



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Uffizi federal d'ambient UFAM

wascosa



kasasi 
SOFTWARE SOLUTIONS

Forschungsprojekt

„Flachstellenerkennung mit Telematik“

Projektleitung:

WASCOSA AG
Christoph Becker

Mitwirkende Unternehmen:

Kasasi GmbH, Kempten (DE)
Martin Forster

SAVVY Telematic Systems AG, Schaffhausen (CH)
Felix Schwarz

Anzahl Seiten: 48

Datum: 01. März 2018

WASCOSA AG

Werftestrasse 4
CH - 6005 Luzern
+41 41 727 67 67
info@wascosa.ch

SAVVY Telematic Systems AG

Grabenstrasse 9
CH - 8200 Schaffhausen
+41 52 633 46 02
info@savvy-telematics.com

kasasi GmbH

An der Stiftsbleiche 11
DE - 87439 Kempten
+49 831 512 34 33 0
info@kasasi.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	7
1.1.	Motivation	7
1.2.	Auftrag	7
1.3.	Ausgangslage	8
1.3.1.	<i>Vorhandenes Wagenmaterial</i>	8
1.3.2.	<i>Vorhandene Telematiksysteme</i>	8
1.3.3.	<i>Vorhandene Schnittstellenanbindung</i>	8
2.	Konzeptphase	9
2.1.	Ziel 1: Entwicklung Erkennungsalgorithmus	9
2.1.1.	<i>Theorie und Annahmen</i>	9
2.1.2.	<i>Dokumentation von Flachstellen</i>	10
2.1.3.	<i>Testumgebung zur Erfassung von Entwicklungsmessdaten</i>	11
2.1.4.	<i>Bewertung Testaufbau</i>	11
2.1.5.	<i>Flachstellenbeispiel Wagen 3780 4975 506-9</i>	13
2.1.6.	<i>Verifikation von Theorie und Annahmen</i>	17
2.1.7.	<i>Beispiel mit Flachstelle</i>	21
2.1.8.	<i>Beispiel ohne Flachstelle</i>	25
2.1.9.	<i>Auffällige Wagen ohne Flachstellenmeldung</i>	27
2.1.10.	<i>Erkenntnisse</i>	29
2.1.11.	<i>Verbesserungen</i>	29
2.1.12.	<i>Nächste Schritte</i>	30
3.	Realisierungsphase	31
3.1.	Ziel 1: Entwicklung Erkennungsalgorithmus	31
3.1.1.	<i>Einleitung</i>	31
3.1.2.	<i>Grundlage</i>	31
3.1.3.	<i>Erwartetes Resultat</i>	32
3.1.4.	<i>Rollout</i>	32
3.1.5.	<i>Validierung & Resultate</i>	32
3.2.	Ziel 2: Schnittstellenanbindung	36
3.2.1.	<i>Einleitung</i>	36
3.2.2.	<i>Zu übermittelnde Grössen</i>	36
4.	Fazit	39
4.1.	Zielerreichung	39
4.2.	Dank	39
A	Telematik: Einbauorte an WASCOSA-Intermodalwagen	41
A-i	Containertragwagen 60'	41
A-ii	Doppelcontainertragwagen 80'	41
A-iii	Doppelcontainertragwagen 90'	42
A-iv	Einzeltaschenwagen	42
A-v	Doppeltaschenwagen	43
B	Formular zur Dokumentation von Flachstellen	45
C	Schnittstelle	47
C-i	«RailPushReceiver.wsdl»	47
C-ii	«RailPushReceiver.xsd»	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptphase	9
Abbildung 2: (v.l.n.r.) Koordinatensystem am Güterwagen; Signalentstehung physisch am Rad; Messung im Zeitbereich; Auswertung im Frequenzbereich.....	9
Abbildung 3: Normale Messgrößen am Wagen 3780 4975 506-9.....	13
Abbildung 4: Messgrößen nach Auftreten einer Flachstelle bei hoher Geschwindigkeit	14
Abbildung 5: Messgrößen nach Auftreten einer Flachstelle bei niedriger Geschwindigkeit	15
Abbildung 6: Messung nach dem Werkstattbesuch	16
Abbildung 7: Erfassung einzelner Messungen.....	17
Abbildung 8: Verschiedene Detektionsmuster zur Flachstellenerkennung	19
Abbildung 9: Geschwindigkeit (oben) und Beschleunigungen der z-Achse (unten) eines Wagens mit Flachstellen	21
Abbildung 10: Frequenzdarstellung nach der Transformation der Beschleunigungsdaten in den Frequenzbereich (oben); Extraktion der Peaks (Mitte) und des Grundrauschens (unten).....	22
Abbildung 11: Anzahl Peaks jeder Einzelmessung während rund 4 Monaten	23
Abbildung 12: Oberwellen-Analyse aller erkannten Peaks während rund 4 Monaten	23
Abbildung 13: Summe der Peakstärken einzelner Messungen während rund 4 Monaten.....	24
Abbildung 14: Anzahl Peaks jeder Einzelmessung während rund 4 Monaten, ohne Flachstelle.....	25
Abbildung 15: Oberwellen-Analyse aller erkannten Peaks während rund 4 Monaten, ohne Flachstelle	25
Abbildung 16: Summe der Peakstärken einzelner Messungen während rund 4 Monaten.....	25
Abbildung 17: Indikator eines einzelnen Wagens in Abhängigkeit der Geschwindigkeit während rund 4 Monaten.....	26
Abbildung 18: Beispiel 1: Kurzzeitig hoher Indikator am 15. Mai (1007-000865; 3780 4975 947-5).....	27
Abbildung 19: Beispiel 2: Kurzzeitig hohe Indikatoren in der ersten Maihälfte (1007-000356; 3385 4956 167-2).....	27
Abbildung 20: Beispielhafte Messdaten eines Wagens mit dauerhaft hohen Werten über alle Verarbeitungsformen.....	28
Abbildung 21: Realisierungsphase.....	31
Abbildung 22: Messwerte ohne Flachstelle. Oben: Gemessene Beschleunigungen der z-Achse während 3 Sekunden (gefiltert). Unten: Frequenzspektrum der Messdaten (blau) inkl. dem Rauschpegel (gelb).	33
Abbildung 23: Messwerte mit Flachstelle. Oben: Gemessene Beschleunigungen der z-Achse während 3 Sekunden (gefiltert). Unten: Frequenzspektrum der Messdaten (blau) mit dem Rauschpegel (gelb).	34
Abbildung 24: Verlauf der Indikatoren 1-4 des während rund einem Monat (vor und bei Entstehung der Flachstelle).....	35
Abbildung 25: Messdatenbeispiel: Detektierte Flachstelle	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemeldete Flachstellen.....	10
Tabelle 2: Wagen mit zeitlich begrenzter Abweichung.....	27
Tabelle 3: Wagen mit dauerhaft hoher Anzahl Peaks	28
Tabelle 4: Beschreibung der Indikatoren	32
Tabelle 5: Messdatenbeispiel: Typische Indikatorwerte ohne Flachstelle.....	33
Tabelle 6: Messdatenbeispiel: Typische Indikatorwerte mit Flachstelle.....	34
Tabelle 7: Übersicht relevanter Informationen zur Übermittlung von Flachstellen-Messdaten	36

1. Einleitung

1.1. Motivation

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz 265'000 Menschen schädlichem oder lästigem Eisenbahnlärm ausgesetzt. Zu ihrem Schutz wurde nach Massgabe des Bundesgesetzes vom 24. März 2000 über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE alt) bis 2015 ein umfassendes Konzept zur Lärmreduktion umgesetzt. Es beinhaltet Massnahmen am schweizerischen Rollmaterial, die Realisierung von Lärmschutzwänden und den Einbau von Schallschutzfenstern. Damit können unter weitgehender Einhaltung der Fristen und mit einer wesentlichen Unterschreitung der ursprünglich geschätzten Kosten zwischen 160'000 und 170'000 Menschen vor dem Lärm geschützt werden.

Das im Gesetz formulierte Minimalziel zur Anzahl der zu schützenden Personen (Schutzgrad) von mindestens zwei Dritteln wurde mit 60-64% jedoch knapp nicht erreicht.

