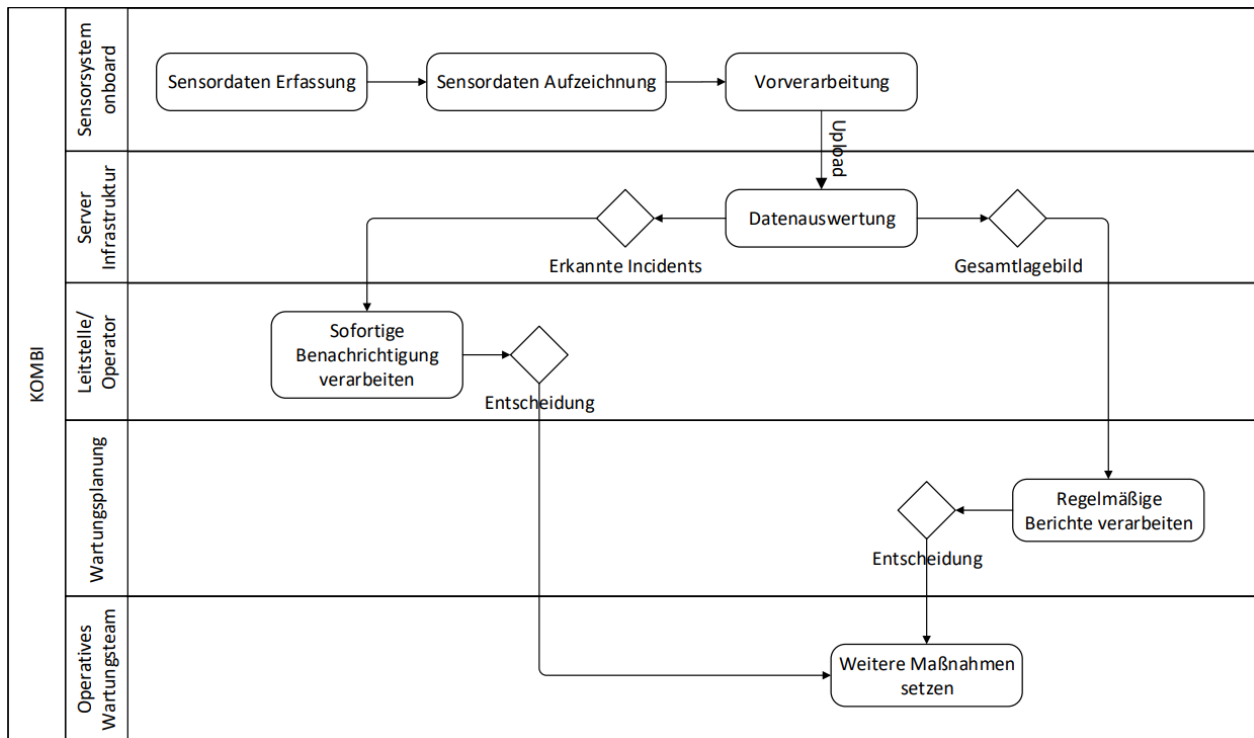


Abb. 56: Abläufe im operativen Konzept

7 INTEGRATIONSKONZEPT

Dieses Kapitel beschreibt wie das Gesamtkonzept in die bestehende Infrastruktur und Fahrzeugflotte integriert werden kann.

7.1 SENSORIK AM FAHRZEUG

Dieser Abschnitt beschreibt wie die einzelnen Sensoren am Fahrzeug eingebaut werden können, inklusive möglicher Herausforderungen.

7.1.1 BASISSYSTEM

7.1.1.1 KAMERAS

Die hochauflösenden Kameras werden so verbaut, dass sie den ganzen Gleiskörper erfassen können. Bei der Datensammelkampagne wurden zwei Kameras in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut, da das eine schnellere Integration ermöglichte. Nach Analyse des Bildmaterials empfehlen wir, die Kameras mit größerem Abstand jeweils über einer der Schienen zu verbauen.

