

KI-MeZIS

**KI-Methoden in der Zustandsüberwachung und bedarfsangepassten
Instandhaltung von Schienenfahrzeugstrukturen**



Individueller Abschlussbericht – Teil 2

Projektzeitraum: 01.10.2021 – 30.09.2024

Förderkennzeichen: 19I21042A

Verfasser

Martin Köppel

martin.koeppel@deutschebahn.com

+49 (0) 1523 7547206

Daniela Lauer

daniela.lauer@deutschebahn.com

+49 (0)1523 7547213

Berlin, 2025



Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	5
Abbildungsverzeichnis	6
1 Projektleitung (TP000)	13
2 Zustandsüberwachung (TP100)	15
2.1 Sensorsetup für die Integration im aTL	15
2.2 Finales Sensorsetup	18
3 KI-Verfahren des TP100	20
3.1 Datenvorverarbeitung	20
3.2 Sensordatenanalyse der Testfahrten	21
3.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse der betrieblichen Daten	21
3.2.2 Plausibilitätsprüfung gemessener Daten und Datengrundlage.....	22
3.2.3 Erwartetes Signalverhalten.....	22
3.2.4 Analyse des betrieblichen Grundrauschens.....	23
3.2.5 Analyse des situativen Rauschens	27
3.2.6 Analyse der Peaks im operativen Signal	32
3.2.7 Einfluss der Schienenqualität auf das situative Rauschen	35
3.2.8 Einflusses von Regen auf das situative Rauschen	42
3.2.9 Analyse der Typhon Peaks.....	47
3.2.10 Analyse der Peaks von Ereignissen	49
3.2.11 Analyse der Peaks von kleinen Kollisionen und Überfahrungen	51
3.2.12 Sensordatenanalyse Front Impact.....	53
3.2.13 Sensordatenanalyse Radsatz Impact	66
3.2.14 Erkennbarkeit und Sensordatenfusion.....	73
3.2.15 Wahl und Bewertung von KI-Verfahren	83
4 Schadensfälle im Fahrwerksbereich (TP200)	84
4.1 Werkstattbefragung	84
4.2 Planung und Durchführung der Befragung der Lokführer.....	85
4.3 Ergebnisse und Erkenntnisse der Lokführerbefragung	87
4.4 Integration der Ergebnisse in die Schadensbibliothek.....	87
5 Optimierte Auslegung Bauteile (TP300)	88
5.1 Realversuche auf Komponentenebene (TP400)	88

5.1.1	Überfahrversuche.....	88
6	Realversuche im / am Fahrzeug (TP500).....	95
6.1	Integration des Sensorsystems in das advanced TrainLab	95
6.1.1	Übersicht.....	95
6.1.2	Planung der Integration	95
6.1.3	Integration	99
6.2	Zulassung des Systems.....	101
6.2.1	Zulassung des Sensorsystems.....	102
6.2.2	Zulassung des Kabelkanals.....	103
6.3	Testfahrten	104
6.3.1	Testfahrten im regulären Netzwerk.....	105
6.3.2	Überfahrversuche.....	106
6.3.3	Aufprallversuche.....	107
7	Integration in Betriebskonzepte (TP600).....	109
7.1	Architektur und Schnittstellen	109
7.1.1	Übersicht.....	109
7.1.2	Technische Architektur.....	109
7.1.3	Funktionale Architektur.....	111
7.2	Operationale und gesetzliche Anforderungen	112
7.2.1	Performance Anforderungen	116
7.3	Kostenmonitoring.....	118
7.3.1	Systemkosten des Prototyps	118
7.3.2	Entwicklungskosten des Prototyps	120
7.3.3	Ableitung von Serienkosten.....	121
7.3.4	Ableitung von Transferkosten.....	122
8	Bericht und Publikation (TP700).....	124
9	Literaturverzeichnis.....	126

Nomenklatur

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
aTL	Advanced Train Lab (Forschungs- und Testfahrzeug der DB)
DMS	Dehnungsmessstreifen
FE	Finite Elemente
IEPE	Bezeichnung für einen piezoelektrischen Sensor (Integrated Electronics Piezo-Electric)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Dokumentationsprogramm Confluence	13
Abbildung 1.2: Erstes Konsortialtreffen in Stuttgart	14
Abbildung 1.3: Konsortialtreffen in Berlin (2024/05)	14
Abbildung 2.1: Grobkonzept für die Sensoren.....	15
Abbildung 2.2: Beispiel für eine Messkette vom Sensor bis zum Messwertaufzeichner für zwei Uniaxiale Beschleunigungssensoren am Unterfahrerschutz bzw. an der Tragestruktur Es wurde jede einzelne Komponente bestimmt, die notwendig ist, um das Signal vom Sensor bis zum Messwertaufzeichner zu transportieren.	16
Abbildung 2.3: Übersicht Sensoren und Kamera für KI-MeZIS.....	17
Abbildung 2.4: Verwendete Messfrequenzen und Blindwege für Sensoren und Kamera für KI-MeZIS	18
Abbildung 2.5: Finales Sensorsetup für die Funktionalitäten Aufprallerkennung und Instandhaltung. Die grün markierten Sensoren sind notwendig und der gelb markierte Sensor ist optional.	19
Abbildung 3.1: Architektur des sensorbasierten Systems zur Zustandsüberwachung	20
Abbildung 3.2: Links: Beschleunigungen über Geschwindigkeit am Radsatz des Güterwagens beim Vorprojekt, rechts: daraus abgeleitete maximale Beschleunigungen sowie zwei lineare Grenzkurven.	24
Abbildung 3.3: Beschleunigungen über Geschwindigkeit am Radsatz des aTL in der KW 10 (bitte unterschiedliche Skalierung beachten) Links: Strecke mit niedrigen Beschleunigungen (155645_002), rechts: Strecke mit hohen Beschleunigungen (091832_006)	24
Abbildung 3.4: Grenzkurven des Grundrauschen für die Sensoren an der Front abgebildet auf ungefilterten Daten	26
Abbildung 3.5: Höhe und Auftrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am Radsatz Rechts (IEPE-U-09-R) vom 5.3.2024 - 6.3.2024	27
Abbildung 3.6: Grenzkurven des Verlaufs des Situativen Rauschens für die Sensoren an der Front ermittelt auf gefilterten Daten.....	29
Abbildung 3.7: Häufigkeitsverteilungen von Beschleunigungswerten der Schnell- und Nebenstrecke für drei Geschwindigkeitsbereiche.....	30

Abbildung 3.8: Häufigkeitsverteilungen von Beschleunigungswerten der Schnell- und Nebenstrecke für drei Geschwindigkeitsbereiche ohne Typhon und Hochschwingungsbereich	31
Abbildung 3.9: Grenzkurven für maximalen Einzelereignisse (Peaks) für die Sensoren an der Front ermittelt an ungefilterten Daten	32
Abbildung 3.10: Ortsfeste Peaks in Beschleunigungssignalen der Flachwagenversuche aller Messfahrten (Peaks der Hindernisse bei 0)	36
Abbildung 3.11: Unterschiedliches situatives Rauschen je Gleisseite der Flachwagenversuche	36
Abbildung 3.12: Unterschiedliches situatives Rauschen je Gleisseite der aTL-Versuche	37
Abbildung 3.13: Höhe und Auftrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am Radsatz Rechts (IEPE-U-09-R) links vom 5.3.2024, rechts vom 6.3.2024	37
Abbildung 3.14: Vergleich der Beschleunigungshistogramme einer Strecke an drei Messtagen	40
Abbildung 3.15: Häufigkeitsverteilung von Beschleunigungswerten am 5.3.2024 (links) im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung des 5.3.2024 – 6.3.2024 (rechts).	40
Abbildung 3.16: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit niedrigen Beschleunigungswerten am Radsatz.	41
Abbildung 3.17: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit mittleren Beschleunigungswerten am Radsatz	41
Abbildung 3.18: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit hohen Beschleunigungswerten am Radsatz	42
Abbildung 3.19: Beschleunigungen und Geschwindigkeiten über der Zeit für U01 - U08	43
Abbildung 3.20: Beschleunigungsverläufe Sensoren U01-U08 ungefiltert, Zoom der Tunnelfahrt	45
Abbildung 3.21: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) Sensoren an der Bugklappe am 23.07.2024.....	45
Abbildung 3.22: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) von Regenereignissen auf Front Sensoren 09.12.2023 mit passenden Geschwindigkeitsverläufen	46
Abbildung 3.23: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) signifikanter Zeitraum auf Front Sensoren 09.12.2023 mit passendem Geschwindigkeitsverlauf	46

Abbildung 3.24: Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme des auffälligen Streckenabschnitts über alle Frontsensoren mit und ohne signifikanten Zeitraum.	47
Abbildung 3.25: Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme des auffälligen Streckenabschnitts mit CFC1000 Filter.	47
Abbildung 3.26: Maximale Beschleunigungswerte der Typhon Peaks +-5 Sekunden um den annotierten Event in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens	48
Abbildung 3.27: Höhe der Typhon Peaks an der Bugklappensensorik	48
Abbildung 3.28: Whisker Plots der Typon Peaks der Sensorik am Unterfahrerschutz (IEPE-U-06), der Tragstruktur (IEPE-U-07) und an Kupplung (IEPE-U-08) (Excel Format)	49
Abbildung 3.29: Whisker Plots der annotierten Peaks der Radsatz-Sensorik (Excel Format)	49
Abbildung 3.30: Whisker Plots der maximalen Beschleunigungswerte von annotierten Ereignissen an den Sensoren (3-5) an der Bugklappe	50
Abbildung 3.31: Whisker Plots der maximalen Beschleunigungswerte von Tunneleinfahrten an den Sensoren (3-5) an der Bugklappe	51
Abbildung 3.32: Links: Bei den Beschussversuchen ausgestattete Sensorpositionen sowie Rechts: Rückansicht mit Beschussposition (Loch)	55
Abbildung 3.33: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren verschiedener Positionen am Bug für dasselbe Ereignis	56
Abbildung 3.34: Genormte Kollisionsszenarien nach DIN EN 15227 (7)	62
Abbildung 3.35: sichtbares Schadensausmaß bei Kollisionen an der Bugklappe über Peakhöhe (maximum des Beschleunigungssignals) an Position 4	62
Abbildung 3.36: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren - andere Signalformen des Impact Signals	63
Abbildung 3.37: seitliches Abprallen des Steines als Beispiel der hohen Varianz der Beschussversuche der Bugklappe	64
Abbildung 3.38: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren - weitere Signalformen des Impact Signals (Sensor fliegt ab)	64
Abbildung 3.39: Mittlere Energy [J] über Maximale Beschleunigung [g] an Position 4 je Objekttyp (mit Trendlinie bei Vogelnachbildung)	65
Abbildung 3.40: Testabdeckung als Anzahl der Versuche je Objekt zur Überfahrererkennung	69

Abbildung 3.41: Höhere minimale Peaks je Objekt bei Sensor Typ A und B im Vergleich.....	70
Abbildung 3.42: Maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B (Anschnitt)	71
Abbildung 3.43: Maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B.....	71
Abbildung 3.44: Gefilterte maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B	72
Abbildung 3.45: Verteilung der mit 3000Hz gefilterten Maximalwerte je Objekt am Sensor Typ B.....	73
Abbildung 3.46: Verteilung der mit 3000Hz gefilterten Maximalwerte je hartes Objekt am Sensor Typ B	73
Abbildung 3.47: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese – Einschränkungen durch Peaks, Typhon und Regen.....	79
Abbildung 3.48: Beschleunigungswerte erkennbarer Objekte im Vergleich mit dem linear interpolierten situativen Rauschen bei Filterung von 3000 Hz.	80
Abbildung 4.1: Übliche Schäden und Ursachen	84
Abbildung 4.2: Spezielles Aufprallereignis.	85
Abbildung 5.1: Das Geländer der HVLE in Spandau Johannesstift.	89
Abbildung 5.2: Sensorposition am Güterwagendrehgestell	90
Abbildung 5.3: exemplarische Probekörper: Armknochen (links), Schädelknochen (Mitte), Birkenholz (rechts).....	91
Abbildung 5.4: Beschleunigungs-Zeit-Diagramme für den Bay-Sensor (oben) und den Kistler-Sensor (unten) bei der linken Seite des Drehgestells.....	92
Abbildung 5.5: Signale der Überrollungen im Zeit- und im Frequenzbereich	93
Abbildung 6.1: Gesamtübersicht Einbauorte der Sensorik KI-MeZIS	96
Abbildung 6.2: Drucksensoren an der Außenhaut.....	97
Abbildung 6.3: Dewetron Messwertaufzeichner	98
Abbildung 6.4: Auszug aus dem Integrationstagebuch.....	100
Abbildung 6.5: Kabelkanal aus dem Umbaukonzept.	101
Abbildung 6.6: Der Messwertaufzeichner und die Messtechnik integriert im Serverschrank des aTL. Der Monitor wurde während den Testfahrten zum Visualisieren der Signale verwendet.	101

Abbildung 6.7: Ende einer Testfahrt in Potsdam.	106
Abbildung 6.8: Befestigung von Knochen für den Überrolltest.....	107
Abbildung 6.9: Kupplungsversuche, der aTL führ auf einen zweiten ICE auf um einen Aufprall nachzubilden.....	108
Abbildung 7.1: Ausschnitt aus der technischen Architektur.	110
Abbildung 7.2: technische Architektur für die Software	111
Abbildung 7.3: Systemdefinition	111
Abbildung 7.4: funktionale Architektur.....	112
Abbildung 7.5: Geltende Rechtsnormen.....	113
Abbildung 7.6: Auszug aus dem Sequenzdiagramm zum operativen Konzept.....	114
Abbildung 7.7: Ableitbarkeit der Serienkosten aus dem KI-MeZIS Kostenmonitoring (farblich gestaffelt von rot: schlecht ableitbar nach grün: gut ableitbar).	122
Abbildung 7.8: Kategorien von Entwicklungsaufwänden abhängig vom Erkennungsbereich.....	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Grenzkurven des Grundrauschens der Frontsensorik entwickelt am gefilterten Datensatz.....	26
Tabelle 2: Parameter der Grenzkurven (new Limit Curve) des situativen Rauschens am Radsatz	28
Tabelle 3: Parameter des Verlaufs der Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt am gefilterten Datensatz.....	29
Tabelle 4: Parameter der linearen Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt an der Peak-to-Peak Verteilung von zwei Messtagen der KW10	31
Tabelle 5: Parameter der linearen Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt am ungefilterten Datensatz	33
Tabelle 6: Ergebnisse der Analyse von Einzelpeaks und der darauf basiert abgeleiteten korrigierten Grenzwerte für das situative Rauschen (m/s^2)	34
Tabelle 7: Ergebnisse der Bestimmung der Maximalwerte [m/s^2] über dem gesamten Datensatz	35
Tabelle 8: Übersicht Verletzung der Grenzkurven für Messfahrten am 05.03.2024	38
Tabelle 9: Übersicht Verletzung der Grenzkurven für Messfahrten am 06.03.2024	39
Tabelle 10: Dokumentierte Ereignisse im Zeitabschnitt der Tunnel-Regen-Fahrt	43
Tabelle 11: Maximale Beschleunigungswerte im Zeitabschnitt der Tunnel-Regen-Fahrt	44
Tabelle 12: Erkennbarkeit von kleinen Kollisionen und Überfahrungen je Sensor	53
Tabelle 13: Betrachtete Kategorien bei der Bestimmung des Einflusses von Masse und Geschwindigkeit auf Impuls Signale.....	57
Tabelle 14: Verwendete Sensoren der Impact Analyse an der Front.....	58
Tabelle 15: Übersicht Impact Versuche und Ereignisse	58
Tabelle 16: Testabdeckung Impact Szenarien schwere Kollisionen	59
Tabelle 17: Testabdeckung Impact Szenarien leichte Kollisionen	61
Tabelle 18: Objektkategorien der Überfahrererkennung.....	67
Tabelle 19: Sensoren der Überfahrererkennung.....	68
Tabelle 20: Übersicht Überfahr-Versuche und Ereignisse	68
Tabelle 21: Erwartetes Signalverhalten, abhängig von der Objektzerstörung.....	69
Tabelle 22: Verwendete Farbgebung für die Erkennungshypothese	74

Tabelle 23: Erkennbarkeitshypothese für Train starting (0-5km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s ²)	75
Tabelle 24: Erkennbarkeitshypothese für low Velocity (0-5km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s ²)	75
Tabelle 25: Erkennbarkeitshypothese für high Velocity (>80 km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s ²)	76
Tabelle 26: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese an der Kupplung	77
Tabelle 27: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese an der Bugklappe	77
Tabelle 28: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese am Unterfahrschutz	79
Tabelle 29: Erkennbarkeitshypothese am Radsatz	80
Tabelle 30: Erkennbarkeit der Überfahr Szenaren während der Testfahrt mit dem aTL	81
Tabelle 31: Fusionskonzept Front	82
Tabelle 32: Verwendete Beschleunigungssensoren	90
Tabelle 33: Beispiel eines Rationales einer Performance Anforderung	117
Tabelle 35: Beispiel einer Definition und Repriorisierung von der Überfahr Tests anhand einer Performance Anforderung	117
Tabelle 37: Beispiel von aus technischen Machbarkeitsgrenzen abgeleitete Anpassungsvorschläge für Anforderungen	118
Tabelle 38: HW-Kosten eines minimalen Prototyps	119
Tabelle 39: Integrations- und Zulassungskosten eines minimalen Prototyps	120
Tabelle 40: Daten der Entwicklungskosten	121
Tabelle 41: Publikationen die während der Projektlaufzeit umgesetzt wurden	124

1 Projektleitung (TP000)

Aufgabe dieses Teilprojekts ist die Koordination des Projekts. Aufgrund der Projektgröße wird dies als eigener Punkt aufgeführt.

Die DB InfraGO AG (1) hat die Koordination und Projektleitung des Forschungsprojektes übernommen. Daher wurden im Rahmen dieses Aufgabenpaketes organisatorische Aufgaben bearbeitet.

Am Anfang des Projektes wurde die Dokumentationsplattform aufgesetzt. Hierfür wurde das online Dokumentationsprogramm Confluence verwendet (siehe Abbildung 1.1).

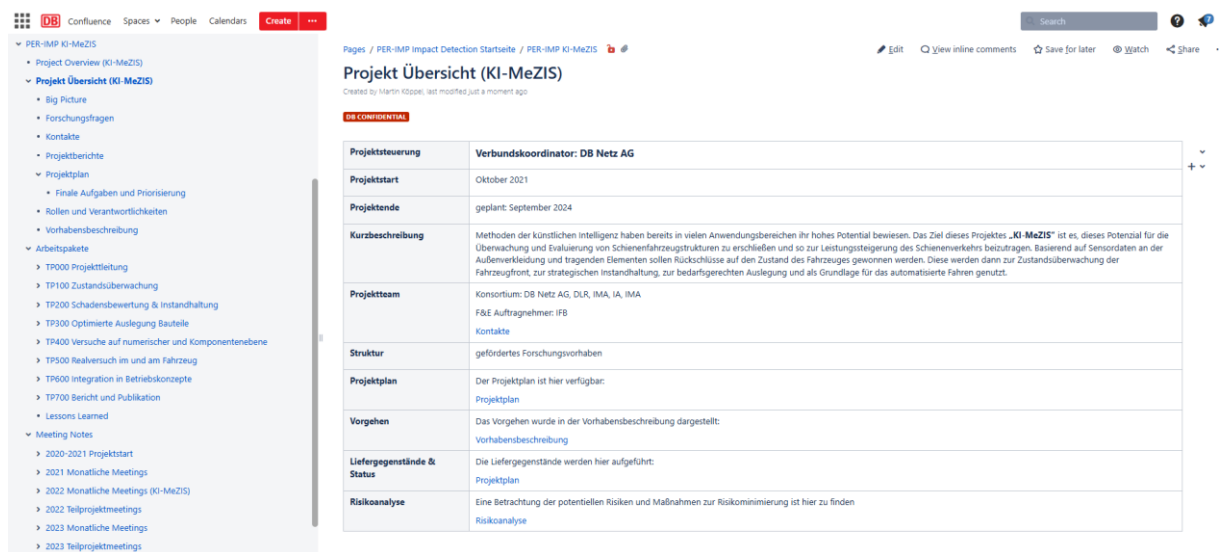


Abbildung 1.1: Dokumentationsprogramm Confluence

Es wurde eine Struktur aufgesetzt, so dass alle Projektbeteiligten wissen, wo sie ihre Ergebnisse dokumentieren können. Weiterhin wurden alle relevanten Informationen, wie Ansprechpartner, Meeting Notes, Projektplan, etc., auf dieser Plattform geteilt.

Des Weiteren wurde ein SharePoint aufgesetzt. Dies ist eine Cloudumgebung, über die große Datenmengen wie Sensordaten ausgetauscht werden können.

Während des gesamten Projektes wurde weiterhin darauf geachtet, dass ein konstruktiver Austausch zwischen den Projektpartnern erfolgt. Zu diesem Zweck wurden zusammen mit den Teilprojektleitern und Partnern regelmäßige Treffen aufgesetzt. Diese regelmäßigen Treffen umfassten:

- 1) Konsortialtreffen (½ jährlich, vor-Ort, siehe Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3)
- 2) Gesamtprojekttreffen (monatlich, online)
- 3) Teilprojekttreffen (wöchentlich, zweiwöchentlich oder monatlich je nach Teilprojekt, online)

Weitere unregelmäßige Treffen umfassten unter anderem: Vor-Ort Termine in der Werkstatt oder beim aTL, Testfahrtbegleitungen, Austausch mit Unterauftragnehmern etc.

Zudem wurde regelmäßig der Projektplan geprüft sowie Verzögerungen in Teilprojekten und Risiken dokumentiert. Für die Risiken und Verzögerungen wurden dann jeweils Lösungsvorschläge ausgearbeitet.



Abbildung 1.2: Erstes Konsortialtreffen in Stuttgart



Abbildung 1.3: Konsortialtreffen in Berlin (2024/05)

2 Zustandsüberwachung (TP100)

2.1 Sensorsetup für die Integration im aTL

Im Folgenden wird die Auswahl der Sensoren für das System beschrieben. Für diese Auswahl wurden die Erfahrungen aus den Vorprojekten herangezogen. In den Vorprojekten wurden erste Sensoren für die Überfahr- und Aufprallerkennung prototypisch getestet. Hierbei konnten verschiedene Sensoren ausgeschlossen werden oder es gab Indikationen für geeignetere Sensoren bzw. Sensorpositionen. Mit den Erkenntnissen aus den Vorprojekten haben die Partner, i.e. DB InfraGO AG (IFB), IMA und DLR ersten Grobkonzepte (siehe Abbildung 2.1) entwickelt. Diese enthielten erste Informationen zu Sensortypen und Position. Die DB InfraGO AG hat hierbei die Arbeiten koordiniert und zudem den kontinuierlichen Austausch mit dem Team von DB Systemtechnik und MSG sichergestellt. Regelmäßig wurden die Konzepte auf ihre Machbarkeit bezüglich Integration und Zulassung von DB Systemtechnik und MSG geprüft.

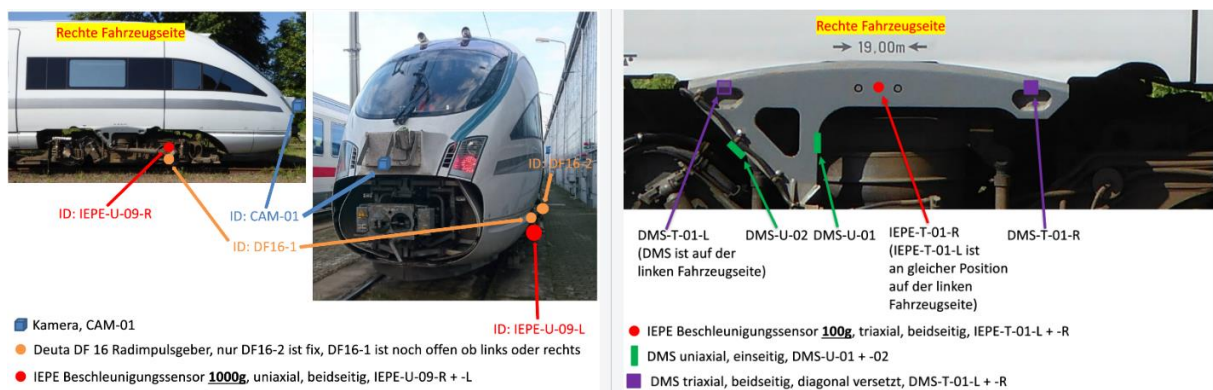





Abbildung 2.1: Grobkonzept für die Sensoren.

Als das Grobkonzept ausgearbeitet war, wurden die nächsten Details beschrieben. Diese nächsten Schritte beinhalteten:

- Die Auswahl der konkreten Sensoren. Von den Projektpartnern, in Zusammenarbeit mit der DB, durchgeführt
- Vergabe von eindeutigen Bezeichnungen für die Sensoren, so dass sie im gesamten Projekt einheitlich verwendet werden können.
- Die Wahl der Kabel. Hierbei mussten bahntaugliche Kabel gewählt werden.
- Die Zuweisung der Sensoren auf die einzelnen Kanäle des Messwertaufzeichners.
- Die detaillierte Beschreibung des Signalweges vom Sensor bis zum Messwertaufzeichner. Abbildung 2.2 zeigt die Messkette für zwei Sensoren. Solch eine Messkette wurde für jeden Sensor aufgebaut.

1.2. Beschleunigungssensor IEPE Uniaxial am Unterfahrerschutz und Tragstruktur (Verantwortlich: IMA)

Diese Messkarte gilt für die Sensoren: **IEPE-U-06, IEPE-U-07**

Oberbezeichnung		Sensor			Kabel			zwischengeschalteter Adapter			Extramodul Messwertaufzeichner		
Untergliederung	Montage	Sensor (Vorauswahl)	Steckverbindung Sensor zu Kabel	Steckverbindung Kabel zu Sensor	Kabel	Steckverbindung Kabel zu Adapter/DAQ	Steckverbindung Adapter zu Kabel	Adapter	Steckverbindung Adapter zu DAQ	Steckverbindung Kabel/Adapter zu Extramodul	Extramodul	Kabelverbindung mit Stecker von Extramodul zu Messkarte	
Bemerkung	Aufkleben von Montageadapter auf Sensortragstruktur. Aufschrauben des Sensors auf Montageadapter. Sicherung der Verschraubung gegen Verrutschen des Sensors. (Büßler, z.B. mit Loctite)				Signalkabel für einachsigte Beschleunigungssensoren im Spannungsmodus			mus in aTL-Rack untergebracht werden		keine benötigt	keine benötigt	keine benötigt	
Name	Montageadapter Kästler Typ 8A4003	Kästler 8705A250	10-32 neg	10-32 pos	Kästler Typ 1781C20 (1781C)	BNC pos./male	BNC Jack (female, neg)		TRION3-CBL-L089-BNC-0.5-03	LEMO 08.309 (plug (male, pos))			
Bild									TRION3-CBL-L089-BNC-0.5-03 High quality adapter cable from LEMO 08.309 plug to BNC cable jack, 0.5 m. For connecting voltage signals and IEPE* sensors to TRION3-1box MULTI-8-LOB modules.  HO: IN + SHIELD: IN -				

...


Messkarte DAQ-Einheit		DAQ-Einheit
Anschlussstecker Messkarte	Messkarte	
9-Pin-Lemo-Steckverbindung 9-pin LEMO EPG.08.309 female (jack, neg.)	TRION3-1820-MULTI-8-LOB	DEWE3 - M4
		

Abbildung 2.2: Beispiel für eine Messkette vom Sensor bis zum Messwertaufzeichner für zwei Uniaxiale Beschleunigungssensoren am Unterfahrerschutz bzw. an der Tragestruktur. Es wurde jede einzelne Komponente bestimmt, die notwendig ist, um das Signal vom Sensor bis zum Messwertaufzeichner zu transportieren.

Basierend auf den Messketten konnten dann auch die genauen Materialien identifiziert werden, welche bestellt werden mussten. Es wurden ca. 10% mehr Kabel bestellt, um ggf. kaputte Kabel möglichst schnell austauschen zu können. Die Bestellung der Materialien erfolgte zudem während der Corona Lockdowns, was zu massiven Lieferverzögerungen und Logistischen Problemen führte, wie z.B. einen Lieferanten zu finden, welcher fristgerecht die Materialien versenden kann.

Das finalisierte Sensorsetup, bestehend aus den Sensoren und deren optimalen Positionen, wurde anschließend durch unseren Unterauftraggeber (DB Systemtechnik) in ein Umbaukonzept überführt. Basierend auf dem Umbaukonzept wurden dann Konstruktionszeichnungen und Umbauvorschriften ausgearbeitet, welche dann in TP500 für den Einbau des Systems verwendet werden konnten. Abbildung 2.3 zeigt eine Übersicht zu den Sensoren. Die erste Spalte gibt die Sensor-ID an. Diese wurde im gesamten Projekt von allen Partnern verwendet, um einen bestimmten Sensor zu bezeichnen. Die zweite Spalte spezifiziert den Einbauort des Sensors und die Sensorbezeichnung ist in der dritten Spalte angegeben. Die Befestigungsart des Sensors an die jeweilige Struktur ist in der letzten Spalte spezifiziert.

Sensor-ID	Einbauort	Bezeichnung	Befestigung
Beschleunigungssensoren			
IEPE-U-01	Front	Kistler 8705A250M1	Klebung mit Mounting Pad (Verdrehsicherung)
IEPE-U-02	Seitenschürze		
IEPE-U-03	Bugklappe		
IEPE-U-04			
IEPE-U-05	Unterfahrerschutz		
IEPE-U-06	Tragstruktur	Kistler 8715B1K0S00T	+Kapselung im CTM-Gehäuse (verschraubt)
IEPE-U-07	Kupplung		
IEPE-U-09-R	Fahrwerk		
IEPE-U-09-L			
IEPE-T-01-L	Fahrwerk		
IEPE-T-01-R			
Dehnungssensoren			
DMS-U-01	Fahrwerk	TML FLAB10-120	Klebung + Kapselung
DMS-U-02	Tragstruktur		
DMS-U-03			
DMS-T-01-L	Fahrwerk	TML FRAB10-120	
DMS-T-01-R	Kurzkupplung		
DMS-T-02			
DMS-T-03-R	Unterfahrerschutz		
DMS-T-03-L			
DMS-T-04-R			
DMS-T-04-L			
DMS-T-05	Tragstruktur		
DMS-T-06			
Drehgeber			
DG16-01	Radsatzlager 1	Knorr Bremse	Verschraubung an Radsatzlager
DG16-02	Radsatzlager 2	DEUTA DF16	
Drucksensoren			
DS-FIS-01	Sensorträger	Endevco 8510B	5-Lochsonde Verschraubung an Sensorträger
DS-FIS-02			
DS-FIS-03			
DS-FIS-04			
DS-FIS-05			
DS-01	Außenhaut		
DS-02			
DS-03			
DS-04			
DS-05			
DS-06			
DS-07			
DS-08			
DS-09			
Kamera			
CAM-01	Sensorträger	C-GP4206M-100-4	Verschraubung an Sensorträger
Temperatursensoren			
TMP-A-01	Kupplungsraum	RS PRO Typ K 131-4751	Kabelschellen an div. Komponenten
TMP-I-01	Innenraum	RS PRO Typ K 762-118	

Abbildung 2.3: Übersicht Sensoren und Kamera für KI-MeZIS

Frequenz in kHz	10	20	35	50
Sensoren	Luftdrucksensor	Dehnungssensoren	<ul style="list-style-type: none"> Beschleunigungssensor <ul style="list-style-type: none"> Fahrwerk Frontkupplung Tragstruktur / Unterfahrschutz Kamera 	Beschleunigungssensoren Front
Begründung	Trägheit der Änderung des Luftdrucks → seltene Messung ausreichend	Maximale Abtastrate des DAQ-Moduls	Kompromiss aus Abstimmung mit DB Netz	Für Detektion kleinster Objekte zuständig (→ geringster Blindweg)

Sampling Rate (Hz)	Blind way (mm)	Sampling Rate (Hz)	Blind way (mm)
5,000	11.11	55,000	1.01
10,000	5.56	60,000	0.93
15,000	3.70	65,000	0.85
20,000	2.78	70,000	0.79
25,000	2.22	75,000	0.74
30,000	1.85	80,000	0.69
35,000	1.59	85,000	0.65
40,000	1.39	90,000	0.62
45,000	1.23	95,000	0.58
50,000	1.11	100,000	0.56

Abtastrate 1,4 MHz

Abbildung 2.4: Verwendete Messfrequenzen und Blindwege für Sensoren und Kamera für KI-MeZIS

2.2 Finales Sensorsetup

Im folgenden Abschnitt wird das finale Sensorsetup beschrieben, welches auch im operativen Betrieb für eine Aufprallerkennung bzw. die vorrausschauende Instandhaltung verwendet werden kann. Für die Spezifizierung des Sensorkonzeptes wurden die Ergebnisse aus diesem Projekt betrachtet. Weiterhin wurde das finale Konzept im Rahmen einer Expertenrunde begutachtet.

In Abbildung 2.5 sind die Sensoren (grün umrahmt) abgebildet, welche für die Funktionalitäten Aufprallerkennung und Instandhaltung notwendig sind, abgebildet. Der gelb umrahmte

Sensor kann optional verwendet werden. Er wäre für die Redundanz notwendig, sofern diese bei einem System berücksichtigt werden soll.

Sensor-ID	Einbauort	Bezeichnung	Befestigung	
Beschleunigungssensoren				
IEPE-U-01	Front	Kistler 8705A250M1	Klebung mit Mounting Pad (Verdrehsicherung)	
IEPE-U-02	Seitenschürze			
IEPE-U-03	Bugklappe			
IEPE-U-04				
IEPE-U-05	Unterfahrerschutz			
IEPE-U-06				
IEPE-U-07	Trastruktur			
IEPE-U-08	Kupplung			
IEPE-U-09-R	Fahrwerk	Kistler 8715B1K0S00T	+Kapselung im CTM-Gehäuse (verschraubt)	
IEPE-U-09-L				
IEPE-T-01-L	Fahrwerk	Kistler 8766A250AB	+Kapselung	
IEPE-T-01-R				
Dehnungssensoren				
DMS-U-01	Fahrwerk	TML FLAB10-120	Klebung + Kapselung	
DMS-U-02				
DMS-U-03	Tragstruktur			
DMS-T-01-L	Fahrwerk	TML FRAB10-120		
DMS-T-01-R				
DMS-T-02	Kurzkupplung			
DMS-T-03-R	Unterfahrerschutz			
DMS-T-03-L				
DMS-T-04-R				
DMS-T-04-L	Tragstruktur			
DMS-T-05				
DMS-T-06				
Drehgeber				
DG16-01	Radsatzlager 1		Knorr Bremse	Verschraubung an Radsatzlager
DG16-02	Radsatzlager 2		DEUTA DF16	
Drucksensoren				
DS-FIS-01	Sensorträger	Endevco 8510B	5-Lochsonde Verschraubung an Sensorträger	
DS-FIS-02				
DS-FIS-03				
DS-FIS-04				
DS-FIS-05				
DS-01	Außenhaut			
DS-02				
DS-03				
DS-04				
DS-05				
DS-06				
DS-07				
DS-08				
DS-09				
Kamera				
CAM-01	Sensorträger	C-GP4206M-100-4	Verschraubung an Sensorträger	
Temperatursensoren				
TMP-A-01	Kupplungsraum	RS PRO Typ K 131-4751	Kabelschellen an div. Komponenten	
TMP-I-01	Innenraum	RS PRO Typ K 762-118		

Abbildung 2.5: Finales Sensorsetup für die Funktionalitäten Aufprallerkennung und Instandhaltung. Die grün markierten Sensoren sind notwendig und der gelb markierte Sensor ist optional.

Die DMS Sensoren wurden nicht in das System integriert, da sie nur sehr große Ereignisse detektieren können und damit redundant zu den Beschleunigungssensoren sind. Zudem sind sie sehr fehleranfällig, aufgrund der filigranen Bauweise und somit für den regulären Betrieb weniger geeignet. Die Drucksensoren waren für dieses Projekt notwendig, um die Lasten bestimmen zu können, die auf einen Zug auftreffen. Diese Sensoren sind somit für die Forschungsergebnisse sehr relevant. Für einen Zug, der im regulären Betrieb fährt, würde man diese Sensoren jedoch nicht berücksichtigen.

3 KI-Verfahren des TP100

In **Abbildung 3.1** ist die Architektur der Sensorsystems zur Kollisionserkennung und Zustandsüberwachung der Fahrzeugfront abgebildet, welches im Rahmen des Projekts KI-MeZIS entwickelt wird. Die Systemarchitektur veranschaulicht das Zusammenwirken von Sensoren, KI, der Schadensbibliothek und der Generierung von Trainingsdaten und bietet damit einen Überblick über die grundlegende Funktionalität des Systems.

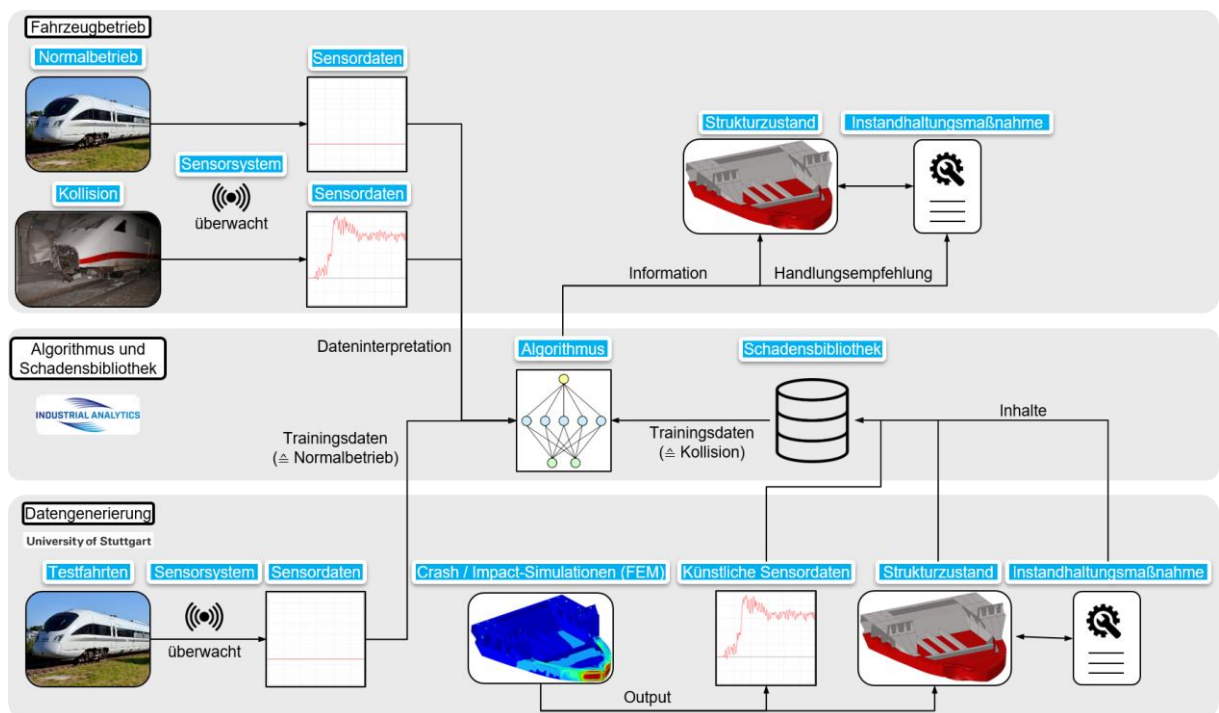


Abbildung 3.1: Architektur des sensorbasierten Systems zur Zustandsüberwachung

Neben den Simulationen lassen sich auch erfasste Kollisionen sowie Daten aus Laborversuchen oder Fahrzeugversuchen als Trainingsdaten nutzen. Dies ist vor allem während der Prototypischen Entwicklung relevant, welche im TP100 maßgeblich erfolgt ist. Als Grundlage für diese Entwicklung wurde durch die DB InfraGO AG die erfassten Daten analysiert, Annahmen zur Erkennbarkeit von Kollisionen in den Daten hergeleitet, ein Fusionskonzept sowie Empfehlungen für KI-Verfahren erarbeitet.

3.1 Datenvorverarbeitung

Die Datenvorverarbeitung wurde maßgeblich von der Industrial Analytics GmbH entwickelt. Die DB InfraGO AG hat den Prozess begleitet und im Rahmen von Diskussionsrunden und regelmäßigen Besprechungen dem Partner beratend zur Seite gestanden.

3.2 Sensordatenanalyse der Testfahrten

Ziel des TP 100 ist die Definition eines Sensorsystem zur Zustandsüberwachung des Zuges sowie die Entwicklung der zugehörigen KI-Software. Die KI-Software sollte dabei sowohl zur Erkennung betrieblich relevanter Kollisionen und Überfahrungen als auch zur Identifikation instandhaltungsrelevanter Schäden eingesetzt werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für viele Methoden des maschinellen Lernens sind annotierte Daten in hoher Qualität. Hierfür wurden in TP 500 betriebliche Daten in Realversuchen mit dem aTL (advanced TrainLab) und einem hierzu entwickelten Messsystem erfasst. Darüber hinaus wurden in TP400 Impact Daten in Überfahrversuchen, Laborversuchen und Simulationen erfasst.

Um bestimmte relevante Ereignisse in der Datenmenge wiederzuerkennen (z. B., Aufpralle mit Objekten, Zugbegegnungen, Tunnelfahrten etc.) wurden die Realfahrten durch Unterauftragnehmer der DB InfraGO AG, dem IFB, Institut für Bahntechnik GmbH, betreut. Dabei wurden relevante Ereignisse erfasst und protokolliert. Zusammen mit den Kameraaufzeichnungen und der Geschwindigkeitserfassung stellen diese Daten die Grundlage für eine Analyse der betrieblichen Daten zur Sicherstellung der notwendigen Voraussetzung zur Entwicklung und Anwendung von KI-Methoden in diesem und anderen TP bereit.

Darüber hinaus wurden die im TP400 durchgeführten Überfahrversuche, Laborversuche und Simulationen zusammen mit ihrer manuell erfassten Dokumentation betrachtet und hinsichtlich des Einflusses von Objektgewicht und Geschwindigkeit auf die Beschleunigungssignale ausgewertet.

Anschließend wurden auf Basis der Analyse sowohl die Erkennungsmöglichkeiten der verschiedenen Ereignisse ermittelt als auch die IA GmbH bei der Auswahl der im Teilprojekt verwendeten KI-Methoden beraten.

3.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse der betrieblichen Daten

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Analysen zeigen, dass das erfasste betriebliche Signal phasenweise stark von teils unbekanntem Faktoren beeinflusst wird. Diese Einflüsse wirken sich sowohl auf die Höhe von periodisch auftretenden Beschleunigungswerten sowie auf die Höhe und das Vorhandensein einzelner Peaks in den Daten aus.

Um eine Erkennbarkeit von Kollisionsereignissen im Rahmen des Projektes bestimmen zu können, wurden mehrere charakteristische Grenzwerte definiert und bestimmt. Das situative Rauschen deckt statistisch häufige Schwankungen für periodisch auftretende Beschleunigungswerte ab. Ein separater Grenzwert wurde für Peaks ermittelt. Auch ein Grundrauschen als minimales geschwindigkeitsabhängiges Rauschen unter besten Bedingungen wurde hergeleitet. Zusätzlich wurden zu bekannten Einflussgrößen, wie beispielsweise Regen, weitere Grenzwerte erfasst.

Aufgrund der Höhe der Grenzwerte wird die Frage nach einer Abgrenzbarkeit der Peaks und erhöhten Rauschwerte (z.B. regenbedingt) von Kollisionsereignissen aufgeworfen, welche im Rahmen zukünftiger Projekte untersucht werden sollten.

Die ermittelten Grenzwerte werden in den folgenden Abschnitten mit den Verläufen der Kollisionen und Überrollungen abgeglichen, um anschließend zu einer Erkennbarkeitshypothese zu gelangen.