Das Lärmempfinden hängt nicht nur von der Lautstärke einer Schallemission ab, sondern auch von deren Charakter. Während ein «Rauschen» eines Güterzuges aus einiger Distanz zwar hörbar, aber nicht zwingend als störend empfunden wird, erzeugt eine Flachstelle ein sehr eindeutiges, unnatürliches periodisches Schlagen.

Die WASCOSA AG hat zum Zeitpunkt des Projektstartes bereits rund 600 Intermodalwagen mit Telematiksystemen der Firma SAVVY Telematic Systems AG ausgestattet. Mit durchschnittlichen Jahreslaufleistungen von weit über 100'000 km (auch >200'000 km sind keine Seltenheit) gehören Intermodalwagen zu den am intensivsten genutzten Güterwagen. Entsprechend grossflächig verteilen sich auch die Lärmauswirkungen von Flachstellen.

1.2. Auftrag

Ziele dieses Forschungsprojektes bestehen darin:

- 1) Ziel 1: Eine Software zur frühzeitigen und zuverlässigen Flachstellenerkennung mit einem herkömmlichen Telematiksystem ohne externe Sensorik zu entwickeln und zu erproben (Programmierung des Algorithmus zur Flachstellenerkennung);
- 2) Ziel 2: Eine standardisierte Übermittlung dieser Information an externe Systeme zu entwickeln (Programmierung der Schnittstelle zu externen Systemen (senden von Flachstellen-Informationen; Programmierung der Schnittstelle in einem externen System (empfangen von Flachstellen-Informationen)).

1.3. Ausgangslage

Hardwareseitig sind innerhalb des Forschungsprojektes zeitgemässe Telematiksysteme bereits vorgegeben, wobei die meisten Telematiksysteme neueren Datums ähnliche Eigenschaften bieten.

1.3.1. **Vorhandenes Wagenmaterial**

Zu Beginn des Projektes sind rund 600 Intermodalwagen der WASCOSA AG (im Folgenden «Wascosa») mit Telematiksystemen ausgerüstet.

Folgende Intermodalwagen sind vorhanden:

- 1) 60' Containertragwagen (4 Achsen, 2 Bauarten)
- 2) 80' Doppelcontainerwagen (Doppelwagen, 6 Achsen, 2 Bauarten)
- 3) 90' Doppelcontainerwagen (Doppelwagen, 6 Achsen, 2 Bauarten)
- 4) Einzeltaschentaschenwagen (4 Achsen, 2 Bauarten)
- 5) Doppeltaschenwagen (6 Achsen, 2 Bauarten)

1.3.2. **Vorhandene Telematiksysteme**

Das unter 1.3.1 genannte Wagenmaterial ist mit Telematiksystemen der am Projekt beteiligten Firma SAVVY Telematic Systems AG (Im Folgenden «Savvy») ausgerüstet. Der verwendete Gerätetyp ist das

- SAVVY CargoTrac-Ex

welches sowohl Sensoren zur Beschleunigungserkennung als auch zur Erfassung von Position und Geschwindigkeit integriert hat. Alle erfassten Daten können über gängige Mobilfunksysteme („Handynetz“) übertragen werden.

Die maximale Abtastfrequenz dieser Telematiksysteme beträgt 400 Hz, was eine verwertbare Messung von Frequenzen bis 200 Hz zulässt.

1.3.3. **Vorhandene Schnittstellenanbindung**

Für die Kommunikation zwischen Telematikanbietern und Drittsystemen werden im Markt heute unter anderem die proprietären Schnittstellen der Telematikhersteller verwendet, die durch den TIS¹ initiierte Schnittstelle („ITSS-Schnittstelle 1“) oder auch die durch die Firma kasasi GmbH (im Folgenden «Kasasi») definierte Schnittstelle SRS-Rail². Die Integration in Drittsysteme ist eine entscheidende Voraussetzung für einen zeitgemässen automatisierten Informationsaustausch zur effizienten Behebung von Ereignissen wie dem Auftreten einer Flachstelle. Die exemplarische Schnittstellenanbindung wird über die kasasi SRS geschehen.

¹ TIS: Technischer Innovationskreis Schienengüterverkehr; <http://www.innovative-freight-wagon.eu/>

² SRS: Standard Receiving Service Rail

2. Konzeptphase

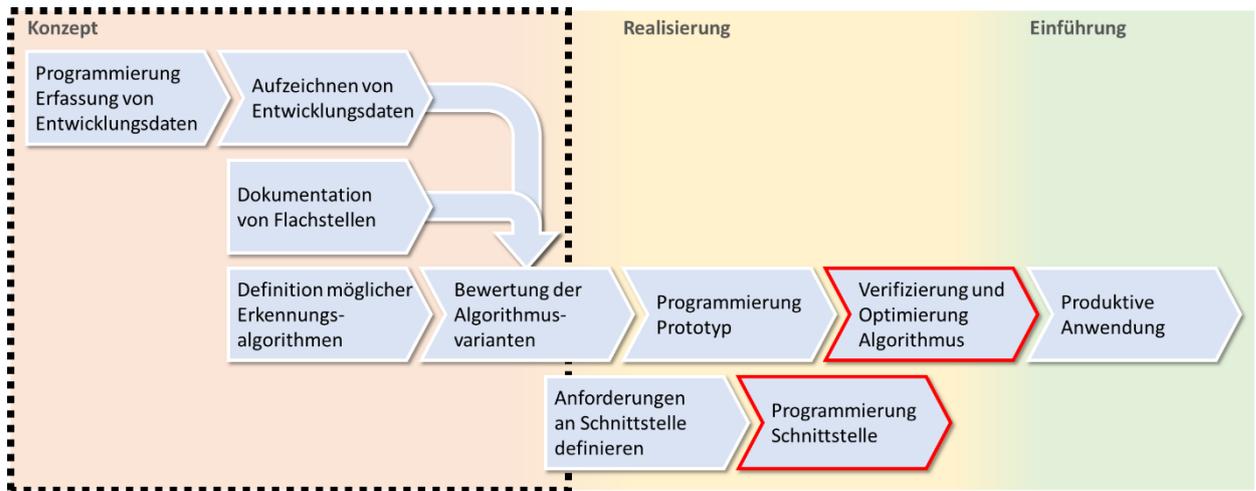


Abbildung 1: Konzeptphase

2.1. Ziel 1: Entwicklung Erkennungsalgorithmus

2.1.1. Theorie und Annahmen

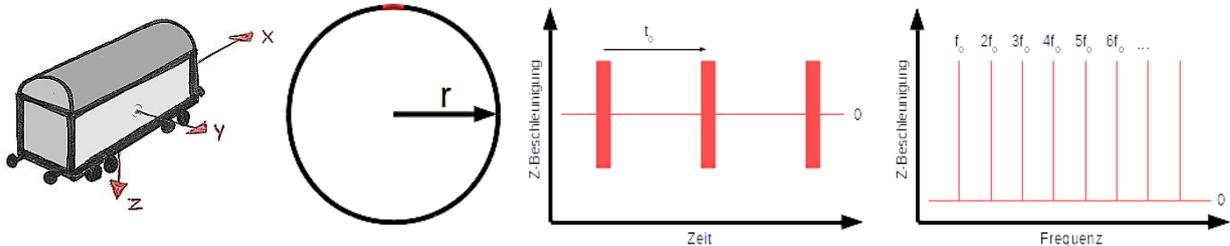


Abbildung 2: (v.l.n.r.) Koordinatensystem am Güterwagen; Signalentstehung physisch am Rad; Messung im Zeitbereich; Auswertung im Frequenzbereich

Ein Rad mit einer Flachstelle (Abbildung 2, 2. von links, Flachstelle rot markiert) wird einmal pro Radumdrehung Beschleunigungen in der z-Achse (senkrecht) verursachen. Die Dauer, Richtung und Amplitude dieses Signals ist für die Analyse nicht von Belang. Diese von der Flachstelle verursachten Beschleunigungen sind im Zeitdiagramm (Abbildung 2, 3. von links) als rote Balken dargestellt. Die Zeit t_0 entspricht der Dauer einer Radumdrehung bis zum neuerlichen Überfahren der Flachstelle. t_0 ist somit abhängig vom Raddurchmesser und der Fahrgeschwindigkeit. Es wird für die weitere Betrachtung davon ausgegangen, dass die z-Beschleunigungswerte nahezu identisch sind und sich damit periodisch wiederholen. Dieses periodische Signal in den Frequenzbereich (Abbildung 2, rechts) übersetzt besteht aus der Grundfrequenz f_0 und der Summe der ganzzahligen vielfachen der Grundfrequenz ($2f_0, 3f_0, \dots$) und werden jeweils als «Frequenzpeak» sichtbar. Das regelmässige Auftreten dieser Peaks führt in der Darstellung zu einem Bild ähnlich einem Kamm, daher auch der Begriff «Frequenzkamm».