- Einbauposition:
 - unten am Zug. Beim Verbau von zwei Kameras werden diese jeweils möglichst direkt über einer Schiene verbaut
 - möglichst geschützt vor Schmutz und Wetter:
in den 3 Wochen der Datensammelkampagne gab es keine wesentliche Beeinflussung der Bildqualität durch Verschmutzung
 - Montage möglichst wartungsfrei, d.h. die Sensorhalterung entspricht Bahnnormen und hält ohne Wartung dem Fahrbetrieb stand.
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
 - Mögliche Verschmutzung der Kameras:
Aufgeschleuderter Schmutz kann den Blickwinkel der Kameras so verdecken, dass die Bilder nicht mehr verwertbar sind. Im Winter kann Vereisung oder Schneematsch auftreten, was durch Beheizung des Systems gelöst werden kann.
Wenn Verschmutzung über einen Zeitraum erhalten bleibt, wird das vom System erkannt und in den automatisch erstellten Berichten an die Leitstelle gemeldet. Dort kann anhand der Bilder entschieden werden, ob Reinigung veranlasst werden muss. Ein System zur Kamera-selbstreinigung (Druckluft, Scheibenwischer, o.ä.) wäre wartungsintensiver und ist bei geschickter gewählter Montageposition der Kamera nicht notwendig, wie sich auch bei der KOMBI Datensammelkampagne gezeigt hat.
 - Schäden an der Kamera:
Durch aufgeschleuderte Steine oder andere Fremdkörper könnten Beschädigungen am Kamerasystem entstehen, die die aufgezeichneten Bilder unbrauchbar machen (Beschädigung des Schutzglases vor der Kamera o.ä.). Wenn keine brauchbaren Bilder mehr aufgezeichnet werden, gibt das System wie bei Verschmutzung eine Fehlermeldung an die Leitstelle, wo über weitere Wartungsschritte entschieden werden kann.

7.1.1.2 LOKALISIERUNG

Zur exakten Lokalisierung aller gemessenen Sensordaten wird ein GNSS-Signal (GPS, GLONASS oder vergleichbare Systeme) benötigt. Dieses wird mit Geschwindigkeitssignal aus

der Radodometrie und in der Processing Unit hinterlegten Streckennetzinformation verknüpft. Daraus ergibt sich durchgehend vorhandene Lokalisierung, auch für die Streckenabschnitte, wo stellenweise kein GNSS-Signal verfügbar ist.

Die Integration der entsprechenden Sensorik wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

7.1.1.2.1 GNSS

Es wird ein GNSS Sensor (GPS, GLONASS oder vergleichbare Technologien) zur Lokalisierung für KOMBI verbaut. Alternativ kann auch ein GNSS-Signal von schon am Fahrzeug vorhandenen Systemen mitaufgezeichnet werden. Dazu muss eine entsprechende Schnittstelle verfügbar sein.

7.1.1.2.2 RAD-ODOMETRIE

Falls die Züge, in denen KOMBI eingebaut wird, über ein via Rad-Odometrie gemessenes Geschwindigkeitssignal verfügen:

- Einbauposition:
Anschlusskabel zum Zugsignal, Verbindung zur Verarbeitungseinheit.
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
Ein mit Rad-Odometrie gemessenes Geschwindigkeitssignal ist eventuell nicht auf allen Zügen für KOMBI verfügbar.

Ein Rad-Odometrie-Signal vom Zug hat den Vorteil der besten Qualität des Geschwindigkeitssignal. Zusätzlich wäre die Integration günstiger als die Integration von eigener Sensorik zur Geschwindigkeitsmessung (vgl. Radarsensor und visuelle Odometrie weiter unten). Laut dem Projektpartner ÖBB Infrastruktur steht das Rad-Odometrie-Signal wahrscheinlich in den meisten Zügen nicht zur Verfügung.

7.1.1.2.3 STRECKENNETZKARTE

Die Streckennetzkarte wird auf der Processing Unit hinterlegt. Das System bestimmt die aktuelle Position auf der Streckennetzkarte mithilfe von GNSS Daten und Rad-Odometrie. Das Wissen über den vor der Lokomotive liegenden Schienenverlauf zusammen mit dem Geschwindigkeitssignal ermöglicht eine genau Lokalisierung, die auch bei leichten Abweichungen immer wieder durch das GNSS-Signal nachkorrigiert werden kann.