3.2.2 Plausibilitätsprüfung gemessener Daten und Datengrundlage

Als erster Schritt zur Sicherstellung der Sensor-Datenqualität ist durch Unterauftragnehmer der DB InfraGO AG, dem IFB Institut für Bahntechnik GmbH, eine Daten-Plausibilitätsprüfung durchgeführt worden. Dabei wurde kontrolliert, ob die Daten in ihrer Gesamtausprägung die erwarteten Signalverläufe aufweisen. Unter anderem kann mit dieser Methode festgestellt werden, ob Sensoren ordnungsgemäß funktioniert haben und ob es Besonderheiten oder Auffälligkeiten gab. Für diese Untersuchung wurden die Fahrten durch das IFB betreut, die aufgezeichneten Signale visualisiert und die Zeitverläufe der Signale mit der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie den annotierten Ereignissen verglichen.

Bei den vom IFB in Unterbeauftragung durchgeführten Untersuchungen wurden die Daten von 5 während betrieblicher Bedingungen durchgeführten Testfahrten auf diese Weise analysiert. Bei den ersten Testfahrten konnten durch diese Untersuchung Fehler im Aufbau der Messtechnik identifiziert, eingegrenzt, sowie anschließend fast vollständig behoben werden. Diese betrafen eine Vielzahl an DMS sowie einige Beschleunigungssensoren. Nachdem während der Testfahrt in KW 10/2024 keine Unregelmäßigkeiten festgestellt wurden, traten in den anschließenden Testfahrten in KW 24 und KW 30 erneut welche auf. Hiervon waren insbesondere die Dehnmessstreifen betroffen. Hierdurch bestätigte sich der anfängliche Verdacht, dass die verwendeten DMS nicht für langfristige Anwendungen geeignet sind. Der Fokus, welcher ohnehin, aufgrund des Sensorkonzeptes für die Zustandserkennung, eher auf die Beschleunigungssensorik gelegt werden sollte, wurde damit bekräftigt. Darüber hinaus wurden in den grundsätzlich als plausibel eingestuften Datensätze viele Signalausprägungen und singuläre Ausreißer bemerkt, welche nicht auf annotierte Ereignisse zurückzuführen waren. Weiterhin wiesen die Daten Abweichungen in den Messwerthöhen auf, welche sich nicht aus den Geschwindigkeiten erklären ließen. In weiteren Analysen, welche in den nächsten Abschnitten beschrieben werden, konnten einige dieser Faktoren identifiziert werden.

Anhand der Ergebnisse der Daten-Plausibilitätsprüfung konnten die in der Kalenderwoche 10 aufgezeichneten Daten, als die mit der besten Datenqualität angesehen werden. Sie wurden daher für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

3.2.3 Erwartetes Signalverhalten

Unter betrieblichen Lasten soll im Rahmen von KI-MEZIS die im Betrieb auf das Fahrzeug wirkenden Lasten, welche ausschließlich über die Zeit im Kollektiv zu Schädigungen am Fahrzeug führen verstanden werden. In allgemeiner fahrzeugunabhängiger Weise sind diese in den Festigkeitsanforderungen an Schienenfahrzeuge beschrieben. Dabei werden neben allgemeinen betrieblichen Lasten, zyklische Belastungen erwähnt (vergl. (2) S8). Diese werden vom Fahrweg induziert oder sind aerodynamisch bedingt (vergl. (3))

Insbesondere bei den Beschleunigungssensoren, welche bereits gering wirkende Beschleunigungen auf das Fahrzeug erfassen, ist davon auszugehen, dass die im Betrieb auf das Fahrzeug wirkenden Lasten erfasst werden. Das im KI-MEZIS durch die DB InfraGO AG definierte erwartete Signalverhalten spiegelt die in den Normen beschriebenen Einflüsse wider. Es setzt sich aus einem bauteilspezifisch geschwindigkeitsabhängigen Grundrauschen sowie aus einem durch die aktuellen betrieblichen Gegebenheiten bedingten, zyklischen Belastungen resultierenden situativen Rauschen zusammen. Davon sollen ereignisbezogene Peaks unterschieden werden, welche während der Fahrt als Annotation mitge-

schrieben wurden. Auf diese Weise lässt sich eine differenzierte Erkenntnis zur Erkennbarkeit von Kollisionseignissen verschiedener Stärke ableiten.

In den Annotationen wurden alle sichtbaren aerodynamischen, fahrwegspezifischen sowie kollisionsbezogenen Ereignisse erfasst.

Annotiert wurden:

- Zugbegegnungen (unterschieden zwischen Personen- und Güterzug, Überholung und Entgegenkommen),
- Weichenfahrten,
- Tunnellein- und ausfahrt,
- Bahnhofsein- und ausfahrt,
- Kollisionen mit Objekten,
- Überfahung von Objekten,
- Einsatz des Typhons,
- Rangierfahrten,
- Starkregen
- andere ungewöhnliche Ereignisse

Die in der Plausibilitätsprüfung gefundenen Unregelmäßigkeiten legen den Verdacht nahe, dass neben den sichtbaren annotierten Einflüssen weitere Größen zu ereignisspezifischen Peaks an den mit Sensoren ausgestatteten Bauteilen, sowie Phasen mit erhöhtem situativem Rauschen führen. Ziel der folgenden Datenanalyse ist es zunächst das Grundrauschen sowie situative Rauschen in datenübergreifender Form zu bestimmen und von Ereignisspezifischen Peaks abzugrenzen. Anschließend sollen weitere Einflüsse derzeit unbekannter Faktoren näher untersucht werden.

3.2.4 Analyse des betrieblichen Grundrauschens

Gemäß des in diesem Projekt definierten erwarteten Signalverhalten weist jeder Sensor ein bauteilspezifisch geschwindigkeitsabhängiges Grundrauschen auf. Um die Höhe des Grundrauschens sowie die Dimension der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit je Beschleunigungs-Sensor bestimmen zu können, werden die Sensoren zunächst in zwei Gruppen eingeteilt:

1. Sensoren am Radsatz,
2. Sensoren an der Front.

Grundrauschen der Radsatz Sensorik:

Für die Sensoren am Radsatz wurden in einem Vorprojekt (siehe (4)) der DB InfraGO AG mit dem IFB in Unterbeauftragung bereits Untersuchungen am Güterwagen durchgeführt. Dabei wurden zur Abgrenzung von betrieblichen Beschleunigungswerten von Überfahrungen zwei lineare Grenzkurven bestimmt. Die untere (gestrichelte) Grenzkurve liegt über allen maximalen Beschleunigungen, berücksichtigt jedoch die höheren Werte der Doppelweiche und der Flachstelle nicht.

$$f(x) = 8 * (h * m / km * s^2) * x * (km/h) + 8 * (m/s^2)$$

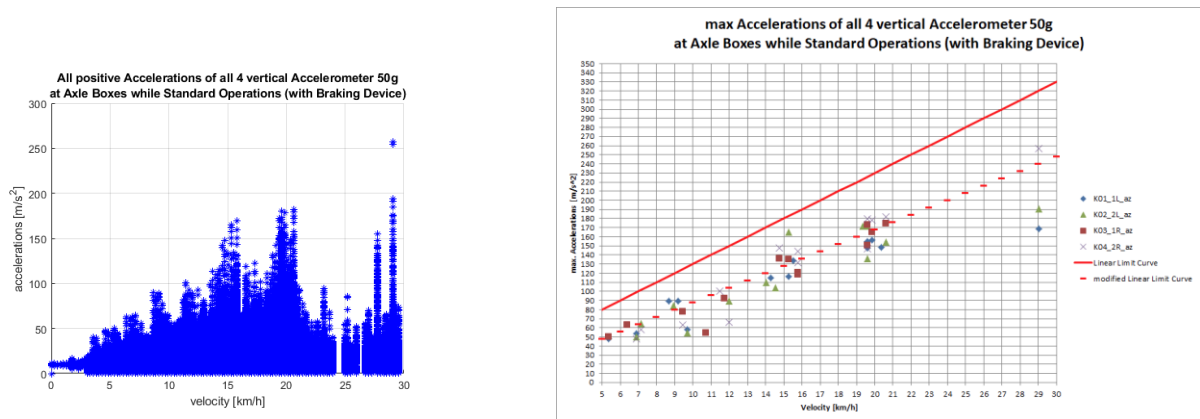


Abbildung 3.2: Links: Beschleunigungen über Geschwindigkeit am Radsatz des Güterwagens beim Vorprojekt, rechts: daraus abgeleitete maximale Beschleunigungen sowie zwei lineare Grenzkurven.

Für die Untersuchungen in KI-MEZIS wurden diese Grenzkurven zunächst als Referenz genutzt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass zwar auf dem Flachwagen der gleiche Sensortyp verwendet wurde, auf dem aTL jedoch ein Sensor mit höherem Messbereich und Frequenzgang zum Einsatz kam. Für eine bessere Handhabung der Daten der Testfahrten wurden jeweils Teilabschnitte von 15 Minuten betrachtet. Dabei zeigte sich eine große Bandbreite von unterschiedlichen Rauschmustern.

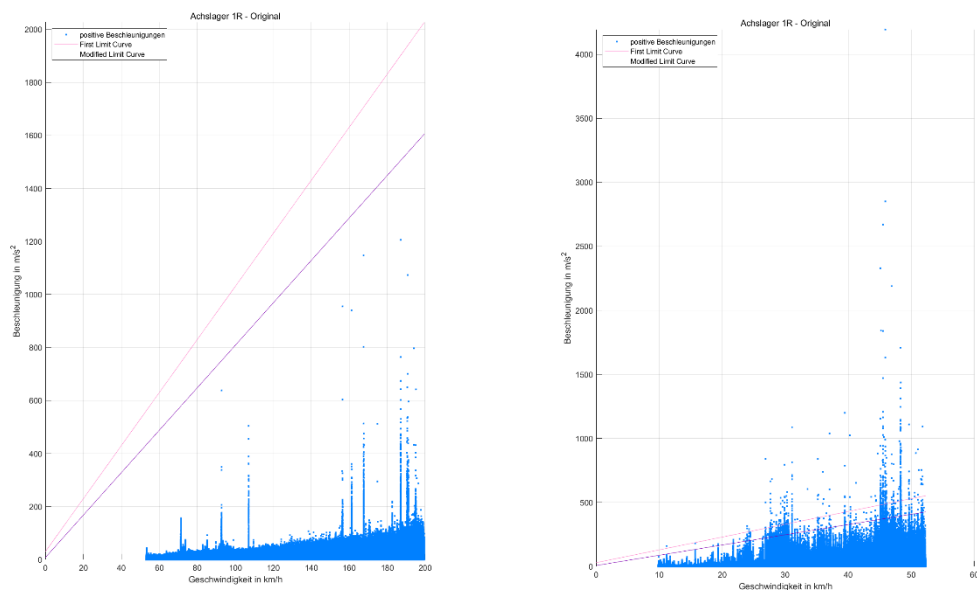


Abbildung 3.3: Beschleunigungen über Geschwindigkeit am Radsatz des aTL in der KW 10 (bitte unterschiedliche Skalierung beachten) Links: Strecke mit niedrigen Beschleunigungen (155645_002), rechts: Strecke mit hohen Beschleunigungen (091832_006)

Während sich in der linken Abbildung einzelne Beschleunigungswerte von einem ansonsten recht homogenen Grundrauschen abheben, ist das Beispiel in der rechten Grafik eher durch unregelmäßig auftretende, höhere Beschleunigungswerte geprägt. Auch wenn diese in der Höhe weiter klar von der Geschwindigkeit abhängen, so zeigt zumindest die abgebildete Stichprobe nur sehr schemenhaft die Dimension der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Eine Möglichkeit der Interpretation liegt darin, dass das Grundrauschen am aTL sehr viel niedriger ausfällt als das am Güterwagen ermittelte, also den in der linken Grafik angedeuteten linearen bis leicht quadratischen Verlauf innehat. Dann wäre das auf der rechten Seite gezeigte Beispiel von sehr umfangreichem situativen Rauschen geprägt, welche das Grundrauschen fast vollständig überdeckt. Dieses hohe situative Rauschen war bei den Flachwagenversuchen nicht aufgetreten. Durch eine Tiefpassfilterung der Signale konnte gezeigt werden, dass ein Großteil des Rauschens im hohen Frequenzbereich (>3500 Hz) liegt – ein Bereich, der aufgrund des begrenzten Frequenzgangs der in den Vorprojekten eingesetzten Sensoren (bis 1500 Hz) zuvor nicht erfasst worden war. Ursache der hochfrequenten Anregungen könnte beispielsweise Schienenrauheit sein. Mögliche Auswirkungen der Schienenqualität wurden daher untersucht und werden in einem separaten Abschnitt betrachtet. Aufgrund der starken Unterschiedlichkeit im Rauschen sind weitere Untersuchungen nötig, um eine Grenzkurve zum Grundrauschen am Radsatz zu erstellen.

Grundrauschen der Front Sensorik:

Um das sensorabhängige Grundrauschen der unterschiedlichen Sensoren an der Fahrzeugfront untersuchen zu können, wurden vom IFB Grenzkurven erstellt, die auf einer quadratischen Gleichung basieren.

$$f(x) = a + bv + cv^2$$

Um einzelne Peaks so weit wie möglich herauszufiltern, wurde zum Bestimmen der Grenzkurve ein Tiefpassfilter (CFC1000 Filter) auf die Daten angewendet (Grenzkurve 2, rot, die grüne Grenzkurve wird nicht verwendet).

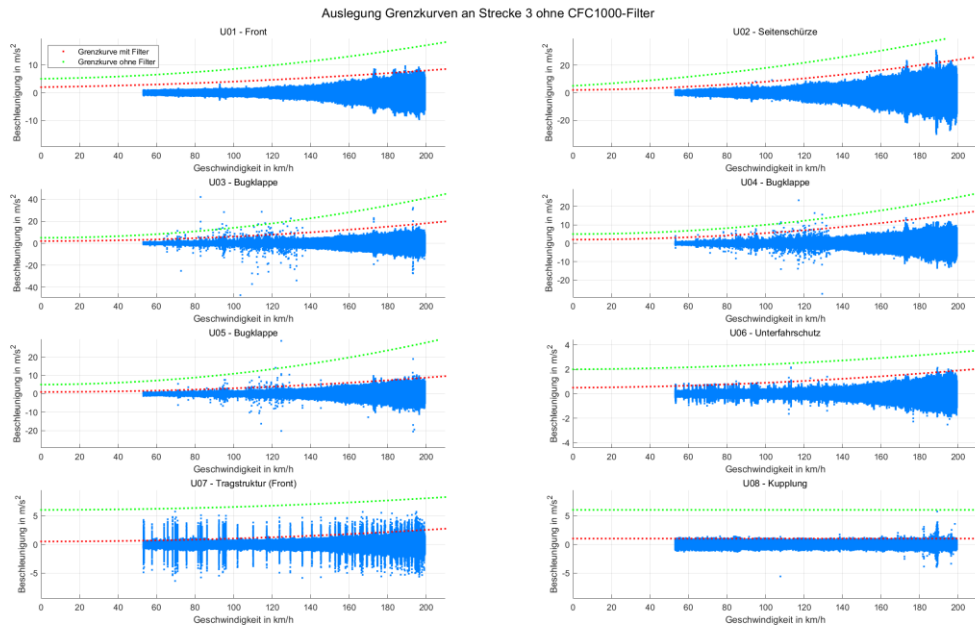


Abbildung 3.4: Grenzkurven des Grundrauschens für die Frontsensoren abgebildet auf ungefilterten Daten

Grenzkurve mit CFC1000 Filter								
Konstante	U01	U02	U03	U04	U05	U06	U07	U08
a	2	2	0	2	1	0,5	0,5	1
b	0,01	0,05	0,001	0,0001	0,001	0,001	0,0001	0
c	0,000099	0,0005	0,0004	0,00035	0,00019	0,00003	0,00005	0

Tabelle 1: Parameter der Grenzkurven des Grundrauschens der Frontsensorik entwickelt am gefilterten Datensatz

Hinweis: Um von einem möglichen Einfluss der Schienenqualität abstrahieren zu können, wurde das Grundrauschen für einen Streckenabschnitt ermittelt, bei dem, aufgrund der Ergebnisse am Radsatz, eine gute Gleisqualität anzunehmen war (Grenzkurve der Vorprojekte wurde in keinem Fall überschritten) und anschließend unter Berücksichtigung weitere Strecken überprüft.

3.2.5 Analyse des situativen Rauschens

In den bisherigen Abschnitten wurde bei der Plausibilitätsprüfung der Messdaten sowie bei der Ermittlung des Grundrauschens bereits ein teilweise ausgeprägtes situatives Rauschen festgestellt, welches stark sensorspezifische Charakteristika aufweist. Für die Ermittlung der Erkennbarkeit von Kollisionsereignissen ist die Überprüfung der Unterscheidbarkeit vom situativen Rauschen notwendig. Als situatives Rauschen sollen die Teile des Signals verstanden werden, welche über das Grundrauschen hinausgehen, jedoch in einer gewissen Regelmäßigkeit und Häufigkeit auftreten. Einzelne auftretende Peaks sind somit nicht Teil des situativen Rauschens und werden in einem weiteren Abschnitt behandelt.

Die Analysen des situativen Rauschens ergaben, dass dieses in der Höhe sehr unterschiedlich ausfällt. Neben einer Grenzwertbestimmung wird es daher als notwendig erachtet Einflussgrößen zu ermitteln und gesondert zu betrachten. Dies betrifft insbesondere den Regen. Weiterhin wurde der Einfluss der Schienenqualität näher untersucht. Dies erfolgt im Anschluss in separaten Abschnitten.

Um die Höhe des situativen Rauschens sowie die Dimension der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit je Beschleunigungs-Sensor bestimmen zu können, werden die Sensoren analog zum vorherigen Abschnitt in zwei Gruppen eingeteilt:

1. Sensoren am Radsatz,
2. Sensoren an der Front.

Situatives Rauschen der Sensorik am Radsatz:

Um von der Vielfaltigkeit des situativen Rauschens am Radsatz des aTL zu abstrahieren, wurde die Auftrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am rechten Sensor von zwei kompletten Messtagen (05.03.2024-06.03.2024) herangezogen.

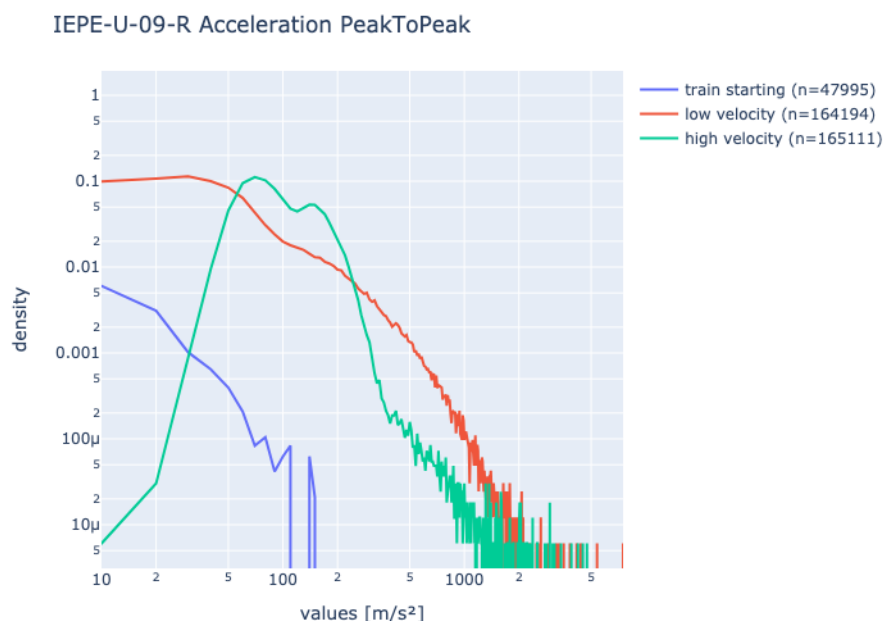


Abbildung 3.5: Höhe und Auftrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am Radsatz Rechts (IEPE-U-09-R) vom 5.3.2024 - 6.3.2024

Die Grenzwerte für das situative Rauschen wurden aus der Grafik in tabellarischer Form bestimmt. Auch wenn die Ursache der hohen Anzahl an Peaks derzeit noch ungeklärt ist, wurde der Grenzwert (new Limit Curve) am Verlauf der Kurve bestimmt. Bei den Ergebnissen der Erkennbarkeit werden die Peaks dann separat berücksichtigt.

Acc Peak to Peak	train starting (>0 -5km/h)	low velocity (5-80km/h)	high velocity: (>80 km/h)
Bogie Front IEPE-U-09-R	100 m/s ²	1800 m/s ²	1500 m/s ²

Tabelle 2: Parameter der Grenzkurven (new Limit Curve) des situativen Rauschens am Radsatz

Auffällig ist, dass der Grenzwert des Geschwindigkeitsbereichs, den des hohen Geschwindigkeitsbereichs übersteigt. Dies könnte auf den schlechteren Wartungszustand der Schienen mit geringeren Höchstgeschwindigkeiten zurückzuführen sein, welche in Ihrem Einfluss in einem separaten Abschnitt behandelt wird.

Situatives Rauschen der Front Sensorik:

Im Folgenden wird das situative Rauschen der Frontsensorik durch das IFB in seiner Höhe durch Grenzkurven erfasst. Außerdem wurden die Ergebnisse der IA GmbH auf einem umfangreichen Datensatz zum Vergleich herangezogen.

Bezüglich der meisten Sensoren ließ der Verlauf des situativen Rauschens durch das IFB als geschwindigkeitsabhängige Grenzkurve bestimmen. Auffällig sind die Ereignisse an der Bugklappe sowie der Seitenschürze, welche auch nach der Filterung noch einen inhomogenen Verlauf zeigen. Auch wenn die Häufigkeit des Auftretens dieser Inhomogenität nicht bekannt ist, sollen diese dennoch für das situative Rauschen berücksichtigt werden, da es sich offenbar nicht um einzelne Peaks handelt. Die Ausschläge an der Bugklappe sind durch den Einsatz des Filters stark reduziert worden. Da der Verdacht besteht, dass sie durch den Regen verursacht wurden, werden sie in einem folgenden Abschnitt noch näher untersucht.

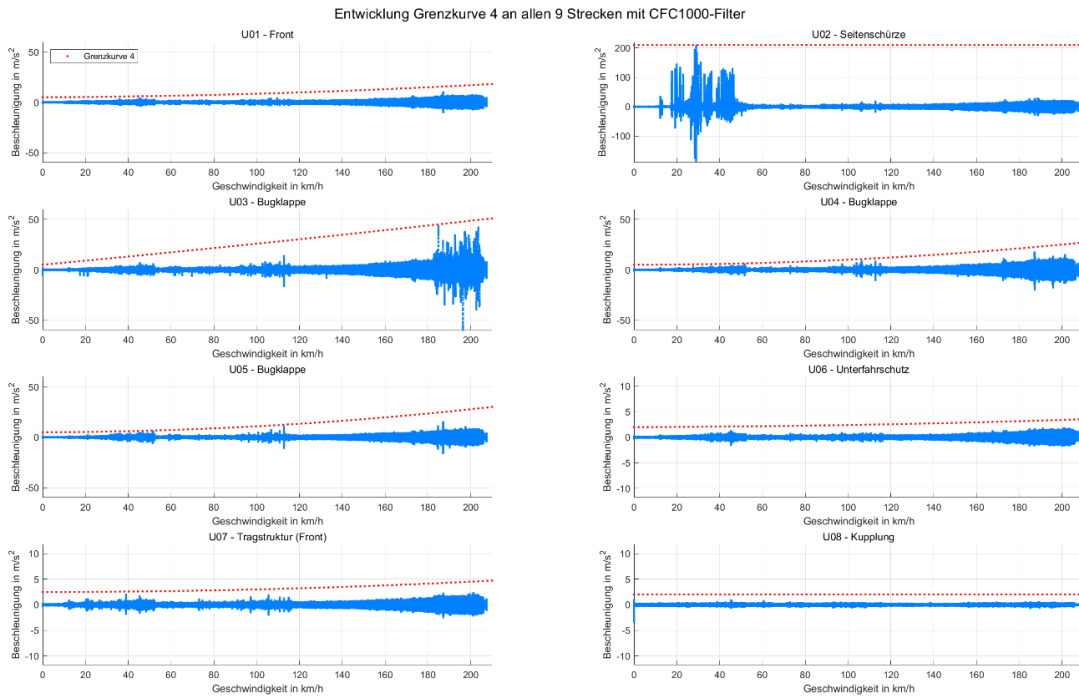


Abbildung 3.6: Grenzkurven des Verlaufs des situativen Rauschens für die Sensoren an der Front ermittelt auf gefilterten Daten

Grenzkurve ohne CFC1000 Filter								
Konstante	U01	U02	U03	U04	U05	U06	U07	U08
A	5	210	5	5	5	2	2,5	2
B	0,01	0	0,2	0,0001	0,004	0,001	0,0001	0
C	0,00025	0	0,00009	0,0005	0,00055	0,00003	0,00005	0

Tabelle 3: Parameter des Verlaufs der Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt am gefilterten Datensatz

Hinweis: Das situative Rauschen wurde anhand der Daten von 9 Streckenabschnitten (a 15 Minuten) ermittelt, bei welchen aufgrund der Ergebnisse am Radsatz eine gleichverteilte Gleisqualität anzunehmen war. Um einzelne Peaks so weit wie möglich herauszufiltern, wurde, analog zum Grundrauschen, ein Tiefpassfilter auf die Daten angewendet.

Die Grenzkurven wurden mit Untersuchungen von IA GmbH zur Geschwindigkeitsabhängigkeit von Peak-to-Peak Beschleunigungsdaten an zwei Messtagen (05.03.2024 -06.03.2024) verglichen.

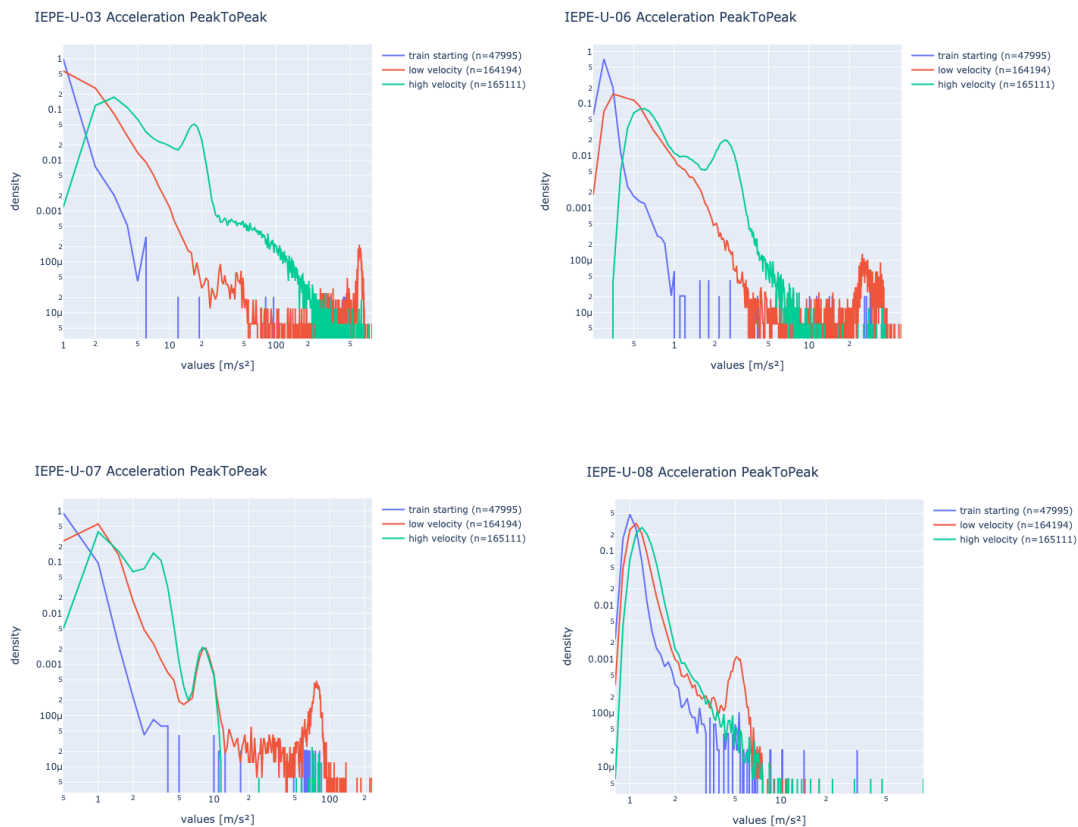
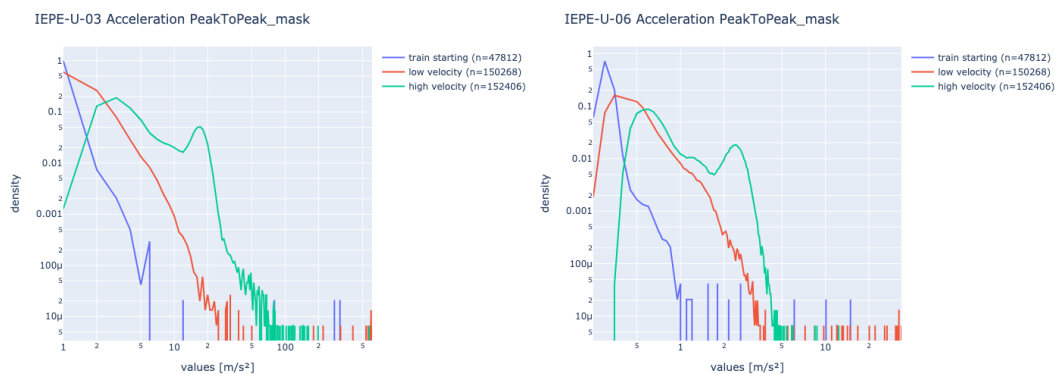


Abbildung 3.7: Häufigkeitsverteilungen von Beschleunigungswerten der Schnell- und Nebenstrecke für drei Geschwindigkeitsbereiche

In der Grafik mit der logarithmischen Skala zeigen sich sehr deutlich die Häufungen der geringeren Beschleunigungswerte (Peak-to-Peak) als drei geschwindigkeitsabhängige Hügel sowie im rechten Bereich sehr viel seltener auftretende Peaks. Dabei verwischen die Peaks in Ihrer Anzahl jedoch den nach rechts abfallendem Hügel, sodass sich die genaue Grenze nicht erkennen lässt.

Die folgenden Grafiken sind durch Entfernen der als Typhon gelabelten Signalbereiche sowie eines besonders verrauschten Abschnitts, welcher später auf einen Regeneinfluss hin noch untersucht wird, entstanden.



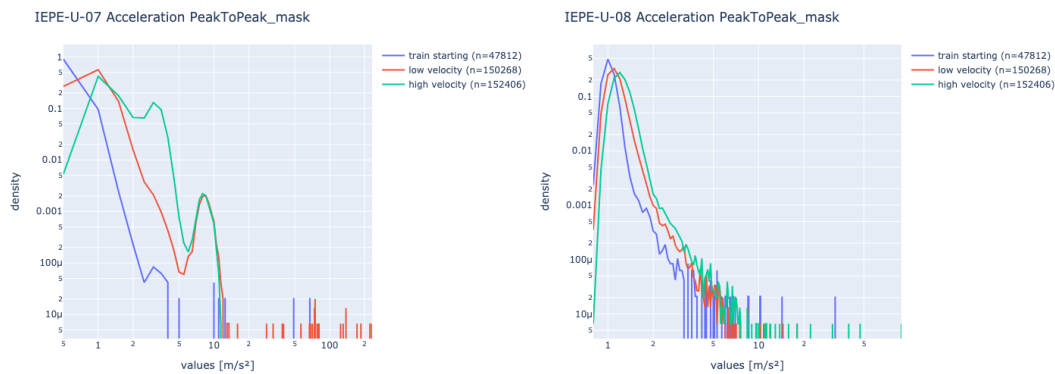


Abbildung 3.8: Häufigkeitsverteilungen von Beschleunigungswerten der Schnell- und Nebenstrecke für drei Geschwindigkeitsbereiche ohne Typhon und Hochschwingungsbereich

Die folgenden Grenzwerte wurden so gewählt, dass die Anzahl der Peaks, die darüber liegen, höchstens 10 beträgt. Anschließend wurden diese Grenzwerte anhand einer genaueren Betrachtung der Peaks nochmals korrigiert. Auf diese Weise sollte ausgeschlossen werden, dass nicht annotierte Einzelereignisse die Grenzwerte für das situative Rauschen verfälschen. Weiterhin wurden auf diese Weise Einzelereignisse generiert, welche für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Acc Peak to Peak	train starting (>0 -5km/h)	low velocity (5-80km/h)	high velocity: (>80 km/h)
Nose Flap IEPE-U-03	5 m/s ²	35 m/s ²	120 m/s ²
Pilot IEPE-U-06	1,2 m/s ²	5 m/s ²	6 m/s ²
Coupling IEPE-U-08	9 m/s ²	11 m/s ²	14 m/s ²

Tabelle 4: Parameter der linearen Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt an der Peak-to-Peak Verteilung von zwei Messtagen der KW10

Grundsätzlich zeigen sich vergleichbare Grenzwerte für das situative Rauschen wie auf dem kleineren gefilterten Datensatz. Dabei wurde berücksichtigt, dass der Grenzwert des größeren Datensatzes auf einem Peak-to-Peak Wert beruht, welcher die maximale Amplitude von Minus nach Plus berücksichtigt und der Grenzwert des kleineren Datensatzes lediglich Maximalwerte betrachtet.

Im Ergebnis weist das Signal wie erwartet ein situatives Rauschen auf, welches durch Grenzwerte gekennzeichnet werden kann. Einzelne Ereignisse führen jedoch zu Peaks und Phasen von erhöhten Werten, welche für eine Erkennung von Kollisionen nochmal separat abgegrenzt werden müssen.

Einige dieser möglichen Einflüsse konnten im Rahmen des Projektes bereits untersucht werden.

3.2.6 Analyse der Peaks im operativen Signal

Die bei der Betrachtung des situativen Rauschens nicht berücksichtigten Peaks wurden näher untersucht. Dabei bleibt die Ursache im Rahmen des Projektes weitestgehend unbekannt. Für eine Betrachtung der Erkennbarkeit werden die, in der KW10 herausgefilterten, Peaks berücksichtigt, auch wenn die auf dem gesamten Datensatz ermittelten Maximalwerte diese teilweise noch zu übersteigen scheinen. Hintergrund ist, dass es sich bei den Werten auch um Datenfehler handeln könnte, was erst eine näher Betrachtung zeigen würde.

Die Untersuchung der Peaks am Radsatz wird analog zum situativen Rauschen an Höhe und Auftrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am Radsatz Rechts (IEPE-U-09-R) vom 5.3.2024 - 6.3.2024 durchgeführt. Die im Abschnitt für das situative Rauschen dargestellte Grafik zeigt für geringe Geschwindigkeiten eine Häufung von Peaks bei 120m/s^2 , bei mittleren Geschwindigkeiten Peaks zwischen 1800m/s^2 und $\sim 8000\text{m/s}^2$ in abfallender Häufigkeit, sowie im Hochgeschwindigkeitsbereich zwischen 1500m/s^2 und 5000m/s^2 . Die Ursache der Peaks konnte im Rahmen des Projektes leider nicht eindeutig geklärt werden und wird bei der Betrachtung der Erkennbarkeit separat berücksichtigt.

Auch wenn einzelne Peaks tendenziell bei vielen Frontsensoren bei hohen Geschwindigkeiten auch höhere Werte aufweisen, lässt sich keine klare Geschwindigkeitsabhängigkeit erkennen. Aus diesem Grund wurde eine lineare Grenzkurve entwickelt, welche alle Peaks nach oben hin abgrenzt.

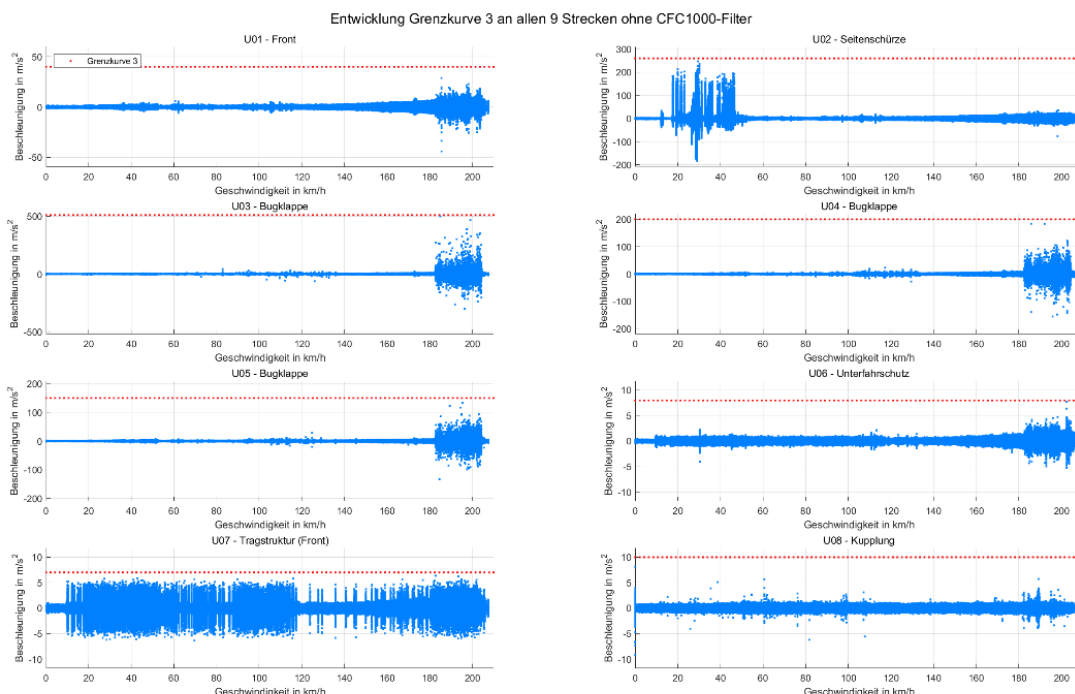


Abbildung 3.9: Grenzkurven für maximale Einzelereignisse (Peaks) für die Sensoren an der Front ermittelt an ungefilterten Daten

Grenzkurve ohne CFC1000 Filter								
Konstante	U01	U02	U03	U04	U05	U06	U07	U08
A	40	260	510	200	150	8	7	10
B	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5: Parameter der linearen Grenzkurven des situativen Rauschens entwickelt am ungefilterten Datensatz

Weiterhin wurde analog zum situativen Rauschen vergleichend ein umfangreicherer Datensatz herangezogen. Alle gelabelten Ereignisse wurden dabei ausgenommen.

Bei der Untersuchung zeigten sich zum einen besonders hohe Einzelereignisse, zumeist als schmale hohe Peaks. Diese ähneln teilweise den typischerweise bei einem Typhon auftretenden Signalformen. Ob es sich dabei aber tatsächlich um ein nicht gelabeltes Typhon gehandelt haben könnte, konnte im Rahmen des Projektes nicht überprüft werden. Ebenso gab es Peaks mit deutlich anderen Signalformen, bei denen die Ursache nicht weiter analysiert werden konnte.

Sinnvolle Analysen könnten vor allem die Betrachtung der Signalausprägung der anderen Sensoren zu diesem Zeitpunkt, die Analyse des Kamerabildes sowie das Hinzuziehen weiterer Daten, wie insbesondere Wetterdaten bzw. Daten über den Schienenzustand umfassen. Einige wenige Peaks zeigten sich als nur geringfügig über das situative Rauschen hinausgehend. Diese wurden bei der Ermittlung des situativen Rauschens bereits berücksichtigt (ursprüngliche Werte in Klammern).

		Train starting (>0 -5km/h)	low velocity (5-80km/h)	high verlocity: (>80 km/h)
Bug IEPE-U-03	Höhe korrigiertes Situatives Rauschen (m/s ²)	5 (5)	35 (20)	120 (100)
	Anzahl Peaks darüber	1	8	6
	Bemerkung	Einzelpeak > 300	Typhon ähnliches Signal > 300 Bremsen > 35	Zwei Einzelpeaks >200 andere < 120

			andere < 35	
Unterfahrerschutz IEPE-U-06	Höhe korrigiertes Situatives Rauschen (m/s ²)	1,2 (1)	5 (4)	6 (5)
	Anzahl Peaks darüber	5	7	8
	Bemerkung	Einzelpeaks bis 14 Andere < 1,2	typhon ähnliche Peaks ~25 Einzelpeak 12 Andere < 5	Einzelpeak 12 & 8 Andere < 6
Kupplung IEPE-U-08	Höhe korrigiertes Situatives Rauschen (m/s ²)	9 (7)	11 (8)	14 (10)
	Anzahl Peaks darüber	8	5	10
	Bemerkung	Einzelpeaks bis 33 andere < 9	Einzelpeaks bis 18 andere < 11	Einzelpeaks bis 90 & 40 andere < 14

Tabelle 6: Ergebnisse der Analyse von Einzelpeaks und der darauf basierend abgeleiteten korrigierten Grenzwerte für das situative Rauschen (m/s²)

Eine Bestimmung der maximalen Werte über dem gesamten Datensatz betrieblicher Testfahrten im angegebenen Zeitraum ergab, dass weitere sehr hohe Werte enthalten sind. Diese gehen zumeist signifikant über die der betrachteten Einflussfaktoren hinaus. Auch Datenfehler können nicht ausgeschlossen werden. Eine genaue Analyse oder Betrachtung wurde im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt. Für eine Nutzung des kompletten Datensatzes müsste die Ursache dieser Peaks geklärt und ggf. behoben werden.

2024-03-12T09:00:00 -- 2024-06-30T00:00:00

IEPE-U-01	618.66
IEPE-U-02	4905.0

IEPE-U-03	2920.2
IEPE-U-04	1263.2
IEPE-U-05	2005.3
IEPE-U-06	55.62
IEPE-U-07	233.27
IEPE-U-08	110.16
IEPE-U-09-L	4576.7
IEPE-U-09-R	9592.0
IEPE-T-01-L.X	184.85
IEPE-T-01-L.Y	274.93
IEPE-T-01-L.Z	277.15
IEPE-T-01-R.X	109.6
IEPE-T-01-R.Y	210.77
IEPE-T-01-R.Z	275.14

Tabelle 7: Ergebnisse der Bestimmung der Maximalwerte [m/s²] über den gesamten Datensatz

3.2.7 Einfluss der Schienenqualität auf das situative Rauschen

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Untersuchungen zum Einfluss der Schienenqualität auf das situative Rauschen am Radsatz sowie der Frontsensorik durchgeführt. Leider konnten für diese Untersuchungen keine unmittelbaren Daten von Schienenqualitäten herangezogen werden, sodass sich mit Annahmen zum Streckenzustand, abgeleitet aus der Streckenkategorie bzw. zulässigen Höchstgeschwindigkeit, beholfen werden musste. Während Analysen auf einem größeren Datensatz die Annahme eines Einflusses zunächst stützten, ließ sich dieser durch detailliertere Betrachtungen nicht weiter bestätigen. Bei der Frontsensorik sind die Grenzkurven des situativen Rauschens so bemessen, dass sie die im Rahmen des Projektes befahrenen Schienenqualitäten abdecken. Für eine Bewertung der Erkennbarkeit an der Radsatzsensorik wird ebenfalls der Grenzwert für das situative Rauschen herangezogen, auch wenn dieser ohne nähere Kenntnis der Ursache durch eine sehr hohe Anzahl an Peaks verletzt wird.

Einfluss der Schienenqualität auf die Sensoren am Radsatz

Aus den Vorprojekten mit einem Flachwagen war bekannt, dass Weichen, insbesondere die Doppelweiche sowie Schienenoberflächenfehler (Schleuderstelle), als Signal auf am Radsatz montierter Beschleunigungs-Sensorik sichtbar werden. In Ki-MEZIS wurden sowohl mit dem aTL als auch mit dem Güterwagen Überfahrversuche durchgeführt, wobei mit beiden Fahrzeugen die gleiche Strecke befahren wurde (siehe TP400). Die Auswertung des Flachwagens zeigte neben den erwarteten Peaks an der Überfahrstelle auch einige weitere Peaks. Durch Überlagerung der Signale von allen Versuchsfahrten konnte unter Ausgleich der Geschwindigkeiten sichtbar gemacht werden, dass diese Peaks auf ortsfeste Ursachen zurückzuführen sein mussten. Das Vorhandensein von Schienenoberflächenfehlern ist höchstwahrscheinlich, wurde am Gleis jedoch nicht überprüft.