Die Grundfrequenz ist dabei der Kehrwert der Radumdrehungszeit: $f_0 = \frac{1}{t_0}$.

In der digitalen Signalverarbeitung muss für die Messung eines Signals der Frequenz f mindestens mit der doppelten der zu messenden Signalfrequenz, also mit der Abtastfrequenz $2f$ gemessen werden. Als Beispiel sei ein Wagen mit einem Raddurchmesser von 940 mm und einer Geschwindigkeit von 100 km/h ($=27.7\text{ m/s}$) genannt. Die Beschleunigung wird mit 400 Hz abgetastet. In diesem Beispiel ist die Grundfrequenz 9.4 Hz . Die höchste theoretisch noch messbare Oberwelle ist die 21. Oberwelle bei $21f_0 = 197.5\text{ Hz}$ welche kleiner als die Hälfte von 400 Hz ist. In der Praxis ist mit mehr Toleranz zu rechnen. Es können somit weniger Oberwellen zur Auswertung verwendet werden.

Es wird angenommen, dass die in der Theorie regelmässig auftretenden Frequenzpeaks ($f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$) als Indikator für eine Flachstelle genommen werden können. Wenn die Geschwindigkeit und der Raddurchmesser bekannt sind, kann die Analyse sogar auf einen spezifischen Teil des Frequenzspektrums fokussiert werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass in der Praxis zahlreiche Störeinflüsse auf das Rad (Unwucht, Unebenheiten der Lauffläche und Infrastruktur, etc.) sowie auf den Wagen (Eigenschwingung, Ladungseinflüsse, etc.) einwirken. Es entstehen somit zahlreiche sich überlagernde Frequenzen, welche in Ihrer Summer als «Rauschen» wahrgenommen werden.

2.1.2. Dokumentation von Flachstellen

2.1.2.1. Auftrag an Werkstätten

Ein zentrales Element der Flachstellenerkennung sind sinnvoll gehaltene Grenzwerte. Nicht jede periodische Schwingung ist gleichzeitig eine Flachstelle, und nicht jede Störung auf der Lauffläche entspricht einer Flachstelle. Zentral ist also das Finden von Zusammenhängen zwischen den Messdaten von betroffenen Wagen und der Dimension der am Wagen vorhandenen Flachstelle(n). Dazu werden während der Projektdauer die Werkstätten aufgefordert, Flachstellen zu dokumentieren:

- 1) Abmessungen der Flachstelle
- 2) Anzahl und Einbauort der betroffenen Achsen relativ zum Einbauort des Telematiksystems
- 3) Bild der Flachstelle

2.1.2.2. Gemeldete Flachstellen

Tabelle 1 zeigt zusammengefasst die gemeldeten Flachstellen. Die letzte Spalte zeigt, ob das hier beschriebene und angewendete Verfahren diese Flachstelle auch erkannt hätte.

#	Datum	Serial	Wagen	Gattung	Erkennbar
1	20.4.2017	1007-000127	37 80 4975 506-9	Doppelcontainertragwagen 80'	ja
2	26.4.2017	1007-000506	37 80 4993 568-7	Taschenwagen T2000	ja
3	10.5.2017	1007-000535	33 85 4956 158-1	Taschenwagen T3000	ja
4	16.5.2017	1007-000369	37 80 4975 768-5	Doppelcontainertragwagen 80'	ja
5	16.5.2017	1007-000690	37 80 4975 581-2	Doppelcontainertragwagen 80'	nein
6	19.5.2017	1007-000438	33 85 4956 199-5	Taschenwagen T3000	nein
7	23.5.2017	1007-000156	33 85 4956 053-4	Taschenwagen T3000	nein

Tabelle 1: Gemeldete Flachstellen

Es gibt Fälle, wo eine gemeldete Flachstelle nicht erkennbar war. Die Ursache kann nicht eindeutig festgestellt werden, möglich sind:

- 1) Keine Messdaten vorhanden nach Entstehung der Flachstelle
- 2) Der Einbauort des Telematiksystems ist zur Flachstellendetektion nicht geeignet
- 3) Doppelwagen: Die Flachstelle hat keine/ nur ungenügende Einwirkung auf die Wagenhälfte, an der das Telematiksystem verbaut ist.

2.1.3. *Testumgebung zur Erfassung von Entwicklungsmessdaten*

Es stehen 678 Containertragwagen mit angebauten Telematikgeräten für die Testmessungen zur Verfügung. Durch Wagenmeister festgestellte Flachstellen werden an Wascosa und an Savvy über ein standardisiertes Formular gemeldet. Die am Wagen angebrachten Geräte zeichnen die Beschleunigung in drei Achsen (x, y und z) mit einer Abtastfrequenz von 400 Hz auf. Ebenfalls aufgezeichnet wird die über das Ortungssystem GPS berechnete Geschwindigkeit. Die Messung wird maximal zweimal pro Tag bei Fahrt während 30 Sekunden durchgeführt. Der Abstand der Messungen beträgt mindestens 4 Stunden.

Die Daten werden an die Server von Savvy gesendet und dort gespeichert. Die Auswertung dieser Entwicklungsmessdaten erfolgt anschliessend mit der Analyse-Software PyLab.

2.1.4. *Bewertung Testaufbau*

Folgende Beobachtungen wurden während der ersten Messphase gemacht:

2.1.4.1. *Einbezug Geschwindigkeitsinformation*

Bei der Auswertung der Daten haben sich einige Einschränkungen ergeben. Die Abtast-Frequenz des Beschleunigungssensors ist ungenau (teilweise mehr als 10% Abweichung). Die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsdaten werden geräteseitig getrennt aufgezeichnet. Für die Auswertung werden die beiden Datenquellen zusammengeführt. Aufgrund der Einschränkungen bei der Genauigkeit der geräteseitig aufgezeichneten Zeit ergibt sich ein Fehler von bis zu 2 Sekunden zwischen Geschwindigkeitsdaten und Beschleunigungsdaten. Beschleunigungen und Bremsungen können Werte von bis zu 0.5 m/s^2 erreichen. Damit ergeben sich Geschwindigkeitsfehler von bis zu 1 m/s aufgrund der zeitlichen Messungenauigkeit. Gerade bei tieferen Geschwindigkeiten resultiert daraus ein prozentual hoher Fehler.

Abtastfrequenz, Geschwindigkeit und Raddurchmesser bestimmen die Position der Frequenzpeaks. Da Oberwellen ein Vielfaches der Grundfrequenz sind, vergrössern sich die Unstimmigkeiten ebenso um ein Vielfaches des Fehlers der Grundfrequenz. Der Abstand zwischen den Peaks entspricht konstant der Grundfrequenz, der relativ gesehene Fehler vergrössert sich also mit jeder Oberwelle. Entsprechend wurde auf die Anwendung geschwindigkeitsbasierter Filter für die Analyse verzichtet.

Die genannten Einschränkungen werden bei einer künftigen geräteseitigen Auswertung kompensierbar sein. Mögliche Lösungen werden im Kapitel 2.1.11 beschrieben.

2.1.4.2. *Häufigkeit der Messungen*

Die Auswertung hat eine geringe Anzahl von 0 bis 2 Messungen mit positivem Indikator (=Detektion) je Wagen über alle gemeldeten Flachstellen ergeben. Da nach dem Auftauchen von Flachstellen über einen längeren Zeitraum keine weiteren Messungen erfolgten, kann davon ausgegangen werden, dass die Wagen jeweils zwecks Unterhalt ausgesetzt wurden.

2.1.4.3. *Geschwindigkeitsabhängigkeit*

Bei tieferer Geschwindigkeit sind sowohl die Beschleunigungsamplituden als auch die Frequenzpeaks geringer, ausserdem wird eine lange Messdauer für eine belastbare Frequenztransformation benötigt. Aufgrund dessen werden nur Messungen bei minimal 40 km/h Fahrgeschwindigkeit bewertet.