7.1.1.3 RADARSENSOR

Ein zur Geschwindigkeitsmessung verbauter Boden-Radar kann ein Geschwindigkeitssignal liefern, falls Rad-Odometrie nicht verfügbar ist.

- Einbauposition: unten oder vorne am Zug, in einem Winkel von 45 Grad schräg aufs Gleis gerichtet. Montagehöhe ähnlich Kameras, zwischen 0.5 und 1.5m über dem Gleis
- Zu erwartende Schwierigkeiten: der Radarsensor ist wetterfest und auch Schmutz ist kein Problem für den Sensor, daher sollte er, einmal installiert, ohne Wartung funktionieren.

7.1.1.4 ALTERNATIVE – VISUELLE ODOMETRIE

Visuelle Odometrie kann ein Geschwindigkeitssignal liefern, falls Rad-Odometrie nicht verfügbar ist.

- Einbauposition:
seitlich an der Fensterinnenseite, auf die vorbeifahrende Landschaft gerichtet
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
Technologie nicht ausgereift genug, um verlässliches Geschwindigkeitssignal zu liefern
Probleme bei Geschwindigkeiten >100km/h, entgegenkommenden Zügen im Blickfeld

7.1.2 VERARBEITUNGSEINHEIT

Die Verarbeitungseinheit sammelt alle Sensordaten, verarbeitet diese schon teilweise und übermittelt Daten weiter an die Leitstelle.

- Einbauposition:
Im Zuginneren in der railpower box.
Verkabelung von Sensoren und Verarbeitungseinheit ist notwendig.
Stromversorgung: 24V.
Leistungsaufnahme: 100-200W.
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
Kabelverlegung von allen Sensoren zur Verarbeitungseinheit muss gut geplant werden:
Verbindung auch zu der Sensorik außen muss möglich sein.

7.1.3 KOMMUNIKATIONSEINHEIT

Die Verarbeitungseinheit muss Daten selbständig und automatisiert an die Cloud Infrastruktur übertragen können. Dazu braucht es eine Mobilfunkverbindung zur Datenübertragung unterwegs und eventuell auch eine WLAN-Verbindung zur Übertragung größerer Datenmengen (z.B. aufgezeichnete Rohdaten), wenn WLAN verfügbar ist.

- Einbauposition:
Mobilfunk/WLAN-Antennen außen/oben am Zug, für möglichst guten Empfang
Kommunikationseinheit in der railpower box
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
Kabelführung zur Verarbeitungseinheit von außen nach innen muss möglich sein.

7.1.4 BESCHLEUNIGUNGSSENSOR

Eine kosteneffiziente Sensorik zur Messung der Beschleunigung in drei Dimensionen im Fahrzeuginneren, z.B. in der railpower box, muss die Bewegungen der Fahrzeugkabine erfassen können

- Einbauposition: möglichst einfach in bestehender Elektronikbox (z.B.: in der railpower box)
- Zu erwartende Schwierigkeiten:
Die Auswertung der Sensorik muss damit umgehen können, dass die Fahrzeugkabine mehrfach gefedert ist. Die gemessenen Beschleunigungswerte werden durch ein mehrfaches Feder-Maße-System verfälscht. Diese Verfälschung muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

7.1.5 ERWEITERUNGEN

7.1.5.1 FAHRWEGKAMERA

- Kamera zur Aufzeichnung des Schienenverlaufs
 - Einbauposition:
vorne auf der Lokomotive, flach auf den Gleiskörper gerichtet.

Montage hinter der Windschutzscheibe: wenn erlaubt einfachste und günstigste Möglichkeit, da wettergeschützt.

Montage außen: benötigt Gehäuse und eventuell automatische Reinigung (Scheibenwischer, Druckluft, o.ä.) bei Regen.

- Zu erwartenden Schwierigkeiten:

Montage hinter Windschutzscheibe: Die Zulassung für eine Kameramontage im Führerstand, direkt hinter der Windschutzscheibe, und Akzeptanz durch Triebfahrzeugführer.