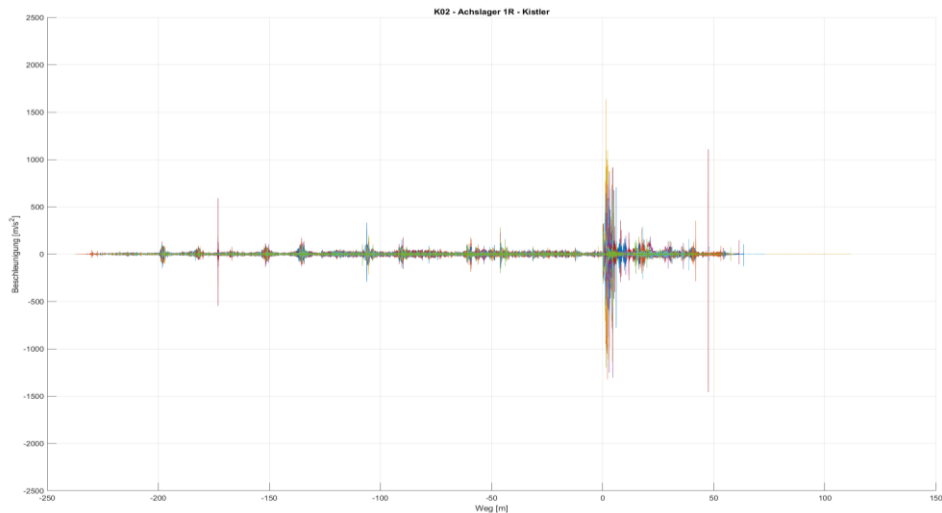


Abbildung 3.10: Ortsfeste Peaks in Beschleunigungssignalen der Flachwagenversuche aller Messfahrten (Peaks der Hindernisse bei 0)

Darüber hinaus fiel auf, dass das (situative) Rauschen beim linken Gleis bei allen Fahrten sowohl mit dem Güterwagen als auch mit dem aTL sehr viel ausgeprägter war als beim rechten. Auch dies deutet eine Abhängigkeit von dem Gleiszustand an. Der Unterschied fiel jedoch bei dem 50g Sensor mit geringerem Frequenzgang wesentlich geringer aus.

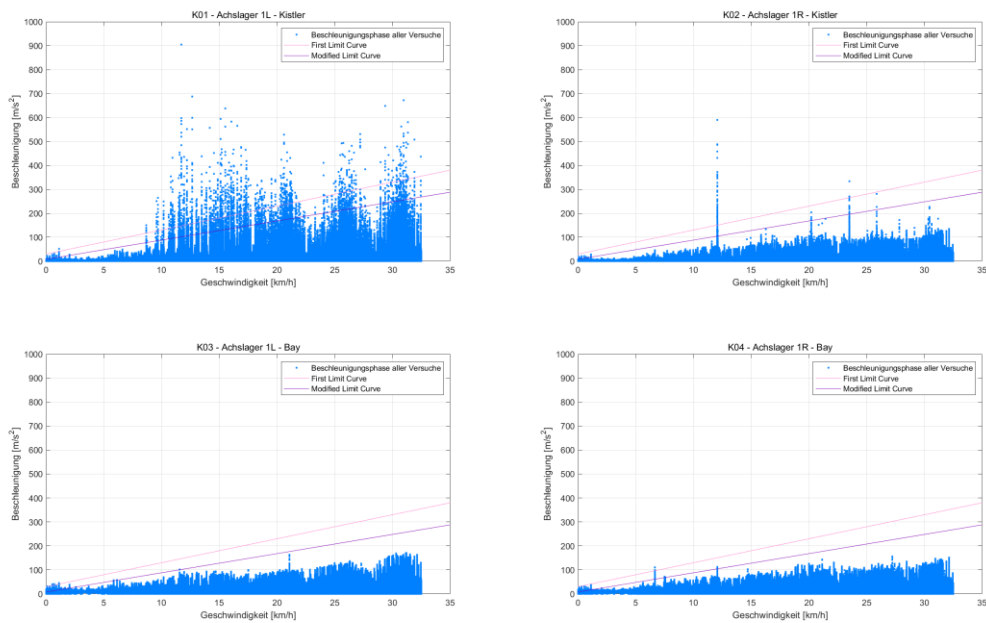


Abbildung 3.11: Unterschiedliches situatives Rauschen je Gleisseite der Flachwagenversuche

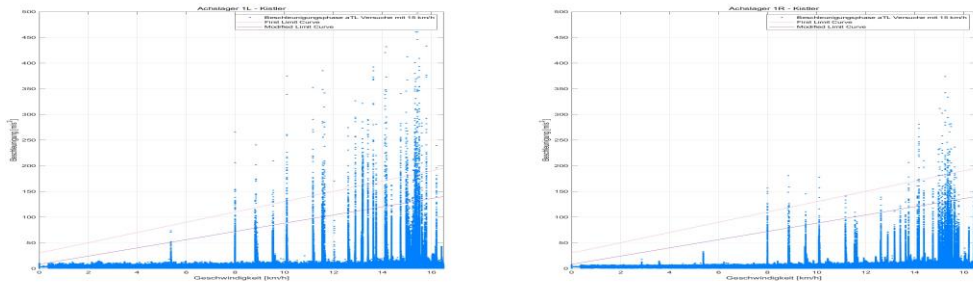


Abbildung 3.12: Unterschiedliches situatives Rauschen je Gleisseite der aTL-Versuche

Gemäß den Grundlagen der Oberbauinspektion (RIL 821.1000) ist der Regelinspektionsabstand von der Höchstgeschwindigkeit der jeweiligen Strecke abhängig. Nach einer Inspektion gelten Instandsetzungsfristen je nach Fehlerschwere und zulässiger Höchstgeschwindigkeit von 6 bis 12 Monaten (siehe Richtlinie 821.2007 Anhang 02 Schienenfehlerkatalog). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Strecken mit hohen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (bis 250km/h) durchschnittlich in geringerem Maße Schienenoberflächenfehler aufweisen als Strecken mit geringeren zulässigen Höchstgeschwindigkeiten.

Da am ersten Tag der Testfahrt der KW10 zum großen Teil Strecken mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten bis 250km/h befahren wurden, wurden zunächst die Beschleunigungswerte des ersten Tages mit denen am zweiten Tag in Ihrer Höhe und Aufttrittshäufigkeit verglichen.

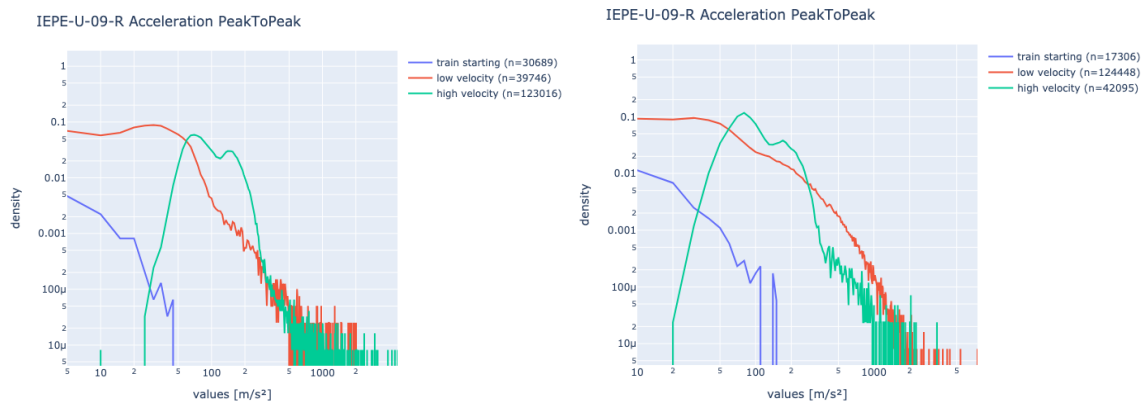


Abbildung 3.13: Höhe und Aufttrittshäufigkeit der Beschleunigungswerte am Radsatz Rechts (IEPE-U-09-R) links vom 5.3.2024, rechts vom 6.3.2024

Im Vergleich der beiden Grafiken zeigen sich am zweiten Tag am Radsatz für alle Geschwindigkeitsbereich ein höheres Maß an hohen Beschleunigungswerten. Dies könnte die Vermutung einer Abhängigkeit von Schienenfehlern am Radsatz bestätigen.

Im Details zeigen die Bereiche „train starting“ (blaue Kurve) sowie „low velocity“ (rote Kurve) am 6.3.2024 tatsächlich sowohl höhere maximale Beschleunigungswerte („train starting“ > 150m/s², „low velocity“ > 2000m/s²), als auch eine erhöhte Häufigkeit von höheren Werten. Bezüglich des Bereichs „high velocity“ fällt zunächst unabhängig vom Vergleich zwischen den beiden Messtagen auf, dass die Kurve viel stärker ansteigt und schneller abfällt. Auch wenn hier die maximalen Beschleunigungen am 5.3.2024 sogar höher ausfallen als am 6.3.2024, so zeigt sich der Abfall des 6.3.2024 bergiger als der am 5.3.2024, Beschleuni-

gungswerte im Bereich 400m/s² - 1000m/s² treten also ebenfalls deutlich häufiger auf. Die abweichende Ausprägung der maximalen Beschleunigungswerte kann (unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Beschleunigungshöhen) vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass die maximal gefahrene Geschwindigkeit am 6.3.2024 aufgrund der Geschwindigkeitsbeschränkungen der Strecken unter der vom 5.2.2023 liegt. Maximalwerte für Geschwindigkeiten >200km/h konnten so am 6.3.2024 gar nicht erfasst werden.

Um den Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeit einer Strecke auf die Beschleunigungssignale am Radsatz des aTL detaillierter bestimmen zu können, wurden die Beschleunigungswerte auf die befahrenen Streckenkategorien gemäß (4) bezogen. Dabei wurde für jeden Streckenabschnitt die Streckenkategorie bestimmt und die dazugehörigen Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme der Sensoren am Radsatzlager links und rechts bezüglich des Rohsignals sowie der gefilterten Datensätze ausgewertet. Als Bewertungskriterium diente das Überschreiten der Grenzkurven der Vorprojekte. Die Ergebnisse wurden in tabellarischer Form zusammengefasst.

Strecke	Kategorie	Kriterium verletzt (Original + Filterung)				
		Original	750 Hz	1.500 Hz	3.000 Hz	6.000 Hz
1732	P3/F1	Ja	Ja	ja	ja	Ja
1733	P1/F1	Ja	Ja	ja	ja	Ja
1750	P3/F1	Ja	Ja	ja	ja	Ja
1754	P5/F3	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
1775	P5/F2	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
3600	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
5919	P1-P3/F1	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
6068	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6105	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6107	P2/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6185	P1/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6340	P2-P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabelle 8: Übersicht Verletzung der Grenzkurven für Messfahrten am 05.03.2024

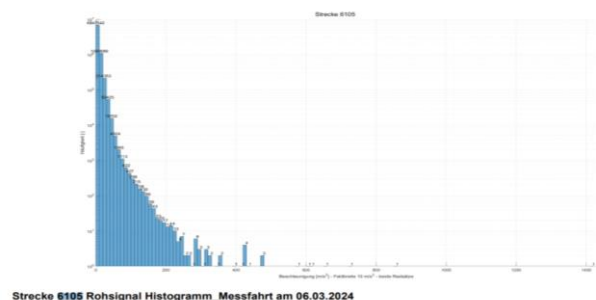
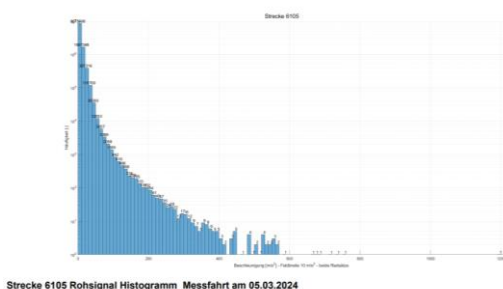
Strecke	Kategorie	Kriterium verletzt (Original + Filterung)				
		Original	750 Hz	1.500 Hz	3.000 Hz	6.000 Hz
6042	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6062	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6068	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6081	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein

6082	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6087	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6088	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6091	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6100	P2/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6101	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6105	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6110	P3/F1	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6118	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6170	P3/F1	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6751	P6/F4	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
6938	F4	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6946	F4	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabelle 9: Übersicht Verletzung der Grenzkurven für Messfahrten am 06.03.2024

Wie aus den Tabellen ersichtlich wird, lässt sich eine direkte Abhängigkeit zwischen Streckenkategorie und Grenzverletzung nicht ableiten.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ergab sich durch den Fakt, dass zwei Streckenabschnitte mehrfach befahren wurden, jedoch an unterschiedlichen Tagen. Dies betrifft die Streckennummer 6105 und 6170. Beide Strecken weisen an den jeweilig unterschiedlichen Tagen die gleichen Grenzwertüberschreitungen auf. Dennoch wird in den Histogrammen der Beschleunigungswerte deutlich, dass diese voneinander abweichen. Insbesondere das Auftreten von einzelnen hohen Beschleunigungswerten ist dabei sehr unterschiedlich. Dies deutet auch hier darauf hin, dass es streckenunabhängige Einflussgrößen gibt, welche berücksichtigt werden müssen.



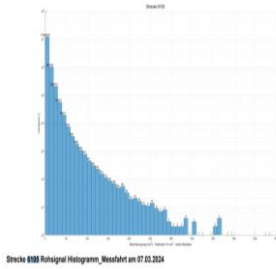


Abbildung 3.14: Vergleich der Beschleunigungshistogramme einer Strecke an drei Messtagen

Um abschließende Erkenntnisse über die Abhängigkeit der Höhe des situativen Rauschens der Radsatzsensorik vom Wartungszustand der Schiene gewinnen zu können, müssten daher weitere Untersuchungen angestellt werden. Auf den bestehenden Daten könnten die Verläufe der mehrfach befahrenen Strecken näher betrachtet werden. Darüber hinaus wäre es hilfreich, Daten zu Schienenfehlern oder zum Wartungszustand der Strecke mit aufgezeichneten Signalen zu vergleichen. Sollte sich eine Abhängigkeit von der Schienenqualität bestätigen und einer erforderlichen Erkennung von Kollisionsereignissen im Wege stehen, könnten Anforderungen an die Schienenqualität für Fahrzeuge mit Kollisionserkennung abgeleitet werden.

Einfluss der Schienenqualität für Sensoren an der Front

Auch für die Sensoren an der Front wurde die Frage nach der Abhängigkeit des situativen Rauschens vom Wartungszustand der Strecke untersucht.

Dabei zeigte sich analog zur Radsatzsensorik, beispielsweise für die Sensorik am Piloten, dass das situative Rauschen der am 5.3.2024 im Vergleich zum kompletten Datensatz (5.3.2024 – 6.3.2024) wesentlich geringer ausfällt.

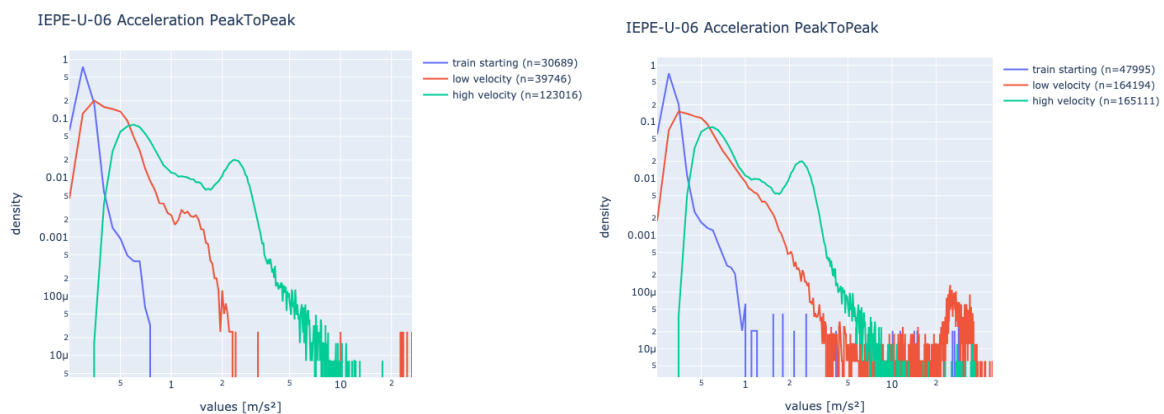


Abbildung 3.15: Häufigkeitsverteilung von Beschleunigungswerten am 5.3.2024 (links) im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung des 5.3.2024 – 6.3.2024 (rechts).

Anhand von Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagrammen und den Grenzkurven des operationalen Grundrauschens sowie des situativen Rauschens, soll dieser Zusammenhang

näher überprüft werden. Hierzu wurden jeweils drei Strecken mit niedrigen Beschleunigungswerten am Radsatz (Grenzkurve aus Vorprojekt wurde eingehalten), drei mit mittleren Beschleunigungswerten am Radsatz (Grenzkurve wurde aus Vorprojekt manchmal überschritten) sowie drei mit hohen Beschleunigungswerten am Radsatz (Grenzkurve aus Vorprojekt wurden häufig überschritten) ausgewählt.

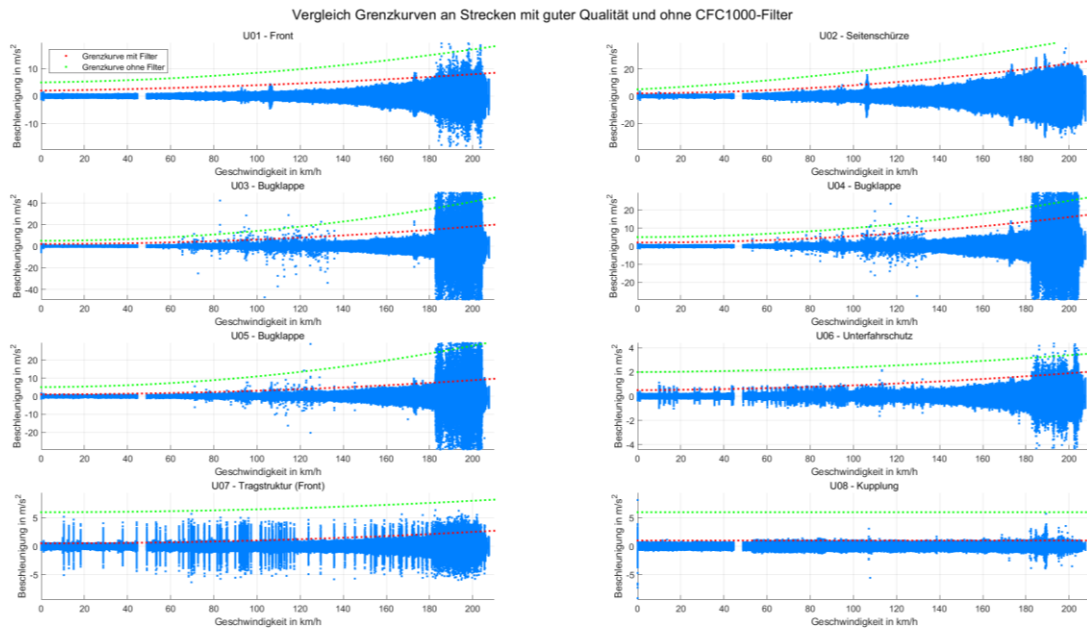


Abbildung 3.16: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit niedrigen Beschleunigungswerten am Radsatz.

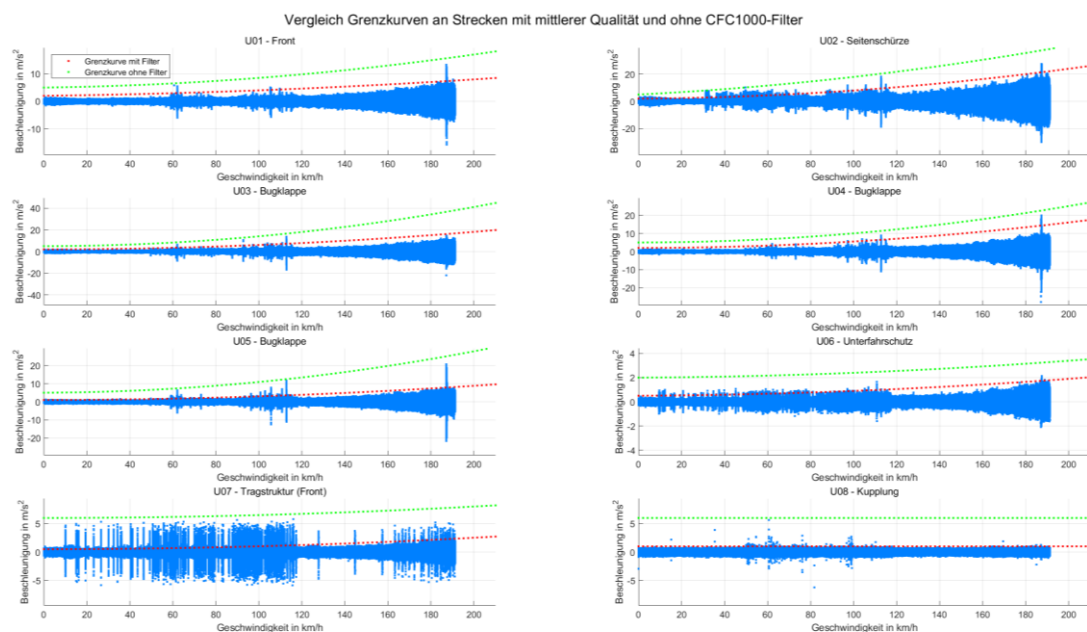


Abbildung 3.17: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit mittleren Beschleunigungswerten am Radsatz

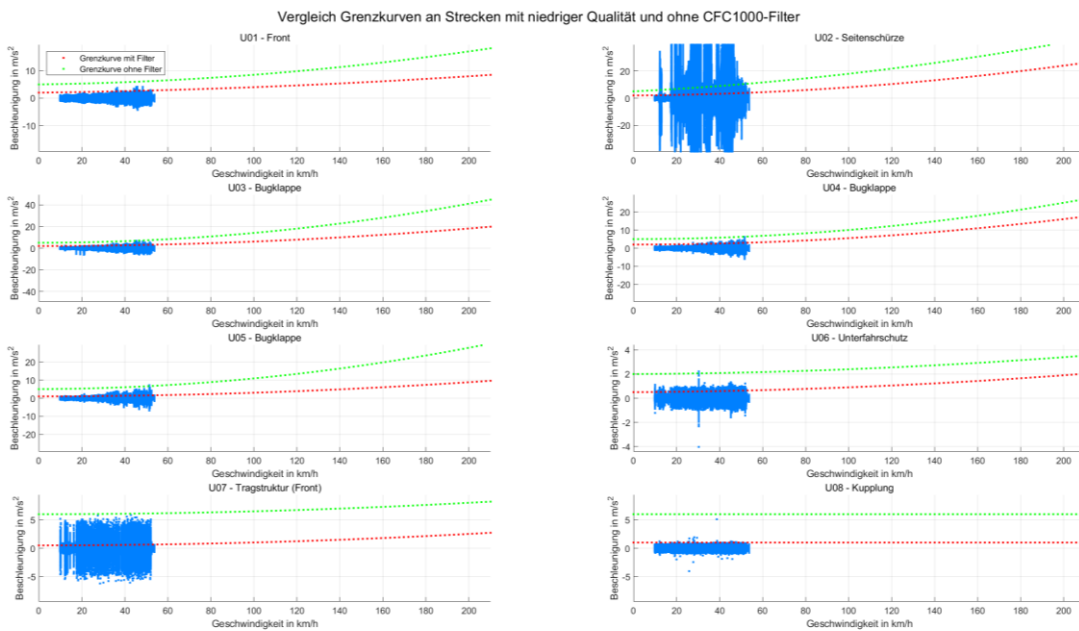


Abbildung 3.18: Vergleich Grenzkurven an Strecken mit hohen Beschleunigungswerten am Radsatz

Vernachlässigt man das Ereignis mit den starken Ausschlägen der Strecke 2 (niedrige Beschleunigungswerte am Radsatz) bei den hohen Geschwindigkeiten, so werden die Grenzkurven dieser Strecken tatsächlich am besten und die Strecken mit hohen Beschleunigungswerten am wenigsten gut eingehalten. Dies legt nahe, dass an der Frontsensorik (von dem Ereignis der Strecke 2 abgesehen) ähnliche Einflussgrößen wirken, wie am Radsatz. Leider wurden bei dieser Auswertung die Streckenkategorien nicht explizit mit ausgewertet. Die Geschwindigkeitsbereiche der ausgewählten Strecken lassen allerdings den Schluss zu, dass es sich bei den Strecken mit hohen Beschleunigungen am Radsatz tendenziell eher um Strecken mit geringeren Höchstgeschwindigkeiten handelte. Während es sich bei denen mit niedrigen Beschleunigungswerten eher Strecken mit höheren Höchstgeschwindigkeiten gehandelt haben muss. Ob der Zusammenhang auch bei den Streckenkategorien besteht, welche untypisch hohe Beschleunigungswerte aufweisen, wurde nicht untersucht.

3.2.8 Einflusses von Regen auf das situative Rauschen

Der Einfluss von Regen wurde an ausgewählten Ereignissen analysiert. Während der betrieblichen Testfahrten wurden stärkere Regenereignisse mit Ihrem Beginn und ihrem Ende annotiert. Die untersuchten Ereignisse (teilweise nicht annotiert) bestätigen einen Einfluss von Regen verschiedener Stärke bei hohen Geschwindigkeiten. Das dabei entstehende situative Rauschen ist deutlich stärker als das in den übrigen betrieblichen Situationen. Es soll daher das durch Regen verursachte Rauschen von den ermittelten Grenzkurven des situativen Rauschens unterschieden und separat betrachtet werden.

Eine umfassende Analyse der annotierten Regenereignisse und ein vollständiger Abgleich mit Wetterdaten konnte im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden. Auch fehlen Vergleichsdaten der im Regen befahrenen Streckenabschnitte unter anderen Wetterbedingungen. Eine systematische Analyse der Geschwindigkeitsabhängigkeit sowie des Einflusses

mit erhöhten Werten, bei welchen die Maximalwerte deutlich oberhalb der bestimmten Grenzwerte des situativen Rauschens liegen.

Sensor	ungefiltert		gefiltert	
	Min [m/s ²]	Max [m/s ²]	Min [m/s ²]	Max [m/s ²]
U01 Front	-83,33	89,21	-8	7
U02 Seitenschürze	-591,71	382,12	-58,11	224,74
U03 Bug	-1364,48	1617,94	-51,64	48,65
U04 Bug	-300,93	413,50	-23,07	21,29
U05 Bug	-284,75	541,40	16,69	15,04
U06 Unterfahrschutz	-38,03	38,58	-38,03	38,58
U07 Tragstruktur	-9,82	9,00	-1,17	1,29
U08 Kupplung	-3,36	3,43	-0,36	0,30

Tabelle 11: Maximale Beschleunigungswerte im Zeitabschnitt der Tunnel-Regen-Fahrt

Weiterhin zeigt eine Detailansicht der 135m langen Tunneldurchfahrt durch den Elbe-Seitenkanal, dass die Werte an der Stelle des Tunnels sprunghaft sinken und anschließend wieder sprunghaft steigen. Im Abgleich mit rückblickenden Wetterdaten aus dem Internet konnte ermittelt werden, dass der Niederschlag in Wieren (zwischen Regenanzfangszeitpunkt und Tunnel gelegen) sowie Uelzen (Ende der 15 Minuten Aufzeichnung) eine Wassersäule von 9,6mm/h aufwies (Starkregen beginnt ab 15mm/h). Ein Abnehmen des Regens in der Zwischenzeit wurde nicht dokumentiert und konnte aus den Wetterdaten weder bestätigt noch widerlegt werden. Die Durchfahrt des Tunnels zeigt, dass die Witterungsbedingungen einen Einfluss auf die Höhe der Beschleunigungswerte haben. Eine Gegenprüfung anderer Tunnelfahrten (beispielsweise am 5.3.2024 13:24) ergaben, dass diese in den Beschleunigungswerten nicht sichtbar waren. Die Ausprägung dieses Regenereignisses in den Beschleunigungswerten zeigt, dass eine hohe Regenstärke bei hohen Geschwindigkeiten zu erhöhten Beschleunigungswerten, über das situative Rauschen hinaus, führt.

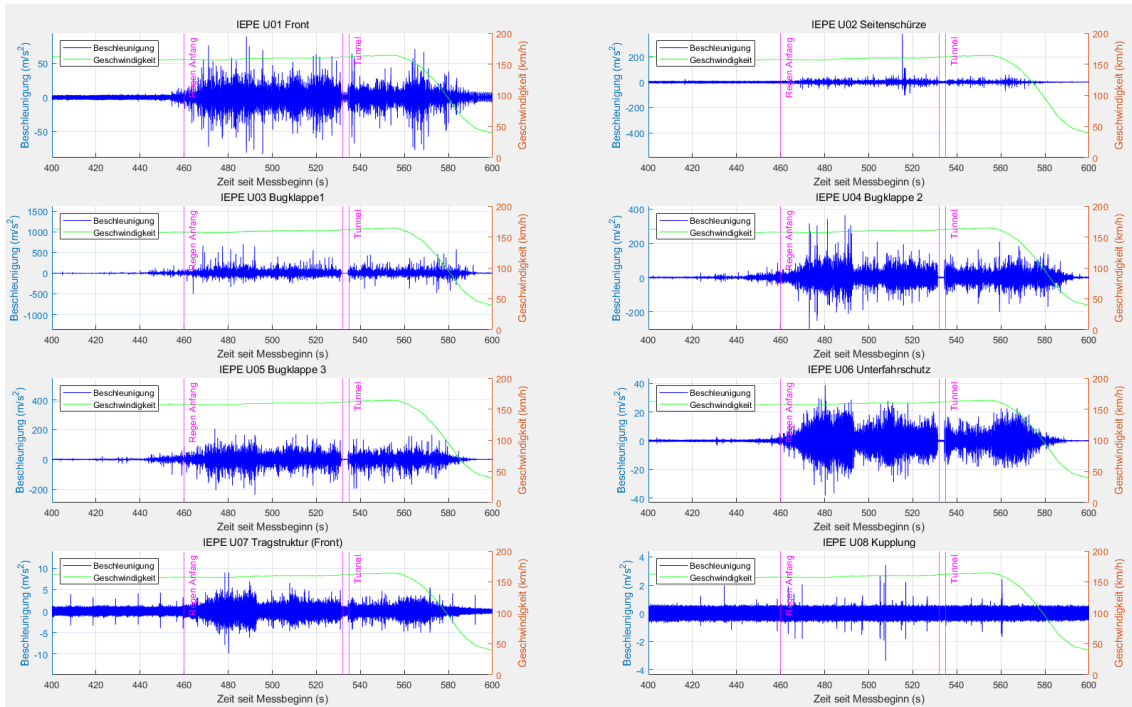


Abbildung 3.20: Beschleunigungsverläufe Sensoren U01-U08 ungefiltert, Zoom der Tunnelfahrt

Auch über den gesamten Tag betrachtet, zeigt sich das Regenereignis als breitere deutliche Erhöhung. Darüber hinaus existiert ein weiteres signifikantes Ereignis, welches eine ähnliche Ausprägung hat. Hierzu existieren zwei passende Regenereignisse als Annotation, welche im groben Abgleich zu der Ausprägung passen. Dies bestätigt den Einfluss.

15:48:30	Regen Anfang
16:02:00	Regen Ende
16:08:00	Regen Anfang
16:13:00	Regen wurde stärker
16:17:00	Regen leichter
16:24:00	Regen Ende

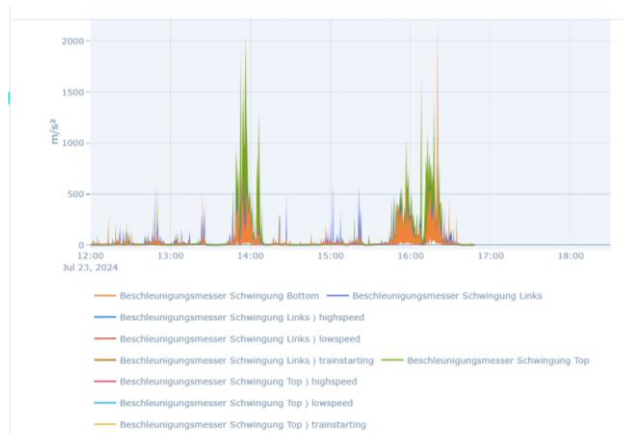


Abbildung 3.21: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) Sensoren an der Bugklappe am 23.07.2024

Als weitere Regenereignisse wurde am 9.12.2023 von 13:41-14:07 sowie 16:39-16:43 annotiert. Bei diesen beiden Ereignissen wird die hohe Geschwindigkeitsabhängigkeit des Regeneinflusses deutlich. Während bei dem ersten Regenereignis die Beschleunigungswerte mit zunehmender Geschwindigkeit wiederum über die Grenzwerte des situativen Rauschens hinaus gehen, zeigt sich das zweite Regenereignis mit der geringen Geschwindigkeit von maximal 15 km/h in den Daten nicht.



Abbildung 3.22: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) von Regenereignissen auf Front Sensoren 09.12.2023 mit passenden Geschwindigkeitsverläufen

In der KW10 am 5.2.2024 fiel während der Analysen der Zeitraum von 14:12:48 - 14:33:35 durch besonders hohe Werte bis 700m/s² auf, welche sich innerhalb einer Höchstgeschwindigkeitsphase zeigten und somit das situative Rauschen deutlich übersteigen.

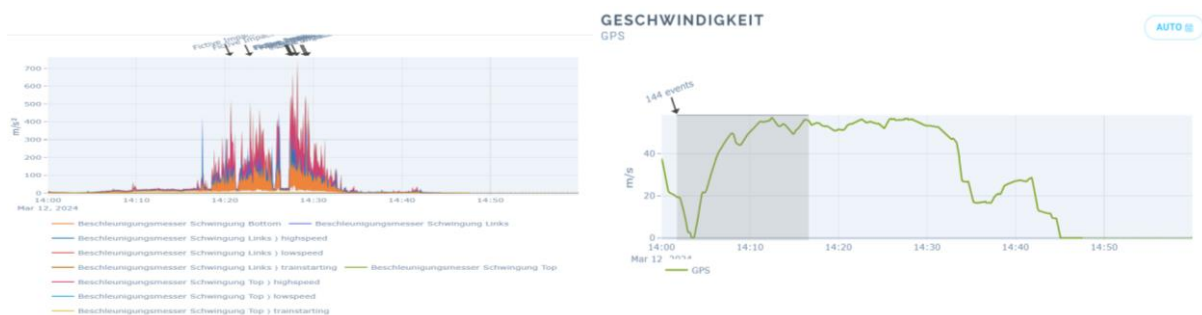


Abbildung 3.23: Beschleunigungsverläufe (Spitze-Spitze) signifikanter Zeitraum auf Front Sensoren 09.12.2023 mit passendem Geschwindigkeitsverlauf

Auch wenn keine Annotation auf ein Regenereignis hindeutete, zeigte der Abgleich mit Wetterdaten, dass es in diesem Zeitraum leicht geregnet hatte (maximale Wassersäule 1,8mm). Im weiteren Verlauf des Tages beschleunigte der Testzug erneut auf Höchstgeschwindigkeit. Diesmal zeigen sich die Werte mit 80m/s² allerdings im Bereich des situativen Rauschens. Auch dieses Ereignis bestätigt einen Einfluss von Regen, auch bei leichtem Regen, im Falle von hohen Geschwindigkeiten. Die Werte liegen leicht unter dem Ereignis mit stärkerem Regen.

Eine Analyse der Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme zeigt, dass neben den Sensoren am Bug, auch die am Unterfahrschutz erhöhte Beschleunigungen zeigen.

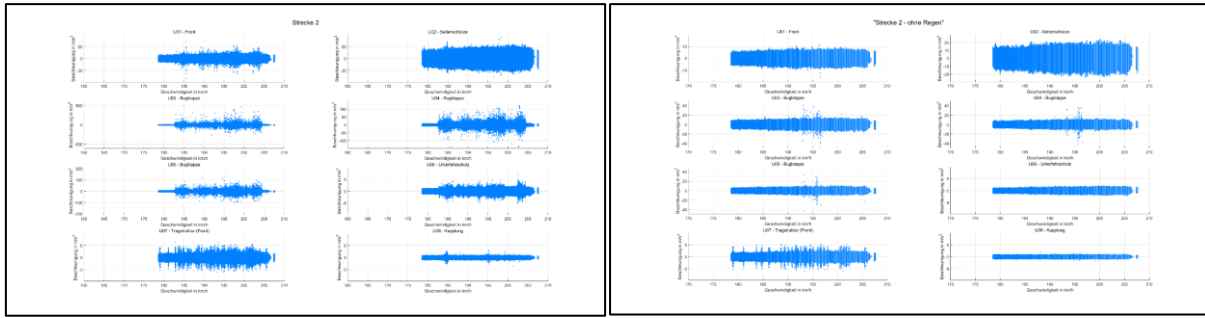


Abbildung 3.24: Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme des auffälligen Streckenabschnitts über alle Frontsensoren mit und ohne signifikanten Zeitraum.

Eine Filterung der Daten mit dem CFC1000 Filter zeigte, dass das signifikante regenbedingte Ereignis damit herausgefiltert werden kann. Ob eine Filterung zur Abgrenzung von Regenereignissen und Kollisionsereignissen verwendet werden kann, ist wahrscheinlich, konnte aufgrund fehlender Kollisionsereignisse bei Regen nicht nachgewiesen werden.

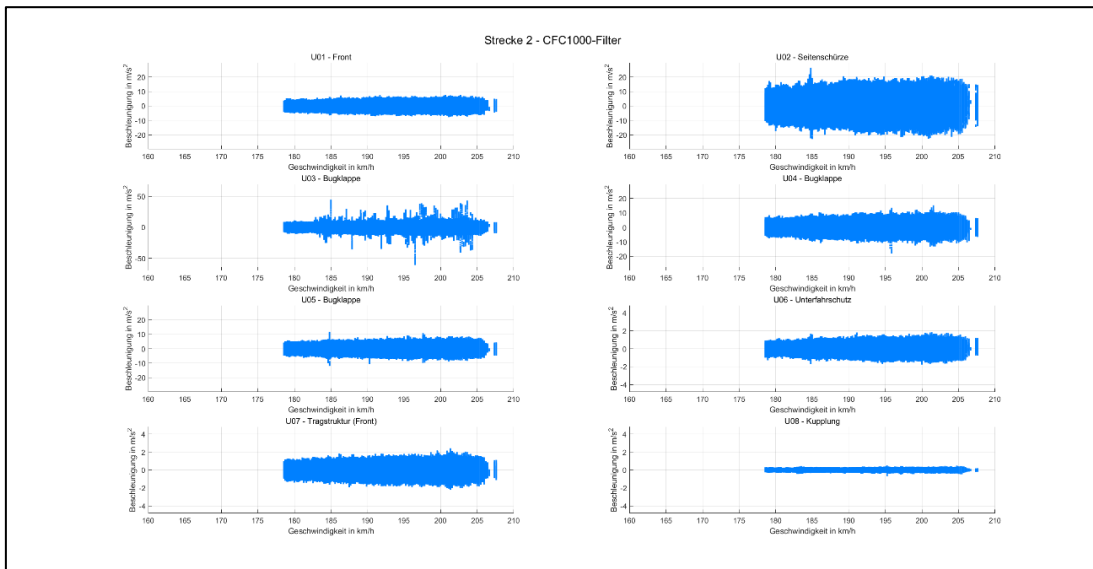


Abbildung 3.25: Beschleunigungs-Geschwindigkeits-Diagramme des auffälligen Streckenabschnitts mit CFC1000 Filter.

3.2.9 Analyse der Typhon Peaks

Besonders an der Bugklappe wurden bei aktivem Typhon hohe Beschleunigungspeaks sichtbar. Die Aktivierung des Typhons wurde während der Testfahrten mit dem aTL aufgezeichnet und als Annotation bereitgestellt. Zur Kompensation kleinerer Abweichungen der Annotationszeit wurde das Maximum innerhalb eines Zeitfensters von ± 5 Sekunden um die Annotation ermittelt. In 8 Fällen wich die Annotation allerdings in größerem Maße vom Signal ab, sodass diese Fälle von der Untersuchung ausgeschlossen wurden. Eine Korrektur der Annotation war im Rahmen des Projektes nicht möglich.

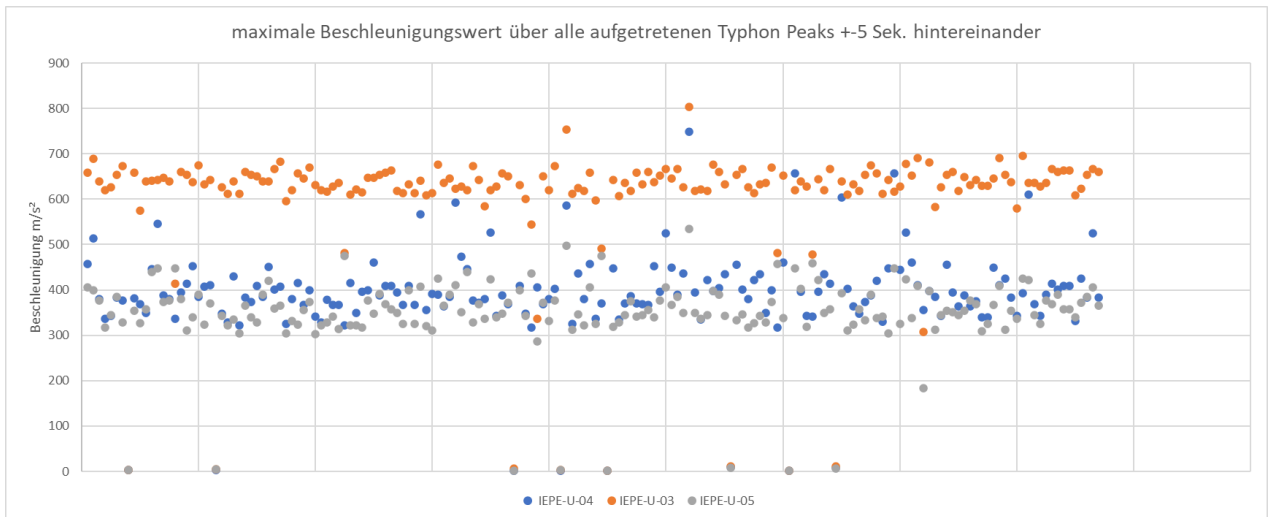


Abbildung 3.26: Maximale Beschleunigungswerte der Typhon Peaks +5 Sekunden um den annotierten Event in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens

Auch wenn ein Großteil der Peaks am IEPE-U-03 um den Meridian bei 640m/s² liegt, so muss mit Werten bis 800m/s² gerechnet werden.