2.1.4.4. *Messdauer*

Bei der Messdauer gilt es einen Kompromiss aus zwei wesentlichen Faktoren zu schliessen. Einerseits erhöht eine längere Messdauer die Auflösung im Frequenzspektrum und senkt damit auch die kleinste messbare Frequenz. Andererseits lässt eine längere Messdauer auch mehr Zeit für eine Geschwindigkeitsänderung oder eine mechanische Veränderung der Flachstelle. Beides hat eine Reduzierung der Grösse des Peaks sowie eine Verbreiterung bzw. Verschmierung der Peaks auf der Frequenzachse zur Folge, was deren Erkennbarkeit verringert.

Die Messdauer gibt also auch die theoretisch minimale Geschwindigkeit vor bei der die Frequenzpeaks noch aufgelöst werden können. Als guter Richtwert wurde eine Messdauer von rund 4 Sekunden für die Testauswertung erkannt. Für die Auswertung wurden daher die 30 s Testmessungen in mehrere Messungen aufgeteilt.

2.1.5. Flachstellenbeispiel Wagen 3780 4975 506-9

Im Folgenden wird anhand des Wagens 3780 4975 506-9 (Telematiksystem SN 1007-000127) die Datenerfassung, -Aufbereitung und -Analyse aufgezeigt. Die Flachstelle konnte erstmals am 20. März 2017 in den Messungen erkannt werden und blieb bis zum 22. März 2017 in den Daten sichtbar.

2.1.5.1. Frequenzkamm-Auswertung in normalem Zustand

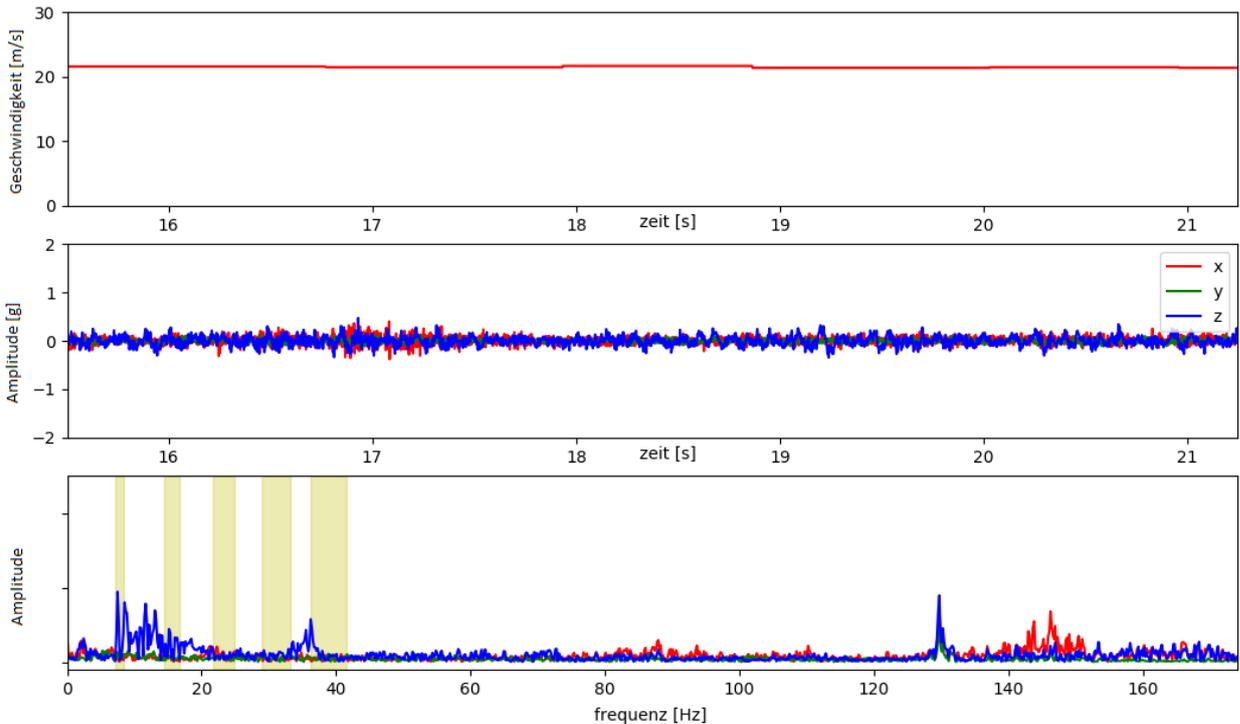


Abbildung 3: Normale Messgrößen am Wagen 3780 4975 506-9

Abbildung 3 zeigt eine Messung vom 16. Februar 2017 ohne eine Flachstelle. Der Wagen fährt mit einer Geschwindigkeit von rund 21.4 m/s (77 km/h). Die oberste Darstellung zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde während einer Dauer von rund 6 Sekunden. Die zweite Grafik zeigt die Beschleunigung in den drei Achsen x, y und z (in $g = 9.81 \text{ m/s}^2$) während derselben Zeitdauer wie die Geschwindigkeit. Die dritte Grafik zeigt das Frequenzspektrum der Daten aus der zweiten Grafik. Die Abszisse zeigt die Frequenz (Hz) und die Ordinate die einheitslose, relative Amplitude. Die senkrechten, gelblichen Balken in den unteren Frequenzbereichen zeigen, wo die 1. bis 5. Frequenz ($f_0, 2f_0, \dots, 5f_0$) zu erwarten sind, basierend auf typischen Raddurchmessern und unter Einbezug der gemessenen Geschwindigkeit. Die Änderung der Balkenbreite ergibt sich aufgrund der Toleranzen (Raddurchmesser und Geschwindigkeit). Das resultierende Spektrum kann grösstenteils als Rauschen interpretiert werden. Einzig die 1., 2. und 5. Oberwelle der z-Achse weisen gewisse Peaks auf (blau) ebenso wie die 3. Oberwelle der x-Achse (rot). Die Amplitudenverhältnisse lassen aber keinen näheren Schluss zu.

2.1.5.2. Frequenzkamm-Auswertung bei Auftreten einer Flachstelle

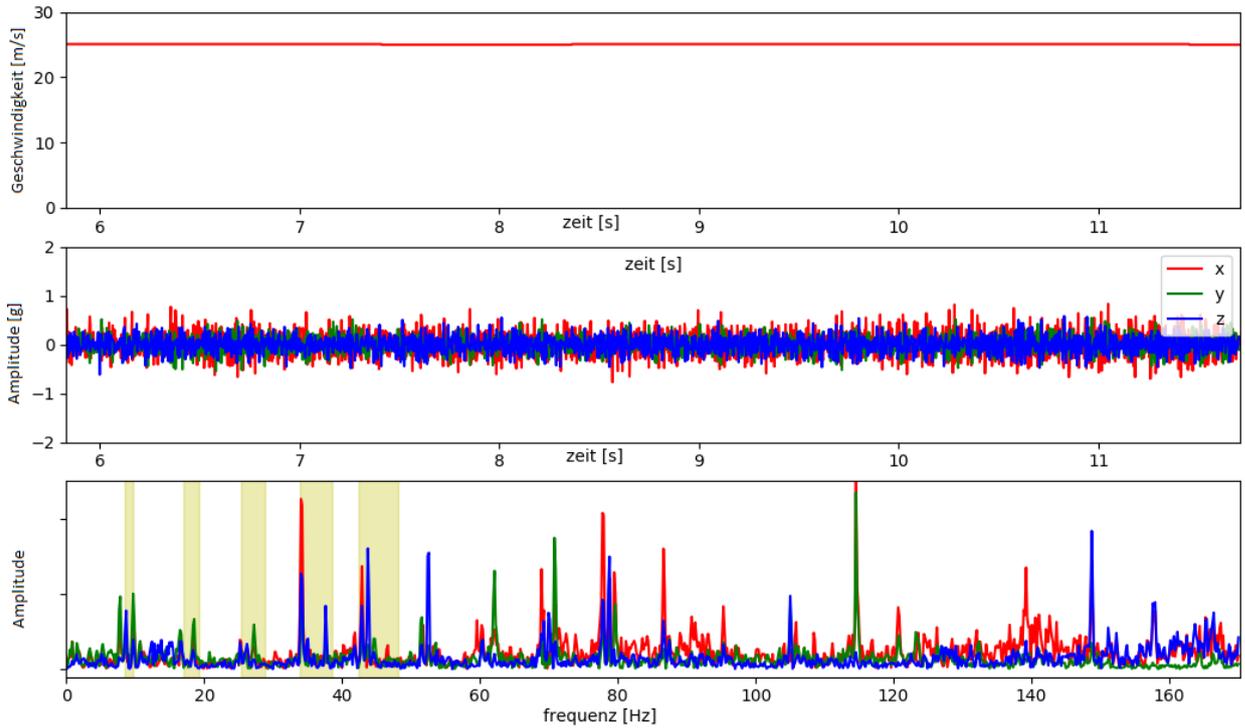


Abbildung 4: Messgrößen nach Auftreten einer Flachstelle bei hoher Geschwindigkeit