Montage außen: System zum Schutz vor Verschmutzung und Wettereinflüssen muss freien Blickwinkel der Kamera garantieren, um sinnvoll Daten aufzeichnen zu können.

7.1.5.2 BESCHLEUNIGUNGSSENSOR RADACHSE

Der Beschleunigungssensor muss die Bewegungen der Räder auf den Schienen möglichst ungefedert aufnehmen können und den auftretenden Kräften standhalten können.

- Einbauposition: möglichst ungefedert, d.h. möglichst nahe an einer Radachse

- Zu erwartende Schwierigkeiten:

Die Sensorik selbst muss sehr starken Stößen standhalten und darf sich im Fahrbetrieb nicht lockern oder lösen. Aufbau an Verschraubung wie bei der KOMBI Datensammelkampagne erfüllt dies.

7.2 INTEGRATION IN BETREIBER IT-INFRASTRUKTUR

Nach mechanischer und elektrischer Integration des KOMBI Sensorsystems in Fahrzeuge und eventuell benötigter einmaliger Kalibrierung funktioniert dieses automatisiert: das System startet automatisch, sobald eine Stromversorgung besteht, zeichnet Sensordaten auf und verarbeitet diese.

Wenn eine Verbindung zur Leitstelle möglich ist, via Mobilfunk oder WLAN, nimmt das System automatisch Kontakt auf und übermittelt Daten an die zentrale Server-Infrastruktur. Dort läuft eine KOMBI-Software, die die Daten geordnet abspeichert und automatisiert weitere Analysen durchführt.

Die KOMBI-Software in der zentralen Server-Infrastruktur besteht aus drei Instanzen mit folgenden Aufgaben:

- Server-Instanz 1 erhält die Daten von den KOMBI Systemen im Streckennetz und speichert diese strukturiert in einer Datenbank
- Server-Instanz 2 führt Big Data und Artificial Intelligence Analysen durch erstellt regelmäßig Berichte
- Server-Instanz 3 bearbeitet Anfragen aus der Leitstelle

Die von Server-Instanz 2 in vom Betreiber (ÖBB Infrastruktur) definierten regelmäßigen Intervallen erstellten Berichte liefert das System an vom Betreiber definierten Orten ab. Diese Berichte bestehen aus den erkannten Use Cases mit entsprechenden Daten (z.B. Fotos möglicher Gleisschäden) und weiteren vom Betreiber gewünschten Daten (z.B. das erstellte durchgehende Bild der Strecke oder Vorhersagen zur Entwicklung des Gleiszustandes über die Zeit).

Die Berichte werden vom Betreiber zur Entscheidungsfindung verwendet, um z.B. Wartungsmaßnahmen zu planen oder Langsamfahrstrecken auf gewissen Gleisabschnitten zu initiieren.

Ein in der Leitstelle schon unabhängig von KOMBI vorhandenes Railway Incident Management System wie Frequentis REM kann die aktuellen Meldungen von KOMBI sowie die Berichte anzeigen. Die regelmäßigen Berichte können je nach Betreiberwunsch von der zentralen Server-Infrastruktur auch per E-Mail oder über andere Kommunikationskanäle verschickt werden.

7.3 INTEGRATION IN BETRIEBLICHE WARTUNGSABLÄUFE

Bei Einsatz des KOMBI-Systems auf Regelzügen ergeben sich wie bei jedem technischen System zu erwartende Wartungsaufwände. Das KOMBI Gesamtkonzept ist so geplant, dass diese Wartungsaufwände in möglichst geringem Ausmaß anfallen.