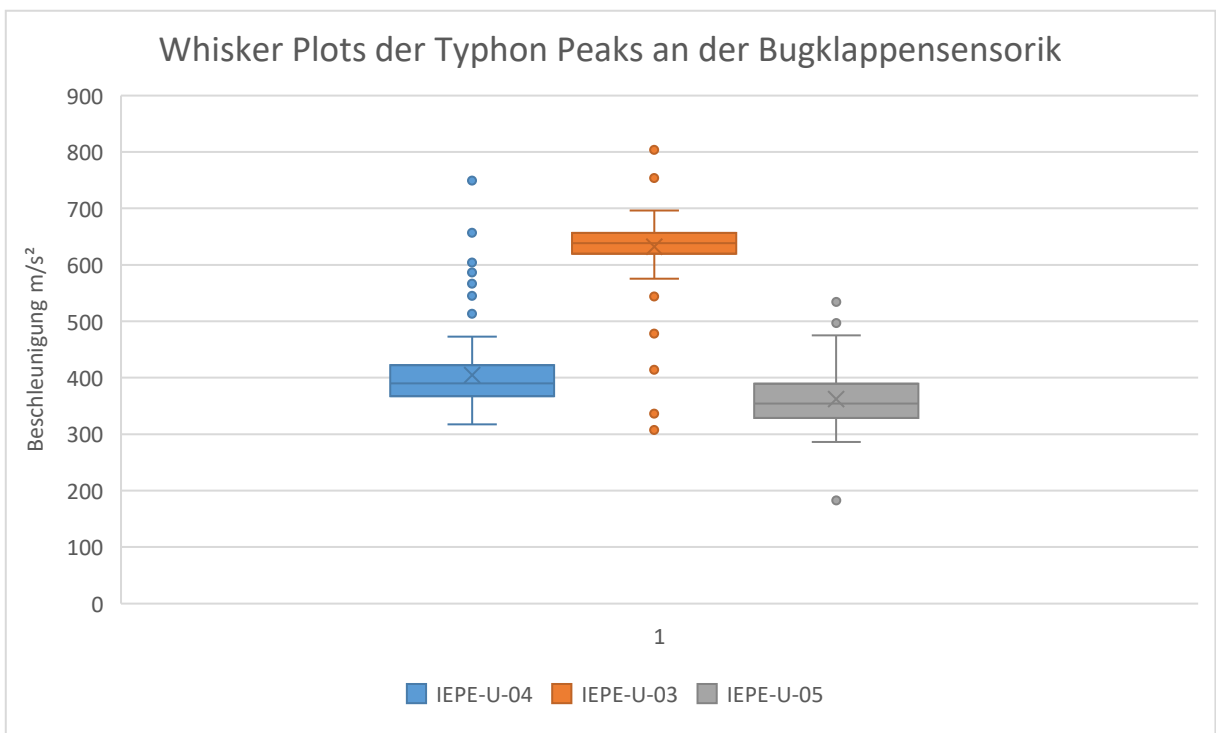


Abbildung 3.27: Höhe der Typhon Peaks an der Bugklappensensorik

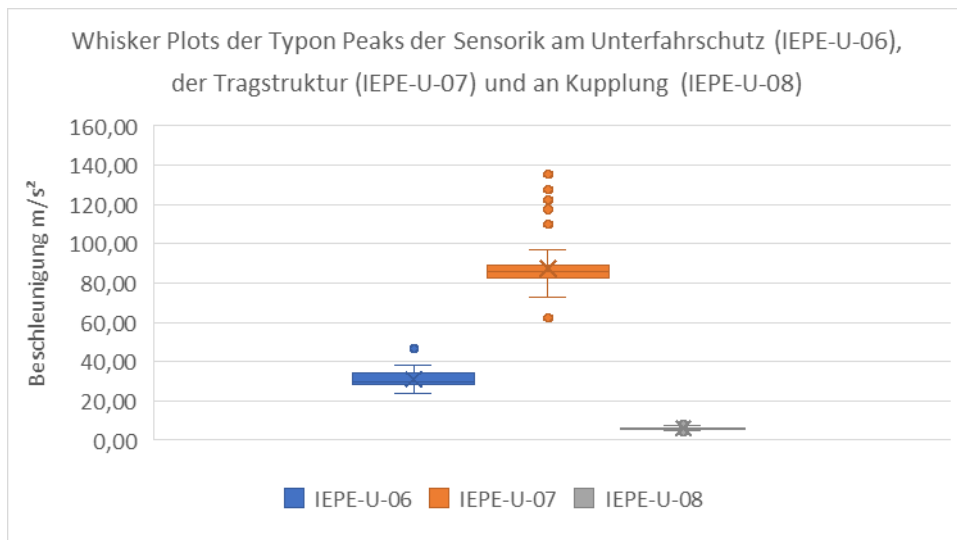


Abbildung 3.28: Whisker Plots der Typon Peaks der Sensorik am Unterfahrschutz (IEPE-U-06), der Tragstruktur (IEPE-U-07) und an Kupplung (IEPE-U-08) (Excel Format)

Was genau die Höhe des Peaks beeinflusst, konnte im Rahmen des Projektes nicht ermittelt werden. Es wurde allerdings festgestellt, dass das Geräusch je nach Betätigung durch den TF variierte.

Da Typhonsignale bei den ermittelten Grenzkurven als Peaks nicht berücksichtigt wurden, sind diese bei der Ermittlung der Erkennbarkeit separat zu berücksichtigen. Dies wurde entsprechend im Text oder in den Tabellen gekennzeichnet.

3.2.10 Analyse der Peaks von Ereignissen

Ziel der Analysen in diesem Abschnitt ist es, zu bestimmen, für welche der annotierten Ereignisse zusätzliche Grenzwerte erforderlich sind und wie diese bei der Erkennung berücksichtigt werden sollten.

Analyse der Peaks am Radsatz:

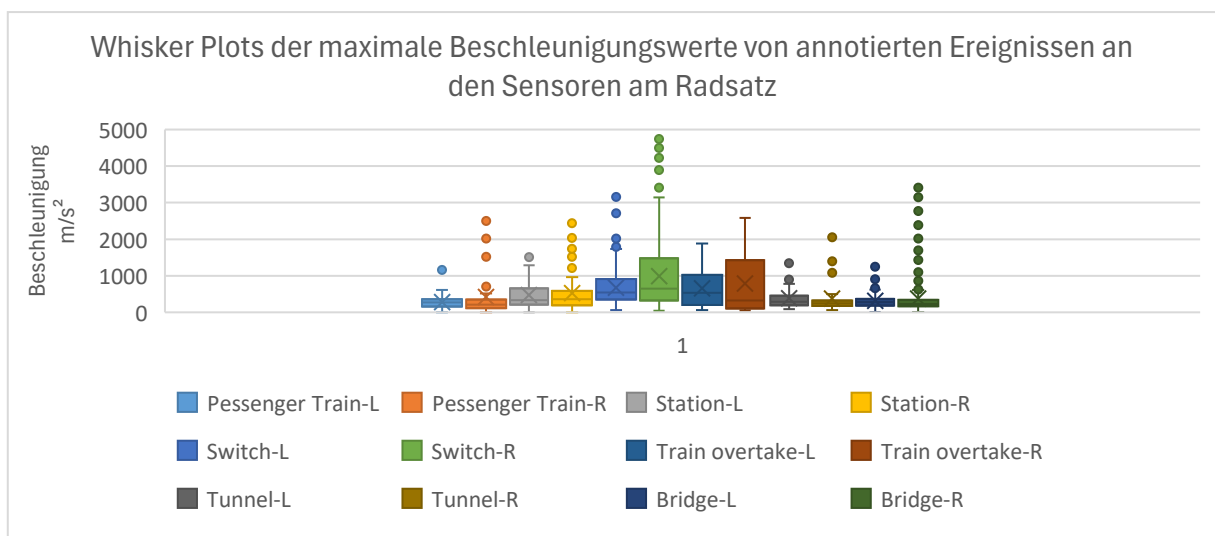


Abbildung 3.29: Whisker Plots der annotierten Peaks der Radsatz-Sensorik (Excel Format)

Bei der Verteilung der maximalen Beschleunigungswerte der annotierten Peaks fallen zunächst die Box-Plots der Weichen auf. Dabei weisen die Werte des rechts (-R) montierten

Sensors höhere Beschleunigungen auf als die Werte des links montierten Sensors (-L). Bei den Überfahrversuchen am aTL waren hingegen links höhere Werte aufgetreten als rechts. Darüber hinaus wird durch die Höhe der Ausreißer (ab 1,5fach > drittes Quartil) deutlich, dass diese im Vergleich zu den anderen Ereignissen nach oben abweichen. Das dritte Quartil selbst befindet sich dagegen auf gleicher Höhe wie das des Ereignisses der Zugüberholungen und unterhalb der ermittelten Grenzwerte für das situative Rauschen. Eine mögliche Erklärung liegt in der Anzahl der erfassten Werte von Weichenüberfahrten, die mit knapp 600 die der anderen Annotationen deutlich übersteigen. Eine weitere Ursache könnte eine mögliche Geschwindigkeitsabhängigkeit der Ausprägung des Ereignisses am Sensor sein.

Dennoch liegt das erfasste Whisker Plot Maximum der Weichen links mit etwas über 3000m/s² deutlich über dem situativen Rauschen, was mit 56 Werten was 10% der erfolgten Weichenüberfahrten betrifft. Eine Berücksichtigung bei der Erkennbarkeit von Ereignissen scheint so angemessen zu sein. Allerdings sollte eine eventuelle Geschwindigkeitsabhängigkeit sowie ein Abgleich mit dem Auftreten nicht annotierter Peaks noch untersucht werden.

Analog gilt dies für Zugüberholungen. Bei Brückenüberfahrten liegen ebenso besonders viele Ereignisse vor, was die hohe Streuung erklärt, für welche die Geschwindigkeitsabhängigkeit untersucht werden müsste.

Analyse der Peaks an der Front Sensorik:

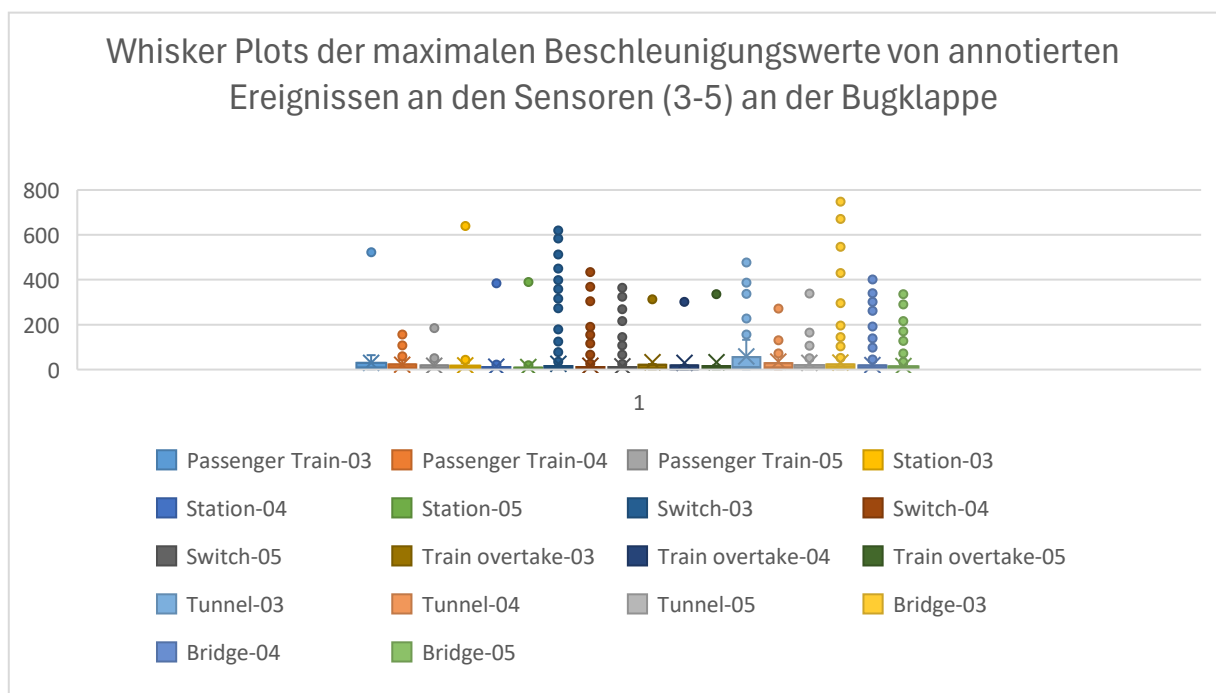


Abbildung 3.30: Whisker Plots der maximalen Beschleunigungswerte von annotierten Ereignissen an den Sensoren (3-5) an der Bugklappe

An der Bugklappe fällt zunächst die hohe Streuung aller Werte auf, welche vermutlich auf eine Geschwindigkeitsabhängigkeit des Einflusses der annotierten Ereignisse auf die Höhe des Beschleunigungswertes nahelegt. Eine leichte tendenzielle Abweichung nach oben ist bei der Tunnelleinfahrt sichtbar. Hierbei ist, wie auch bei den anderen Ereignissen am aTL der Wert des Sensors 3 am höchsten ausgeprägt. Auch wenn die Werte im Vergleich zu den Beschleunigungen am Typhon sehr gering ausfallen, so müssen sie doch bei der Erkennbarkeit berücksichtigt werden. Mit bis 60m/s² im 3. Quartil und knapp 500m/s² Spitze liegen sie

über dem situativen Rauschen bei hohen Geschwindigkeiten. Für eine Auswertung des genauen Einflusses auf die Erkennbarkeit ist allerdings eine Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit notwendig.

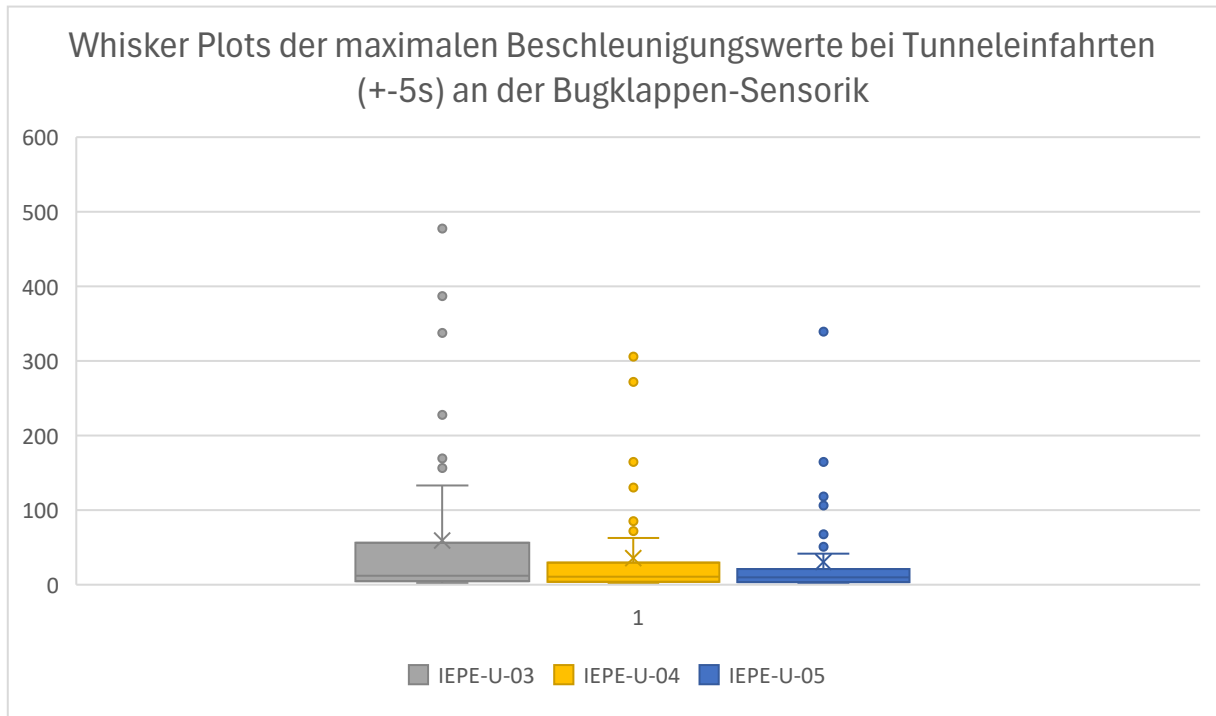


Abbildung 3.31: Whisker Plots der maximalen Beschleunigungswerte von Tunneleinfahrten an den Sensoren (3-5) an der Bugklappe

3.2.11 Analyse der Peaks von kleinen Kollisionen und Überfahrungen

Während der betrieblichen Testfahrten mit dem aTL wurden mehrere kleine Kollisionen und Überfahrungen aufgezeichnet und annotiert. Inwiefern sich diese in den Signalen der Beschleunigungssensorik an der Front sowie am Radsatz abbilden, wurde durch das IFB analysiert. Dabei zeigte sich, dass sich bereits einige dieser Ereignisse deutlich in den Signalen erkennen lassen und auch über das situative Rauschen hinausgehen. Eine Bewertung der tatsächlichen Erkennbarkeit muss allerdings unter Berücksichtigung der Abgrenzbarkeit von anderen Peaks näher betrachtet werden.

Die Auswertung beinhaltet jeweils folgende Schritte: Detaillierte Aufbereitung, Analyse und Aufbereitung des Aufpralls/der Überfahrung mit dem aTL

- Isolieren der entsprechenden Zeitabschnitte durch Annotationsstempel, ggf. Überprüfung mit Kameraaufzeichnungen (Event +/- 10 s)
- Geografische Zuordnung
- Streckenzuordnung
- Auswertung im Zeitbereich

- Analyse der Zeitschriebe, Prüfung welche Sensoren wie betroffen sind und wie sich das Ereignis ausprägte (Sensoren an Bug/Front und Radsatzlager)
- Berücksichtigung der fehlerhaften Sensoren zum damaligen Zeitpunkt
- Ggf. Anwendung weiterer verschiedener Auswerteverfahren
 - Auswertung im Frequenzbereich
 - Spektrogramme
 - FFT-Verfahren

Aus den Ergebnissen kann die Erkennbarkeit abgeleitet werden. Dabei zeigte sich, dass Kollisionen mit Ästen ab einer Geschwindigkeit von 35km/h bis auf eine Ausnahme das situative Rauschen übersteigen und daher als erkennbar angenommen werden. Bei den Überfahrten übersteigen die Schottersteine auf der Schiene, sowie ein Ast das angenommene situative Rauschen und werden daher als erkennbar eingestuft, auch wenn diese Einschätzung vor dem Hintergrund der Vielzahl die Werte übersteigenden Peaks näher überprüft werden sollte.

Datum/Uhrzeit	Ereignis (Geschwindigkeit in km/h)	Front	Seitenschürze	Bugklappe	Bugklappe	Bugklappe	Unterfahrerschutz	Radsatz links	Radsatz rechts
		IEPE U01	IEPE U02	IEPE U03	IEPE U04	IEPE U05	IEPE U08	IEPE U09-R	IEPE U09-R
Beschleunigung in m/s ² (Höhe über situativem Grenzwert in m/s ²)									
30.08.2023									
08:40:37	Vögel gegen Frontscheibe links (134,77)		1						
09:00:35	Vögel gegen Frontscheibe links (120,16)		1						
10:35:43	Überfahrt eines kleinen Astes (54,53)							2	2
10:36:14	Stroh (43,43)							2	2
10:41:25	Überfahrt eines Astes (46,80)							1875,67 (+200)	1
10:42:54	Überfahrt von Schottersteinen (39,78)							6737,7 (+4400)	2452,7 (+800)
10:45:04	Ast an Frontscheibe (36,59)								
13.09.2023									
10:46:24	Strauch im Gleis (38,08)					1			
10:46:32	Strauch im Gleis (39,11)		1						
11:01:50	Äste an der rechten Front (65,48)	10,89 (+4)		33,06 (+15)	59,35 (+50)	26,09 (+18)			
10:01:52	Äste an der Front (63,05)	3		71,51 (+54)	23,94 (+16)	18,93 (+11)			
11:03:24	Äste an der linken Front (19,23)		1	1	1				
11:08:14	Äste links (35,70)	17,46 (+12)	233,67 (+23)	37,67 (+25)	10,69 (+5)				
11:09:42	Äste links (40,65)	6,87 (+1)	2	32,18 (+19)	10,1 (+4)	9,61 (+3)			
11:20:58	Baumüberfahrt (55,59)	175,5 (+170)	2452,5 (+2250)	2452,5 (+2430)	1026,71 (+1020)	793,14 (+787)	392 (+387)	2	2

13:49:27	Schienenfehler (35,09)								
06.03.2024									
10:03:15	Ast rechts (38,85)	1	1	1	1	1			
10:14:17	Ast überfahren (13,33)								
10:36:36	Stroh überfahren (28,85)							1	1
10:38:58	Schotterstein überfahren (48,32)	3	3	3	3	3		2	1708,26 (+100)
10:40:27	Zweig überfahren (29,00)							1	1

Legende

leer Keine Sichtbarkeit im Signal

1 allgemein höheres Hintergrundrauschen (nicht sichtbar)

2 sichtbar in erhöhtem Hintergrundrauschen

3 hebt sich ab aber keine Grenzwertüberschreitung

X
(y) erkennbar X=Maximalwert, in m/s^2 y Höhe der Überschreitung des situativen Rauschens

Wert wurde nicht erfasst

Tabelle 12: Erkennbarkeit von kleinen Kollisionen und Überfahrungen je Sensor

3.2.12 Sensordatenanalyse Front Impact

Für eine Erkennung von Kollisionen oder Überfahrungen ist eine Unterscheidung des Impact Signals vom situativen Rauschen und, sollte dies nicht vorhanden sein, vom Grundrauschen erforderlich. Auch wenn eine künstliche Intelligenz in der Lage ist, selbst geeignete Merkmale zur Abgrenzung zu finden, ist für eine Bewertung von KI-Verfahren dennoch eine theoretische Analyse erforderlich.

Gemäß den Anforderungen an die Kollisionserkennung aus TP600 ist ein Mindestgewicht 30kg sowie eine mindesthöhe von 100mm über der Schiene für Kollisionen von Objekten mit der Front gefordert. Um eine solche Anforderung mit den getesteten Prototypen erfüllen zu könnten müsste die Signalhöhe der geforderten Masse Geschwindigkeitspaare sich von den operativen Signalen abheben.

Da sich die Szenarien der Kollision an der Front und der Überfahrt deutlich unterscheiden, werden die Impact Signale an der Front und die am Radsatz in unterschiedlichen Abschnitten behandelt. Mit der Analyse der Impact Signale an der Front für eine Kollisionserkennung soll begonnen werden.

3.2.12.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensordatenanalyse an der Front

Die Datengrundlage der Impact Signale an der Front besteht aus Daten der Vorprojekte (5), Versuchs- und Simulationsdaten, sowie Ereignissen während der Testfahrten von KI-MEZIS. Auch wenn für die Frontsensorik viele Szenarien nicht abgedeckt sind und einige nur auf theoretischer Basis errechnet wurden, so bilden die vorhandenen Werte dennoch eine gute

Basis für das Ermitteln einer flächendeckenden Erkennbarkeitshypothese. Die Erkennungsgrenzen könnten in zukünftigen Projekten weiter geschärft werden.

Untersuchungen der Einflussgrößen auf die Impact Signale an der Front wurden auf Basis der Beschussversuche durchgeführt, da an der Bugklappe für 3 Sensoren eine gut dokumentierte Datengrundlage existiert. Die Untersuchungen bestätigten, dass die einwirkende Kollisionskraft sich in der Signalhöhe der Impact Signale zeigt. Dabei ist der Kollisionsort, der Sensorort, die betroffenen Materialien sowie die Bauteil- und Objektschädigung zu berücksichtigen. Die Untersuchungen bestätigten ebenfalls den Einfluss der Masse des Kollisionsobjektes und der relativen Geschwindigkeit zwischen Zug und Objekt auf die Signalhöhe. Dabei wirkt jedoch das genaue Kollisionsgeschehen trotz der definierten Versuchsumgebung ein. Dies legt nahe, dass der Nachweis der Erkennung einer bestimmten Mindest-Masse, wie sie gemäß der derzeitigen Formulierung der Anforderungen zu erfüllen wäre, bei einer realen Bandbreite von Kollisionen nicht gewährt werden könnte. Im größeren Maßstab werden Masse und Geschwindigkeit dennoch als hinreichende Einflussfaktoren für die Ermittlung einer generellen Erkennbarkeit an einem Bauteil definierten Aufbaus angesehen. Dies entspricht den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse des DLR bezüglich der Beschussversuche, bei welcher der Einfluss des „Impactor“ Vogel mit den Parametern Masse und Geschwindigkeit auf die gemessenen Beschleunigungssignale genau genug abgesichert ist.

Aufgrund der in der Realität großen Bandbreite an möglichen Kollisionszenarien einer Masse Geschwindigkeitskombination sollte für die Interpretation der Erkennungshypothese dennoch das mit der Masse Geschwindigkeitskombination maximale Kollisionsgeschehen zu Grunde gelegt werden.

3.2.12.2 Erwartetes Signalverhalten

Das erwartete Signalverhalten wird durch die Vorgänge während einer Kollision bestimmt. Daher wurden diese zunächst näher betrachtet.

Bei einem Aufprall wird in sehr kurzer Zeit (meist unter 1 Sekunde) kinetische Energie der Relativgeschwindigkeit von Zug und Hindernis in Verformungsenergie umgewandelt. Die dabei wirkende Kraft hängt vom Bewegungsimpuls, also einer vektoriellen Größe ab, von welcher hier der Einfachheit halber, der Betrag p verwendet werden soll.

$$F = p/dt$$

(mit p für Impuls; dt für die Kontaktzeit und F als Kraft in der Einheit Newton (N)).

Der Impuls hängt von der Masse und der Geschwindigkeit ab. Dabei wird bei der Masse die einwirkende Masse also die des Kollisionsobjektes und bei der Geschwindigkeit die Änderung der relativen Geschwindigkeit zwischen Zug und Objekt innerhalb der Kontaktzeit verwendet

$$p = m \cdot dv$$

(mit m = Masse in Kilogramm, dv = Geschwindigkeitsänderung in m/s).

Damit lässt sich die Kraft bestimmen als:

$$F = m \cdot dv/dt$$

Wirkt diese Kraft nun in sehr kurzer Zeit auf die mit Sensoren ausgestatteten Bauteile des Fahrzeugs, führt dies zu einer Verformung und zur Ausbreitung von Vibrationen im Festkörper, welche am Beschleunigungssensor sichtbar werden.

Die Haupteinwirkung erfolgt dabei unmittelbar beim Auftreffen und setzt sich, je nach Beschaffenheit des Bauteils, beispielsweise durch ein Nachschwingen, noch einen kurzen Moment fort. Aus dem Ablauf eines Aufpralls lässt sich die erwartete Signalform der Beschleunigungssensoren ableiten. Dabei wird zu Beginn des Aufpralls ein großer Peak erwartet, welcher durch eine kurzen Ausschwingphase ergänzt wird.

Die Aufprallkraft kann durch die Messung der Ausbreitung der Festkörperschwingungen ermittelt werden (vergl. (6)). Vereinfacht kann analog zu den oben angeführten Formeln angenommen werden, dass die Höhe des Peaks proportional zur Aufprallkraft ist.

In den folgenden Abschnitten werden anhand der Versuche aus den Vorprojekten sowie in KI-MEZIS die tatsächlich auftretenden Signalformen sowie deren Einflussgrößen analysiert.

3.2.12.3 Einfluss der Sensorposition auf das Impactsignal

Der bereits vor dem Projekt angenommene Einfluss der Sensorposition auf das Impact Signal (vergl. (6)) konnte in den Versuchen beobachtet werden. Die Impact-Peaks an den drei Positionen der Bugklappe wiesen entsprechend dem Abstand zum Aufprallpunkt unterschiedliche Höhen auf. Als weiterer Einflussfaktor konnte durch Tests an Bugklappen unterschiedlichen Typs das Materialverhalten identifiziert werden. Auch deuteten die aufgezeichneten Videos den Einfluss der Stabilisierung des Bauteils durch die Befestigung an. Letztgenannter Einfluss zeigte sich am aTL jedoch in umgekehrter Weise. Weitere Untersuchungen wären hier sinnvoll.

Im Detail wurden die drei Positionen betrachtet:

(Sensor Pos. 1, am aTL IEPE-U-05, Sensor Pos 2/3 am aTL IEPE-U-04 sowie Sensor Pos 4 am aTL IEPE-U-03).

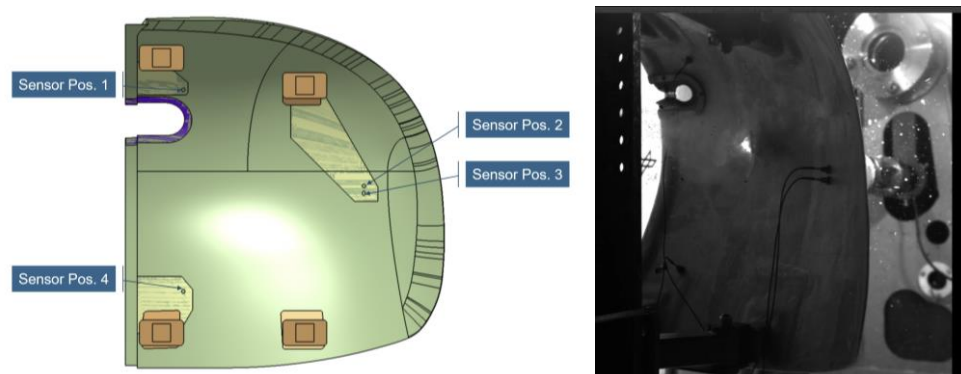


Abbildung 3.32: Links: Bei den Beschussversuchen ausgestattete Sensorpositionen sowie Rechts: Rückansicht mit Beschussposition (Loch)

Dabei zeigten sich an Sensor 3 (Position 3) im Vergleich zum Sensor 4 (Position 4) -beide mit einem Messbereich von 5000g – deutlich höhere Werte.

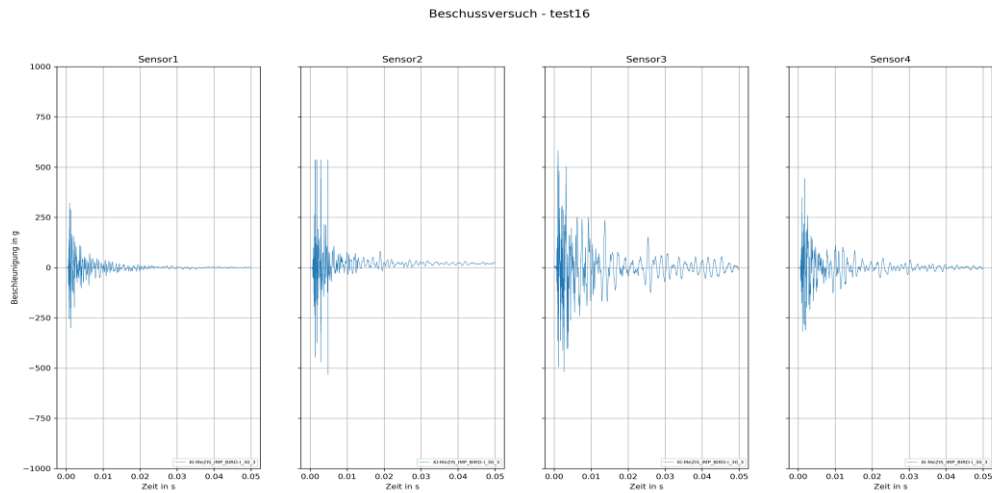


Abbildung 3.33: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren an verschiedenen Positionen am Bug für dasselbe Ereignis

Für die Position 1 und 2, deren Sensoren mit einem Messbereich von 500g ausgestattet waren, zeigten sich auch bei einigen Versuchen Unterschiede. In den meisten Versuchen war der Messbereich an den Positionen 1 und 2 zu klein, sodass die Daten daher nicht aussagekräftig waren. Die Unterschiede in der Höhe des ersten Peaks können durch die Einschussposition erklärt werden, welche sehr viel näher an den Positionen 2 und 3, als an den Positionen 1 und 4 lag. In den aufgezeichneten Videodaten konnte an den Rändern der Bugklappe nahe Position 2/3 ein starkes Nachschwingen beobachtet werden. Zum einen erklärt das die hohen Beschleunigungswerte nach dem aufprallbedingten Peak, zum anderen könnte dies aber auch die Peakhöhe beeinflusst haben. Weitere Einschusspositionen wurden nicht erprobt, sodass die These weder bestätigt noch widerlegt werden konnte.

Für die Untersuchungen am Fahrzeug, bei welchen die gleichen Positionen verwendet wurden, wurde daher die Empfehlung zur Verwendung des IEPE-U-03 an der zur Sensorposition 4 vergleichbaren Position ausgesprochen. Im Widerspruch dazu zeigten sich am aTL allerdings an dem an Sensorposition 2 montierten IEPE-U-04 ein geringeres situatives Rauschen und geringere Peaks (bei kleineren Kollisionen, sowie bei Regen, bei Tunnelleinfahrten) gegenüber dem IEPE-U-03. Dieser Widerspruch konnte im Rahmen des Projektes nicht aufgelöst werden.

3.2.12.3 Datengrundlage

Für die Untersuchungen der Impactsignale an der Front werden die Szenarien in leichte und schwere Kollisionen unterteilt und in drei Geschwindigkeitsbereiche gegliedert.

Definition	Beschreibung
Leichte Kollisionen	Kollisionen mit Objekten unter 500kg beinhaltend kleine Vierbeiner, Menschen, Vögel, Insekten und Hagel
Schwere Kollisionen	Kollisionen mit Objekten schwerer als 500kg, beinhaltend große Vierbeiner, große Bäume, Autos, LKW und Züge
Train Starting	0 km/h – 5 km/h

Low Velocity	>5 km/h– 80 km/h
High Velocity	> 80 km/h

Tabelle 13: Betrachtete Kategorien bei der Bestimmung des Einflusses von Masse und Geschwindigkeit auf Impulssignale.

Außerdem wurde der Fokus auf folgende Sensoren gelegt.

Anbringung	Name	Sensor Spezifikation	Technologie	Sensor Zulieferer
Unterfahr- schutz	IMA-C	Messbereich: 50 g Frequenzbereich: 0.5. 5000 Hz Temperaturbereich: -40. 65 °C Ansprechschwelle: 0.36 mg	Ceramic	Kistler Piezo- Beam, Typ 8640A50
Kupplung	IFB-B	Tri-Axial Messbereich: 50 g; Frequenzbereich: bis 1. 5000 Hz Temperaturbereich: -55 - 120 °C Ansprechschwelle: 2 mg	piezoelektrisch	Kistler Type 8766A050BB
Kupplung	IEPE-U- 08	Messbereich: 1.000 g Frequenzbereich: 0,7 - 10.000 Hz		Kistler Typ 8715B1K0S00 T
Unterfahr- schutz	IEPE-U- 06	aTL: uniaxial Messbereich: 250 g Frequenzbereich: 0,5 – 10.000 Hz [Hz] Abtastrate 50Hz Labortests: Messbereich: +/- 10 000 g Abtastrate 24Hz Messbereich +/- 2000 g Abtastrate 24Hz	piezoelektrisch Quartz Ceramic	aTL: Kistler Typ 8705A250 M1 Labortests: Kistler Typ 8742A10 Kistler Typ 8764B2
Bugklappe	IEP03 (IEP04 IEP05)	aTL: uniaxial Messbereich: 250 g Frequenzbereich: 0,5 – 10.000 Hz [Hz] Abtastrate 50Hz Labortests: Messbereich: 500 g Empfindlichkeit ~10.000 mV/g Messbereich: 5000 g Empfindlichkeit ~1.000 mV/g	piezoelektrisch Quartz	aTL: Kistler Typ 8705A250 M1 Labortests: A389170- 72 5649350 – 51 8742A10

Tabelle 14: Verwendete Sensoren der Impact-Analyse an der Front

Bei der Betrachtung wurden dynamische Versuche, Simulationen sowie Kollisionsereignisse während der Testfahrt herangezogen. Diese stellt die folgende Tabelle zusammen.

Bezeichnung	Beschreibung	Sensor
Kupplungsversuche Vorprojekt	aTL statisch, Lokomotive (shunting Loco) bewegt sich und initiiert Kupplung	IMA-C
Lab Test Vorprojekt	Kraft wird für ca. 10s zentral auf Kupplung aufgebracht. Die Masse Geschwindigkeitspaare sind aus der Kraft mit kürzerer Impact Zeit ermittelt (analog erwartetes Signalverhalten)	IFB-B
Kupplungsversuche	aTL bewegt sich auf ungebremst stehenden ICE	IEPE-U-08
Experimente Schaukel	Pendel schwingt gegen den Unterfahrschutz, Stahl und Gelatine Objekte werden erprobt	IEPE-U-06
Simulation Unterfahrschutz	Kollisionssimulationen mit berechnungsoptimiertem FE-Modell des Unterfahrschutzes (siehe TP 200)	analog IE-PE-U-06
Beschussversuche	Versuche mit DLR Beschussanlage Impactoren Schotterstein, Hagel, Vogel 30g -1,8kg Geschwindigkeiten 30,60,100m/s	IEP03 - IEP05
Simulation Bugklappe	Auf Basis der Beschussversuche entwickelte Simulation	analog IEP03 - IEP05
Baumüberfahrt	13.9.2023 kam es bei 56km/h zur Überfahrt eines kleinen Baumes. Eventuell war dieser morsch.	IEP03 - IEP08
Äste links	13.9.2023 kam es bei 65,48km/h bzw. 63,05 km/h je zu einer Kollision mit Ästen	IEP03 - IEP05

Tabelle 15: Übersicht Impact Versuche und Ereignisse

Für eine Ermittlung der Testabdeckung wurden anhand der Versuchsparameter Versuchsszenarien aus Objekten und Geschwindigkeiten gebildet. Es zeigt sich, dass schwere Kollisionen am Unterfahrschutz und an der Kupplung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich getestet wurden. Dabei sind die sehr schweren Objekte Zug und LKW (bis 6 bzw. 20 km/h) berücksichtigt. Für hohe Geschwindigkeiten >80 km/h wurden Objekte bis 250kg getestet.

Schwere Kollisionen

Train Starting (0-5 km/h)

Bauteil	Tree	Car	Truck	Train	Animals >500kg
Bugklappe					
Unterfahrschutz				Kupplungsversuche Vorprojekt	
Kupplung			Lab Test Vorprojekt	Impact Test Vorprojekt Kupplungsversuche Vorprojekt Kupplungsversuche (bis 2km/h)	

Low Velocity (>5 - 80km/h)

Bauteil	Steel	Tree	Car	Truck	Train	Animals >500kg
Bugklappe						
Unterfahrschutz	Experimente Schaukel (bis 15km/h)				Kupplungsversuche Vorprojekt: (bis 6mn/h)	
Kupplung			Lab Test Vorprojekt (bis 20km/h).			Lab Test Vorprojekt (40km/h).

High Velocity (> 80 km/h)

Bauteil	Block (50 - 250 kg)	Tree	Car	Truck	Train	Animals >500 kg
Bugklappe						
Unterfahrschutz	Simulation Unterfahrschutz (bis 160km/h)					
Kupplung	Lab Test Vorprojekt					

Tabelle 16: Testabdeckung Impact Szenarien schwere Kollisionen

Leichte Kollisionen wurden für geringe und mittlere Geschwindigkeiten bis 80 km/h an der Bugklappe simulativ erfasst. Am Unterfahrschutz wurden Geschwindigkeiten bis 10 km/h im

Labor, während der Testfahrten bis 56km/h berücksichtigt. Bei der Kupplung wurden Geschwindigkeiten ab 20km/h für leichte Kollisionen aus den Kräften der Labortests errechnet.

Leichte Kollisionen

Train Starting (0 - 5km/h)

	Humans >30kg	Animals with limbs <500kg	bigger Insects Stag Beetle	Birds
Bugklappe	Simulation Bugklappe (3,6km/h)			Simulation Bugklappe (3,6km/h)
Unterfahrerschutz				
Kupplung				

Low Velocity >5-80

Bauteil	Humans >30kg	Animals with limbs <500kg	bigger Insects Stag Beetle	trees/branches	Birds
Bugklappe	Simulation Bugklappe: (18 & 54km/h)			Baumüberfahrt (56 km/h)	Simulation Bugklappe: (18 & 54km/h)
Unterfahrerschutz	Experimente Schaukel (bis 15 km/h)			Baumüberfahrt (56 km/h)	
Kupplung		Lab Test Vor- projekt (ab 20 km/h)		Baumüberfahrt (56 km/h)	

High Velocity (>80)

Bauteil	Humans >30kg	Animals with limbs <500kg	bigger Insects Stag Beetle	Birds
Bugklappe			Beschussversuche (bis 360 km/h)	Beschussversuche (bis 360 km/h) Simulationsergeb
Unterfahrschutz				
Kupplung		Lab Test Vor- projekt (bis 65km/h)		

Tabelle 17: Testabdeckung Impact Szenarien leichte Kollisionen

3.2.12.4 Einfluss des Schadens auf das Signal

3.2.12.4 Einfluss des Schadens auf das Signal

In diesem Abschnitt wurde der Einfluss des Schadens auf die maximale Höhe sowie den Verlauf der Beschleunigungssignale betrachtet. Die Untersuchungen basierten auf den Beschussversuchen. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass ein Durchbrechen des Bauteils zu geringeren Beschleunigungsmaxima führt als andere Schadensarten. Dies müsste anhand von einer größeren Anzahl Versuche überprüft werden. In der Betrachtung des Beschleunigungsverlaufs ließen sich die unterschiedlichen Formen nicht durch einfachen Abgleich auf die grob erfassten Hergänge der Kollisionen beziehen. Wurden einzelne Signale betrachtet, konnte dies dennoch den Eindruck erwecken, dass sich die konkreten Schadenshergänge in den Signalen erkennen ließen.

Die getesteten Kollisionsereignisse wurden sowohl bei den Vorprojekten als auch bei KiMEZIS so dimensioniert, dass sie in Ihrer Stärke den Bereich der Schadensbildung eingrenzbar machten. Es wurden also Kollisionen getestet, welche gerade so keinen Schaden, und welche gerade so einen Schaden erzeugten. Für die Tragstruktur wurden dabei vorwiegend genormte Kollisionsereignisse gemäß DIN EN 15227 (7) berücksichtigt, für welche die Sicherheit der Passagiere in Form von Schutzräumen gewährleistet (vergl. (7)) bleiben muss.


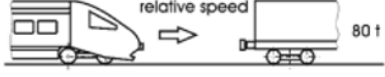

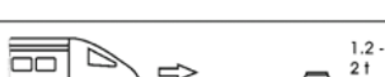
	1 36 km/h
	2 36 km/h
	3 110 km/h deformable
	4 Static force 250 kN / 300 kN

Abbildung 3.34: Genormte Kollisionsszenarien gemäß DIN EN 15227 (7)

So beschränkt sich das untersuchte erwartete Signalverhalten daher auf schadlose Kollisionen sowie Kollisionen mit Schäden eines Teils des Bauteils. Eine komplette Zerstörung des Bauteils, sowie eine direkte Einwirkung auf den mit dem Sensor verbundenen Teil des Bauteils, wurde nicht untersucht.

Einfluss des Schadens auf den Signal-Peak

Zu den Beschussversuchen an der Bugklappe wurde der Schaden durch Sichtprüfung der Bugklappe ermittelt und entsprechend seiner Stärke in drei Kategorien eingeteilt Kategorie 0: kein Schaden, Kategorie 0,5: geringer Schaden (Weiterfahrt möglich), Kategorie 1: deutlicher Schaden (Weiterfahrt erfordert Überprüfung).

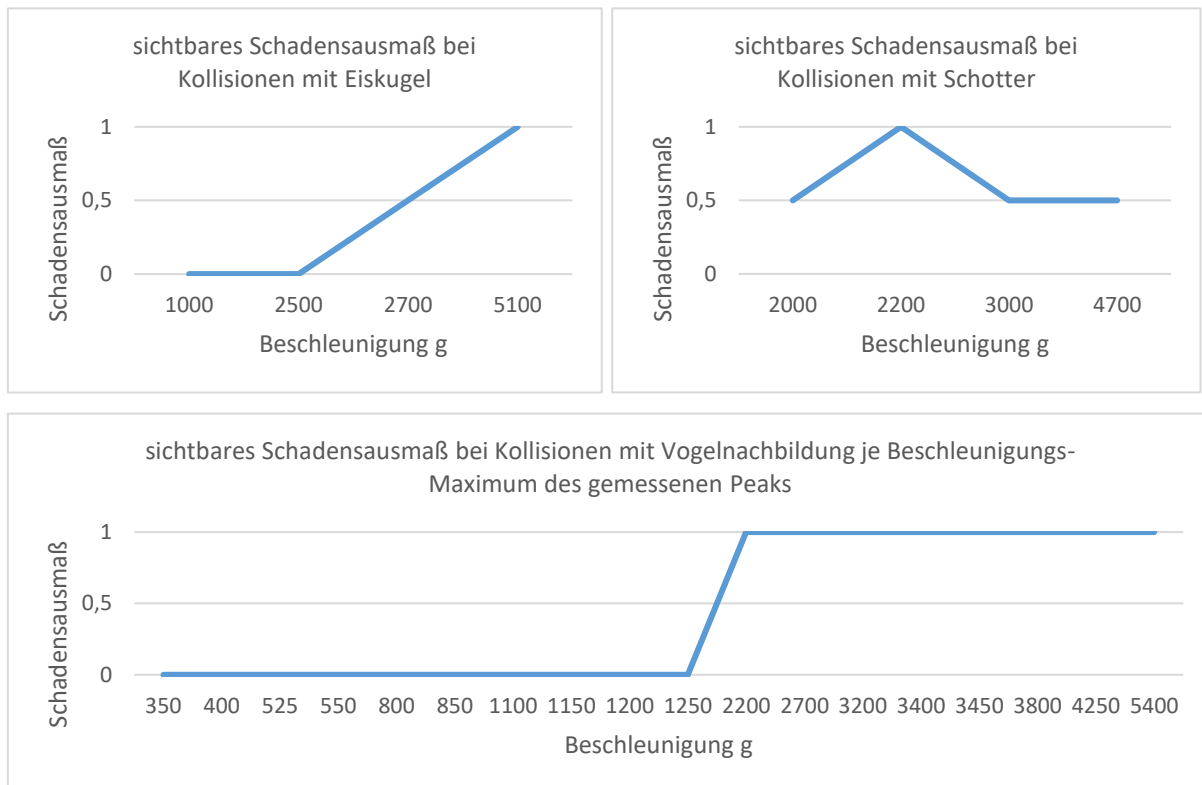


Abbildung 3.35: sichtbares Schadensausmaß bei Kollisionen an der Bugklappe über Peakhöhe (maximum des Beschleunigungssignals) an Position 4

Während bei der Eiskugel das Schadensmaß mit den Beschleunigungswerten zunimmt, zeigt der Graph beim Schotterstein einen anderen Verlauf. Hier kommt es bei einem geringen Beschleunigungswert zu einem deutlichen Schaden, während es bei höheren Werten nur zu leichten Beschädigungen kam. Bei genauer Betrachtung des betroffenen Versuchs zeigte sich, dass der Schotterstein die Bugklappe in diesem Fall durchschlug, sodass ein großes Loch entstand. Ein Großteil der Kollisionskraft war also vermutlich in die Zerstörung des Bauteils geflossen und zeigte sich daher weniger als Festkörper-Schwingung.