Abbildung 4 zeigt die Messdaten bei rund 26 m/s (94 km/h) desselben Wagens wie in Kapitel 2.1.5.1 nach Entstehung der Flachstelle. Im Frequenzspektrum (unterste Darstellung) sind deutlich die Peaks der Oberwellen zu sehen. Die Messung entspricht damit den Erwartungen.

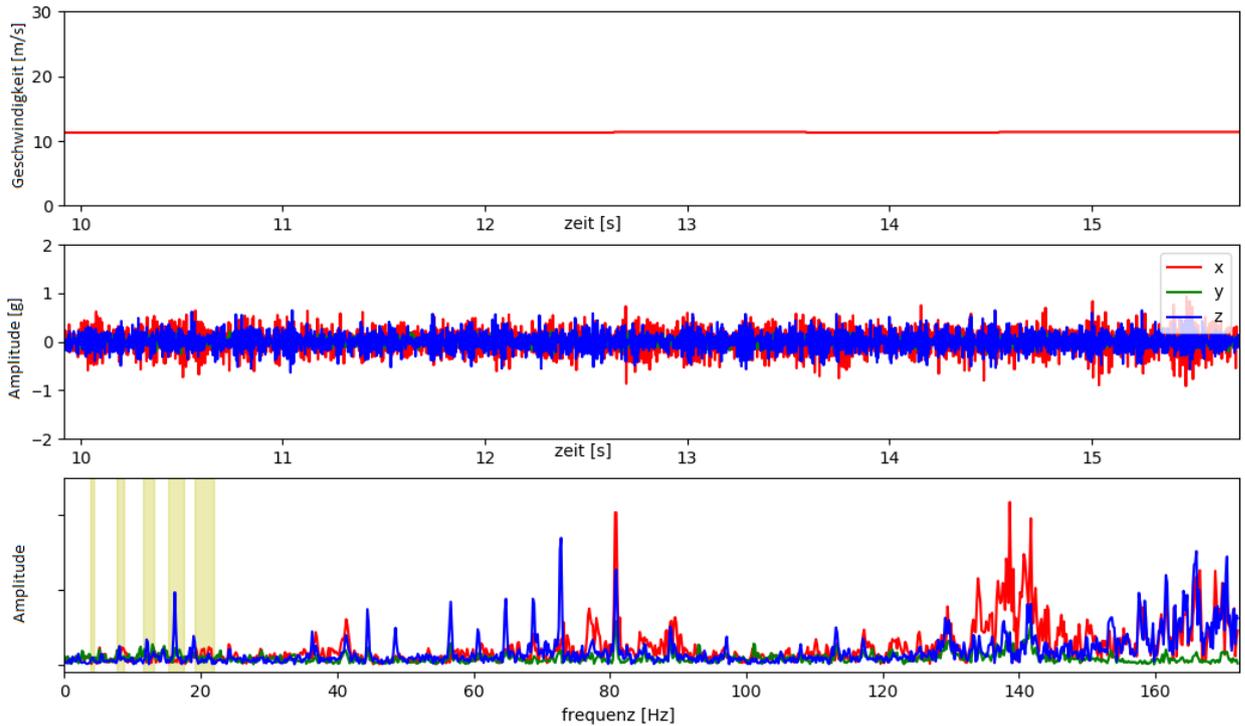


Abbildung 5: Messgrößen nach Auftreten einer Flachstelle bei niedriger Geschwindigkeit

Abbildung 5 zeigt Messdaten desselben Wagens während einer weiteren Messung, jedoch mit tieferer Geschwindigkeit (ca. 11 m/s = 40 km/h). Es zeigt sich das gleiche Bild. Auffallend ist in beiden Fällen, dass Peaks tieferer Frequenzen ($f_0, 2f_0, 3f_0$) kaum sichtbar sind. Dies ist auf den begrenzten Betrachtungszeitraum von rund 6 Sekunden zusammen mit der langsamen Geschwindigkeit zurückzuführen.

1007-000127, 2017-06-25 03:21:39, 90kmph, 367Hz

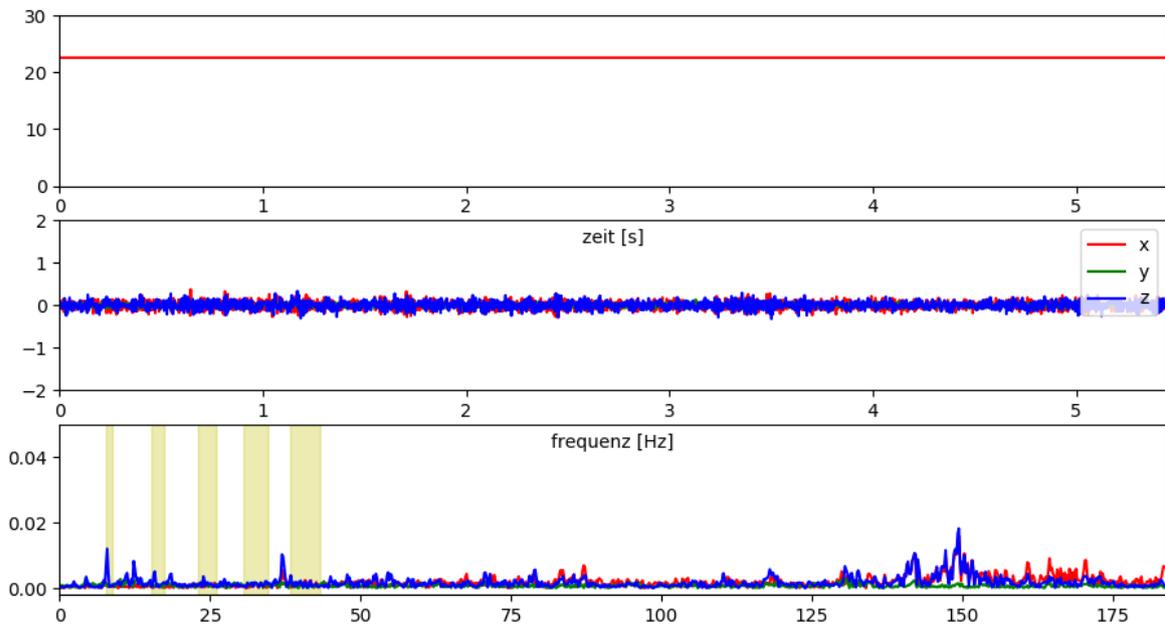


Abbildung 6: Messung nach dem Werkstattbesuch

Abbildung 6 zeigt erneut eine Messung am Wagen 3780 4975 506-9, bei 90 km/h, 9 Tage nach Auftreten der Flachstelle. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Frequenzpeaks nach dem Tausch der entsprechenden Radsätze wieder in den normalen Zustand zurückgefallen sind.