Für die Sensorsysteme am Zug wird folgende Wartungsnotwendigkeit erwartet:

- Reinigung notwendig:
 - Bodenkamera
 - Intervall: bei Montage unterm Zug kann das System mehrere Monate laufen, ohne dass Reinigung notwendig wird.
Für den unwahrscheinlichen Fall, dass Verschmutzung auftritt, meldet das System, dass die aufgezeichneten Bilder nicht mehr brauchbar sind, und in der Leitstelle kann anhand der Bilder entschieden werden, ob Reinigung nötig ist.
 - Tausch von beschädigten Schutzgläsern.
 - Fahrwegkamera:
 - wenn die Kamera außen montiert wird, Verfahren wie bei der Bodenkamera
 - wenn die Kamera im Führerstand montiert ist, muss nur die Scheibe gereinigt werden, Verfahren wie bei der Bodenkamera
- Sichtprüfung und Überprüfung der Montage von Gehäusen aller Sensoren:
 - Beschleunigungssensor 3D
 - RADAR
 - GNSS Empfänger

Generelle Kontrollen der KOMBI-Sensorik wie visuelle Inspektion auf Schäden können mit den Wartungsintervallen mit dem Betreiber abgestimmt werden. Beispielsweise:

- Wenn möglich: Kurzer Check auf sichtbare Schäden bei der Inspektion der Lokomotive durch Triebfahrzeugführer vor der Inbetriebnahme.
- Bei der Wartung der Lokomotive: Checks für KOMBI-Hardware in Wartungsprotokolle integrieren

Genauer Ablauf bzw. Ausmaß dieser Checks wird vom Betreiber definiert.

8 KOSTENBEWERTUNG

In der nächsten Phase des KOMBI-Projekts wurde eine Kostenbewertung für das empfohlene System erstellt. Diese liefert eine Abschätzung der zu erwartenden Kosten für KOMBI im Einsatz auf Regelzügen. Diese Abschätzung versteht sich als eine Größenordnung für bahntaugliche Komponenten. Sie enthält nicht die Kosten für die einmalige Montage und das Testen am Zug, sowie die Kosten für Kabeln, da diese sehr stark von der Länge abhängen und somit vom Zug und der endgültigen Einbauposition abhängen.

BASISSYSTEM	PREIS €
Kamera Zugunterseite	5000
Beschleunigungssensor in railpower box	500
Compute+HW	6500
Mechanik	2000
LTE	750
GNSS	750

Tab. 6: Kostenbewertung - Basissystem

ERWEITERUNGEN	PREIS €
Kamerasystem Vorderseite	1750
Beschleunigungssensor auf den Radachsen	500

Tab. 7: Kostenbewertung - Erweiterungen

Das Basis System besteht aus:

- In einer Sensorbox auf der Unterseite des Fahrzeugs:
 - Kamera- und Beleuchtungssystem
- Im Fahrzeugraum bzw. in der railpower box
 - Onboard- Verarbeitungseinheit
 - Datenübertragung
 - Beschleunigungssensor
- Für die Lokalisierung und Verortung:
 - GNSS
 - RADAR u. Odometriesignal

Mögliche Erweiterungen:

- Beschleunigungssensor auf den Radachsen
- Kamerasystem an der Fahrzeugfront

9 ZUSAMMENFASSUNG

Das KOMBI-Projekt hat gezeigt, dass ein System zum kontinuierlichen Monitoring der Bahn-Infrastruktur auf Regelzügen einen nützlichen Mehrwert bringen kann. Durch den Verbau in Regelzügen kann eine gute Netzabdeckung erreicht werden und der Zustand des Gleiskörpers wird durchgehender beobachtet, was eine sinnvolle Ergänzung zu den nicht so häufig durchführbaren Fahrten des Gleismesswagens (ÖBB Railchecker) darstellt.

In der Use Case Analyse wurden mögliche Schäden am und um den Gleiskörper betrachtet und gemeinsam mit den Projektpartnern nach ihrer Relevanz beurteilt. Daraus ergaben sich für das kontinuierliche OnBoard Monitoring interessante Use Cases. Die zur Erkennung dieser Use Cases benötigten Funktionen wurden in einem Workshop mit den Experten der ÖBB besprochen und bewertet.

- Schienenbruch
- Gleisverwerfungen
- Fehlende Kleinteile
- Beschädigte Schwellen
- Ausbruch (bei Weichen kritischer als bei Schiene)
- Nennenswerte Absenkung des Gleisbetts

Aufgrund der benötigten Funktionen wurden verschiedene Sensortechnologien betrachtet und nach ihrer Nützlichkeit für den KOMBI-Einsatz beurteilt. Daraus ergab sich eine empfohlene Sensorauswahl für das KOMBI-System.