Bezüglich des Vogels zeigt sich eine klare Schwelle (1250 m/s^2), ab welcher sich eine deutliche Beschädigung ergibt. Dies legt nahe, dass aus der Höhe des Beschleunigungspeaks tatsächlich auf den Schaden geschlossen werden kann. Allerdings handelt es sich, wie beim Eis, in keinem Fall um ein Durchschlagen der Außenhaut, sondern um andere Defekte wie das Abfallen von Sensoren, Lösen von Befestigungen, Delamination. Im Falle eines Durchschlagens könnte ein niedriges Beschleunigungssignal entstehen, das fälschlicherweise keinen Schaden anzeigen würde. Um diese Fälle abzugrenzen, müsste ein weiteres Kriterium hinzugezogen werden.

Einfluss des Schadens auf den Signalverlauf

An der Außenhaut entstanden zumeist temporäre Eindellungen, ein Durchbruch. Es kam zum Ablösen der Anbringungspunkte, zu sichtbaren Schäden, zu Delamination und zum Ablösen der Sensoren. Die entstandenen Signale zeigten neben der erwarteten Signalform auch andere Formen, wie insbesondere Formen ohne Abschwingphase oder eindeutigen Anfangspeak.

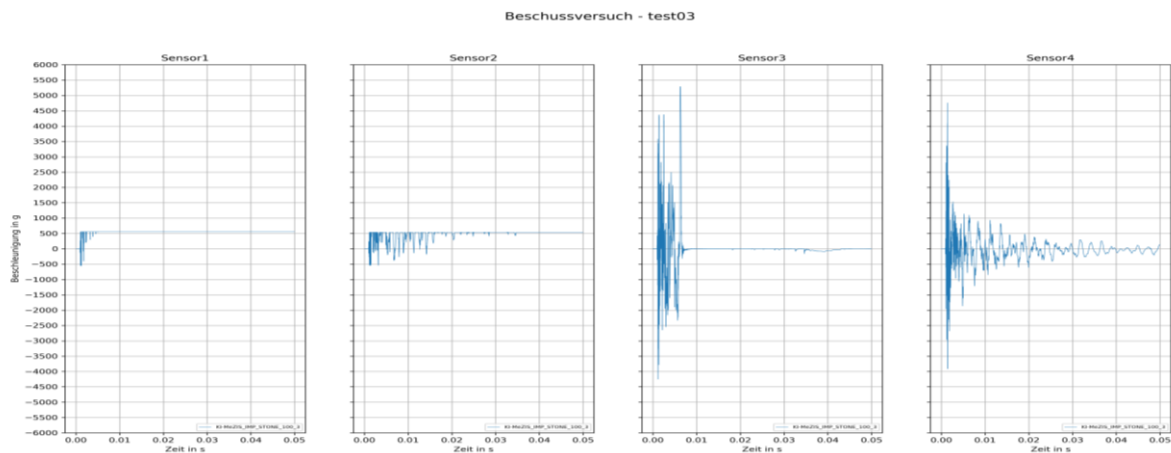


Abbildung 3.36: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren - Abweichende Signalformen des Impact Signals

Die mitgeschnittenen Videos zeigten eine hohe Varianz des Kollisionsgeschehens. Die Kollisionskörper prallten auf verschiedene Art und Weise ab, wurden teilweise selbst zerstört. Selbst bei Kontrolle von Richtung, Geschwindigkeit und Objektart zeigt sich bereits das chaotische Naturell von Kollisionen.

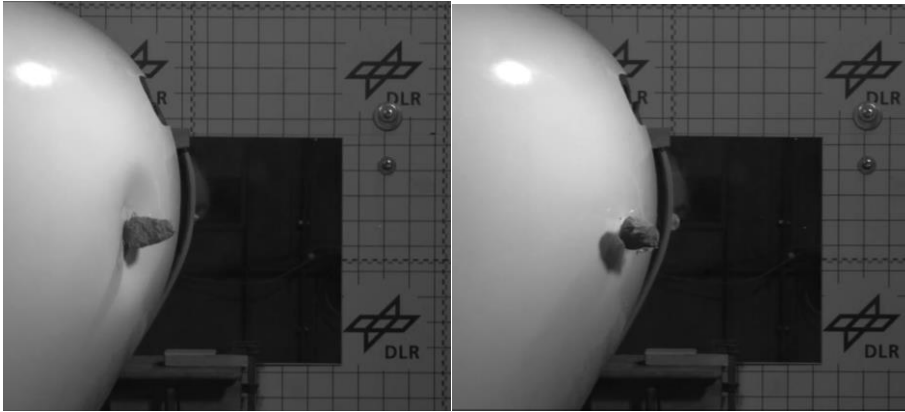


Abbildung 3.37: seitliches Abprallen des Steines als Beispiel der hohen Varianz der Beschussversuche der Bugklappe

Dabei lassen sich die Signalformen nicht durchweg bestimmten Verläufen von Kollisionen oder Schäden zuordnen, auch wenn sich einzelne Hergänge in den Signalverläufen wiederzufinden scheinen. Aufgrund der großen Bandbreite im Verhältnis zur Anzahl Versuche konnten keine Tendenzen abgeleitet werden da keine in allen Parametern vergleichbaren Szenarien entstanden sind.

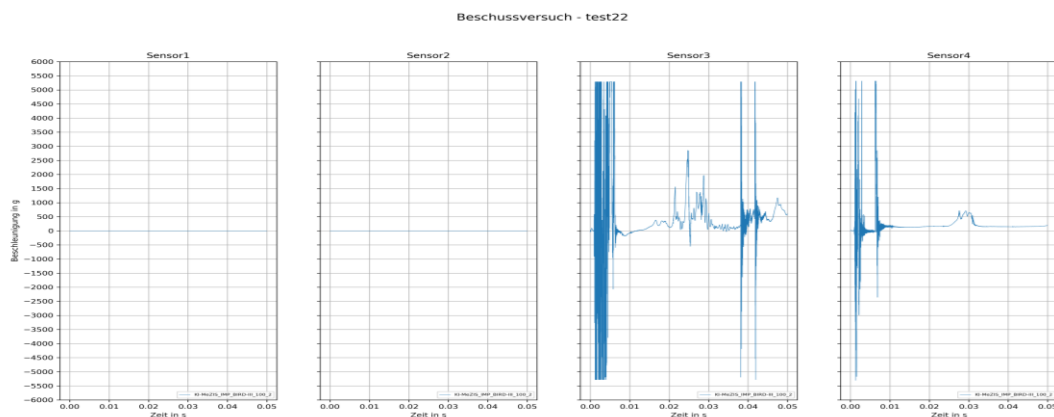


Abbildung 3.38: Zeitdiagramme der Beschleunigungssensoren - weitere Signalformen des Impact Signals (Sensor fliegt ab)

3.2.12.5 Einfluss von Masse und Geschwindigkeit

Das erwartete Signalverhalten basiert auf der angenommenen Kollisionskraft, die proportional zur Masse und Geschwindigkeit und umgekehrt proportional zur Kontaktzeit ist. Schon aus diesem Zusammenhang wird deutlich, dass der genaue Kollisionshergang, insofern er auf die Kontaktzeit wirkt, auch die Kraft der Kollision beeinflusst. Darüber hinaus wurde vom Impuls, der eine vektorielle Größe ist, der Betrag betrachtet. Dieser ist nur im Falle eines senkrechten Aufpralls korrekt und würde bei seitlichen Kollisionen entsprechend niedriger ausfallen. Weiterhin wurde in den vorherigen Abschnitten bereits gezeigt, dass zusätzlich der Abstand zum Auftreffpunkt sowie die Art der Zerstörung einen Einfluss auf die Höhe der Kollision hat. Auch konnte gezeigt werden, dass die Art des Kollisionsobjektes ebenso einen Einfluss hat.

Um den Zusammenhang zwischen Beschleunigungssignal mit Masse und Geschwindigkeit näher untersuchen zu können, wurde zu den Beschussversuchen die (kinetische) Energie wie folgt ermittelt:

$$\text{Aufprallenergie} = \text{Masse des Projektils} * 0,5 * \text{Aufprallgeschwindigkeit}^2$$

Bei den Beschussversuchen wurde auf eine fixe Position verschiedener Bugklappen gleichen Modells geschossen, sodass hier von einer geringen Varianz des Kollisionsgeschehens auszugehen ist. Die Maximalwerte des Beschleunigungssensors an der Position 4 wurden anschließend über die Kollisionsenergie geplottet.

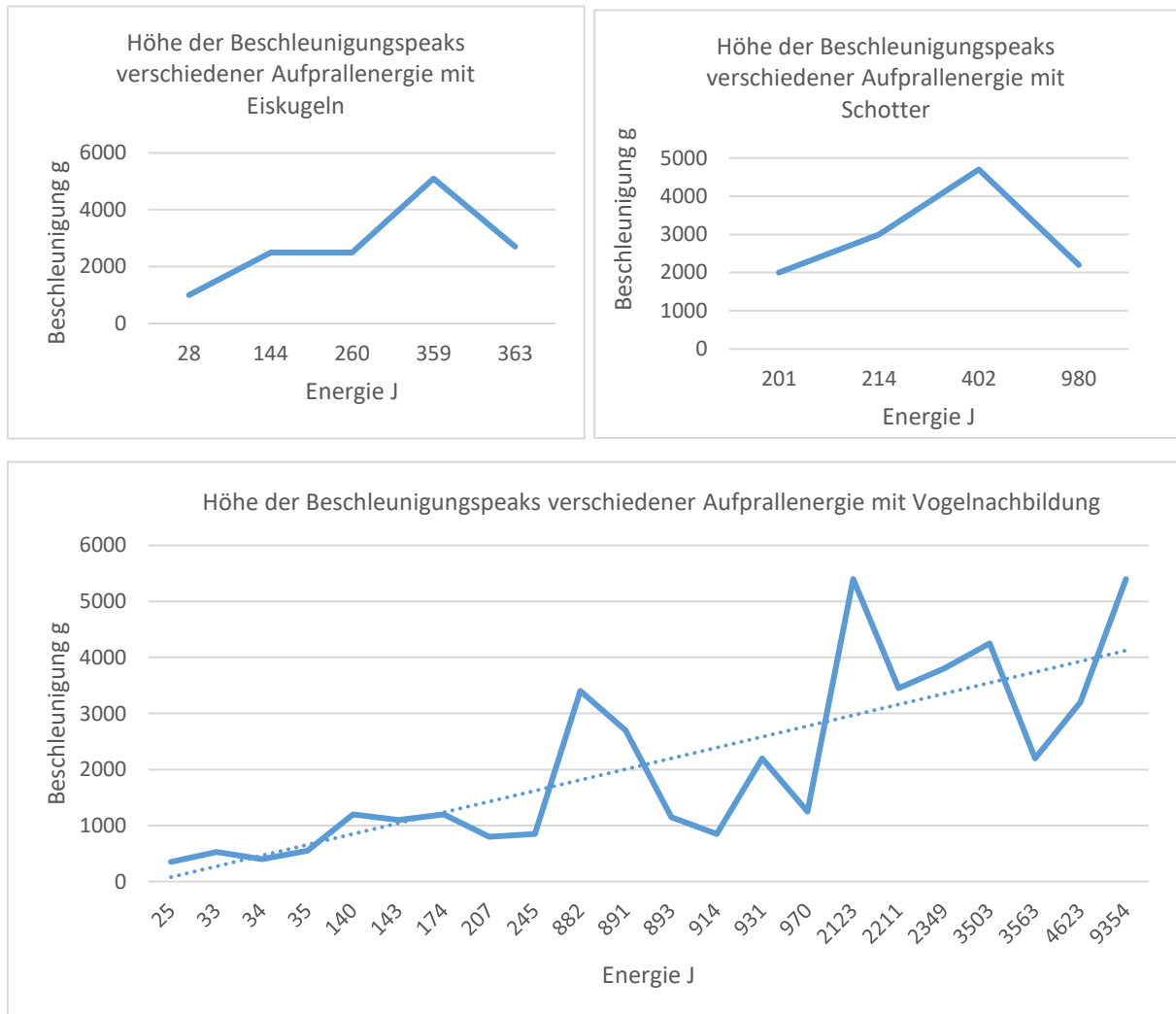


Abbildung 3.39: Mittlere Energie [J] über Maximale Beschleunigung [g] an Position 4 je Objekttyp (mit Trendlinie bei Vogelnachbildung)

Wäre das Beschleunigungssignal unmittelbar von Masse und Geschwindigkeit abhängig, so würde sich ein linear ansteigender Verlauf zeigen. Ein glatter Verlauf ist bei keinem der Objekte erkennbar. Bei genauerer Betrachtung des Kollisionsgeschehens lassen sich Unterschiede feststellen, welche den Verlauf gut erklären.

Im Falle der Eiskugel wird bei den Versuchen lediglich die Geschwindigkeit variiert, die Kugel ist immer gleich groß und auch gleich schwer. Allerdings kommt es während des Fluges in zwei Fällen dazu, dass die Kugel bricht, also gar nicht mehr mit ihrem ganzen Gewicht auf-

trifft. Dies wurde bei der Berechnung der Energie nicht berücksichtigt, zeigt sich aber in niedrigeren Beschleunigungswerten am deutlichsten beim höchsten Wert.

Beim Schotter wurde sowohl die Größe als auch die Geschwindigkeit variiert. Hier deutet sich zunächst ein linear ansteigender Verlauf an. Bei genauerer Betrachtung des letzten Versuches durchschlägt der Stein diese beim Aufprall, sodass ein großes Loch entsteht. Ein Teil der Kollisionsenergie geht also vermutlich in die Zerstörung des Bauteils und ist daher nicht im Beschleunigungssignal sichtbar.

Bei den Vögeln wurde drei Größen in verschiedenen Geschwindigkeiten getestet (Versuche auf anderem Bugklappentyp sind nicht enthalten). Ein tendenzieller Anstieg ist sichtbar (siehe Trendlinie), dieser ist jedoch gekennzeichnet durch ein stetiges Auf und Ab. Eine genauere Untersuchung der verschiedenen Kollisionshergänge bei Vögeln konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr erfolgen. Durch ihren groben Verlauf entsprechen diese Untersuchungen den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse des DLR in TP300. Hierbei konnte gezeigt werden, dass beim Vogel Geschwindigkeit und Masse (sowie Materialaufbau der Bugklappe) wesentliche Einflussfaktoren auf das resultierende Beschleunigungssignal sind. Zusätzlich konnte durch das DLR gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit einen größeren Einfluss hat als die Masse.

3.2.13 Sensordatenanalyse Radsatz Impact

Gemäß den Anforderungen an die Kollisionserkennung aus TP600 ist ein Mindestgewicht von 5kg für das Überfahren harter Objekte und ein Mindestgewicht von gefordert. Um eine solche Anforderung mit den getesteten Prototypen erfüllen zu könnten müsste die Signalthöhe des geforderten Objektgewichts (unabhängig vom Ausmaß) sich von den operativen Signalen abheben.

3.2.13.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensordatenanalyse am Radsatz

Datengrundlage der Impact-Signale am Radsatz sind Daten der Vorprojekte sowie Überfahrversuche mit dem Güterwagen beziehungsweise dem aTL, und Überfahrten während der betrieblichen Testfahrten. Die Versuche zeigen eine gute Testabdeckung bis 30km/h. Höhere Geschwindigkeiten wurden nur sehr vereinzelt abgedeckt.

Die aufgezeichneten Peaks bei Überfahrten weisen unterschiedliche Frequenzanteile auf, wobei die durch das Anheben des Radsatzes hervorgerufenen Beschleunigungswerte vorwiegend im niederfrequenten Bereich (<3000 Hz) anzusiedeln sind. Höherfrequente Signale treten zusätzlich mit teilweise höheren Beschleunigungswerten auf und sind vermutlich durch Schwingungen der Festkörperstruktur des Radsatzes bedingt. Für eine Detektion empfiehlt sich daher eine Tiefpassfilterung der Daten oder eine Erfassung der Daten mit einem geringen Frequenzband (Sensor Typ A). Eine solche Filterung verringert auch die Höhe der Peaks im operativen Signal.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass wie erwartet die Peaks harter Objekte abhängig von Ihrer Höhe und Bruchfestigkeit ist. Weiche Objekte oder Objekte, welche nicht überfahren werden, weisen geringe bis keine Peaks im Beschleunigungssignal auf.

3.2.13.1 Datengrundlage

Für die Untersuchungen der Impact-Signale am Radsatz werden die Objekte in Knochen, Weiche (Uneinheitlicher Pluralgebrauch), Harte, Gitterobjekte und Hemmschuhe unterteilt und in zwei Geschwindigkeitsbereiche 0-<15 km/h(Unüblich und schwer verständlich) sowie 15km/h-30km/h gegliedert. Höhere Geschwindigkeiten konnten aus Sicherheitsgründen im Rahmen der durchgeführten Testumgebung nicht durchgeführt werden.

Knochen	5 Fingerknochen Armknochen Schädel
Weiche Objekte	Biofidelhuhn Birkenholz
Harte Objekte	Stahlrohr Dachziegel Flachstahl 10 mm Flachstahl 6 mm Oberleitung Dachlatte Betonstück Stahlkeil 30 mm
Gitterobjekte	Einkaufswagen Fahrrad
Hemmschuhe	1 Hemmschuh 2 Hemmschuhe (beidseitig)

Tabelle 18: Objektkategorien der Überfahrerkennung

Folgende Sensoren wurden bei der Untersuchung betrachtet (vergleiche auch 2.1):

Anbringung	Fahrzeug	Na- me	Sensor Spezifika- tion	Technologie	Sensorzuliefe- rer
Führender Rad- satz rechts und links	Güterwa- gen	Typ A	Messbereich: 50 g Frequenzbereich: 0 - 1.500 Hz Sensitivität: 80 (mV/g) Orientierung: in Richtung Gleisbett Achse: uniaxial	Kapazitiv	Bay BST 54K1E-050

Führender Rad- satz rechts und links	Güterwa- gen	Typ B	Messbereich: 1.000 g Frequenzbereich: 0,7 - 10.000 Hz Abweichung Fre- quenzbereich: 5%	piezoe- lektrisch	Kistler 8715B1K0S00T
Führender Rad- satz rechts und links	aTL	IE- PE- U-09- R/L	Sensitivität: 5 (mV/g) Orientierung: ent- gegengesetzt zum Gleisbett Achse: uniaxial		
Drehimpulsge- ber			Empfindlichkeit: 1000 Impul- se/360°		Kübler Sendix 5000 2320509121

Tabelle 19: Sensoren der Überfahrererkennung

Folgende Testfahrten sowie Betriebsfahrten wurden durchgeführt:

Bezeichnung	Beschreibung	Sensor
VP	Überfahrversuche mit Güterwagen (Res- wagon No. 37 80 33997 017-3) 5 – 15 km/h vereinzelt bis 29 km/h, Bremsung mit Hemmschuh, Objekte links	Typ A
ÜF	Überfahrversuche mit Güterwagen (Res- wagon No. 37 80 33997 017-3) 5 – 30 km/h, Remote Bremsung, Objekte links	Typ A Typ B (=IEPE-U-09)
aTL	Überfahrversuche aTL, weniger Objekte, 5 – 15km/h, Objekte links	IEPE-U-09 (= Typ B)
Baumüberfahrt	13.9.2023 kam es bei 56km/h zur Überfahrt eines kleinen Baumes. Eventuell war dieser morsch.	IEP-U-09
Überfahrt Schotterstein	30.08.2023 kam es bei 39,78 km/h bzw. 48,32 hm/h zu je einer Kollision mit Ästen	IEP-U-09
Überfahrt Ast	30.08.2023 kam es bei 46,80 zu einer Über- fahrt eines Astes	IEP-U-09

Tabelle 20: Übersicht Überfahr-Versuche und Ereignisse

Folgende Testabdeckung der Versuche wurde hergeleitet:

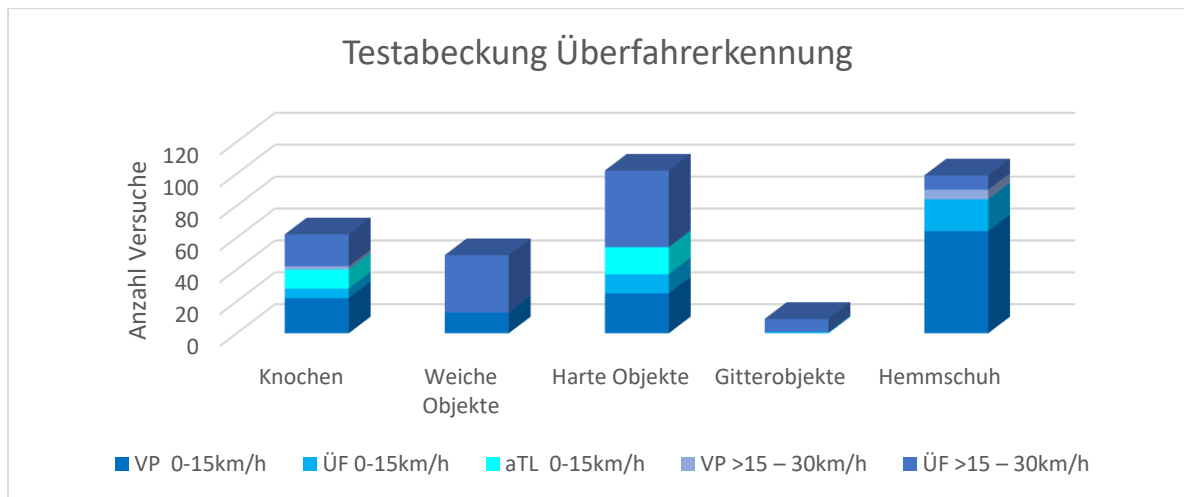


Abbildung 3.40: Testabdeckung als Anzahl der Versuche je Objekt zur Überfahrererkennung

3.2.13.1 Erwartetes Signalverhalten

Das erwartete Signalverhalten wird durch die Vorgänge während einer Überfahrt bestimmt. Befindet sich ein Objekt auf der Schiene und wird durch den führenden Radsatz eines Schienenfahrzeugs überfahren, so hebt sich dieser während des Überfahrens an und fällt anschließend wieder herab. Dies tritt sowohl auf der Seite des Objekts als auch auf der gegenüberliegenden Seite, wenn auch im geringeren Maße, auf. Gleichzeitig wirken das Gewicht des Fahrzeugs, der Geschwindigkeitsimpuls sowie der Drehimpuls der Räder auf das überfahrene Objekt ein. Dies kann ein Zerdrücken, Zersplittern, Mitschleifen oder Wegstoßen des Objekts bewirken. Beim Zerdrücken und Zersplittern kommt es zu einer entsprechend geringeren Anhebung des Radsatzes bei der Überfahrt - je nachdem wie viel Material auf der Schiene verbleibt. Beim Mitschleifen kann es zu einer Blockade des Rads kommen. Beim Wegstoßen kann ebenso ein Impuls auf das Rad wirken. Es wird erwartet, dass sich eine Radblockade am Radimpulsgeber zeigt. Der durch das Anheben bzw. Absenken verursachte Peak erhöht sich mit steigender Geschwindigkeit.

Erwartetes Signalverhalten	Überfahrt			Mitschleifen	Wegstoßen
	standhalten	zersplittern	zerdrücken		
Beschleunigungssensor	Peak	Vereinzelte Peaks	Geringer bis kein Peak	-	Geringer bis kein Peak
Drehimpulsgeber	-	-	-	Blockade	

Tabelle 21: Erwartetes Signalverhalten, abhängig von der Objektzerstörung

3.2.13.1 Einfluss des Sensors auf das Impact Signal

Schon bei der Analyse des Grundrauschens sowie des situativen Rauschens am aTL hatte sich gezeigt, dass die Signale der beiden verwendeten Sensoren (Typ A und Typ B) sich

erheblich unterschieden. Der Einfluss des Sensors auf das Impact-Signal wurde daher anhand der Daten der Überfahrversuche untersucht.

Dabei zeigte sich, dass die Ereignis-Peaks der Knochen- und harten Objekte beim Typ-A-Sensor geringer ausfielen als beim Typ-B-Sensor. Bei weichen Objekten sowie Drahtobjekten ergaben sich dagegen kaum Unterschiede (siehe Abbildung unten).

Dabei scheinen jedoch die größeren Höhen der Ereignis-Peaks die Unterschiede im situativen Rauschen und den operativen Peaks jedoch nicht zu kompensieren. Sensoren des Typ A können im Bereich der getesteten Geschwindigkeiten Objekte daher wesentlich besser erkennen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass, sollten diese Sensoren höheren Geschwindigkeiten ausgesetzt sein, ihre Schockfestigkeit entsprechend hoch sein müsste. Die verwendeten Sensoren vom Typ A wiesen eine Schockfestigkeit von 10.000 g auf (entspricht ca. 1020 m/s²), welche durch das erfasste situative Rauschen bei mittleren Geschwindigkeiten bereits deutlich überschritten wird. Bei den weiteren Untersuchungen wird daher der Fokus auf Sensoren des Typs B gelegt.

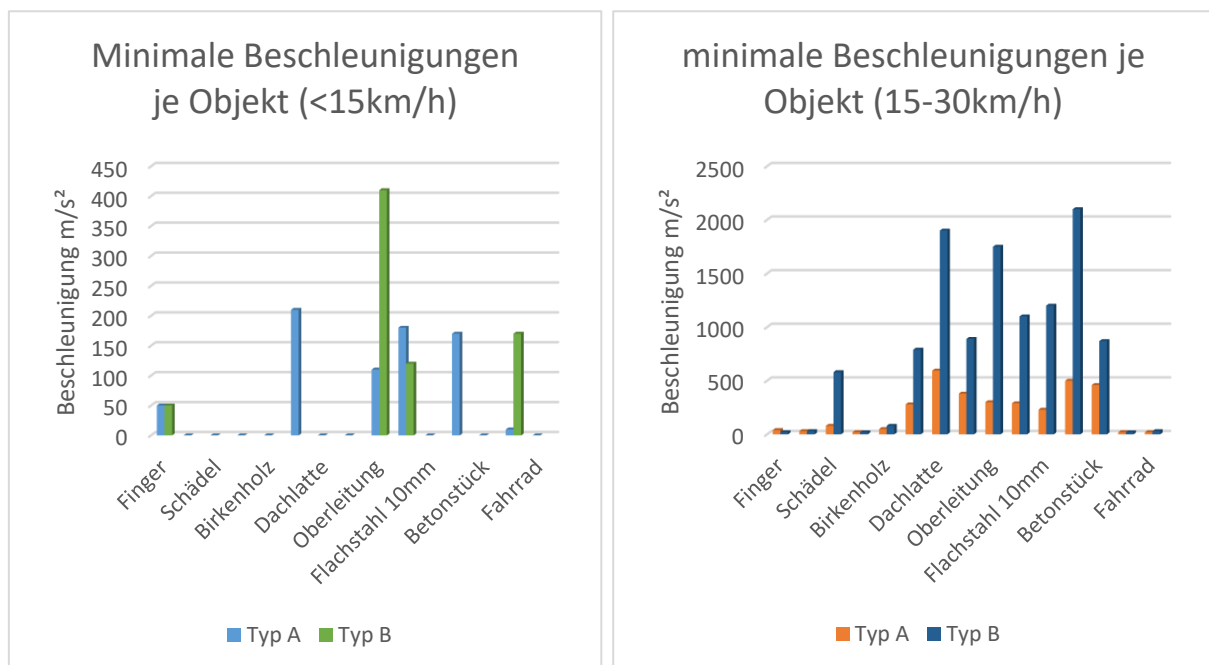


Abbildung 3.41: Höhere minimale Peaks je Objekt bei Sensor Typ A und B im Vergleich

3.2.13.2 Frequenzanteile im Impact Signal

Die Unterschiede im situativen Rauschen der beiden Sensoren lassen sich vermutlich vorwiegend auf die unterschiedlichen Frequenzbänder zurückführen. Eine Tiefpassfilterung konnte dabei das situative Rauschen erheblich reduzieren. Wie sich ein solcher Filter auf die Ereignis-Peaks auswirkt, wurde ebenfalls untersucht und soll hier dargestellt werden.

In den folgenden Diagrammen sind die maximalen Beschleunigungen je Versuch und Objekt beim Sensor B dargestellt. Dabei fällt bei den ungefilterten Diagrammen auf, dass keine klare Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu erkennen ist. Die Höhen der Beschleunigungswerte weisen von Versuch zu Versuch eine hohe Abweichung auf.

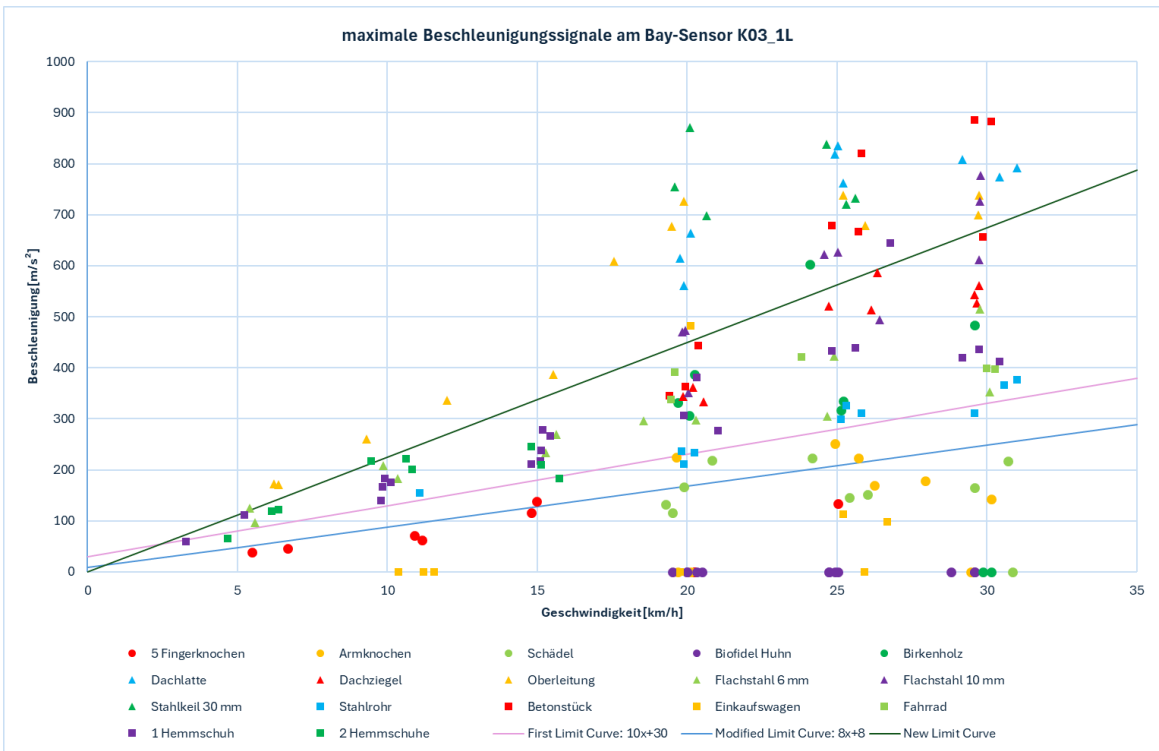


Abbildung 3.42: Maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B (Anschnitt)

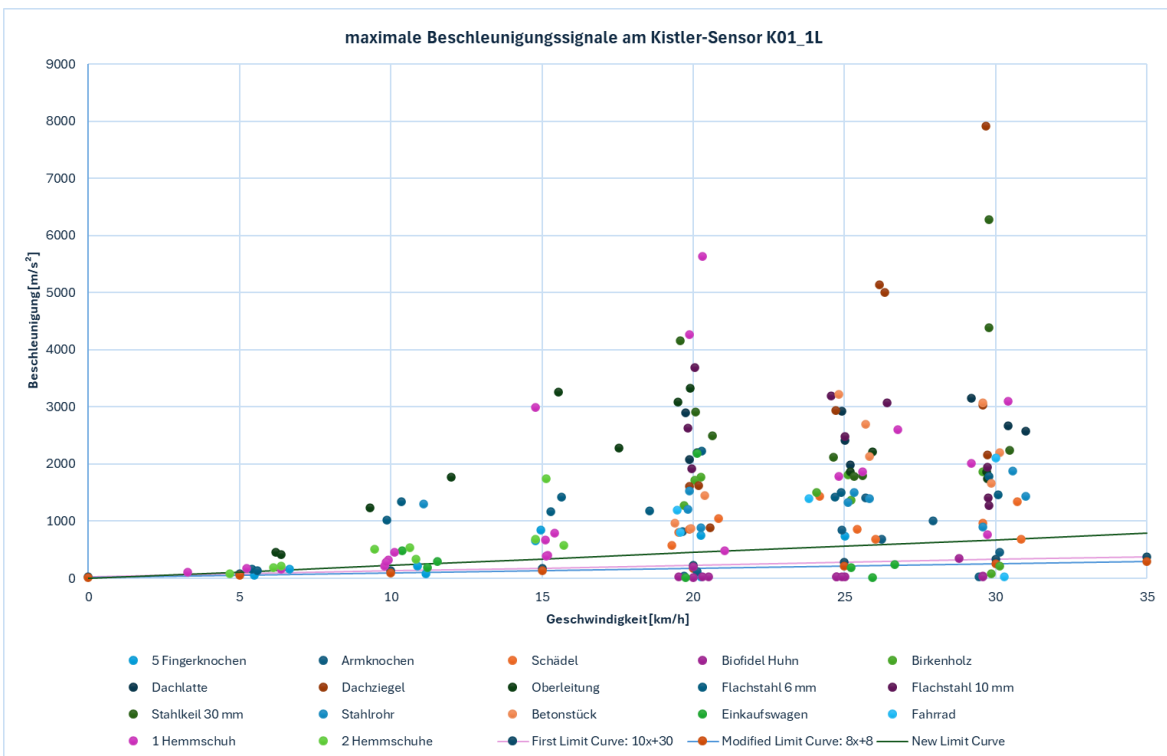


Abbildung 3.43: Maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B

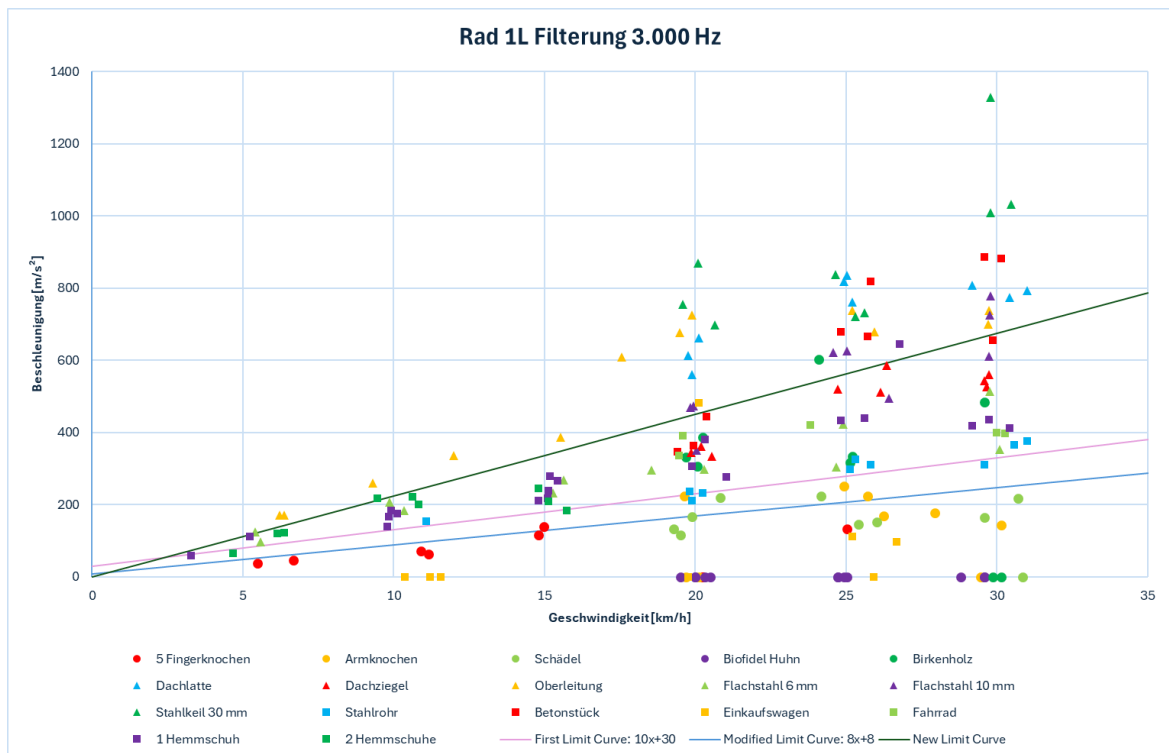


Abbildung 3.44: Gefilterte maximale Beschleunigungssignale je Objekt am Sensor Typ B

Diese Abweichung verringert sich durch die Filterung der Daten erheblich. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit lässt sich nun erkennen.

Eine Interpretation dieser Beobachtung ist, dass sich das Signal nun auf das Anheben bzw. Herabfallen des Rades bei der Überfahrt beschränkt, da dieser Vorgang im niedrigen Frequenzbereich angesiedelt ist. Ohne Filterung würden zusätzlich hochfrequente Schwingungen der Fahrzeugstruktur erfasst, die im Zusammenhang mit der Überfahrt, auch durch Stöße oder Objektsplitter verursacht worden sein können. Die Tatsache, dass das Biofidelhuhn sowie einige der Fahrten des Einkaufswagens, des Birkenholzes sowie des Schädels durch die Filterung einen Beschleunigungswert nahe null aufweisen, stützt diese These.

Die Abgrenzung gegenüber dem situativen Rauschen wird durch die hochfrequenten Signalanteile ebenfalls nicht erleichtert, da deren Höhe nicht mit zunehmender Geschwindigkeit steigt. Daher wird empfohlen, die Erfassung auf den niederfrequenten Bereich zu beschränken oder das Signal zu filtern.

3.2.13.3 Einfluss der Objekhärte und -höhe auf das Impact-Signal

Wie beim erwarteten Signalverhalten von Impact-Signalen beschrieben, zeigte sich, dass harte Objekte die höchsten Peaks aufweisen. Weiche Objekte wiesen je nach Ausmaß der Kompression geringe bis keine Peaks auf. Objekte, wie Knochen, die zersplitterten, oder der Schädel, der weggestoßen wurde, zeigen im Median die geringste Peak-Höhe, wobei das erste Quartil aufgrund kleiner überfahrener Teile über den ganz weichen Objekten liegt.

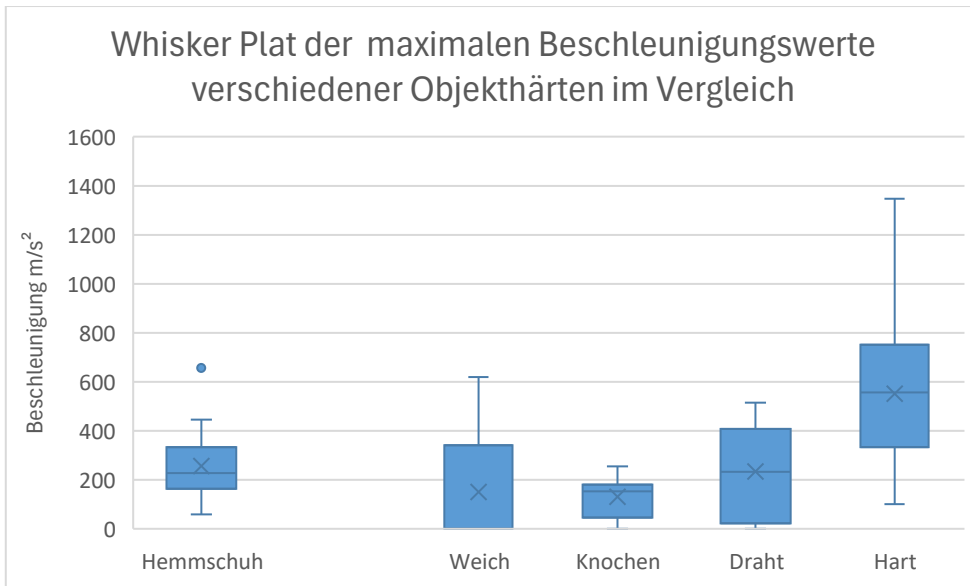


Abbildung 3.45: Verteilung der mit 3000 Hz gefilterten Maximalwerte je Objekt am Sensor Typ B

Da die Bandbreite der getesteten Objekte bei den harten Objekten am größten war, wurde hierzu die Verteilung der Maximalwerte nach Objekttyp ergänzend betrachtet. Dabei bestätigte sich die Abhängigkeit von der Objekthöhe. Die Sortierung wurde anhand von Objektbildern validiert.

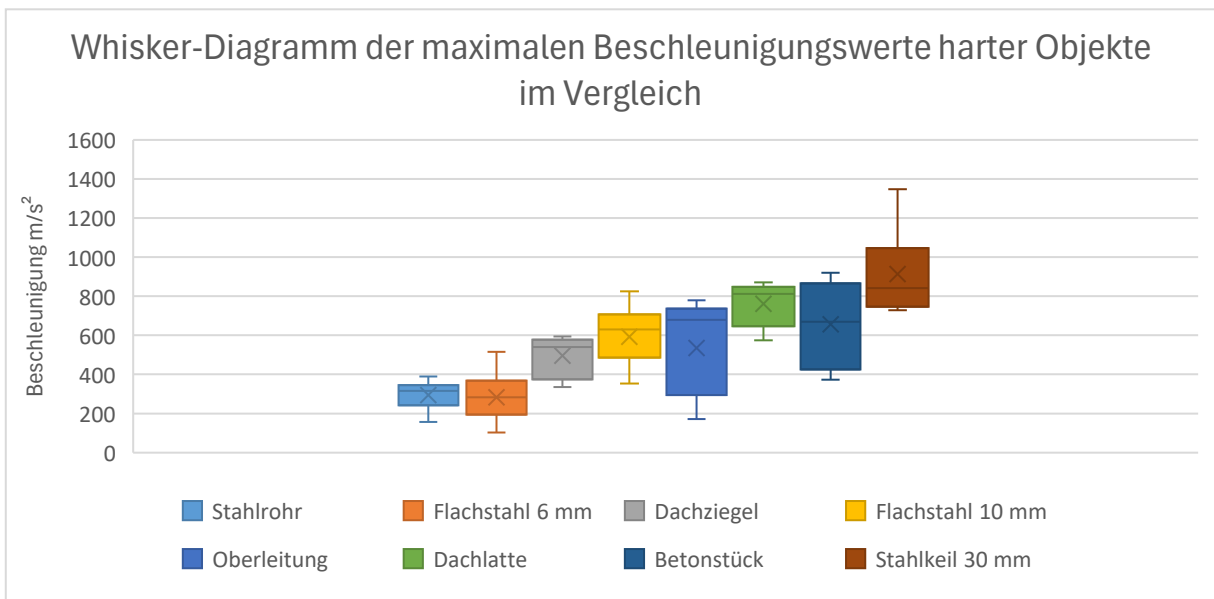


Abbildung 3.46: Verteilung der mit 3000 Hz gefilterten Maximalwerte je hartes Objekt am Sensor Typ B

3.2.14 Erkennbarkeit und Sensordatenfusion

Das aTL wurde zur Kollisionserkennung an der Front sowie zur Überfahrererkennung mit 12 Beschleunigungssensoren, einem Drehimpulsgeber sowie 9 Dehnmessstreifen ausgestattet. Welche Sensoren sich zur Erkennung welcher Kollisionen eignen, wurde ermittelt.