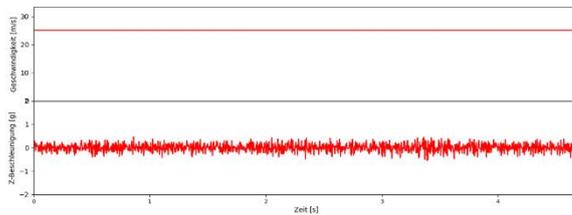
2.1.6. Verifikation von Theorie und Annahmen

2.1.6.1. Verarbeitung einzelner Messreihen

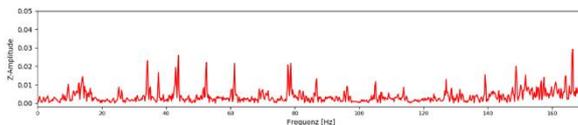
Zur Verifikation der Theorie gemäss Kapitel 2.1.1 werden die vorhandenen Messdaten gemäss folgendem Verfahren Erfasst und Bearbeitet:



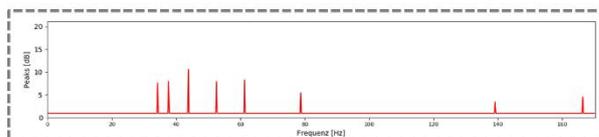
Messung



Frequenztransformation



SNR



Messung

Am Wagen werden folgende Grössen während einer gewissen Dauer aufgezeichnet:

- 1) Geschwindigkeit
- 2) Beschleunigungen in z-Richtung
- 3) Datum/ Uhrzeit

Frequenztransformation

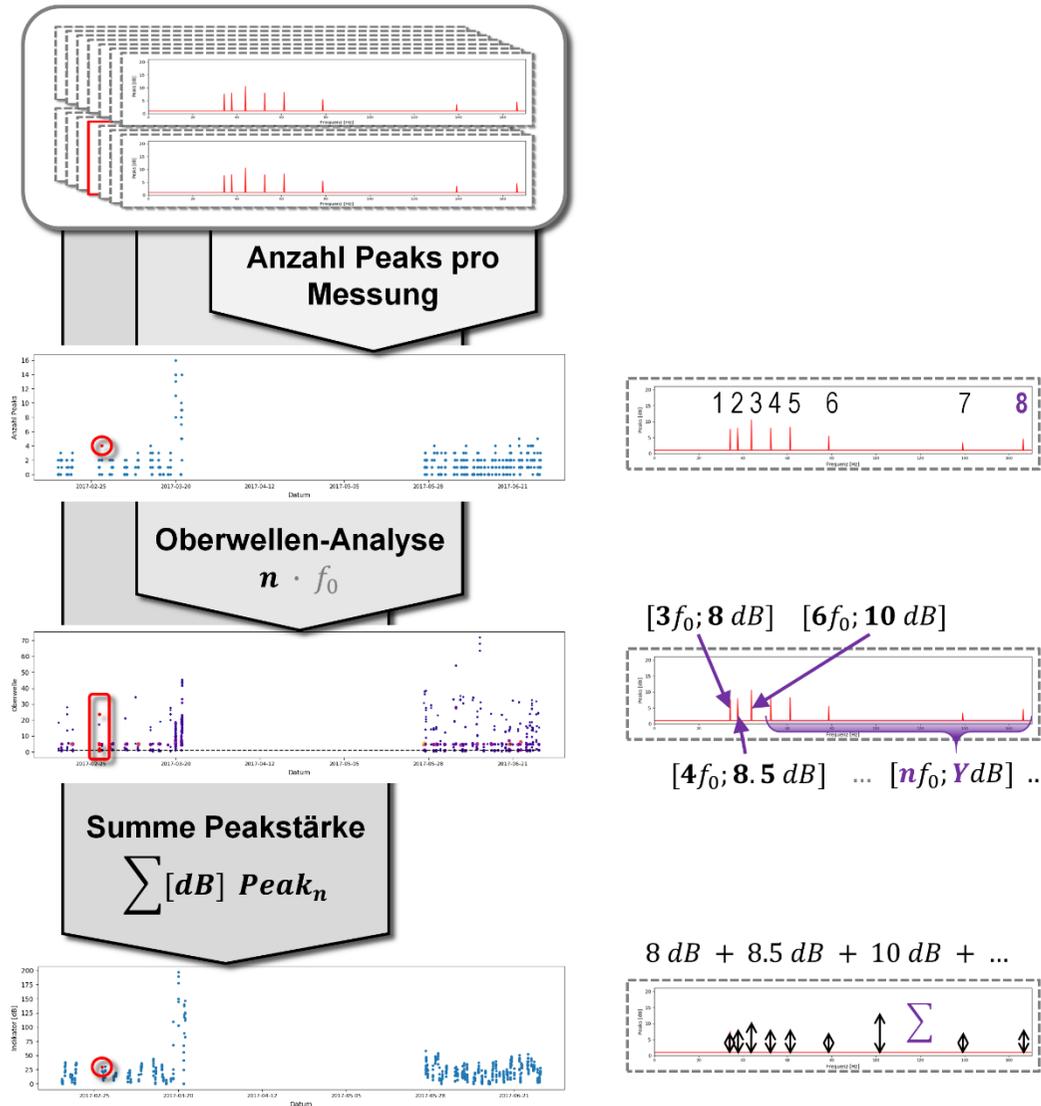
Aus den Messdaten wird mittels einer Transformation das Frequenzspektrum der Beschleunigungsdaten ermittelt.

SNR

Aus der Frequenztransformation wird das Signal-Rausch-Verhältnis bestimmt «SNR». Dadurch wird das Hintergrundrauschen von den Peaks getrennt und sind somit einfach weiter zu verarbeiten.

Abbildung 7: Erfassung einzelner Messungen

2.1.6.2. Massenverarbeitung und Lösungsentwicklung



Zur Mustererkennung wurden ausgehend von den SNR-Analysen der einzelnen Messungen weitergehende Auswertungen gemacht und diese auch auf Ihre Eignung zur maschinellen Detektion von Flachstellen geprüft.

Anzahl Peaks pro Messung

In einer ersten Betrachtung wurden die Anzahl der nach der SNR-Analyse erkennbaren Peaks ermittelt. Im SNR-Beispiel in Abbildung 8 entspricht dies der Zahl Acht.

Über einen längeren Zeitraum können nun alle einzelnen Messungen analysiert werden. Über die Zeit aufgezeichnet ergibt sich damit die linke Darstellung, wobei jeder Punkt der Auswertung einer einzelnen Messung entspricht.

Oberwellen-Analyse

Ausgehend von der zu jeder Messung ermittelten Grundfrequenz f_0 wird jedem Peak sein Vielfaches n der Oberwelle zugeordnet. Dieser Wert wird über die Zeit in das Punktdiagramm eingetragen. Zusätzlich wird abhängig von der ‚Stärke‘ in dB des Peaks jeder Einzelne Punkt angepasst (Grösse und Einfärbung). Dies ergibt für alle Peaks jeder Messung einen einzelnen Punkt.

Summe der Peakstärken

Die Stärke [dB] der Einzelnen Peaks in der SNR-Analyse werden für jede Messung aufsummiert. Damit wird eine Gewichtung der Peaks möglich. Das Resultat ist somit für jede Messung eine totale ‚Höhe‘ aller Peaks. Dieser Wert führt in der Langzeit-Darstellung zu jeweils einem Punkt.

Abbildung 8: Verschiedene Detektionsmuster zur Flachstellenerkennung

2.1.7. Beispiel mit Flachstelle

2.1.7.1. Verarbeitung der Einzelmessung

Folgendes Kapitel zeigt detailliert die Datenverarbeitung aus Kapitel 2.1.6 anhand eines Beispielwagens.