- Bodenkamera: Kamera Sensorik mit der Montagevariante „steiler Winkel“
- Beschleunigungssensor 3D
- LIDAR-Sensor in 2D oder 3D (je nachdem welche Vorteile der 3D gegenüber dem 2D hat)

Im Rahmen des KOMBI-Projekts wurden bei anderen Bahninfrastrukturbetreibern erhoben, inwiefern kontinuierliche Infrastrukturüberwachung von Regelzügen angewendet wird, ob es dazu schon Ansätze gibt und welche Technologien geplant bzw. schon entwickelt werden.

Eine erste Sensorevaluierung wurde im Rahmen einer dreiwöchigen Datensammelkampagne durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Sensorevaluierung und den durchgeführten Recherchen und Analysen wurde ein Gesamtkonzept erarbeitet und im Detail beschrieben wie die Umsetzung aussieht.

Das vorgeschlagene KOMBI-System besteht aus einem Basis System und möglichen erweiterbaren Komponenten.

Das Basis System besteht aus:

- In einer Sensorbox auf der Unterseite des Fahrzeugs:
 - Kamera- und Beleuchtungssystem
- Im Fahrzeugraum bzw. in der railpower box
 - Onboard- Verarbeitungseinheit
 - Datenübertragung
 - Beschleunigungssensor
- Für die Lokalisierung und Verortung:
 - GNSS

- RADAR u. Odometriesignal

Mögliche Erweiterungen:

- Beschleunigungssensor auf den Radachsen
- Kamerasystem an der Fahrzeugfront

Je nach gewünschter Netzabdeckung können verschiedene Teile der ÖBB Flotte mit KOMBI-Systemen ausgestattet werden und mit bis zu 230 km/h im österreichischen Streckennetz unterwegs sein.

10 AKRONYME UND ABKÜRZUNGEN

ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Eisenbahninfrastrukturverwaltung in Spanien)
CTM	Continuous Track Monitoring
DB	Deutsche Bahn
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ID	Identification
ME	Mission Embedded
ÖBB	Österreichischen Bundesbahnen
PU	Processing Unit
REM	Rail Emergency Management
SNCF	Société nationale des chemins de fer français (Nationale Gesellschaft der französischen Eisenbahnen)
TRL	Technology Readiness Level

11 QUELLENVERZEICHNIS

- [1] <https://pure.tugraz.at/ws/portalfiles/portal/12105001/DerWegzurSmartenWeiche.pdf> aufgerufen am 13.11.2018
- [2] Präsentation von Somrita Dhar, Deformation and Damage of Railway Crossing studied by X-ray Tomography and other methods, Folie 3. Bild heruntergeladen am 21.11.2018
- [3] Foto von Mission Embedded GmbH
- [4] http://www.capacity4rail.eu/IMG/pdf/c4r_-_d131_-_operational_failure_modes_of_scs_public_.pdf heruntergeladen am 02.11.2018
- [5] <http://www.voestalpine.com/signaling/de/produkte/HYDROSTAR-Weichenantrieb/> heruntergeladen am 22.11.2018
- [6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ausbruch_am_Schienenkopf.jpg heruntergeladen am 13.11.2018
Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en> aufgerufen am 13.11.2018
- [7] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gauge_Corner_Cracking.png heruntergeladen am 13.11.2018
- [8] <https://www.flickr.com/photos/wsry1754/8351077672> heruntergeladen am 13.11.2018
- [9] Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. Lothar Marx, Dietmar Moßmann, Hermann Kullmann
- [10] Die gläserne Schiene. Fortgeschrittene Ultraschall-Schienenprüfung. Richard Armbruster, Thomas Heckel, Steffen Fenger
<https://www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp121-Armburster.pdf> heruntergeladen am 26.02.2018
- [11] Fahrzeugseitige Schienenbruchererkennung, Dissertation, Bohdana Slovák
https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3831/1/Dokument_2.pdf heruntergeladen am 26.02.2019