Der Fokus wurde dabei – analog zum Sensorkonzept und der Plausibilitätsprüfung – auf ausgewählte Beschleunigungssensoren an der Kupplung der Bugklappe, dem Unterfahrerschutz an der Front sowie separat auf die Sensoren des Radsatzes gelegt.

3.2.14.1 Erkennbarkeit an der Frontsensorik

Für die Sensoren an der Front wurde zunächst die Erkennbarkeit verschiedener Masse-Geschwindigkeits-Kombinationen pro Bauteil ausgewertet und daraus ein Fusionskonzept abgeleitet. Für die Interpretation der Erkennungshypothese sollte – wie in der Analyse des Impact-Signals hergeleitet – das maximale Kollisionsgeschehen in Abhängigkeit der Masse-Geschwindigkeits- Kombination zugrunde gelegt werden.

Dabei wurde die folgende Farbgebung verwendet:

	Hebt sich vom situativen Rauschen ab
	Geht eventuell über das situative Rauschen hinaus
	Verschwindet im situativen Rauschen
	Liegt außerhalb des Messbereichs

Tabelle 22: Verwendete Farbgebung für die Erkennungshypothese

Auf Basis der in Abschnitt 3.2.12.3 ermittelten Datengrundlage wurden – im Vergleich mit dem entsprechend Abschnitt 3.2.5 eingetragenen situativen Rauschen – Erkennungshypothesen für die jeweiligen Bauteile je Geschwindigkeitsbereich erstellt. Die folgenden Tabellen stellen dies am Beispiel der Sensorik an der Kupplung dar. Für nicht vorhandene Werte erfolgte eine Schätzung.

Train Starting	Geschwindigkeit (km/h) Gewicht (t)	0,00 4	0, 2	0, 3	0, 4	0,8	1	1, 5	2	3	4	4,5	5
Peaks		33											
Situatives Rauschen		6											9
Car	1												
	2												
Truck	3												1 4
	4												5 0

	5									14	50	140		
	8								14					
	10								50					
	15								14					
	20								50					
	50								50					
	55								130	90	250			
Train	75								14	50	470	490	500	
	100								50					
	4200								14					

Tabelle 23: Erkennbarkeitshypothese für Train starting (0-5 km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s²)

Low Velocity	Geschwindigkeit (km/h)		6,5	10	20	30	40	50	65	80	
Peaks									18		
Situatives Rauschen			9							11	
light impacts	tree	unknown						7,8			
	Small animal	190 kg								14	
		300 kg						14	50		
		400 kg					14	50			
heavy impacts	big animal	500 kg				14	50				
		700 kg			14						
	car	1t			50						
		1,5t		14							
		2t		50							
		3t	50								

Tabelle 24: Erkennbarkeitshypothese für low Velocity (0-5km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s²)

High Velocity	Geschwindigkeit (km/h) → Gewicht (t) ↓	80	100	200
peaks			90	
Situatives Rau-		11		14
small animals	75 kg			14
	100 kg			50
	150 kg		14	
	200 kg		50	

Tabelle 25: Erkennbarkeitshypothese für High Velocity (>80 km/h) an der Kupplung, Werte in (m/s²)

Aus diesen Einzelergebnissen je Geschwindigkeitsbereich wurde eine konsolidierte Erkennungshypothese abgeleitet. Diese zeigt, dass die Kupplung sich für die Erkennung schwerer Kollisionen eignet. Außer im Fall sehr schwerer Objekte ist eine Mindestgeschwindigkeit von 30 km/h für eine Erkennung erforderlich. Werden die vorhandenen Peaks berücksichtigt, ist eine Mindestgeschwindigkeit von 40 km/h erforderlich.

		Train Starting	Low Velocity	High Velocity
light impacts	bigger insects			
	birds			
	small tree		Baumüberfahrt	
	human			
	Animals with limbs			Kupplungsversuche Vorprojekt
heavy impacts	Big Animals		> 30km/h Kupplungsversuche Vorprojekt	
	Tree			

	Car			> 20km/h Kupplungsversuche Vorprojekt	
	Truck				
	Train	Impact Test Vorprojekt			
		Kupplungsversu- che Vorprojekt			
		Kupplungsversu- che (bis 2km/h)			

Tabelle 26: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese an der Kupplung

Das Vorgehen wurde analog für die Sensorik an der Bugklappe sowie am Unterfahr-
schutz durchgeführt.

		Train Starting	Low Velocity	High Velocity
light impacts	bigger insects			Simulation Bugklappe +Beschussversuche
	birds	>3,6 km/h Simulation Bugklappe	Simulation Bugklappe	Simulation Bugklappe +Beschussversuche
	small tree / branch		Baumüberfahrt Äste links	
	human	>3,6 km/h Simulation Bugklappe	Simulation Bugklappe	
	Animals with limbs	>3,6 km/h Simulation Bugklappe		
heavy impacts	Big Animals			
	Tree			
	Car			
	Truck			
	Train			

Tabelle 27: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese an der Bugklappe

Dabei zeigte sich, dass an der Bugklappe der Anfahrbereich, vermutlich ab 3,6 km/h abgedeckt werden kann, und sich mittlere Objekte auch bei mittleren Geschwindigkeiten sowie Kleine Objekte bei hohen Geschwindigkeiten erkennen lassen.

Berücksichtigt man an der Bugklappe den Einfluss von Peaks und den des Typhons, ist eine Detektion vermutlich erst ab 50 km/h möglich.

Wird zudem der Einfluss von Regen bei hohen Geschwindigkeiten berücksichtigt, so ist davon auszugehen, dass sich Vögel davon vermutlich nicht abheben werden.

Inwiefern auch Kollisionen außerhalb des Messbereichs der verwendeten Sensorik erkannt werden können, konnte im Rahmen des Projektes nicht untersucht werden.

Die Erkennungshypothese am Unterfahrschutz beinhaltet aufgrund der begrenzten Testabdeckung einen großen Unsicherheitsbereich. Der mögliche Erkennungsbe- reich beginnt ab kleineren Bäumen und erstreckt sich über alle Geschwindigkeitsbe- reiche.

Dabei ist davon auszugehen, dass bei der Anfahrt vermutlich nur sehr schwere Ob- jekte erkannt werden können und sich diese im Hochgeschwindigkeitsbereich ver- mutlich außerhalb des Messbereichs befinden.

		Train Starting	Low Velocity	High Velocity
light impacts	bigger insects			
	birds			
	small tree		Baumüberfahrt	
	human		> 10km Experimente Schaukel	
	Animals with limbs			
heavy impacts	Big Animals			
	Tree			< 160km/h Simulation Unterfahrschutz
	Car			
	Truck	> 1 km/h Kupplungsversuche Vorprojekt		
	Train	>1 km/h Kupplungsversuche		

			Vorprojekt Lab Test Vorprojekt Kupplungsversuche		
--	--	--	--	--	--

Tabelle 28: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese am Unterfahrschutz

V (km/h)	Object	train starting			low velocity			high velocity		
		Nose Flaps	Pilot	Coupling	Nose Flaps	Pilot	Coupling	Nose Flaps	Pilot	Coupling
light impacts	bigger insects	Orange	Orange	Orange	Peaks	Orange	Orange	rain Peaks (unfiltered)	Orange	Orange
	birds	Peaks	Orange	Orange	> 50km/h Simulation	Orange	Orange		Orange	Orange
	small tree / branch	Orange	Orange	Orange	> 50km/h Baum/Ast (Testfahrt)	Peaks Pendel	Baum/Ast (Testfahrt)		Orange	Orange
	human	Orange	Orange	Orange	> 50km/h Simulation	Pendel	Pendel		Orange	Orange
	Animals with limbs	Orange	Orange	Orange						Peaks
	heavy impacts	Big Animals	Orange	Orange	Orange			Peaks	>40km/h analog VP Kupplungstests	Pendel
	Tree	Orange	Orange	Orange				>40km/h analog VP Kupplungstests	< 160 Pendel	Orange
	Car	Orange	Orange	Orange				>40km/h analog VP Kupplungstests		Orange
	Truck	Orange	Peaks	Orange						Orange
	Train	Orange	Peaks > 2 km/h Kupplungstests	Peaks > 0,5km/h Kupplungstests						Orange

Abbildung 3.47: Konsolidierte Erkennbarkeitshypothese – Einschränkungen durch Peaks, Typhon und Regen.

3.2.14.2 Erkennbarkeit an der Sensorik am Radsatz

Für die Erkennbarkeit von Überfahrungen durch die Sensorik am Radsatz konnte aufgrund der vorhandenen Datengrundlage für den Bereich 0-30 km/h eine Hypothese aufgestellt werden.

In den Versuchen zeigte sich, dass sich Überfahrungen in diesem Geschwindigkeitsbereich als Beschleunigungspeaks im Frequenzspektrum bis 3000 Hz sichtbar werden und für harte Objekte ab einer Höhe von ca. 20 mm vom situativen Rauschen abgrenzbar sind.

Enthaltene höhere Frequenzen werden im getesteten Geschwindigkeitsbereich vermutlich nicht durch das Anheben des Rads verursacht und sind daher nicht klar von operationalen Ereignissen abgrenzbar. Eine Überprüfung dieser These durch Untersuchung der aufgetretenen operationalen Peaks bietet sich an.

Für die Auswertung der Erkennbarkeit am Radsatz wurde anhand der Grenzwerte für das situative Rauschen eine neue Grenzkurve durch lineare Interpolation ermittelt.

Die Abbildung zeigt der Übersicht halber nur die verbleibenden drei erkennbaren Objekte bei einer Filterung mit 3000 Hz. In diesem Fall ist noch die Dachlatte, die Oberleitung sowie der Stahlkeil erkennbar. Die Beschleunigungswerte des 10 mm Flachstahl liegen zumindest teilweise unterhalb der Kennlinie und wurden daher nicht in die Grafik aufgenommen.

Durch Analysen konnte gezeigt werden, dass die Erkennbarkeit in den durchgeführten Versuchen von der Objekthärte und der Objekthöhe abhing. Auch die Abgrenzung zur neuen Grenzkurve zeigt, dass ausschließlich harte Objekte mit einer gewissen Mindesthöhe erkannt werden können. Diese liegt zwischen 10 mm und 30 mm und wird daher auf 20 mm geschätzt.

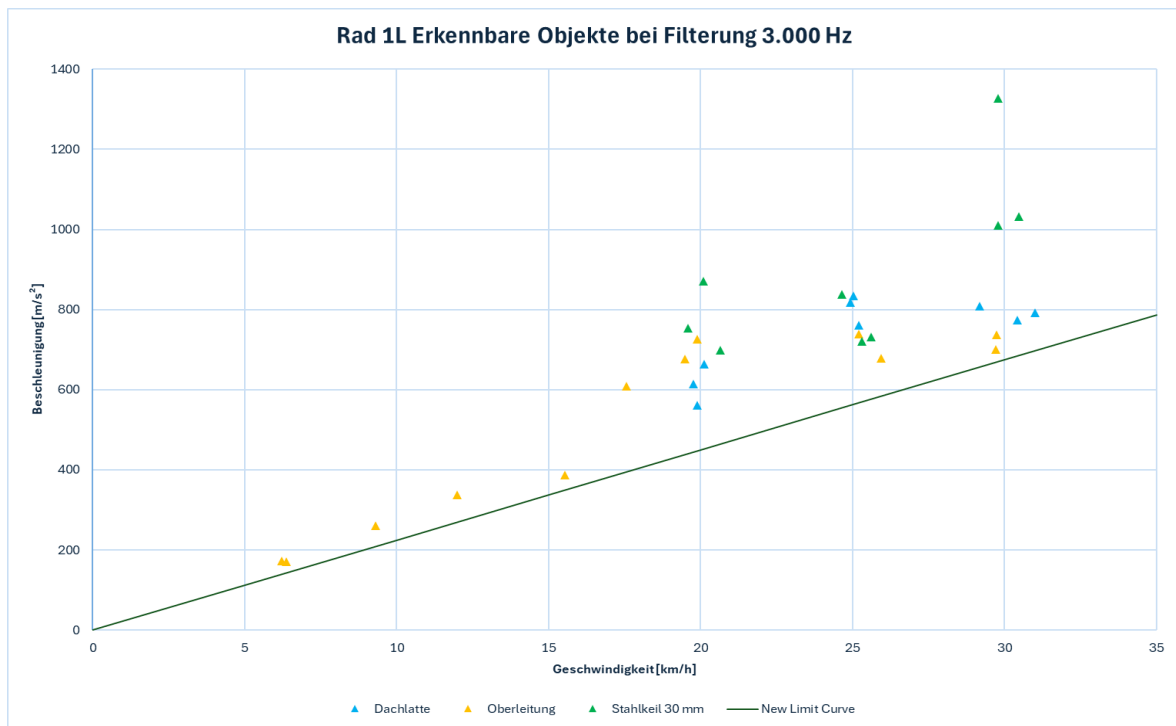


Abbildung 3.48: Beschleunigungswerte erkennbarer Objekte im Vergleich mit dem linear interpolierten situativen Rauschen bei Filterung von 3000 Hz.

Für die Erkennung werden Beschleunigungssignale in einem Frequenzbereich von unter 3000 Hz ausgewertet, da höhere Beschleunigungen vermutlich nicht durch Radanhebungen aufgrund der Objekte verursacht werden. Es ist jedoch möglich, dass im Bereich höherer Geschwindigkeiten, aufgrund kürzerer Überfahrzeiten, auch höherfrequente Ereignisse betrachtet werden müssen. Eine Filterung müsste in diesem Fall Geschwindigkeitsabhängig erfolgen. Eine Abgrenzbarkeit zu operationalen Signalen könnte anhand der Peak-Höhe erfolgen.

Erkennbarkeitshypothese	0-15 km/h	15-30 km/h	>30 km/h
Harte Objekte	>20 mm	> 20 mm	
Weiche Objekte			
Knochen			
Draht			
Hemmschuh	Radblockade	Radblockade	

--

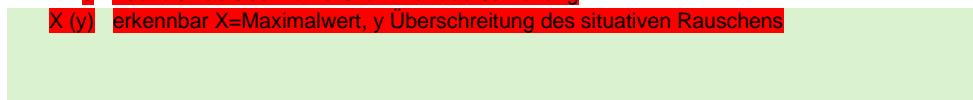
	erkennbar
	vermutlich erkennbar (zu geringer Datensatz)
	nicht erkennbar
	wurde nicht untersucht

Tabelle 29: Erkennbarkeitshypothese am Radsatz

Die während der Testfahrten aufgezeichneten Ereignisse zeigen, dass bei höheren Geschwindigkeiten zwischen 40 und 50 km/h Überfahrten von Ästen und Schottersteinen durchaus erkannt werden können. Leider ist die Stichprobe für das Ableiten einer diesbezüglichen Erkennungshypothese allerdings zu gering. Eine weiterführende Untersuchung des Frequenzspektrums wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Da- tum/Uhrzeit	Ereignis	Radsatz links IEPE U09-R	Radsatz rechts IEPE U09-R
30.08.2023			
10:35:43	Überfahrt eines kleinen Astes (54,53)	2	2
10:36:14	Stroh (43,43)	2	2
10:41:25	Überfahrt eines Astes (46,80)	1875,67 (+200)	1
10:42:54	Überfahrt von Schottersteinen (39,78)	6737,7 (+4400)	2452,7 (+800)
13.09.2023			
11:20:58	Baumüberfahrt (55,59)	2	2
13:49:27	Schienenfehler (35,09)		
06.03.2024			
10:14:17	Ast überfahren (13,33)		
10:36:36	Stroh überfahren (28,85)	1	1
10:38:58	Schotterstein überfahren (48,32)	2	1708,26 (+100)
10:40:27	Zweig überfahren (29,00)	1	1

- leer Keine Sichtbarkeit im Signal
- 1 allgemein höheres Hintergrundrauschen
- 2 sichtbar in erhöhtem Hintergrundrauschen
- 3 hebt sich ab aber keine Grenzwertüberschreitung
- X (y) erkennbar X=Maximalwert, y Überschreitung des situativen Rauschens



Code	Bedeutung
leer	Keine Sichtbarkeit im Signal
1	Allgemein erhöhtes Hintergrundrauschen
2	Signal ist im erhöhten Hintergrundrauschen sichtbar
3	Signal hebt sich ab, aber überschreitet nicht den Grenzwert
X (y)	Eindeutig erkennbar – X = Maximalwert (m/s ²), y = Überschreitung in m/s ²

Tabelle 30: Erkennbarkeit der Überfahr-Szenaren während der Testfahrt mit dem aTL

Sollen in einem Zielsystem nur Ereignisse bis 30 km/h erkannt werden, das Fahrzeug jedoch auch mit höheren Geschwindigkeiten fahren, so setzt dies den Einsatz von Sensoren mit einer entsprechend hohen Schockfestigkeit voraus.

Die verwendeten Sensoren Typ B mit 1000 g Messbereich hatten einen Schockfestigkeit bis 5000 g, welche bei den hohen, während des Betriebs auftretenden Peaks, als zu gering angesehen werden kann.

3.2.14.3 Fusionskonzept

Aus den Analysen der Erkennbarkeit der Sensoren an der Front sowie am Radsatz wurde ein Fusionskonzept erstellt.

Dabei wurden:

- die Ergebnisse der Bugklappe als repräsentativ für die Außenhaut,
- die des Unterfahrschutzes als repräsentativ für die tragende Struktur herangezogen.

Um eine Zuordnung der Sensoren zu spezifischen Objektklassen zu ermöglichen, wurde eine Klassifizierung wie folgt vorgenommen:

Very light impacts: insects, birds, branches/small tree

Light impacts: human, small animal

Heavy impacts: big animals, big tree, car

Very heavy impacts: truck, train

Drive over: rigid objects >20mm

Kategorie	Beispiele
Very light impacts	Insekten, Vögel, Äste, kleine Bäume
Light impacts	Menschen, kleine Tiere
Heavy impacts	Große Tiere, große Bäume, Autos
Very heavy impacts	Lkw, Züge
Drive over	Starre Objekte > 20 mm

Anschließend wurden den jeweiligen Bereichen die Sensoren mit einer positiven Erkennungshypothese zugeordnet. Dabei zeigt sich, dass durch die Außenhaut und die Tragstruktur im Wesentlichen alle Bereiche abgedeckt werden können. Die obere linke Hälfte durch die Außenhaut und die untere rechte durch die Tragstruktur. Für schwere und sehr schwere Kollisionen können Sensoren an der Kupplung ergänzend hinzugezogen werden.

Bei dieser Fusionshypothese ist jedoch zu beachten, dass Kollisionen von Peaks – insbesondere durch das Typhon verursachte – unterschieden werden müssen, um eine sichere Detektion an der Außenhaut sowie an den Randbereichen von Kupplung und Tragsstruktur zu gewährleisten.

	Train Starting	Low Velocity		High Velocity	
very light impacts	Typhon	> 50 km/h		Rain	
light impacts	Typhon	> 50 km/h	> 50 km/h		
heavy impacts			> 40 km/h		
very heavy impacts		peaks	peaks		
Drive over		< 30 km/h			

Außenhaut	Tragstruktur	Kupplung	Radsatz
-----------	--------------	----------	---------

Tabelle 31: Fusionskonzept Front

3.2.15 Wahl und Bewertung von KI-Verfahren

Wir haben die IA GmbH über die gesamte Projektlaufzeit hinweg mit unserer fachlichen Expertise beraten und die verschiedenen KI-Ansätze und Vorgehensweisen miteinander diskutiert. Aufgrund von Zulassungskriterien wurden dabei von Beginn an nachvollziehbare Verfahren favorisiert. Dies war auch wegen der geringen Kenntnis über die Daten hilfreich und begründete den Fokus auf schwellenwertbasierte Verfahren.

Darüber hinaus wurden Verfahren diskutiert, die ein besseres Verständnis der Daten ermöglichen könnten. Aufgrund der Datenkomplexität sowie unvollständiger Beschriftung kam jedoch keine Anomalieerkennung infrage. Stattdessen wurde auf schwellenwertbasierte Verfahren und statistische Methoden zurückgegriffen.

Zukünftig könnten auf Basis der durchgeführten Analysen gezielt Datensätze für die Anomalieerkennung erstellt werden, die aufgrund der Testumgebung nur selten Anomalien enthalten und somit für unüberwachte Verfahren geeignet sind. Alternativ könnten aus den gemachten Analysen Annotationen von über das normale situative Rauschen hinausgehenden Situationen gemacht und für ein Training herangezogen werden.

Während sich die Analysen im Rahmen von Ki-MEZIS primär auf das Zeitsignal der Beschleunigungen richteten, konnten für die Ki-Algorithmen zusätzlich die Ableitungen Geschwindigkeit, Weg, aber auch die Frequenzbänder oder andere Modalitäten einbezogen werden.

Neben der Kollisionsdetektion zeigten die Analysen die Wichtigkeit der Abgrenzbarkeit von Peaks, insbesondere des Typhon-Peaks. Auch in diesem Zusammenhang erscheint der Einsatz von KI-Algorithmen in zukünftigen Projekten sinnvoll.

4 Schadensfälle im Fahrwerksbereich (TP200)

Im Rahmen des Teilprojekts 230 lag der Schwerpunkt auf der Erfassung und Analyse von Erfahrungen und Wahrnehmungen von Lokführern und Werkstattpersonal in Bezug auf mögliche Schadensfälle im Fahrwerksbereich. Ziel war es, durch eine strukturierte Befragung wertvolle Erkenntnisse über potenzielle Auffälligkeiten und wiederkehrende Probleme im Betrieb zu gewinnen. Die erfassten Ergebnisse wurden anschließend in die Schadensbibliothek des Teilprojekts 220 integriert, um eine systematische Dokumentation und zukünftige Analyse dieser Vorfälle zu ermöglichen.

Die Untersuchungen wurden vom IFB als Unterauftragnehmer der DB InfraGO AG durchgeführt.

4.1 Werkstattbefragung

In ersten Schritt wurde eine Werkstattbefragung durchgeführt. Im Rahmen dieser Befragung wurde Werkstattpersonal zu allgemeinen und spezifischen Vorfällen befragt. Es wurde untersucht, welche Schäden typischerweise häufig und welche eher selten auftreten. Weiterhin wurden typische Ursachen identifiziert.

Abbildung 4.1 zeigt Beispiele für übliche Ursachen und Schäden. In den Bildern auf der linken Seite ist der betroffene Bereich jeweils gelb umrahmt. Die verursachten Schäden sowie deren typische Ursachen sind der zugehörigen Tabelle aufgeführt.

Übliche Schäden & Ursachen



Schaden	Ursache
Zerstörung Spitzenbeleuchtung	Baum
Verformung Rangier-, Einstiegstritte	Wild, Baum
Zerstörung Frontscheibe	Baum, Steine (Schotterflug)
Zerstörung Bugklappe	Wild
Verformung, Zerstörung Frontverkleidung	Gleistor, Baum
Verformung Geländer	Gleistor

Abbildung 4.1: Übliche Schäden und Ursachen

Darüber hinaus wurden gängige Schäden und deren Ursachen auch für weitere Bereiche des Zuges untersucht. Die in der Werkstattbefragung identifizierten und tabellarisch aufbereiteten Bereiche umfassen:

- die obere Front sowie die Frontscheiben (siehe Abbildung 4.1),

- die untere Front,
- den Fahrwerksbereich,
- und den Dachbereich der Fahrzeuge.

In einem nachfolgenden Schritt wurden spezielle Aufprallereignisse untersucht. Ein Beispiel wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Zum einen wird das Ereignis geschildert und weiterhin die werden Schäden und die notwendigen Maßnahmen beschrieben. Insgesamt wurden fünf spezifische Schadensereignisse mit unterschiedlichen Schweregraden untersucht.

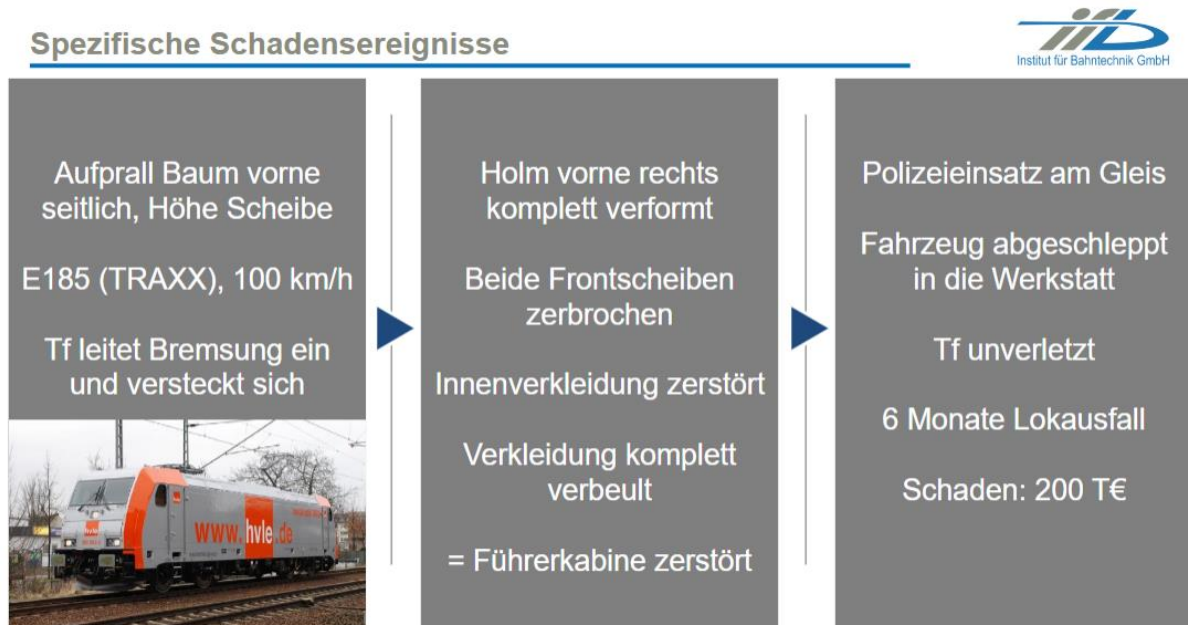


Abbildung 4.2: Spezielles Aufprallereignis.

4.2 Planung und Durchführung der Befragung der Lokführer

Neben der Werkstattbefragung wurde auch eine Lokführerbefragung durchgeführt. Diese Befragung wurde online durchgeführt. Zu Beginn wurde ein detaillierter Fragebogen entwickelt, der sich auf die Wahrnehmung von Unregelmäßigkeiten im Fahrwerksbereich konzentrierte. Die Fragen zielten darauf ab, welche ungewöhnlichen Vibrationen, Geräusche oder sonstige Auffälligkeiten die Lokführer während ihrer Fahrten registrieren. Zudem wurde erfasst, unter welchen Bedingungen diese Phänomene auftraten, etwa in Bezug auf Streckenabschnitte, Wetterbedingungen oder Zugbelastung.

Die Befragung wurde in mehreren Phasen durchgeführt. In einer ersten Testphase wurde der Fragebogen mit einer kleineren Gruppe von Lokführern erprobt, um eventuelle Unklarheiten oder fehlende Aspekte zu identifizieren. Nach dieser Anpassung folgte die Hauptbefragung mit einer größeren Stichprobe. Die Teilnahme war freiwillig, und die Daten wurden anonymisiert erfasst, um eine möglichst ehrliche und detaillierte Rückmeldung zu gewährleisten.

Der Fragebogen teilte sich in 6 Abschnitte auf. Diese werden im Folgenden aufgeführt:

Teil 1: Eingangsfragen

- Fahrzeugkategorie

-
- Ereignisse

Teil 2: Aufprall oder Überfahung von Tieren

- Wahrnehmung
- Reaktion
- Aufprallzone auf das Triebfahrzeug
- Schäden durch Tiere

Teil 3: Aufprall oder Überfahung von Gegenständen

- Wahrnehmung
- Reaktion
- Aufprallzone auf das Triebfahrzeug
- Schäden durch Gegenstände

Teil 4: Wahrnehmung und Witterung

- Veränderung der Wahrnehmung durch:
- Dunkelheit
- Regen
- Nebel
- Schneetreiben

Teil 5: Abbruch/Fortsetzung des Fragebogens

- Arbeitgeber
- Fortsetzen?

Teil 6: Schäden am Fahrwerk

- Konkrete Fragen zu Schäden durch Aufprall oder Überfahung am Fahrwerk
- Wahrnehmung
- Betriebliche Konsequenzen

Teil 7: Unfälle mit Hemmschuhen

- Fahrzeugkategorie auf der sich der Unfall mit einem Hemmschuh ereignet hat
- Beschädigte Baugruppen
- Wahrnehmung
- Betriebliche Konsequenzen

Teil 8: Abschluss

- Kommentare zum Fragebogen
- Berufserfahrung

4.3 Ergebnisse und Erkenntnisse der Lokführerbefragung

Die Auswertung der Befragung ergab wertvolle Hinweise auf wiederkehrende Problembereiche. Viele Lokführer berichteten über spezifische Stellen im Streckennetz, an denen sie regelmäßig ungewöhnliche Erschütterungen oder Geräusche wahrnehmen. Diese Rückmeldungen deuten darauf hin, dass bestimmte Infrastruktur- oder Fahrwerksaspekte einer genaueren Untersuchung bedürfen.

Zudem wurde deutlich, dass die Wahrnehmung von Unregelmäßigkeiten stark von der Erfahrung der jeweiligen Lokführenden abhängt. Während sehr erfahrene Lokführende oft in der Lage waren, konkrete Vermutungen zur Ursache eines Problems zu äußern, fiel es weniger erfahrenen Fahrern schwerer, Auffälligkeiten zu spezifizieren.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis war die Differenzierung zwischen sporadisch auftretenden und kontinuierlich wahrnehmbaren Unregelmäßigkeiten. Während einige der gemeldeten Auffälligkeiten nur unter bestimmten Bedingungen auftraten, gab es andere Stellen, an denen nahezu jeder befragte Lokführende ähnliche Wahrnehmungen hatte

4.4 Integration der Ergebnisse in die Schadensbibliothek

Um die gewonnenen Erkenntnisse nachhaltig nutzbar zu machen, wurden die identifizierten Schadensmuster und betroffenen Streckenabschnitte in die Schadensbibliothek des Teilprojekts 220 überführt. Diese systematische Dokumentation ermöglicht eine gezielte Nachverfolgung und Verknüpfung mit weiteren Datenquellen, wie technischen Inspektionen oder Instandhaltungsmaßnahmen.

Durch die Einbindung der Ergebnisse aus TP 230 in TP 220 wurde eine wertvolle Grundlage geschaffen, um potenzielle Schadensfälle frühzeitig zu erkennen, Muster zu identifizieren und gezielte Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

5 Optimierte Auslegung Bauteile (TP300)

Die DB InfraGO AG stand bei diesem Arbeitspaket beratend zur Seite. Es wurden regelmäßig Besprechungen besucht und Unterlagen gesichtet.

5.1 Realversuche auf Komponentenebene (TP400)

Ziel des Arbeitspaketes war es, die korrekte Funktionsweise des Sensorsystems und der Auswertelgorithmen anhand von abstrahierter Komponentenversuche zu prüfen sowie Trainings- und Validierungsdaten für die KI-Methoden bereitzustellen. Dies wurde ermöglicht zum einen durch experimentelle Versuche mit klar definierten Eingangsdaten und Randbedingungen ermöglicht, zum anderen durch numerische Versuchen.

Da Laborversuche im Fahrwerksbereich aufwändig sind und komplexe Hindernis-Überrollvorgänge schlecht abgebildet werden können, werden Hindernis-Überrollversuche mit Schienenfahrzeugen durchgeführt. Das IFB und die TU Berlin, als Unterauftraggeber der DB InfraGO AG erstellen ein Konzept zur Durchführung von Messfahrten, bei denen ausgewählte Objekte überrollt werden, um positive Daten zu Überrollereignissen zu generieren.

5.1.1 Überfahrversuche

In den folgenden Abschnitt werden die Überrollversuche beschrieben. Diese wurden vom IFB und der TU-Berlin als Unterauftraggeber der DB InfraGO AG durchgeführt. Die DB InfraGO AG begleitete die Planung und Durchführung.

Die Überrollversuche umfassten mehrere Aufgaben:

1. Erstellung und Abstimmung des Durchführungskonzepte
2. Untersuchung der Versuchsanlage
3. Beschaffung der Materialien
4. Erstellung der Bremsvorrichtung am Güterwagen
5. Probeaufbau der Hindernisse am Gleis
6. Messaufbau am Güterwagen und Vorbereitung der Teststrecke
7. Versuchsdurchführung
8. Versuchsabbau
9. Versuchsdokumentation
10. Datenauswertung

Das gesamte Teilprojekt wurde in einem Zeitraum von 8 Monaten durchgeführt.

5.1.1.1 Testgelände

Die Testfahrt wurde auf dem Testgeländer der Havelländischen Eisenbahn durchgeführt.

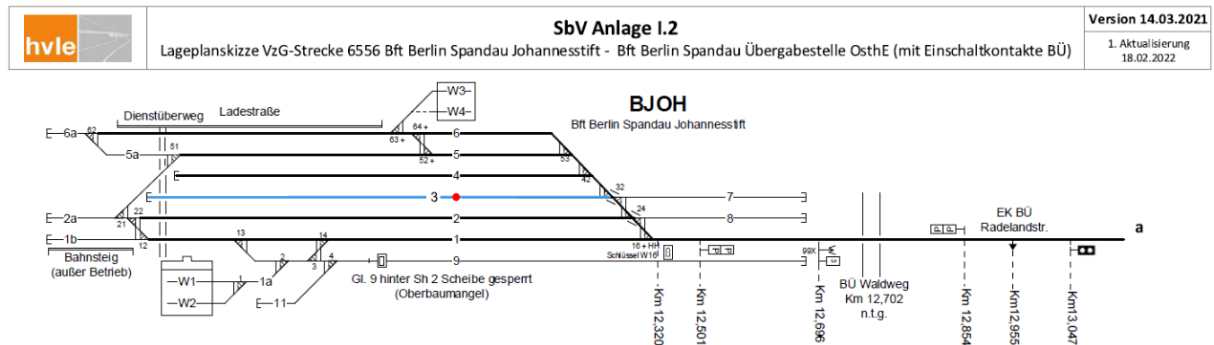


Abbildung 5.1: Das Geländer der HVLE in Spandau Johannesstift.

Abbildung 5.1 zeigt das Geländer der Havelländischen Eisenbahn. Die Versuche wurden auf dem Gleis 3 (farbig markiert in Abbildung 5.1) durchgeführt. Vor den Tests gab es eine Vermessung des Gleisbereiches. Hier wurde geprüft, welche Schutzmaßnahmen notwendig sind, um die Tests durchführen zu können. Dafür wurde z.B. geprüft, wie lang der Bremsbereich ist und ob Geschwindigkeiten bis 30 km/h möglich sind. Weiterhin wurde ein Sicherheitskonzept zusammen mit dem Betreiber aufgesetzt, um die Sicherheit für die Besucher und Projektbeteiligten sicherstellen zu können.

5.1.1.2 Sensorkonzept und Versuchsumfang

Wie bereits im ersten Projekt zu Überrollversuchen im Jahr 2021 wurde für die Versuche ein Güterwagen vom Typ Res verwendet.

Für die Überrollversuche auf dem Gelände der HVLE in Spandau wurde ein Güterwagen (Nr. 37 80 33997 013-2, letzte Revision am 20.10.2021, hergestellt von Raw Eberswalde 1982) der Bauart Res der HVLE verwendet (siehe Abbildung 2-1). Der Res-Flachwagen besteht aus zwei Drehgestellen der Bauart Y25 mit Kopfstücken sowie einem Wagenkasten mit niedrigen Bordwänden, der für die Beförderung von Stahlelementen, Maschinenteilen oder Baumaterialien ausgelegt ist. Die Masse des Wagens beträgt 24,5t.

Die Raddurchmesser wurden im eingebauten Zustand mit einem Messgerät des Typs EWF5572.19/5 ermittelt. Der Wagen hat LL-Bremssohlen des Typs IB 116* und ein KE-GP Bremssystem mit einem dreistufigen Lastwechsel. Die Versuche wurden mit einem leeren Wagen durchgeführt. Nur die für die Messungen erforderlichen Ausrüstungen wurden im Wagen mitgeführt. Ihre Masse ist im Vergleich zur Masse des Wagens vernachlässigbar.

Das Fahrzeug wurde mit Beschleunigungssensoren ausgerüstet (siehe Abbildung 5.2). Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Sensoren, welche auch am aTL installiert sind, verwendet wurden. Die Abtastraten betragen bei den Versuchen für die Beschleunigungssensoren, wie beim aTL, 50 kHz und für die Impulsgeber 10 kHz.

Darüber hinaus wurden zwei Drehgeber und ein GPS-Sensor zur Bestimmung der Geschwindigkeit und Position des Wagens eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Lichtschranke am Wagenkasten montiert, die auf den Boden in Gleisnähe gerichtet ist, um die genaue Position relativ zum Gleis zu bestimmen. Dazu wurden neben dem Gleisreflektierende Platten angebracht.

Um den abgestoßenen Wagen bremsen zu können wurde zudem eine von der TU-Berlin entwickelte Bremsvorrichtung verbaut, die per Funk eine definierte Druckabsenkung in der Hauptluftleitung des Wagens bewirkt und so die Bremsen des Wagens anlegen lässt.

Tabelle 32: Verwendete Beschleunigungssensoren

	Kistler (aTL-Sensor)	Bay
Typ	8715B1K0S00T	BST 54K1E-050
Messbereich	1.000 g	50 g
Frequenzbereich	0,7 - 10.000 Hz mit 5% Abweichung	0 - 1.500 Hz
Sensitivität	5 (mV/g)	80 (mV/g)
Orientierung	entgegengesetzt zum Gleisbett	in Richtung Gleisbett
Messkanal	K01 und K02	K03 und K04

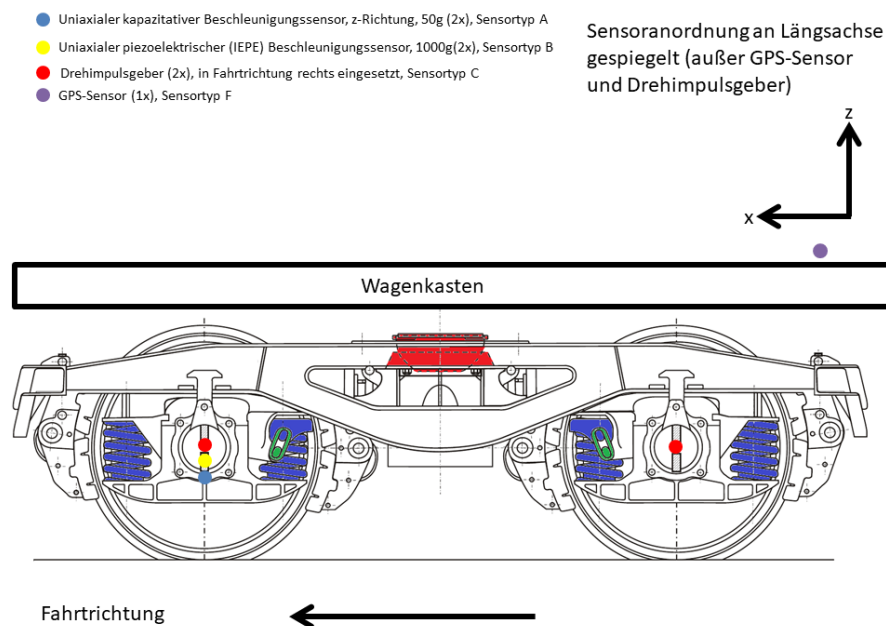


Abbildung 5.2: Sensorposition am Güterwagendrehgestell

Der Versuchsumfang umfasste insgesamt 168 Überfahrungen mit 17 Objekten (siehe Abbildung 5.3) im Geschwindigkeitsbereich von 5 bis 30 km/h, wobei der Fokus Geschwindigkeiten zwischen 20 und 30 km/h lag.

Die Objekte sind folgend aufgeführt: Fingerknochen, Armknochen, Schädelknochen, biofideles Huhn, Birkenholz, Dachlatte, Dachziegel, Flachstahl (6 mm), Flachstahl (10 mm), Stahlkeil, Stahlrohr, Betonstück, Einkaufswagen, Fahrrad, ein Hemmschuh, zwei Hemmschuhe.

Die Tests wurden innerhalb einer Woche vollständig durchgeführt. In der Woche zuvor wurde das System innerhalb von zwei Tagen auf den Zug montiert und getestet. Am Montag nach der Testwoche wurde das System wieder vom Fahrzeug demontiert.



Abbildung 5.3: Exemplarische Probekörper: Armknochen (links), Schädelknochen (Mitte), Birkenholz (rechts)

Die Überfahrobjekte wurden so ausgewählt, dass sie Gegenstände und Materialien abbilden, die typischerweise auch im regulären Betrieb überfahren werden. Über eine speziell angefertigte Halterung wurden die Objekte an dem Gleis fixiert. Auf diese Weise wurden die Objekte nicht vom Gleis gestoßen.

5.1.1.3 Plausibilität der Messdaten

Die aufgezeichneten Signale wurden auf ihre Plausibilität überprüft. Das bedeutet, es wurde kontrolliert, ob die Signale fehlerfrei aufgezeichnet wurden.

Bei der Auswertung der Beschleunigungs-Zeit-Diagramme zeigt sich, dass die Kistler-Sensoren höhere Beschleunigungen erfassen als die Bay-Sensoren (siehe Abbildung 5.4). Dies ist jedoch auf die jeweiligen Sensorspezifika zurückzuführen.

Zugleich zeigt sich, dass bis auf einzelne Ausnahmen, die markanten Peaks in den Beschleunigungen häufig zu den gleichen Wegpunkten auftreten und damit ein Vorliegen von ortsfesten Schienenfehlern deutlich wird. Gleichzeitig verursachen diese Schienenfehler Beschleunigungen, welche kritisch für die Auswertung sein können. Ebenfalls deutet sich an, dass die in Fahrtrichtung linke Schiene eine schlechtere Qualität (hinsichtlich Schienenfehlern und Rauigkeit) aufweist als die rechte Schiene.

Fazit: Die Analyse der Plausibilität ergab, dass die aufgenommen Messdaten schlüssig und nachvollziehbar sind. Ein permanenter Messfehler konnte nicht ermittelt werden.