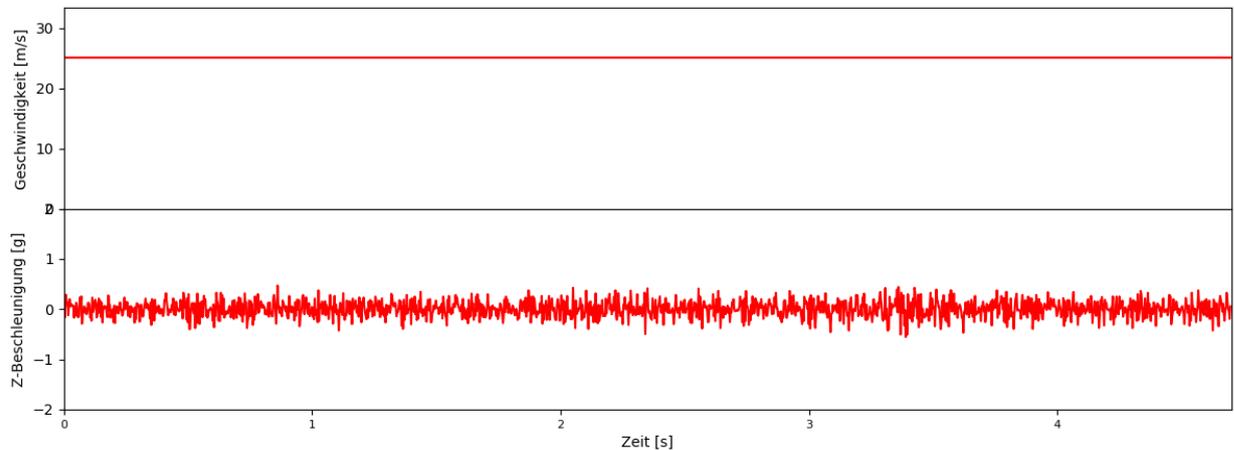


Abbildung 9: Geschwindigkeit (oben) und Beschleunigungen der z-Achse (unten) eines Wagens mit Flachstellen

Abbildung 9 zeigt die Aufzeichnung von Messdaten bei einer Geschwindigkeit von rund 25 m/s ($= 90 \text{ km/h}$, oben). Das untere Diagramm zeigt die gemessenen Beschleunigungen in der vertikalen z-Achse während einer Aufzeichnungsdauer von knapp 5 Sekunden. Im Sinne der hiesigen Betrachtung handelt es sich hierbei um eine «Einzelne Messung».

Wie bereits beschrieben, wurden in den ersten Monaten des Projektes stets Daten während einer Dauer von 30 s erfasst. Diese Daten wurden in verschiedenen Zeitintervallen mit den erwähnten Verfahren ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Betrachtung in Stücken von 4 bis 6 Sekunden Dauer die belastbarsten Resultate lieferten. Durch die Zerstückelung der langen Messungen entstanden also pro Erfassung mehrere Auswertungseinheiten, die in der Folge als einzelne Messungen betrachtet werden.

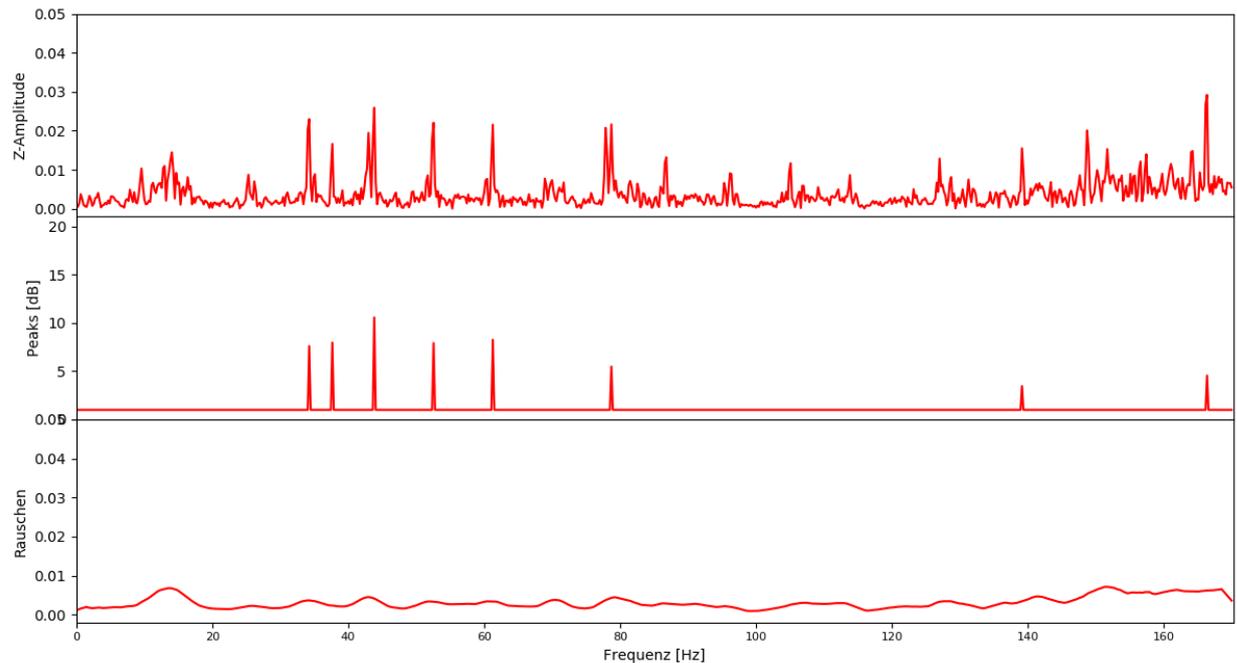


Abbildung 10: Frequenzdarstellung nach der Transformation der Beschleunigungsdaten in den Frequenzbereich (oben); Extraktion der Peaks (Mitte) und des Grundrauschens (unten)

Abbildung 10 zeigt im obersten Diagramm das Frequenzspektrum der Beschleunigungsdaten aus Abbildung 9. Diese Darstellung wurde mittels einer Transformation der gemessenen Beschleunigungen in den Frequenzbereich gewonnen. Die zweite Grafik zeigt das SNR in dB der einzelnen erkannten Peaks aus dem Frequenzspektrum. Das unterste Diagramm zeigt das ermittelte Rauschen des Frequenzspektrums.

Natürlich kann die Sensitivität zur Erkennung eines Peaks beliebig festgelegt werden. Dabei wird die Amplitude im Frequenzspektrum mit der Amplitude des Hintergrundrauschens verglichen. Ist die Amplitude im Frequenzspektrum um mehr als ein frei festzulegender Faktor grösser als das Rauschen, so wird dieser Ausschlag als Peak erkannt. Als guter Filter – auch im Hinblick auf die kommenden weiteren Auswertungen – hat sich ein Faktor von ca. 3 ergeben.

In der weiteren Betrachtung wird das SNR-Diagramm herangezogen.

2.1.7.2. Massenverarbeitung aller Messungen eines Wagens

Aus den zahlreichen einzelnen Messungen eines Wagens werden nun breitere Analysen angestellt, um Muster einer Flachstelle zu erkennen. Zu beachten ist bei den bisherigen Auswertungen, dass keine Berücksichtigung von Geschwindigkeitswerten erfolgte.

Anzahl Peaks pro Messung

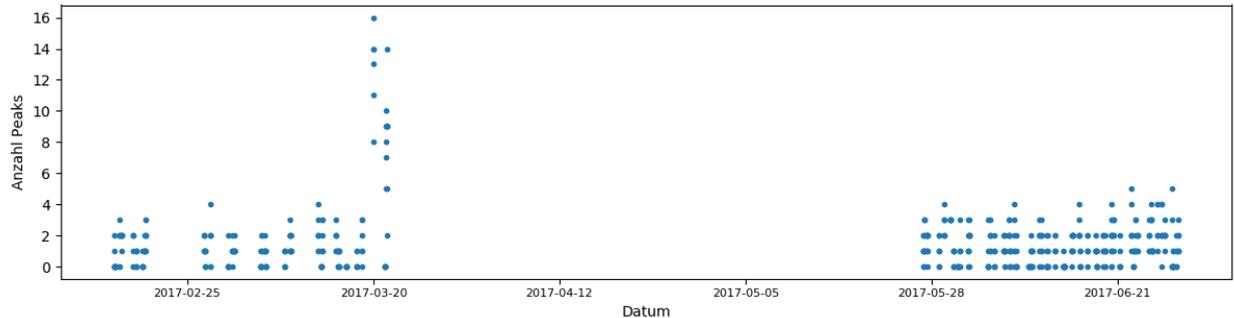


Abbildung 11: Anzahl Peaks jeder Einzelmessung während rund 4 Monaten

In Abbildung 11 werden über einen Zeitraum von ca. 4 Monaten – mit entsprechend zahlreichen Messungen – die jeweilige Anzahl der gemessenen Peaks im SNR dargestellt. Gut zu erkennen sind die Zeiten, während denen der Wagen gefahren ist (Punkte reihen sich zu einer vertikalen Linie). Ebenfalls ist eine klare Zunahme der Anzahl Peaks um den 20. März zu sehen, also nach Entstehung der Flachstelle. Nach dem Radsatztausch und der Wiederinbetriebnahme des Wagens um den 28. Mai ist wieder der Normalzustand zu Erkennen.