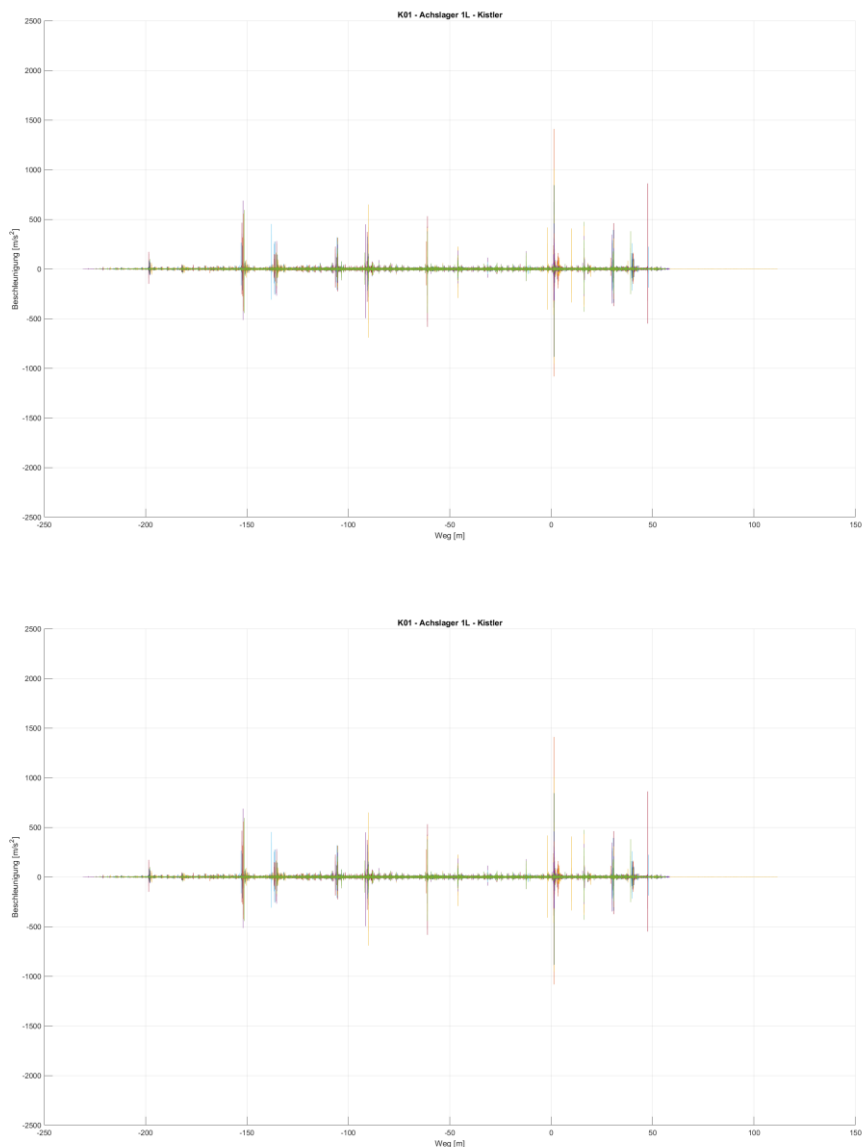


Abbildung 5.4: Beschleunigungs-Zeit-Diagramme für den Bay-Sensor (oben) und den Kistler-Sensor (unten) bei der linken Seite des Drehgestells.

5.1.1.4 Auswertung der Messdaten im Zeit- Frequenz- und Geschwindigkeitsbereich

5.1.1.4.1 Gültigkeit der Grenzkurve mit allgemeinen Beschleunigungen

Bereits im Jahr 2021 wurden Überfahrten mit einem Güterwagen durchgeführt, allerdings mit einem geringeren Untersuchungsspektrum. Die Frage nach der Gültigkeit der hier aufgestellten Grenzkurve lässt sich anhand erweiterten Untersuchungsspektrum nur differenziert beantworten. Die Grenzkurve bezeichnet die Kurve, welche reguläre Ereignisse von Überfahrereignissen abgrenzt.

Die Bay-Beschleunigungssensoren zeigen eine gute Grenzkurve, benötigen jedoch im Geschwindigkeitsbereich bis 5 km/h eine minimale Offset-Anpassung und eine flachere Steigung. Erhöhte Beschleunigungen bis 5 km/h traten nur am ersten Versuchstag auf, was auf Einfahrverschleiß und schlechte Gleisqualität hinweist. Die Kistler-Sensoren erfassen eine

hochfrequente Anregung des linken Gleises. Eine Reduktion dieser Anregung würde ihre Funktionalität verbessern.

Zusammenfassend deutet sich eine streckenabhängige Qualität der Gleise (Schienenfehler, Rauheit) an, was eine automatische Überfahrerkennung und gleichzeitig eine Qualitätsüberwachung des Gleises erfordert. Neben den eigentlichen Objekten stellt somit auch die Streckenqualität eine Herausforderung für die Überfahrerkennung dar. Bei hoher Gleisqualität wäre eine minimale Anpassung der Grenzkurve ausreichend, um auch die Kistler-Sensoren funktionsfähig zu halten.

Abbildung 5.5 zeigt die Signale bei der Überrollung eines Stahlkeils. Auf der linken Seite sind die Zeit- und Frequenzsignale des Beschleunigungssensors am linken Radsatz und auf der rechten Seite die Signale des rechten Radsatzs dargestellt. Die Überrollung führt zu einem hohen Ausschlag, der bei dieser Objektklasse deutlich vom regulären Betrieb unterscheidbar ist.

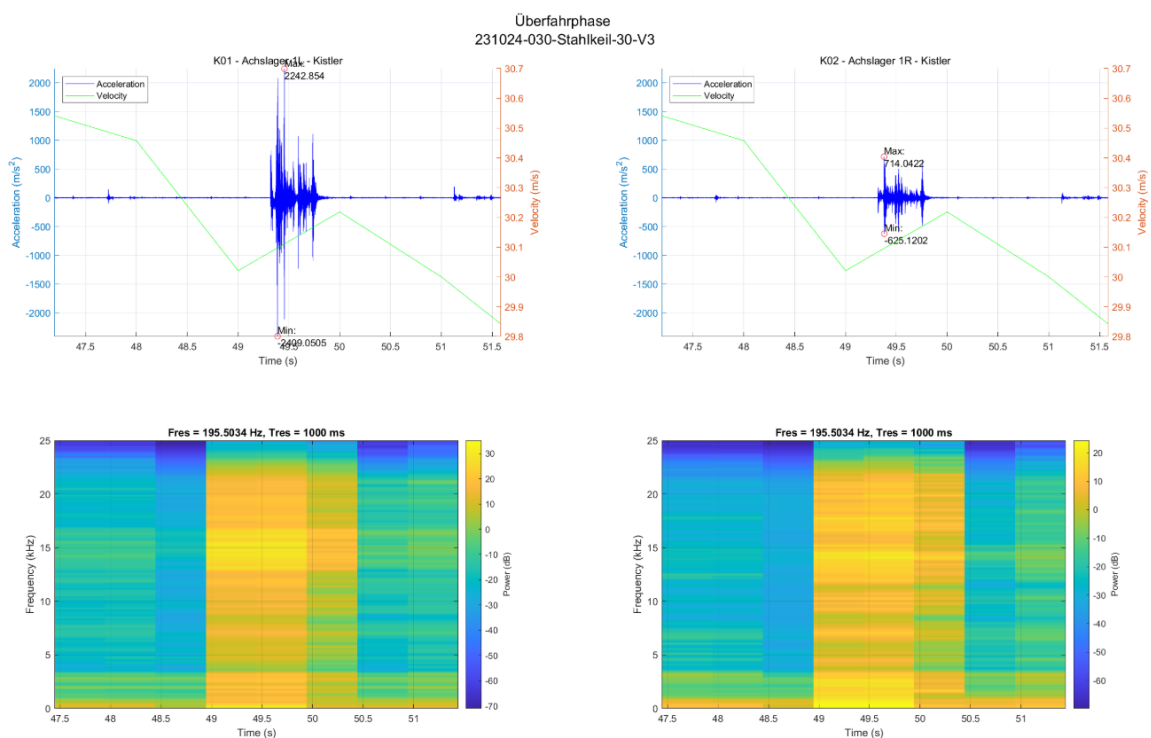


Abbildung 5.5: Signale der Überrollungen im Zeit- und im Frequenzbereich

5.1.1.4.2 Gültigkeit der Grenzkurve bei Überfahrungen

Im vorangegangenen Projekt wurde eine „Modified Limit Curve“ experimentell ermittelt. Diese kann über eine Formel im Beschleunigungs-Zeit Diagramm beschrieben werden.

Wird die „Modified Limit Curve“ als gültige Grenzkurve betrachtet, so ergeben sich für den aktuellen Versuch folgende Erkennungsraten überfahrener Objekte durch den Kistler-Sensor in Originalkonfiguration sowie mit drei unterschiedlichen Tiefpassfiltern, und durch den Sensor in Originalkonfiguration:

- Kistler (original): 86,9 % erkannt, 13,1 % nicht erkannt
- Bay (original): 80,4 % erkannt, 19,6 % nicht erkannt

-
- Kistler (750 Hz Tiefpass): 75,0 % erkannt, 25,0 % nicht erkannt
 - Kistler (1.500 Hz Tiefpass): 76,8 % erkannt, 23,2 % nicht erkannt
 - Kistler (3.000 Hz Tiefpass): 76,8 % erkannt, 23,2 % nicht erkannt

Sofern die Problematik hinsichtlich der hochfrequenten Streckenanregung gelöst werden kann, zeigen die Ergebnisse, dass der Kistler-Sensor in Originalkonfiguration die meisten Überfahrungen detektiert hätte. An zweiter Stelle folgt bereits der Bay-Sensor, welcher immer noch 80,4 % der Überfahrungen detektiert hätte und zugleich die hochfrequenten Anregungen durch seine Trägheit (bzw. niedrigeren Frequenzgang) nicht erfasst hätte.

5.1.1.4.3 Versuchsfahrten mit dem aTL und Kreuzvergleich mit dem Güterwagen

Neben den Überfahrversuchen mit dem Güterwagen wurden auch Überfahrten mit dem aTL durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen miteinander verglichen und interpretiert.

Im Allgemeinen zeigte der aTL bei der Überfahrt über vergleichbare Objekte höhere Beschleunigungswerte als der Güterwagen. In vielen Fällen hätte der aTL ebenfalls die Überfahrt detektieren können, wenn dies beim Güterwagen möglich gewesen wäre.

Bei nicht zerbrechlichen Objekten traten sowohl beim Güterwagen als auch beim aTL sehr hohe Beschleunigungen auf. Die Streckenqualität auf der Versuchsstrecke stellte für beide Fahrzeuge eine Herausforderung dar, da sie die Detektion ohne falsch positive Ereignisse erschwerte.

Der Bay-Sensor, der eine geringere Sensibilität gegenüber Streckenfehlern aufweist, besitzt jedoch einen begrenzten Messbereich von nur 50 g. Dagegen empfiehlt sich bei Verwendung des Kistler-Sensors (wie am aTL) eine Tiefpassfilterung von 1.500 Hz für die Streckendaten.

Die Qualität der Strecke beeinflusst stark die Fähigkeit zur Überwachung mittels einer Grenzkurve. Selbst auf schlechten oder sehr alten Strecken kann eine Tiefpassfilterung die Datenqualität nicht wesentlich verbessern.

Für einen zukunftsfähigen, vollautomatisierten Betrieb ist es notwendig, Sensoren zur Umfelderkennung sowie Sensoren für die Aufprall- und Überfahrerkennung einzusetzen. Zudem muss die Streckenqualität ein bestimmtes Mindestniveau erreichen. Die notwendige Streckenqualität ist jedoch auf regulären und vielbefahrenen Strecken auch heute schon gegeben.

6 Realversuche im / am Fahrzeug (TP500)

Das Ziel dieses Arbeitspakets bestand darin, die einwandfreie Funktionsweise des Sensorsystems auf einem realen Fahrzeug zu überprüfen und gleichzeitig Trainings- sowie Validierungsdaten für die KI bereitzustellen. Die im Arbeitspaket AP110 identifizierte Sensorik zur Aufprallerkennung und Schadenserfassung soll erstmals in einem Versuchsfahrzeug integriert werden.

Um das Fahrzeug auch auf öffentlichen Straßen einsetzen zu können, müssen verschiedene Genehmigungs- und Zulassungsverfahren durchlaufen werden.

Während der Projektlaufzeit sind mit dem Testzug und dem integrierten Sensorsystem mehrere Testfahrten geplant. Dabei wird ein Datensatz erstellt, der verschiedene Betriebszustände und Wetterbedingungen abbildet. Da mit dem aTL keine Aufprallversuche durchgeführt werden dürfen, handelt es sich bei diesem Datensatz ausschließlich um Betriebsbelastungen und negative Beispiele für Kollisionsereignisse.

Dieser Datensatz ist jedoch essenziell für das Arbeitspaket AP140, da er dazu dient, Anomalien im Normalbetriebsverhalten zu identifizieren. Nichtsdestotrotz konnten Überrollversuche mit dem aTL realisiert werden. Auf diese Weise ist möglich, die Ergebnisse der Überrollversuche aus

Um eine umfassende Analyse zu ermöglichen, sollen Datensätze erstellt werden, die unterschiedliche Randbedingungen, wie beispielsweise Tunnelleinfahrten, sowie verschiedene Witterungsverhältnisse abdecken. Für die Betrachtung von Kollisionsereignissen wird dieser Datensatz in AP140 durch die Ergebnisse der Impact-Labortests aus AP420 ergänzt.

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Zunächst werden die für die Integration notwendigen Schritte beschrieben. Anschließend folgen die für die Zulassung erforderlichen Maßnahmen. Abschließend werden die einzelnen Testfahrten erläutert.

6.1 Integration des Sensorsystems in das advanced TrainLab

6.1.1 Übersicht

Das Sensorsystem sollte laut Projektplan innerhalb eines Zeitfensters in das aTL (1) integriert werden. Nach der sorgfältigen Erstellung des Konstruktionsplanes musste die Integration über drei Zeitfenster hinweg durchgeführt werden.

6.1.2 Planung der Integration

Die Sensoren, welche im AP110 identifiziert wurden, müssen im Rahmen des AP510 in den Zug integriert werden. Innerhalb des AP110 wurden die idealen Sensorpositionen ermittelt. Ob diese Positionen baulich umsetzbar sind und wie die Integration am besten durchgeführt werden kann, musste im Rahmen eines Umbaukonzeptes geklärt werden.

Das Umbaukonzept beinhaltet die genaue Positionierung der Sensoren sowie die Kabelführung der Sensorkabel in das Zuginnere.

Die DB Systemtechnik GmbH war mit dafür beauftragt, das Einbauengineering für das Sensor-Setup zur Entwicklung dieses Systems auf dem Testzug „Advanced TrainLab“ vorzunehmen sowie die Kollegen in technischen Fragestellungen und Zulassungsthemen von Schienenfahrzeugen zu unterstützen.

Das erstellte Umbaukonzept zeigt eine erste Veranschaulichung der zu tätigten Umbauten an dem Fahrzeug BR 605 Tz 5517 (aTL – advanced TrainLab).

Durch die im weiteren Projektfortlauf noch durchgeführten Engineering- und Dokumentation.

Bei der Erstellung des Umbaukonzeptes wurde die MSG Ammendorf GmbH mit unterstützt. Weiterhin wurde auch der Umbau von der MSG Ammendorf in Halle/Saale durchgeführt.

Abbildung 6.1 zeigt eine Gesamtübersicht aller relevanten Einbauorte für die Sensorik am Fahrzeug aus dem Umbaukonzept. Die Umbauinhalte und Einbauorte werden im Konzept detailliert beschrieben.

Insgesamt wurden 42 Sensoren und eine Kamera auf dem Fahrzeug installiert:

- 12 Beschleunigungssensoren
- 12 Dehnungssensoren
- 2 Drehgeber
- 14 Drucksensoren
- 2 Temperatursensoren
- 1 Kamera

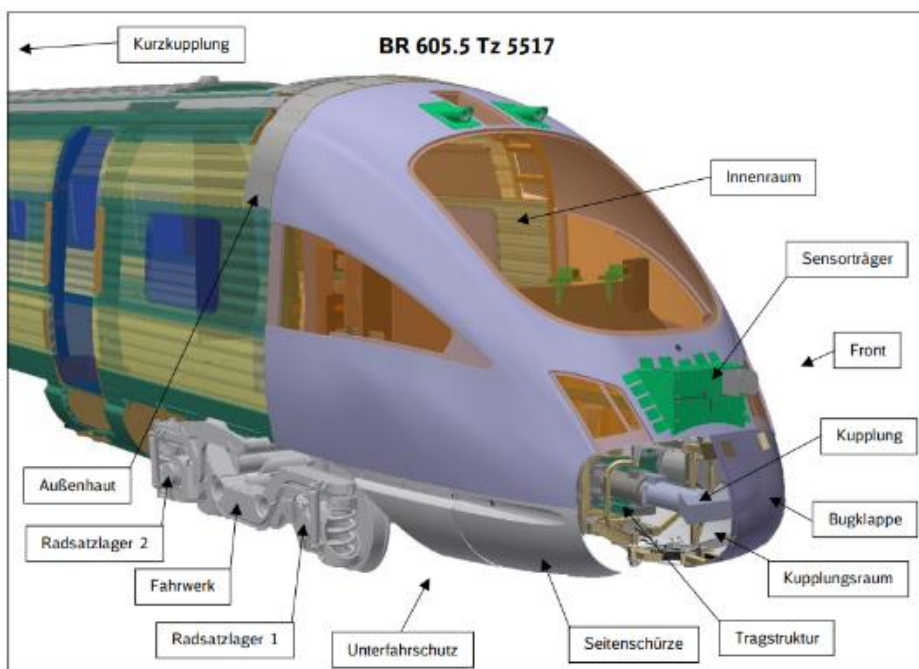


Abbildung 6.1: Gesamtübersicht Einbauorte der Sensorik KI-MeZIS

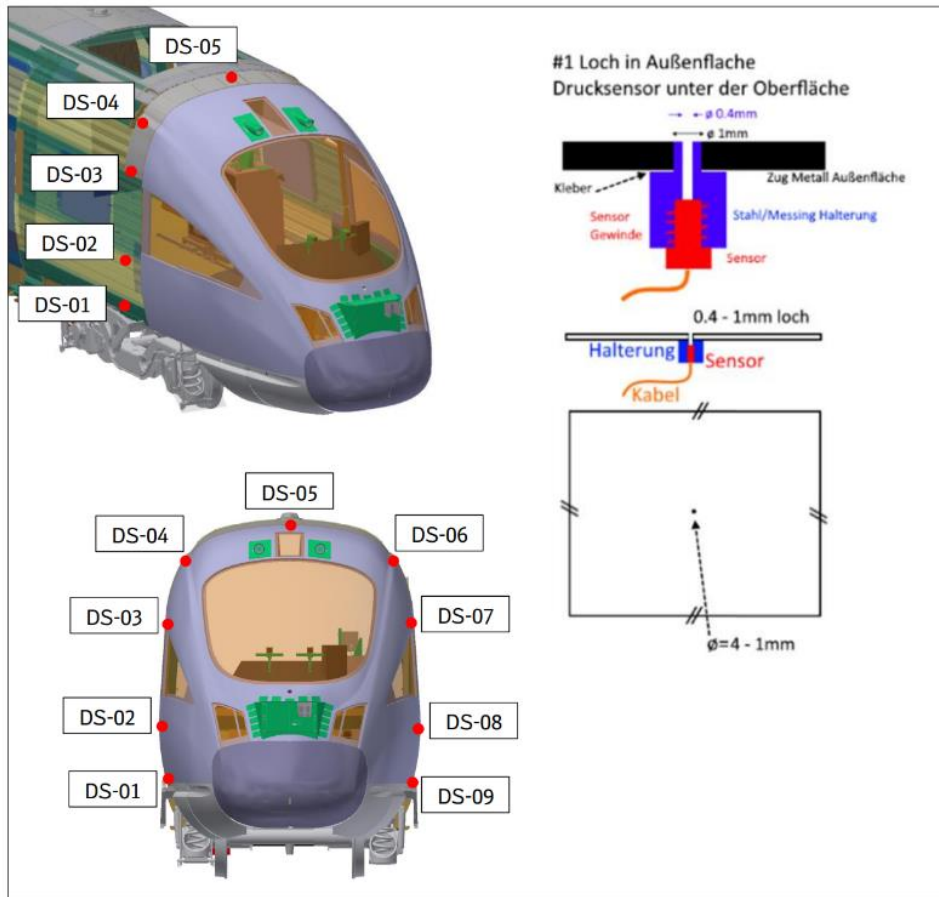


Abbildung 6.2: Drucksensoren an der Außenhaut

Abbildung 6.2 zeigt ein Beispiel für die Positionierung der Drucksensoren an der Außenhaut des Fahrzeugs.

Die entsprechenden Umbauten mussten gestaffelt am Fahrzeug umgesetzt werden. Dies war notwendig, da die Integration der Sensoren umfangreicher als geplant war und das Fahrzeug nur wochenweise aus dem Betrieb genommen werden konnte.

Es wurde ein geeigneter Messwertaufzeichner (2) zur Speicherung von Echtzeitdaten ausgewählt. Als Konsequenz der deutlich höheren Sensoranzahl ist ein leistungsfähigeres System, das in der Lage ist, eine deutlich größere Menge an Sensordaten zu verarbeiten, nötig gewesen. Dementsprechend wurde entgegen der ursprünglichen Planung ein deutlich leistungstärkeres System ausgewählt, das alle Sensoren in Echtzeit aufzeichnen kann. Ein Bild des Messwertaufzeichners ist in Abbildung 6.3 gezeigt.



Abbildung 6.3: Dewetron Messwertaufzeichner

Die unten aufgeführten Arbeitspakete zeigen, welche Arbeitsinhalte prioritär durch die zu beauftragende Werkstatt, z.B. MSG GmbH), umgesetzt werden sollten. Der in den aTL integrierte Messwertaufzeichner ist in Abbildung 6.6 abgebildet.

Arbeitspaket 1

- Auswerteelektronik (Messwertaufzeichner)
- Innenraum
- Fahrwerk
- Radsatzlager 1
- Radsatzlager 2
- Sensorträger

Arbeitspaket 2

- Unterfahrschutz
- Bugklappen
- Front
- Tragestruktur
- Kupplung
- Kupplungsraum
- Seitenschürze

Arbeitspaket 3

- Außenhaut
- Kurzkupplung

Die Umbauten wurden in den folgenden Zeitfenstern durchgeführt. Die Zeitfenster umfassten jeweils ein bis drei Wochen:

Arbeitspaket 1: Oktober 2022

Arbeitspaket 2: April 2023

Arbeitspaket 3: Juni 2023

Nach jedem Einbau wurde eine Testfahrt durchgeführt, um die Signale zu prüfen. Im Winter 2023 wurde weiterhin eine Revision des Fahrzeugs durchgeführt. Hier musste das Drehgestell ausgewechselt werden. Sensoren, die an dem Drehgestell installiert waren, wurden zunächst deinstalliert und im Anschluss wieder an das neuen Drehgestell angebaut.

In der KW08 wurde deshalb das gesamte System auf dem Gelände der HVLE geprüft. Dabei konnten mehrere fehlerhafte Sensoren identifiziert werden. Bis auf zwei Sensoren konnten alle Sensoren wieder in Betrieb genommen werden. Die zwei Sensoren, die nicht repariert werden konnten, waren redundant ausgelegt, so dass andere Sensoren verwendet werden könnten um die benötigten Informationen zu messen.

6.1.3 Integration

Die Integration wurde in drei Arbeitspaketen durchgeführt. Basierend auf dem von DB Systemtechnik angefertigten Umbaukonzept wurden Konstruktionsskizzen und Arbeitsanweisungen erstellt. Basierend auf diesem Umbaukonzept und den abgeleiteten Dokumenten konnte die Integration in den Testzug durch die MSG in Halle - Ammendorf umgesetzt werden. Hier begleitete die DB InfraGO AG den Um- und Einbau als verlässlicher Ansprechpartner für unerwartet auftretende Herausforderungen beim Einbau vor Ort, wie z.B. die kurzfristige Beschaffung eines Sensorkabels oder der schnelle Ersatz eines ungeeigneten Klebstoffs. In einem Integrationstagebuch wurden die einzelnen Integrationsschritte dokumentiert. Abbildung 6.4 zeigt ein Bildbeispiel aus diesem Dokument.

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Konzeptionsphase in TP100 war, dass im Vergleich zu der ursprünglichen Planung vor Projektbeginn deutlich mehr Sensoren benötigt werden, um eine verlässliche Schadensbewertung am Fahrzeug vornehmen zu können. Durch eine höhere Anzahl von Sensoren ist es möglich, einerseits die KI-Modelle mit mehr Daten zu trai-

nieren und andererseits eine größere Aussagekraft für Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Aufprällen auf die Fahrzeugstruktur zu gewinnen. Dementsprechend wurde das Sensor-setup angepasst



Abbildung 6.4: Auszug aus dem Integrationstagebuch

Aufgrund der Vielzahl an Sensoren und den zugehörigen Kabeln ist der Raum in den bereits vorhandenen Kabelkanäle nicht ausreichend. Daher muss ein neuer Kabelkanal gelegt werden, der nach dem „4. Eisenbahnpaket“ zugelassen werden muss. Dies beinhaltet einen erhöhten zeitlichen und monetären Mehraufwand. Der Zulassungsprozess für das System und den Kabelkanal wird in Kapitel 6.2 beschrieben. Der Kabelkanal wurde per 3D-Druck in jeweils drei Teilen erstellt. Die CAD-Konstruktionszeichnungen für den 3D Druck hat die DB Systemtechnik erstellt. Den tatsächlichen Ausdruck hat die Siemens AG durchgeführt. Für die Steuerung der Prozesse und die Einhaltung der Termine war die DB InfraGO AG zuständig.

Der Kabelkanal wurde innerhalb des dritten Arbeitspakets am Zug montiert und mittels Klebetechnik am Fahrzeug befestigt.

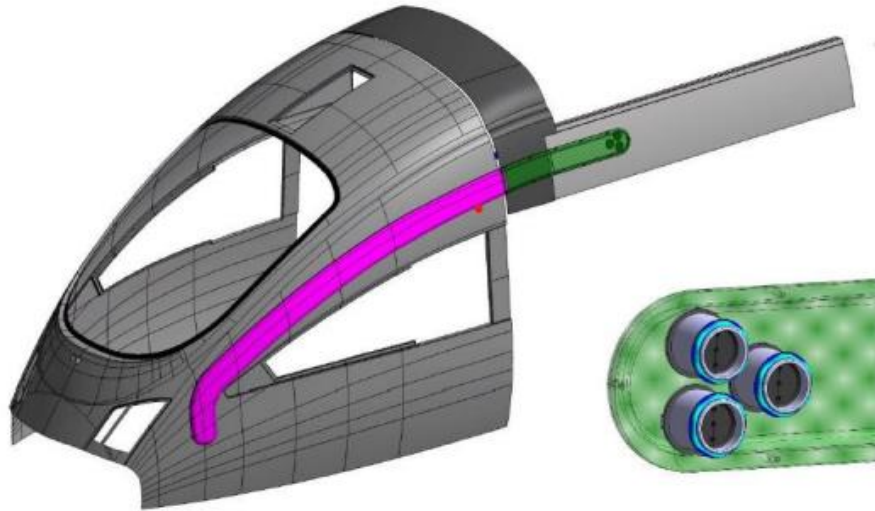


Abbildung 6.5: Kabelkanal aus dem Umbaukonzept.



Abbildung 6.6: Messwertaufzeichner und Messtechnik im Serverschrank des aTL. Der Monitor wurde während den Testfahrten zur Visualisierung der Signale verwendet.

6.2 Zulassung des Systems

In diesem Abschnitt wird der notwendige Zulassungsprozess für das integrierte Sensorsystem und den Kabelkanal erläutert.

6.2.1 Zulassung des Sensorsystems

Das Sensorsystem wurde im einen Testfahrzeug aTL installiert. Da dieses Fahrzeug nicht im regulären Betrieb eingesetzt wird, kann der Zulassungsprozess vereinfacht werden – vorausgesetzt, es erfolgt kein substanzieller Eingriff in die Fahrzeugstruktur. Da das Sensorsystem so verbaut wurde, dass die Außenhaut des Fahrzeugs nicht verändert werden musste, könnte das System vom Fahrzeughalter abgenommen werden. Nichtsdestotrotz mussten verschiedene Nachweise von Fachabteilungen erbracht werden, welche die Sicherheit des installierten Systems gewährleisten. Die erbrachten Nachweise sind im Folgenden aufgeführt:

Festigkeit(FEM): Die Prüfung der Festigkeit mittels FEM (Finite-Elemente-Methode) dient der Zulassung von Bauteilen oder Konstruktionen, um sicherzustellen, dass sie mechanischen Belastungen standhalten und strukturelle Integrität gewährleisten.

Brandschutz (Brandschutzkonzept für Umbau am Fzg.): Die Prüfung des Brandschutzes dient der Zulassung von Materialien, Bauteilen oder Anlagen, um sicherzustellen, dass sie den Anforderungen an Feuerwiderstand, Rauchentwicklung und Flammenausbreitung entsprechen und somit die Sicherheit im Brandfall gewährleisten.

EMV (Bewertung vorhandener EMV-Gutachten, Durchführung einer EMV-Vermessung des umgebauten Fzg.): Die Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) dient der Zulassung von elektrischen Geräten oder Systemen, um sicherzustellen, dass sie weder elektromagnetische Störungen verursachen noch durch solche gestört werden und somit zuverlässig in ihrer Umgebung betrieben werden können.

Rückwirkungsfreiheit (Erdungskonzept): Die Prüfung der Rückwirkungsfreiheit (Erdungskonzept) dient zur Zulassung von elektrischen Anlagen oder Systemen, um sicherzustellen, dass elektrische Erdung keine störenden oder gefährdenden Rückwirkungen auf andere Teile des Systems oder die Umgebung verursacht.

- **Festigkeit (FEM):** Sicherstellung der strukturellen Integrität durch Simulation mittels Finite-Elemente-Methode.
- **Brandschutz:** Nachweis eines geeigneten Brandschutzkonzepts für die Umbauten am Fahrzeug.
- **EMV:** Bewertung vorhandener EMV-Gutachten sowie Durchführung einer EMV-Messung am umgebauten Fahrzeug.
- **Rückwirkungsfreiheit (Erdung):** Sicherstellung, dass die Erdung keine unerwünschten elektrischen Rückwirkungen verursacht.

Der Messwertaufzeichner konnte in einem Serverschrank verbaut werden, welcher sich im ersten Wagon des Fahrzeugs befindet. Dieser Serverschrank wurde im Rahmen eines vorherigen Projektes in den Zug integriert. Es wurden bereits umfassende Nachweise erbracht und Zulassung durchgeführt. Daher mussten diese Elemente nicht noch einmal geprüft werden.

6.2.2 Zulassung des Kabelkanals

Der Kabelkanal wurde an der Außenhaut des Zuges verbaut. Dies stellt einen erheblichen Eingriff in die Fahrzeugstruktur dar, da dieser Bereich direkten Einfluss auf das Lichtraumprofil des Fahrzeugs hat. Aus diesem Grund musste der Kabelkanal nach dem 4. Eisenbahnpaket zugelassen werden. Dieser Zulassungsprozess stellte einen erheblichen Mehraufwand im Vergleich zu den geplanten Aufwänden dar. In der folgenden Tabelle sind die Aufgaben dargestellt, die im Rahmen der Zulassung bearbeitet werden mussten.

Schritt	Aufgaben
Vorbereitung des Antrags	<ul style="list-style-type: none">• -Identifizierung aller anzuwendenden Anforderungen (TSI, NNTR/ NNTV, ...)• -Festlegung der Einsatzbedingungen und -beschränkungen• -Management von Änderungen am Fahrzeug / Fahrzeugtypen• -Festlegung der notwendigen Konformitätsbewertungen (Erprobungen / Tests)• -Bestimmung der Art der Genehmigung• -Klärung, ob Erprobungsfahrten im Verwendungsbereich erforderlich sind• -Klärung, ob die Erprobungsfahrten genehmigungspflichtig sind
Konformitätsbewertung	<ul style="list-style-type: none">• -Erstellung der notwendigen Nachweise für die Konformitätsbewertung• -Bewertung durch NoBo (TSI Anforderungen)• -Bewertung durch DeBo (NNTR-/ NNTV-Anforderungen)• -Bewertung durch AsBo (falls Anwendung von CSM erforderlich ist)
Antragstellung	<ul style="list-style-type: none">• -Zusammenstellung des Antrags inklusive der Dokumentation gemäß DVO (EU) 2018/545, Anhang I• -Insbesondere Bereitstellung der notwendigen Nachweise:• -Zertifikate und Konformitätserklärungen für die Konformität der Teilsysteme• -Nachweis des Prozesses für die Erfassung aller anzuwendenden Anforderungen• -Antragstellung auf GIF über den One Stop Shop* der Agentur
Bearbeitung des Antrags	<ul style="list-style-type: none">• -Versendung der Eingangsbestätigung• -Bestätigung der Vollständigkeit des Antrags und durch die Genehmigungsstelle• -Prüfung des Antrags durch Genehmigungsstelle / beteiligte Nationale Sicherheitsbehörden

	<ul style="list-style-type: none"> • -Klärung von Problemen und berechtigten Bedenken der Genehmigungsstelle / beteiligten Nationale Sicherheitsbehörden • -Entscheidung der Genehmigungsstelle über die Erteilung der und Benachrichtigung des Antragstellers
Schlussdokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung der Informationen/Dokumente, die im Zusammenhang mit der Fahrzeuggenehmigung abgelegt werden. • Registrierung dieser Informationen/Dokumente in ERATV and ERADIS • Archivierung der Entscheidung (inclusive aller Aktionen/Ergebnisse)

Der zusätzliche Integrationsaufwand hat die Testfahrten nicht behindert. In der Zeit, in der Kabelkanal noch nicht installiert war, wurden die Sensorkabel über eine provisorische Halterung, z.B. mit Spezialklebeband, befestigt. In der Zeit, in welcher der Kabelkanal schon an den Zug verklebt war, aber noch keine finale Zulassung erhalten hatte, haben wir eine befristete Sonderzulassung bekommen. Diese ermöglichte es, die jeweiligen Testfahrten planungsgemäß durchzuführen.

Im Rahmen der Zulassung gemäß dem 4. Eisenbahnpaket wurden für den Kabelkanal folgende Nachweise erbracht:

- Massenachweis
- Festigkeitsbetrachtung
- Brandschutz
- EMV
- Lichtraumprofil
- Aerodynamik
- Nachweis der Festigkeit der Fügetechnik
- Nachweis der elektrischen Sicherheit
- EG-Konformitätserklärung
- Nationale notifizierte Technische Regeln (NNTR) Konformitätserklärung

6.3 Testfahrten

Im Folgenden Abschnitt werden die durchgeführten Testfahrten beschrieben. Insgesamt fanden neun Testfahrten statt, von denen sieben im regulären Schienennetz der DB durchgeführt wurden.

Weiterhin wurden spezielle Testfahrten (2 Testfahrten) durchgeführt. Bei diesen Testfahrten wurden Tests auf den Privatgeländen der MSG Ammendorf bzw. der Havelländischen Eisenbahn (HVLE) durchgeführt. Bei der MSG wurden Aufprallversuche und bei der HVLE Überrollversuche realisiert.

6.3.1 Testfahrten im regulären Netzwerk

Das System wurde in den Testzug advanced Trainlab integriert. Dieser Zug kann im regulären Bahnnetz der DB fahren (siehe Abbildung 6.7). Somit konnte das System in der relevanten Einsatzumgebung (Technologiereifegrad TRL 6) getestet werden.

Nach jedem Einbaufenster wurde eine Testfahrt durchgeführt. Da es 3 Einbaufenster gab, war erst ab der dritten Testfahrt das gesamte System verfügbar. Nichtsdestotrotz konnten die Daten der jeweils reduzierten Sensorsetups verwendet werden.

Bei den Testfahrten im Netz der DB (7 Testfahrten) wurden auf die folgenden Anforderungen geachtet:

- 1) Es wurden Schnellfahrtstrecken befahren. Auf diesen Strecken kann der Zug mit Höchstgeschwindigkeit fahren.
- 2) Es wurden Tunnelfahrten durchgeführt. Dies ist wichtig, da beim Einfahren in einen Tunnelleinfahrt ein großer Luftdruck auf das Fahrzeug wirkt.
- 3) Es wurden Nebenstrecken befahren. Auf den Nebenstrecken ist die Gleisqualität schlechter als auf den Hauptstrecken, da diese Strecken seltener gewartet werden.
- 4) Es wurden Strecken befahren, auf denen es auch zu Zugbegegnungen bei hohen Geschwindigkeiten kommt, Bei solchen Begegnungen wirken starke Kräfte auf den Zug.
- 5) Sowohl Schnellfahrtstrecken als auch Nebenstrecken wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten befahren.
- 6) Der Zug fuhr im regulären Schienennetz.

Im Rahmen der Planung der Testfahrten mussten mehrere Aufgaben erfüllt werden:

1. **Terminabstimmung für die Testfahrten:** Die Planung wurde zusammen mit dem Team vom aTL durchgeführt.
2. **Buchung der Strecken:** Die Strecke wurde nach unseren Vorgaben vom aTL-Team durchgeführt.
3. **Teambegleitung festlegen:** Vom aTL-Team waren mindestens ein Triebfahrzeugführer und ein Projektleiter bei jeder Testfahrt dabei.

Jede Testfahrt wurde weiterhin von einem Projektteam des KI-MeZIS begleitet. Zum einen waren zwei Personen von der DB InfraGO AG an Bord. Bei den ersten Testfahrten waren zusätzlich zwei Personen von DB Systemtechnik mit dabei. Sie haben geprüft, ob die Sensorik und die Messtechnik so funktioniert wie erwartet. Bei einem Fehler des Systems konnten sie die Fehlerquellen direkt identifiziert und beseitigt werden.

Zudem waren zwei Personen vom IFB mit auf dem Zug. Das IFB hat während der Testfahrten die Annotation durchgeführt. Um eine gute Annotationsdatei bereitstellen zu können wurde eine, mit den Servern auf dem Zug Zeitsynchronisierte, Software verwendet. Während der Fahrt wurde jedes relevante Ereignis dokumentiert – zum Beispiel Tunnelleinfahrten, Tunnelausfahrten, Weichen, Zugbegegnungen, etc.

Die Annotationsdatei wurde dann im Rahmen der weiteren Entwicklung verwendet.



Abbildung 6.7: Ende einer Testfahrt in Potsdam.

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Testfahrten im regulären Netz kurz beschrieben:

Testfahrt	Beschreibung
KW48 - 2022	Testfahrt nach dem ersten Einbaufenster. Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren
KW19 - 2023	Testfahrt nach dem zweiten Einbaufenster. Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren
KW35 - 2023	Testfahrt nach dem dritten Einbaufenster. Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren. Das gesamte System funktionierte.
KW37 - 2023	Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren. Das gesamte System funktionierte. Tunnelfahrten wurden durchgeführt.
KW10 - 2024	Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren. Das gesamte System funktionierte. Tunnelfahrten wurden durchgeführt.
KW26 - 2024	Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren. Das gesamte System funktionierte. Tunnelfahrten wurden durchgeführt.
KW30 - 2024	Es wurden Schnellstrecken und Nebenstrecken befahren. Das gesamte System funktionierte.

6.3.2 Überfahrversuche

In Kalenderwoche 39 des Jahres 2023 wurden mit dem aTL Überfahrversuche durchgeführt. Die Überfahrversuche wurden auf dem Gelände der HVLE durchgeführt. Das Gelände der HVLE ist ein Privatgelände, auf dem kein Regelverkehr stattfindet.

Es wurde eine Untermenge der Objekte überfahren, die auch bei den Überfahrversuchen mit den Flachwagen (siehe TP400) verwendet worden waren (siehe Abbildung 6.8).

Um die Tests durchführen zu können, musste ein umfangreiches Sicherheitskonzept zusammen mit der HVLE und dem Team vom aTL erstellt werden. Hierbei wurden verschiede-

ne Grenzfälle theoretisch untersucht und geeignete Sicherheitsmaßnahmen ergriffen. Die Testfahrten wurden an zwei Tagen durchgeführt.



Abbildung 6.8: Befestigung von Knochen für den Überrolltest.

6.3.3 Aufprallversuche

Um Signale zu erzeugen, die einen Aufprall simulieren, wurden Kupplungstests durchgeführt. Das heißt, dass der aTL mit einem stehenden Zug gekuppelt wurde. Hierbei fuhr der Zug mit einer nicht höheren Geschwindigkeit als bei einem Kupplungsvorgang.

Die Tests wurden nach der Testfahrt in Kalenderwoche 30 auf dem Gelände der MSG Ammendorf durchgeführt.

Um die Tests durchführen zu können, musste ein detailliertes Sicherheitskonzept mit dem aTL Betreiber und der MSG ausgearbeitet werden.

Der Zug wurde jeweils dreimal mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (0,8 km/h, 1,5 km/h und 2 km/h) gekuppelt. Somit wurden insgesamt neun Kupplungstests durchgeführt.

Während der Tests ist die Kupplung des aTL auch einmal beschädigt worden:

Eine Feder der Kupplung hatte sich gelöst. Dieser Fehler konnte jedoch direkt behoben werden, da geschultes Fachpersonal anwesend war.



Abbildung 6.9: Kupplungsversuche, der aTL fuhr auf einen zweiten ICE auf, um einen Aufprall nachzubilden.

7 Integration in Betriebskonzepte (TP600)

Ziel dieses Teilprojektes war die Sicherstellung der Kompatibilität der in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Technologien in die Betriebs- und Instandhaltungskonzepte der DB und der internationalen Standardisierung. Diese basieren insbesondere auf der Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs sowie (nachgelagert) auf der Digitalisierung der Fahrzeuginstandhaltung.

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden drei Arbeitspakete bearbeitet, nämlich die Arbeitspakete AP610-AP630.

7.1 Architektur und Schnittstellen

7.1.1 Übersicht

Als Basis für den bilateralen Austausch zwischen technologischer- und der Betriebskonzeptentwicklung dienen Architekturentwürfe sowie Anforderungen und Schnittstellenbeschreibungen. In diese sollen Erkenntnisse aus der Technologieentwicklung wie die Weiterentwicklung der betrieblichen Konzepte unmittelbar einfließen und dadurch im weiteren Verlauf des KI-MeZIS-Projekts sowie der Arbeiten der Digitalen Schiene Deutschland der DB InfraGO AG berücksichtigt werden. Zudem sollte die technische Integration der entwickelten Konzepte und Komponenten in die konzernweite KI-Plattform vorbereitet, geplant und soweit möglich umgesetzt werden.

In diesem Sinne stellt der Ki-MEZIS-Prototyp eine konkrete Instanz der Referenzarchitektur dar. Da innerhalb der Referenzarchitektur keine Instandhaltungsprozesse enthalten sind, stellt die Projektarchitektur in dieser Hinsicht eine Abweichung dar.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde sowohl eine projektspezifische technische Architektur als auch eine projektspezifische funktionale Architektur als Instanz der Referenzarchitektur aufgebaut. Tests und Analysen wurden im Hinblick auf die Performance-Anforderungen der Referenzarchitektur entwickelt. Die Ergebnisse fließen im Rahmen von Expertenrunden zurück. Auf Basis der Erkenntnisse können für zukünftige Projekte projektspezifische Performance-Anforderungen abgeleitet werden.

7.1.2 Technische Architektur

In diesem Abschnitt wird die technische Architektur beschrieben. Bei der Technischen Architektur, war es zunächst entscheidend, dass hier das tatsächliche System - so wie es auch im aTL eingebaut wurde - abgebildet ist. Aus diesem Grund war der Architekt auch bei der Systemkonzeption involviert. Änderungen in den Signalwegen wurden regelmäßig an den Architekten weitergegeben und in die technische Architektur integriert. Auf diese Weise konnte die korrekte Abbildung des Systems in der Architektur über die Projektlaufzeit sichergestellt werden.

In Abbildung 7.1 wird ein Ausschnitt aus der Architektur dargestellt. Diese beinhaltet den gesamten Signalweg aller Komponenten des Systems. Die folgenden Informationen werden somit abgebildet:

- Die verschiedenen Einbauorte

- Die Aufteilung aller Komponenten nach deren Einbauorten
- Die Sensoren und genauer Produktbezeichnung
- Die projektinternen Bezeichnungen der Sensoren
- Die notwendigen Kabel und deren genaue Produktbezeichnung
- Die notwendigen Adapter und deren Produktbeschreibung
- Die notwendigen Steckverbindungen und deren Produktbeschreibung
- Der Meßwertaufzeichner und dessen Produktbezeichnung
- Die verwendeten Messkarten und deren Produktbeschreibung
- Die genauen Kanalnummerierungen der Messkarten
- Die Signale, welche auf welchem Kanal aufgezeichnet werden.

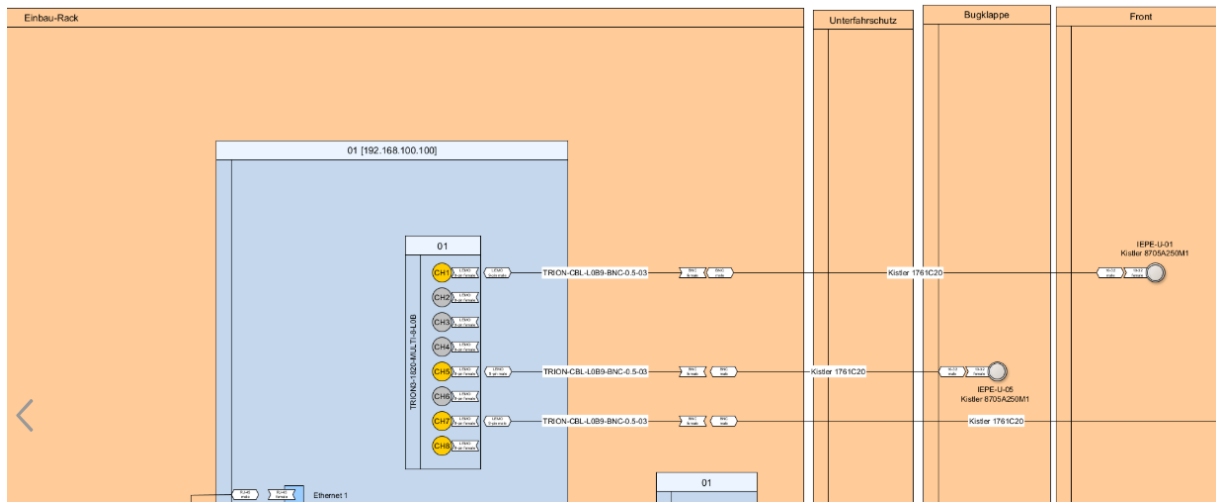


Abbildung 7.1: Ausschnitt aus der technischen Architektur.

Diese technische Architektur wurde anschließend verwendet, um Schlussfolgerungen auf ein System zu ziehen, das auch in operativen Betrieb eingesetzt werden kann.

Die Softwarearchitektur wurde weiterhin beschrieben diese beinhaltet die genauen softwareseitigen Schnittstellen und Datenflüsse. Diese Architektur wird in Abbildung 7.2 dargestellt. Sie beinhaltet

- Die Softwaremodule
- Die Umgebung, in der die Software betrieben wird
- Die Softwareschnittstellen zwischen den einzelnen Modulen
- Die exakten Datenflüsse zwischen den Modulen.

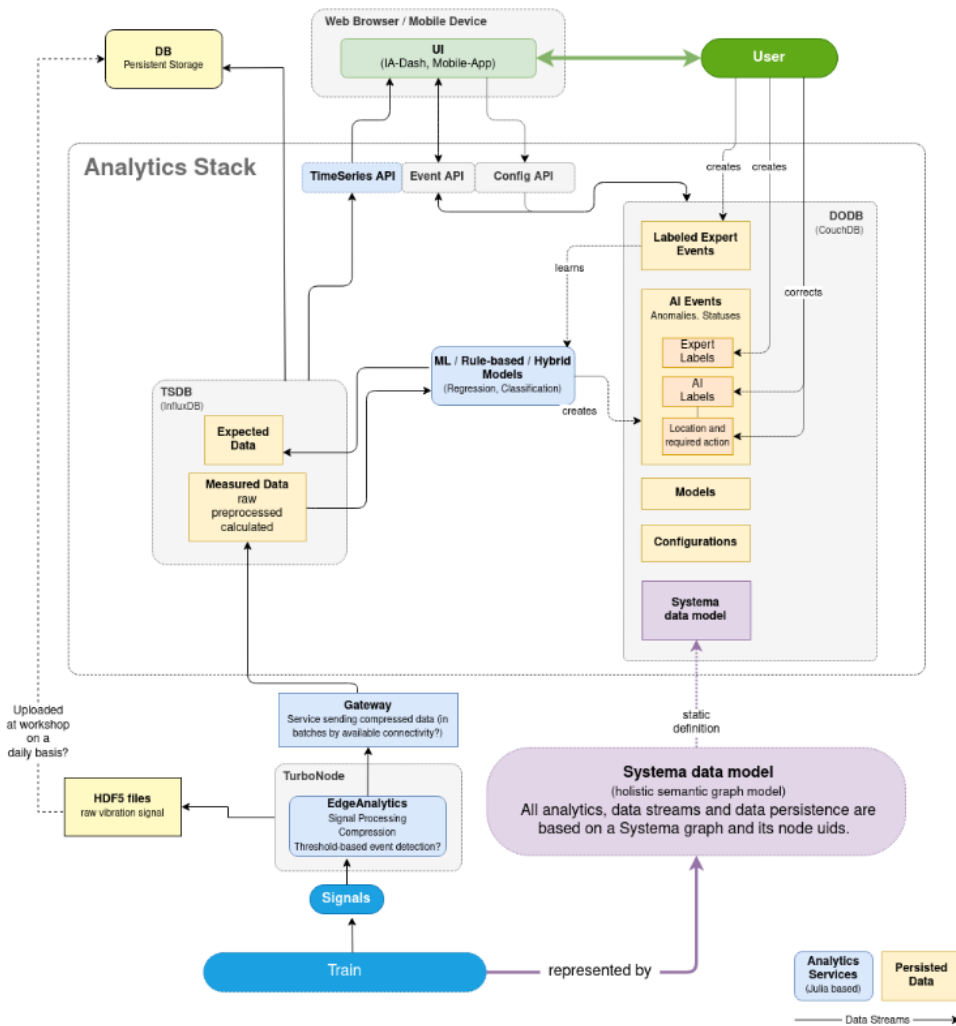


Abbildung 7.2: Technische Architektur der Software

7.1.3 Funktionale Architektur

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde zunächst auf Basis der Referenzarchitektur eine übergeordnete funktionale Systemdefinition entwickelt. Diese beschreibt, wie das zu entwickelnde System mit anderen Systemen interagiert. Diese Systemdefinition ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Sie zeigt, dass das System zum einen mit dem physischen Zug und zum anderen mit dem „Incident Prevention System“ interagiert.

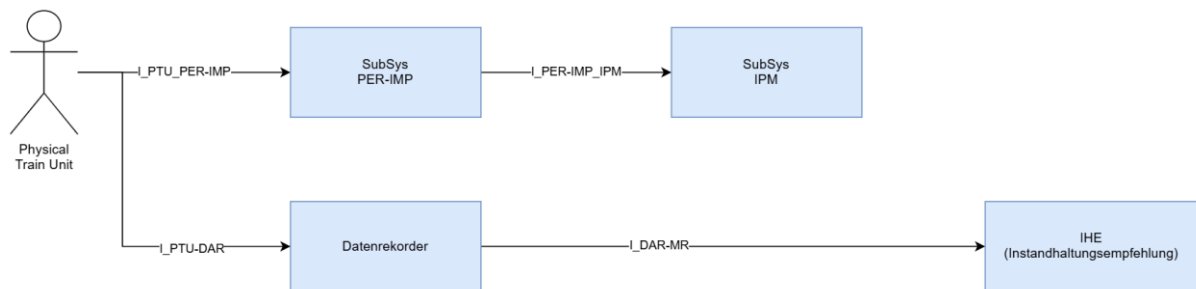


Abbildung 7.3: Systemdefinition

Im Anschluss wurde die funktionale Architektur aufgebaut.

Abbildung 7.4 zeigt die relevanten Funktionen, die aus den Funktionen "Detect Collision" und "Assess Collision Event" des operationellen Konzepts (siehe AP620) abgeleitet wurden. Die Funktionen sind den Subsystemen Impact Detection (PER-IMP) und Evaluated Train Manager (IPM-ETM) zugeordnet. Das ETM-Subsystem beinhaltet weitere, hier nicht dargestellte Funktionen für andere nicht-reguläre Fahrsituationen.

Der Aspekt der Wartungsempfehlung ist kein Bestandteil der DBS-Referenzarchitektur, da dieser für den GoA4 (Grade of Automation 4: vollautomatischer Betrieb) nicht zwingend erforderlich ist. Für eine effiziente Planung und wird daher im Rahmen dieses Projekts berücksichtigt. Die entsprechende Instandhaltungsempfehlung ist ebenfalls in der Abbildung 7.4 dargestellt.

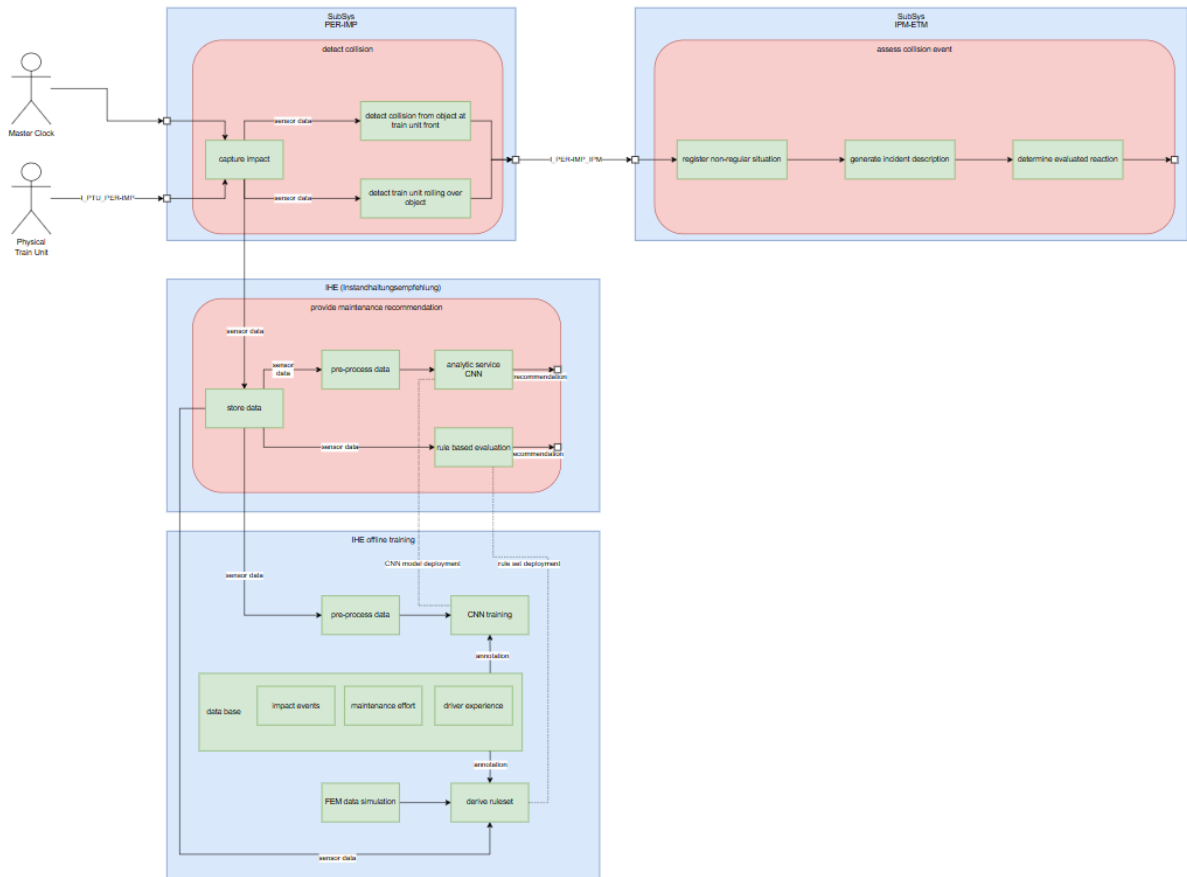


Abbildung 7.4: Funktionale Architektur

7.2 Operationale und gesetzliche Anforderungen

In ersten Schritt wurden die derzeit rechtlichen Grundlagen untersucht, die direkte Auswirkungen auf den operativen Betrieb haben können. Dabei wurden insbesondere jene betrachtet, die für den Anwendungsfall Aufprallerkennung und der Instandhaltung relevant sind. Es gelten folgende übergeordnete Richtlinien:

1. EU-Richtlinien
2. Richtlinien des Bundes
3. DB interne Richtlinien

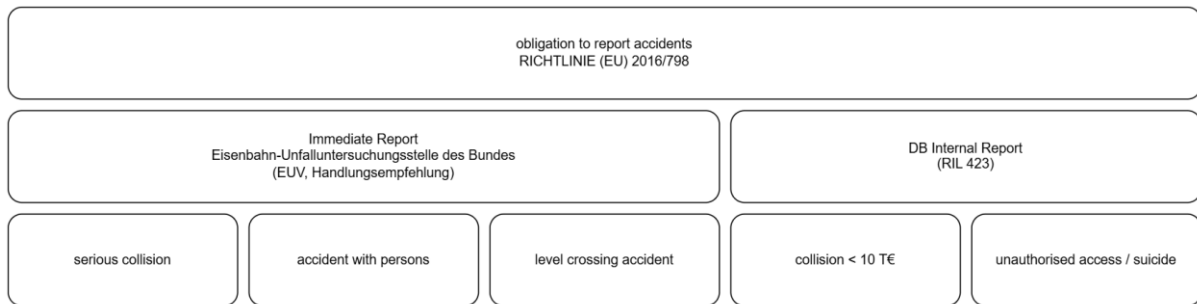


Abbildung 7.5: Geltende Rechtsnormen

Abbildung 7.5 stellt diese verschiedenen Richtlinien und ihren Wirkungsrahmen dar. So gelten EU-Richtlinien übergeordnet. Richtlinien des Bundes müssen EVUs in Deutschland zusätzlich zu den EU-Richtlinien wahrnehmen. Weiterhin gibt es DB interne Richtlinien, die von der DB und deren EVUs befolgt werden müssen.

Als weitere den operationalen Betrieb betreffende Größe wurden fiktive operationale Anforderungen herangezogen. Auf dieser Grundlage wurden die praktischen Auswirkungen von Systementscheidungen auf den operationalen Betrieb analysiert. Hierbei wurde sich vorrangig auf das Wissen der DB und der IMA berufen. Der Fokus wurde dabei auf die mögliche Umsetzung eines voll automatischen Betriebs gelegt. Es wurde bestimmt, welche Auswirkungen die Sensorkonzeption, das Architekturdesign und die KI-Verfahren auf operationale Größen haben.

Dabei wurde als wichtigste Einflussgröße die ausgegebene betriebliche Handlungsempfehlung auf operationale Größen wie Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bestimmt. Auf Basis dessen können in einem konkreten Anwendungsfall möglicher operationaler Risiken und Differenzen abgeleitet werden.

Ein weiterer Bestandteil der Arbeiten in 620 war daher auch die Abschätzung der Auswirkungen auf den operativen Instandhaltungsprozess von Fahrzeugen.

Basierend auf den geltenden Rechtsnormen und Annahmen zu operativen Anforderungen wurde ein operatives Konzept entwickelt.

Diese Darstellung zeigt in einem Sequenzdiagramm die verschiedenen Akteure sowie deren Handlungen im Falle eines Ereignisses. Die beteiligten Akteure sind:

- der Zug
- das Aufprallerkennungssystem
- die Notfalleitstelle
- der Eisenbahnbetriebsleiter
- der Notfallmanager
- die Instandhaltungsverantwortlichen
- die DB-Unfalluntersuchungsstelle
- die Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung

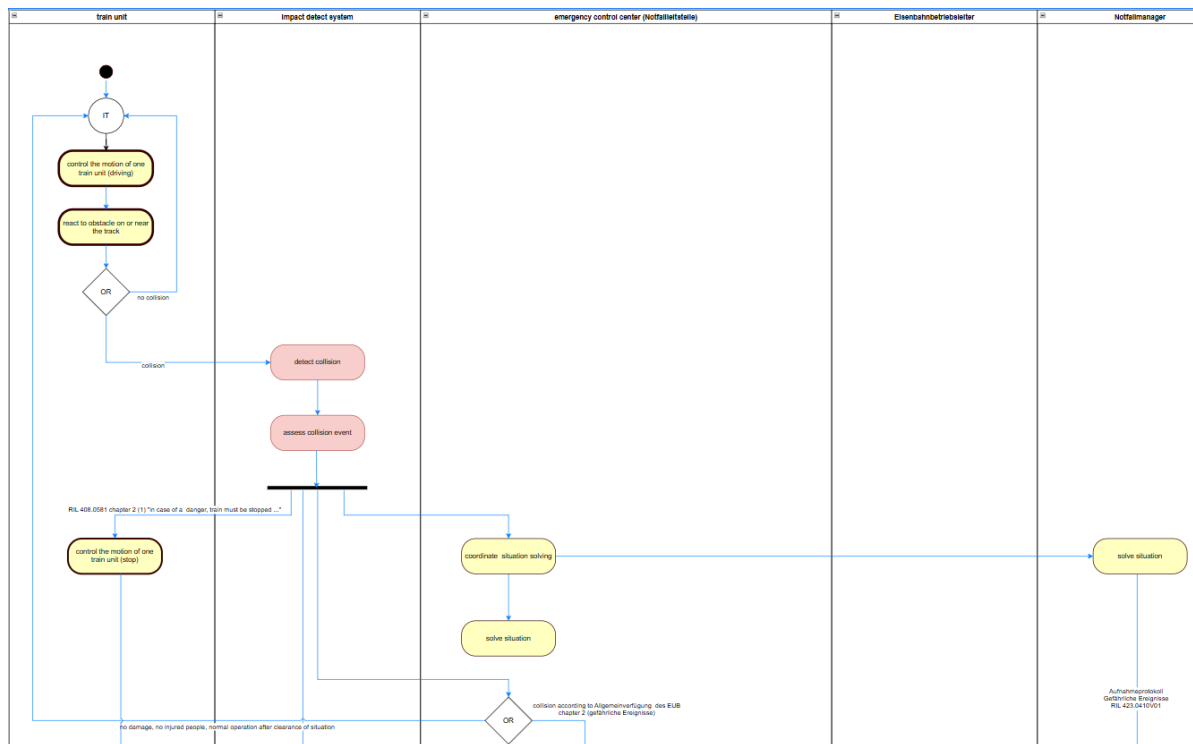


Abbildung 7.6: Auszug aus dem Sequenzdiagramm zum operativen Konzept

Abbildung 7.6 zeigt einen Ausschnitt aus dem operativen Konzept. Es werden die Akteure und die Aufgaben beschrieben. Weiterhin gibt es Entscheidungsverzweigungen, welche die weiteren Handlungsabläufe bestimmen.

Im Folgenden werden die operativen Verantwortlichkeiten („Operational Capability“) beschrieben.

Control the motion of one train unit

Diese Operational Capability beschreibt die Fähigkeit eines Zuges, sich sicher im Schienennetz zu bewegen. Die Capability wird für das KI-MeZIS Projekt als gegeben vorausgesetzt.

React on obstacles on or near the line

Diese Operational Capability beschreibt die Fähigkeit des Zuges, Hindernisse im eigenen Fahrweg zu erkennen und darauf zu reagieren, um eine Kollision möglichst zu vermeiden. Die Capability wird für das KI-MeZIS Projekt als gegeben vorausgesetzt.

Detect collision

Sind die Maßnahmen zur Vermeidung einer Kollision nicht ausreichend, so erkennt diese Funktion den Aufprall eines Objektes auf die Zugfront und/oder das Überrollen eines Objekts mit den Rädern.

Assess collision event

Diese Funktion beurteilt die Kollision mit einem Objekt beziehungsweise das Überfahren eines Objekts in Hinblick auf den weiteren operativen Ablauf. Die Funktion beinhaltet Handlungsempfehlungen, wie das sofortige Stoppen des Zuges, aber auch das Ableiten von notwendigen Attributen Daten, wie Aufprallschwere etc. für eine spätere Verwertung für die Störungsbeseitigung und Wartungsempfehlungen.

Provide maintenance recommendation

Diese Funktion stellt Empfehlungen zur Wartung der durch die Kollision verursachten Schäden bereit. Dabei können Erfahrungen aus vorherigen, ähnlichen Vorfällen genutzt werden, um die Wartungsmaßnahmen gezielt zu unterstützen.

Coordinate situation solving

Das Emergency Control Center übernimmt die Koordination der Unfallsituation. Sollte es sich um ein Ereignis handeln, das eine Sofortmeldung erfordert, wird die Zuständigkeit für die Unfallstelle an die Unfalluntersuchungsbehörde (EUB) übergeben. Diese Funktion ist nicht Teil des KI-MeZIS Projektes.

Solve situation

Diese Funktion beschreibt die Durchführung operativer Maßnahmen vor Ort durch das bestehende Notfallmanagement. Die Funktion ist nicht Teil des KI-MeZIS Projektes.

Sofortmeldung

Für die in Kapitel 3.2 der Allgemeinverfügung der Eisenbahnunfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB) aufgelisteten Ereignisse ist eine Meldung des Unfalls innerhalb von 30 Minuten an das EUB fernmündlich erforderlich. Das EUB übernimmt damit die Hoheit über die Unfalluntersuchung und koordiniert sich mit der Notfalleitstelle und dem Notfallmanager. Die Sofortmeldung ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Tagesmeldung

Liegt ein meldepflichtiges gefährliches Ereignis nach Kapitel 2 der Allgemeinverfügung des EUB vor so erfolgt, unabhängig davon ob eine Sofortmeldung erforderlich war, eine Tagesmeldung an das EUB zur Information über den aktuellen Ermittlungsstand. Die Tagesmeldung ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Generate accident report (EUB)

Nach Abschluss der Untersuchung erzeugt der Eisenbahnbetriebsleiter einen Unfalluntersuchungsbericht nach der Eisenbahnunfalluntersuchungsverordnung (EUV). Dieser Bericht wird an das EUB gesendet. Der Untersuchungsbericht ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Provide DB internal accident report (RIL 423)

Ist das Ereignis kein meldepflichtiges gefährliches Ereignis, dann hat eine interne Untersuchung des Ereignisses zu erfolgen, die in einem internen Bericht dokumentiert wird. Die Untersuchungsbericht ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Train maintenance work

Diese Funktion beschreibt den Reparatur- und Wartungsvorgang am Zug für die durch das Ereignis entstandenen Folgen. Zur besseren Planung soll die vom System generierte Wartungsempfehlung verwendet werden. Über die tatsächlich notwendigen Arbeiten und die Wiederfreigabe entscheidet die Entity in Charge of Maintenance.

Infrastructure maintenance work

Diese Funktion beschreibt den Reparatur- und Wartungsvorgang an der Infrastruktur für die durch das Ereignis entstandenen Folgen.

Monitor incident

Das EUB wird durch die Tagesmeldung über den aktuellen Ermittlungsstand des Ereignisses informiert. Die Funktion ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Coordinate with ECC and Notfallmanager

Im Falle eines Ereignisses mit notwendiger Sofortmeldung hat die EUB die Hoheit über die Unfalluntersuchung. In diesem Fall koordiniert sie sich mit der Notfallleitstelle und dem Notfallmanager über Maßnahmen und Ergebnisse an der Unfallstelle. Die Funktion ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Evaluate accident and introduce DB internal safety recommendations

Diese Funktion beschreibt die Ableitung interner Maßnahmen/Empfehlungen aus dem Unfalluntersuchungsbericht, um - wenn möglich - ähnliche Vorfälle in Zukunft zu vermeiden und weiterhin einen sicheren Bahnbetrieb zu gewährleisten. Die Funktion ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

Evaluate accident and introduce safety recommendations

Diese Funktion beschreibt die Ableitung Maßnahmen/Empfehlungen aus dem Unfalluntersuchungsbericht, um - wenn möglich - ähnliche Vorfälle in Zukunft zu vermeiden und weiterhin einen sicheren Bahnbetrieb zu gewährleisten. Die Funktion ist Bestandteil des bestehenden Notfallmanagements.

7.2.1 Performance Anforderungen

Bereits zu Beginn der Vorprojekte hatte die DB InfraGo AG Performance-Anforderungen im Rahmen der Referenzarchitektur entwickelt. Diese Anforderungen beschreiben, was das System leisten soll. Da innerhalb der Referenzarchitektur von konkreten Projektumsetzungen abstrahiert wird, wurden diese Anforderungen sehr allgemein gehalten. Dennoch getroffene Annahmen wurden in Form eines „Rationale“ zu jeder Anforderung festgehalten.

ID	Performance Requirement	Rationale
R-00102	<i>While the train unit is driving, this function shall detect a collision at the train front with any object in the clearance gauge having a weight of more than 30 kg in 95% of the cases.</i>	<p>Only objects with a certain weight will damage the train (30 kg is weight of a larger animal or a kid)</p> <p>The 95% confidence intervall is based on IEC 61508 for safety function with small requirements rate. The current estimate is SIL0 probability for an on demand function. To be checked after safety risk analysis if this value needs to be adapted</p> <p>Notes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Initial results show accelerations exceeding 500g in some events. This must be taken into account in the sensor and system design. • Preliminary data also indicate that

ID	Performance Requirement	Rationale
		the acceleration sensors may be affected by the activation of the typhon (horn). This could potentially be due to cable routing. This issue needs to be further investigated and addressed in the system design.

Tabelle 3334: Beispiel eines Rationale zu einer Performance-Anforderung

Da zum Stand der Technik nur wenige Informationen zur Leistungsfähigkeit technischer Umsetzungen vorlagen, stellte ein wichtiger Aspekt bei der Konkretisierung der Referenzanforderungen Anforderungen die technische Machbarkeit dar.

Das Finden möglicher Machbarkeitsgrenzen, stellte daher eine wichtige Aufgabe in Ki-MeZIS dar, welche von der Konzeption, Durchführung sowie Auswertung berücksichtigt wurde.

Zu konkreten Fragestellungen wurden regelmäßig Expertenrunden initiiert, die auf Basis der bestehenden Anforderungen durchgeführt wurden.

ID	Performance Requirement	Abgeleitete Fragestellung / Priorisierung für Tests
R-00101	While the train unit is driving this function shall detect collisions with any rigid object on the rail having a weight of more than 5 kg in 95% of the cases.	Ergänzen: Detektierbarkeit weggestoßener Objekte vom Typ Metallrahmen Repriorisieren: Einfluss der Schienenqualität auf die Detektierbarkeit, was ist unter welchen Umständen detektierbar

Tabelle 3536: Beispiel für die Definition und Repriorisierung von Überfahrversuchen anhand einer Performance-Anforderung

Weiterhin wurden die in TP100 durchgeführten Analysen der Test- und Labordaten genutzt, um mögliche Machbarkeitsgrenzen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Technologieunabhängigkeit zu bewerten. Daraus wurden anschließend Empfehlungen zur Anpassung der Anforderungen abgeleitet, die im weiteren Projektnachgang bewertet werden sollen

ID	Performance Requirement	Result of KI-MEZIS	Proposal for Change
R-00101	While the train unit is driving this function shall detect collisions with any rigid object on the rail having a weight of more than 5 kg in 95% of the cases.	<ul style="list-style-type: none"> Rigid Object of minimum height on the rail (e.g. 20 mm) is detectable Object is detectable if it is driven ober by the wheel Collision with wheel is not detectable for tested situations 	any driven over rigid object on the rail having a hight of more than 20 mm above rail
R-00102	While the train unit is driving this function shall detect a collision at the train front with	<ul style="list-style-type: none"> stone of 204g has destroyed bugklappe at 352 km/h relative speed 30 kg is only detectable 	Shall detect a collision with operational relevant damage of the

ID	Performance Requirement	Result of KI-MEZIS	Proposal for Change
	any object in the clearance gauge having a weight of more than 30 kg in 95% of the cases.	<p>from ca. 3,6 km/h on, > 5km/h wenn nicht gegenüber Peaks abgegrenzt werden muss</p> <ul style="list-style-type: none"> • Object might only slightly or partly touch the train - that would reduce detectability • The collision force will cause damage to the train is train specific • The same energy as a bird collision with full speed would calculatory occur at 30 km/h with 30 kg 	<p>train according to DIN EN 12663 and Leitfaden Bestimmung aerodynamischer Lasten für Schienenfahrzeuge) or train specific</p> <p>at least with any object colliding with a mass of more then 30kg at speed above 5km/h with the train</p>

Tabelle 37: Beispiel für aus technischen Machbarkeitsgrenzen abgeleitete Anpassungsvorschläge für Anforderungen

7.3 Kostenmonitoring

Ziel der Kostenbeobachtung ist es, ein besseres Verständnis dafür zu entwickeln, welche Kosten bei einer Nachrüstung bzw. Erstausrüstung entstehen würden. Die im Rahmen von KI-MEZIS angefallenen Systemkosten des Prototyps sind dabei gut bestimmbar. Auch Daten zu entstandenen Entwicklungskosten des Prototyps konnten festgehalten werden.

Bei der Betrachtung der Kosten müssen allgemeine Kosten, von konkreten Kosten eines Aufprallerkennungssystems unterschieden werden. Allgemeine Kosten fielen innerhalb von KI-MEZIS in Form von Zulassungskosten und Kosten des Kabelkanals an, welche soweit möglich bei den oberen Kosten unberücksichtigt blieben. Weitere allgemeine Kosten, wie die für ein Testfahrzeug oder ein CAD-Modell, sind im Projekt nicht angefallen.

7.3.1 Systemkosten des Prototyps

Als Systemkosten des Prototyps können im Rahmen von KI-MEZIS vor allem die HW-Kosten herangezogen werden. Zunächst wurden die im Projekt angefallenen Systemkosten zusammengefasst. Anschließend wurde unter Berücksichtigung, welche Hardware und Software für einen minimalen Prototyp benötigt würden (siehe Abschnitt 2.2), eine Auswahl der angefallenen Kosten aufgestellt. Dabei zeigt sich, dass die prototypische HW mit 120.000 € Hoffnung auf geringe Stückkosten eines zukünftigen Produktes machen kann.

Komponente	Umfang Prototyp 1-seitig	Kosten beid-seitig
Sensorik	<p>7 Beschleunigungssensoren (laut minimalem Sensorkonzept)</p> <p>Kosten pro Sensor: 850 € (uniaxial)-2.500 € (triaxial)</p> <p>resulting cost 6.000 €-17.000 € (einseitig)</p>	26.600 €

Kabel + Montagezubehör	7 Kabel für Beschleunigungssensoren Kosten pro Kabel: 240 € -1215 € (Extra-Long) Kosten für Klebepads: 385 € + 1.240 € Schutzklappen → Resultierende Kosten: 1.680 € - 8.505 € + 385 € (einseitig)	12.000 €
Messtechnik	Rechner: XKrug 11.500 € Messwertaufzeichner (8×4 Kanäle): 67.700 € DMS-Erweiterung: 2.500 € Datenleitungen: 5.000 € → Resultierende Kosten: 81.700 €	81.700 €
SUMME	Der Einsatz des Systems erfordert eine Lokalisierung; das Dewetron-System war nicht echtzeitfähig. Beinhaltet nicht die Kosten der externen Datenspeicherung, Datenaufbereitung/Auswertung sowie Übertragung	120.000 €

Tabelle 38: HW-Kosten eines minimalen Prototyps

Die Rechen-Hardware eines realen Produkts wäre vermutlich deutlich günstiger. Als Messwertaufzeichner könnte ebenso eine kleinere Version verwendet werden, da 14 Kanäle ausreichend wären. Sollte es eine Anforderung zur Echtzeitdatenübertragung geben, müsste auf ein echtzeitfähiges Modell eines Messwertaufzeichners zurückgegriffen werden.

Für eine Nachrüstung kann die Kabelführung als größter Kostentreiber für die Integrations- und Zulassungskosten ausfindig gemacht werden. Diese wurde bei aTL notwendig, da ebenso Frontsensoren im oberen Bereich verbaut waren, welche die innenliegenden Kabelkanäle blockierten. Bei einer alleinigen Ausstattung der Zuggattung des aTL (ICE-TD) mit Kollisionssensoren wären diese innenliegenden Kanäle ausreichend gewesen, was die Kosten auf unter 200.000 € begrenzt hätte.

Integrations- und Zulassungskosten

Komponente	Umfang im Prototyp	Kosten
Einbau	Aufprallsystem (ohne Kabelkanal): <ul style="list-style-type: none"> • Einbau: 34.305 € • Einrichtung und Test: 30 000 € Überfahrssystem: <ul style="list-style-type: none"> • Einbau: 50.888,50 € • Fachliche Begleitung: 17.934 € Messwertaufzeichner:	223.127,50 €

	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau und Konfiguration: 90.000 € 	
Zulassungsprüfungen	<p>Zulassung Gesamtsystem</p> <ul style="list-style-type: none"> • Messnachweis: 1.521 € • Festigkeitsbetrachtung 22.400 € • Brandschutz: 4.638 € • EMV: 6.000 € • Lichtraumprofil: 5.500 • Aerodynamik 28.120 € • Nachweis Feistigkeit Fügetechnik: 8.040 € • Genehmigungsmanagement 23.400 € • Zulassungsmanagement/Safety & Risk: 62.956 € • Engineering Fachdienste: 12.030 € • Nachweis elektrische Sicherheit: 2.535 € • EG- und NNTR-Konformitätsbewertung: 43.550 € <p>Zulassungsdokumente CTM: 48.123,55 €</p>	<p>177.509 € (220.690 €)</p>
SUMME	Zulassung für den regulären Betrieb nach dem 3. Eisenbahnpaket - ohne Kabelkanal (fett) und mit Kabelkanal.	177.509 €

Tabelle 39: Integrations- und Zulassungskosten eines minimalen Prototyps

Die Zulassung erfolgte von Oktober 2022 bis Frühling 2024, also über einen Zeitraum von 1,5 Jahren. Dabei nahm die Integration des Kabelkanals den Zeitraum vom Frühling 2023 bis Frühling 2024 in Anspruch. Ohne diesen wäre die Zulassungszeit erheblich verkürzt worden.

7.3.2 Entwicklungskosten des Prototyps

Auch die in KI-MEZIS angefallenen Entwicklungskosten können als Basis für spätere Schätzungen dienen. Die Daten der Entwicklungskosten wurden dabei in einem Workshop gemeinsam mit den Partnern ermittelt und tabellarisch festgehalten. Sie beinhalten nicht das Erstellen eines CAD-Modells, da dieses im Rahmen von Ki-MEZIS vorhanden war. Aufgrund der fehlenden Informationen über Stundensätze, sind die Daten teilweise als Mann Monate festgehalten.

Einbaukonzeption	<p>Aufprallerkennung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption: 11.200 € • Beratung: 15.568,77 € • Beratung: 2.277,07 € • Beratung: 4.713,00 € <p>Überfahrererkennung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption: 22.475 € 	
Feldtestdatenanalyse	Ca. 400.000 €	
Labortests	IMA: 50.000 -80.000 € pro	

	<p>Bauteil</p> <p>+ 6MM pro Bauteil</p> <p>Materialkosten IMA: 1.000-2.000 € pro Sensor mit Kabel</p> <p>DLR: 4 - 6 Mannmonate für statische Versuche (Sensorpositionierung)</p> <p>Laborkosten 10.000 – 60.000 € pro Komponente pro Testserie</p>	
FEM-Modelle	<p>IMA: 2 Mannjahre pro Komponente</p> <p>DLR: 0,5 -2 Mannjahre pro Bauteil (rein Personalkosten)</p>	
Feldtests	ATL: 7.000 € pro Tag	
Feldtestdatenannotation	10.000 € pro Woche	
KI-Software	2 Mannmonate	

Tabelle 40: Daten der Entwicklungskosten

7.3.3 Ableitung von Serienkosten

Aufgrund des in KI-MEZIS auf Sensorik und KI gelegten Fokus können Serienkosten nicht vollständig aus den Projektkosten abgeleitet werden.

Um offene Aspekte herausstellen zu können, wurden daher in einem Workshop die Kosten eines potenziellen Serienprodukts für die Instandhaltung bzw. das automatisierte Fahren in Bereiche gegliedert. Anschließend wurde geprüft, inwieweit sich diese aus den im Projekt KI-MEZIS erfassten Kosten ableiten lassen.

Kostenkategorie	Kostenart	Instandhaltung	vollautomatisiertes Fahren
Allgemeine Entwicklungs- & Testkosten	CAD Modell Fahrzeugfront inkl. Materialien		
	Testfahrten		
	Datenübertragung		
Spezifische Entwicklungs- & Testkosten	Feldtestdatenannotation		
	Feldtestdatenanalyse		
	Testzulassung		
	FE-Berechnungen (numerische Versuche)		
	Labortests		
	Entwicklung Erkennungsalgorithmik		
	Erprobung Erkennungsalgorithmik		
Integrations- und Zulassungskosten	spezifische Integrationskosten Aufprallerkennung		
	(Integrationskosten der Aufpralsensorik ohne Kabel und Auswertungs-HW)		
	(spezifische Zulassungskosten Aufprallerkennung Zulassung aller Einzelkomponenten, sowie Zulassung der spezifischen Integration)		
	Anteil an allgemeine Integrations- und Zulassungskosten		
Applikationskosten	Einbau		
	Kalibrierung		
Betriebskosten	Wartung		
	Instandhaltung		
	Datenübertragung		

Abbildung 7.7: Ableitbarkeit der Serienkosten aus dem KI-MeZIS Kostenmonitoring

(farblich gestaffelt von rot: schlecht ableitbar nach grün: gut ableitbar).

Weiterhin sind die Kosten abhängig vom konkreten Fahrzeug und Use-Case. Innerhalb von KI-MeZIS konnte herausgearbeitet werden, welche Anforderungen an die Erkennbarkeit erhöhte Entwicklungsaufwände mit sich bringen. Dies wird insbesondere durch die Abgrenzbarkeit der Impact Signale von den operationalen Signalen bestimmt und schlägt sich in Aufwänden der Positionierung, Kalibrierung und Entwicklung von Erkennungsalgorithmen nieder.

Abgeleitet aus den Analysen und Hypothesen zur Erkennbarkeit wurden dabei drei unterschiedliche Bereiche identifiziert und Kombinationen von Objektarten und Geschwindigkeitsbereichen zugeordnet. Der Hypothese liegt immer das mit der Masse-Geschwindigkeitskombination maximal mögliche Kollisionsszenario zu Grunde.

	V (km/h)	Object	train starting	low velocity		high velocity	
			3,6-5km/h	> 5-50km/h	> 50 - 80km/h	>80 - 150	150 - max
light impacts	bigger insects	Peaks/Typhon			kleines Objektgewicht		Regen
	birds						
	small tree / branch						
	human						
	Animals with limbs						
heavy impacts	Big Animals						
	Tree						
	Car						
	Truck						
	Train						

Abgrenzung mit Schwellenwertverfahren auf Basis einer Erstkalibrierung möglich

Abgrenzung erfordert eine exakte (dynamische) Kalibrierung

Erfordert aufwändige Verfahren zur Abgrenzung bestimmter Ereignisse

Nicht durch KI-MeZIS abgedeckt

Abbildung 7.8: Kategorien von Entwicklungsaufwänden abhängig vom Erkennungsbereich

7.3.4 Ableitung von Transferkosten

Im Rahmen von KI-MeZIS konnten wichtige Einblicke in die Komplexität der für die Aufprall- und Überfahrererkennung aufgezeichneten Beschleunigungssignalen gewonnen werden. Es zeigte sich, dass die Einflussfaktoren vielfältig und vermutlich größtenteils noch unbekannt sind. Daneben konnte die Material- und Positionsabhängigkeit bestätigt werden. Insgesamt stellen diese Erkenntnisse Indikatoren für höhere Transferaufwände dar.

Dennoch konnte im Rahmen der Überfahrererkennung gezeigt werden, dass die Ergebnisse auf einem Flachwagen mit denen des aTL vergleichbar waren. So kann davon ausgegangen werden, dass die Methoden grundsätzlich für unterschiedliche Fahrzeugkategorien verwendet werden können. Infrastrukturabhängige Einflüsse müssen jedoch im Rahmen eines

Transfers überprüft und fahrzeugabhängiges Einflüsse analysiert werden. Bei einer Nachrüstung ist ein fahrzeugabhängiges Einbaukonzept erforderlich.
Es ist also davon auszugehen, dass im Rahmen eines Transfers erneut Entwicklungskosten anfallen.

8 Bericht und Publikation (TP700)

Im Rahmen dieses Teilprojekts erfolgte die Dokumentation des gesamten Projekts und dessen Teilprojekte entsprechend den spezifischen Vorgaben.

Weiterhin wurden die erzielten Ergebnisse in einschlägigen Fachzeitschriften sowie auf Tagungen publiziert und somit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Die folgende Tabelle listet alle Publikationen auf, die im Rahmen des Projekts entstanden sind und publiziert wurden oder noch werden:

Tabelle 41: Publikationen, die während der Projektlaufzeit umgesetzt wurden.

Publikation	Ort oder Titel und weitere Informationen	Datum
LinkedIn	Vorstellung des Projektes auf der DB Seite	03/2022
DB Newsfeed	Vorstellung des Projektes (9)	03/2022
LinkedIn	Vorstellung des Projektes auf der DLR Seite	05/2022
Messe (InnoTrans)	Vorstellung des Projektes auf der InnoTrans 2022 im aTL	09/2022
Webseite DB	Projektvorstellung: KI-MeZIS (9)	ab 2022
Konferenz (Schienenfahrzeugtagung)	„Aufprallerkennungssystem für Schienenfahrzeuge“, <i>M. Köppel, B. Noethlichs, R. Winkler-Höhn, C.-J. Braun, T. Hanisch, M. Schischkoff, K. U. Wolter, D. Lauer, M. Härter, T. Herrmann</i>	03/2023
Konferenz (NAFEMS)	„Development of a sensor-based system for structuralhealth monitoring of rail vehicle structures“, <i>C.-J. Braun, M. Dazer</i>	05/2023
LinkedIn	Beitrag zu den Überrollversuchen mit dem aTL in Johannesstift auf der DB Seite	10/2023
Konferenz (Schienenfahrzeugtagung)	„KI-MeZIS: Nutzung von künstlicher Intelligenz für die Zustandsüberwachung von Schienenfahrzeugen“, <i>M. Härter, C.-J. Braun, R. Winkler-Höhn, M. Laporte, F. Stark, T. Herrmann, M. Köppel</i>	09/2024
Konferenz (Schienenfahrzeugtagung)	„Methode zur Ermittlung von Betriebslasten bei Schienenfahrzeugen mittels KI-Methoden“, <i>M. Laporte, R. Winkler-Höhn, J. Bell, A. Buhr</i>	09/2024
Konferenz (STAB)	„Wind tunnel calibration methodology for measuring aerodynamic loads on operationalhigh-speed trains“, <i>A. Buhr, J. R. Bell, L. Siegel, A. Henning, M. Köppel, M. Härter, D. Lauer, M. Laporte, and R.-W.Höhn</i>	11/2024
Konferenz (ICIEA)	„Driving-Over Detection in the Railway Environment“, <i>T. Herrmann, N. Chenkov, F. Stark, M. Härter, and M. Köppel</i>	01/2025

Die blau schattierten Publikationen wurden von der DB InfraGO AG initiiert und weitestgehend auch.

9 Literaturverzeichnis

1. Digitale-Schiene-Deutschland. <https://digitale-schiene-deutschland.de/de>.
2. **DIN EN 12663-1:2024-02 Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen** . Bd. Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen);
3. eba. **Leitfaden Bestimmung aerodynamischer Lasten für Schienenfahrzeuge**. Schließung einer Regelungslücke in EN 12663-1 und EN 14067 bei Wagenkastenfestigkeitsnachweisen. 2019.
4. Bahntechnik, Institut für und 2022., DB Impact Detection. **Prototype Driving over Objects**.
5. Bundesanstalt Era. Leitfaden zur Anwendung der Streckenklassen. [Online] https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Guide%20for%20the%20application%20of%20the%20INF%20TSI%20%28EN%29%20-%20DE_0.pdf.
6. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Bahntechnik; Institut für Maschinenelemente. **DB Impact Detection**. 2022.
7. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Institut für Bahntechnik; Institut für Maschinenelemente. **Machbarkeitsstudie Aufprallerkennung**. 2020.
8. Deutsches Institut für Normung e.V. **DIN EN 15227: Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugkästen**. Berlin : Beuth-Verlag, 2011.
9. Projektes);, DB News (Vorstellung des. <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/KI-MeZIS>.
10. DB);, LinkedIn (Vorstellung des Projektes. [https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6910504956043137024/?commentUrn=urn%3Ali%3Acomment%3A\(activity%3A6910504956043137024%2C6911792993511354368\)](https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6910504956043137024/?commentUrn=urn%3Ali%3Acomment%3A(activity%3A6910504956043137024%2C6911792993511354368)).
11. DLR, Vorstellung des Projektes. https://www.linkedin.com/posts/dlr-institut-fuer-fahrzeugkonzepte_gemeinsam-mit-partnern-arbeitet-das-dlr-an-activity-6923158810958172161-NjsX?utm_source=linkedin_share&utm_medium=member_desktop_web.
12. Webseite:, Projektvorstellung auf der DB. <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/KI-MeZIS>.