Eine Anwendung dieser Grösse als Erkennungskriterium erscheint auf den ersten Blick plausibel. Jedoch ist ein solch klares Muster nicht bei allen Wagen erkennbar, ausserdem ist der Einfluss der Infrastruktur (Weichen, Gleiszustand etc.) auf die Messung zu Berücksichtigen

Oberwellen-Analyse

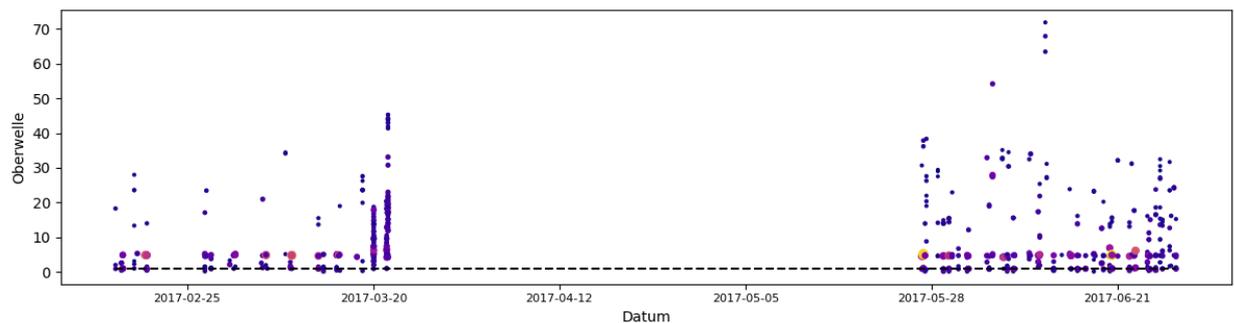


Abbildung 12: Oberwellen-Analyse aller erkannten Peaks während rund 4 Monaten

Abbildung 12 zeigt die Oberwellen-Analyse des Beispielwagens während rund 4 Monaten. Eine Detektion aufgrund des Auftretens bestimmter Oberwellen ist nicht möglich: Nach dem Radsatztausch (rechte Diagrammhälfte) werden einerseits höhere Oberwellen erkannt also zuvor und deren Streuung ist nicht konstant. Auffallend sind im Zustand mit Flachstellen einzig, dass die Oberwellen klarer in Erscheinung treten (um den 20. März). Interessanterweise scheint ist die 5. Oberwelle sehr Konstant aufzutreten, auch bei anderen Wagen als dem hier dargestellten. Die Ursache ist bislang noch nicht bekannt.

Summe der Peakstärken

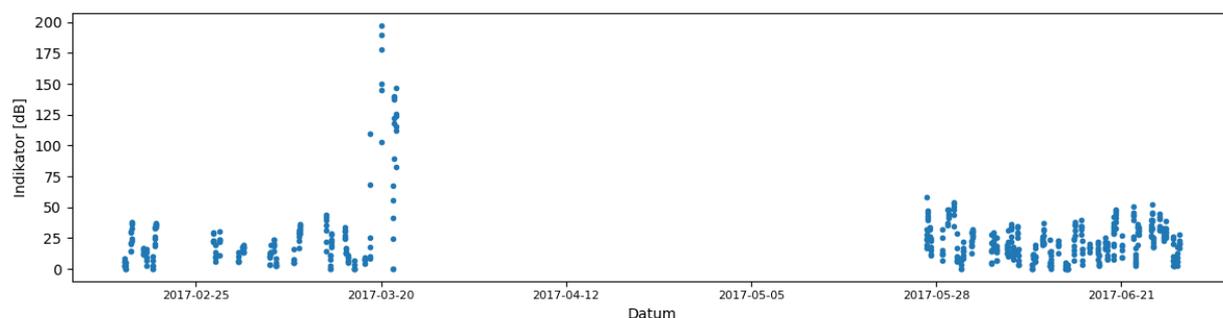


Abbildung 13: Summe der Peakstärken einzelner Messungen während rund 4 Monaten

Abbildung 13 zeigt anhand jedes einzelnen Punktes die Summe aller Peakstärken (in *dB*) pro einzelne Messung während 4 Monaten. Die Abweichungen während des Betriebes mit der Flachstelle sind sehr klar von den restlichen Werten unterscheidbar, wenn auch mit einer relativ grossen Streuung.

In der Gesamtbetrachtung aller Wagen hat sich diese Grösse als verlässlichster Wert zur Erkennung von aussergewöhnlichen Zuständen erwiesen. Sie wird deshalb künftig auch als «**Indikator**» bezeichnet.

2.1.8. Beispiel ohne Flachstelle

2.1.8.1. Auswertung eines einzelnen Wagens

Die Folgenden Diagramme (Abbildung 14 bis Abbildung 16) zeigen Daten eines Wagens der keine Aussergewöhnlichen Daten aufzeigt.

Die Anzahl Peaks des SNR liegen dauerhaft im Bereich bis maximal 6 Peaks. Die Verteilung der Oberwellen ist nicht signifikant ändernd.

Die Summe Der Peakstärken bewegt sich über die gesamte Zeitdauer in einem Bereich unter 70 dB.

Es gilt jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse unter 2.1.7 nicht direkt mit den Beispielen dieses Wagens vergleichbar sind, da jeder Wagen(-Typ) eigene charakteristische Schwingungen aufweist. Ausserdem sind die Schwingungsstärke und -Verteilung auch abhängig von der Beladung des Wagens und der befahrenen Infrastruktur.

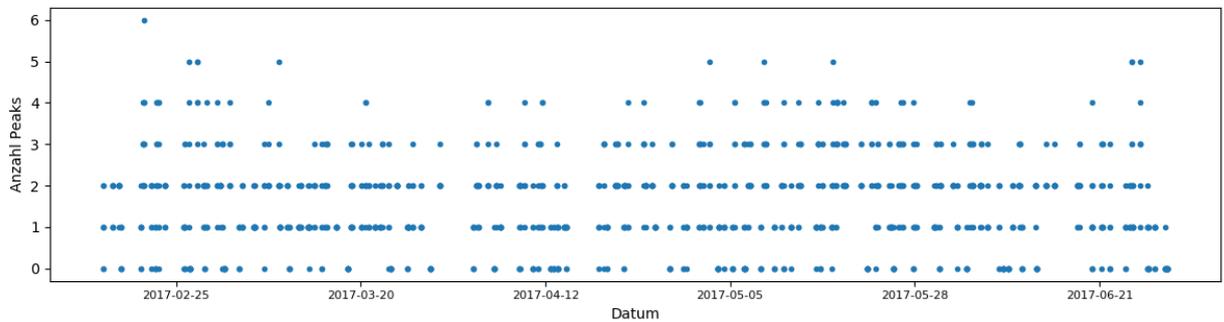


Abbildung 14: Anzahl Peaks jeder Einzelmessung während rund 4 Monaten, ohne Flachstelle

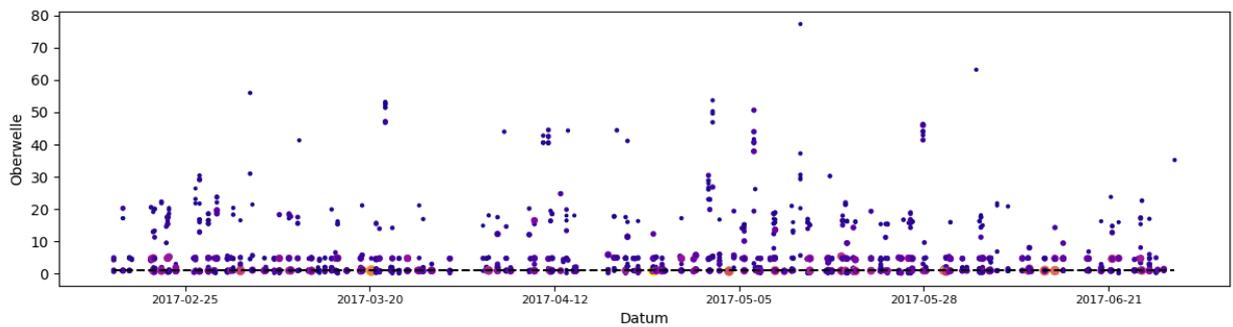


Abbildung 15: Oberwellen-Analyse aller erkannten Peaks während rund 4 Monaten, ohne Flachstelle

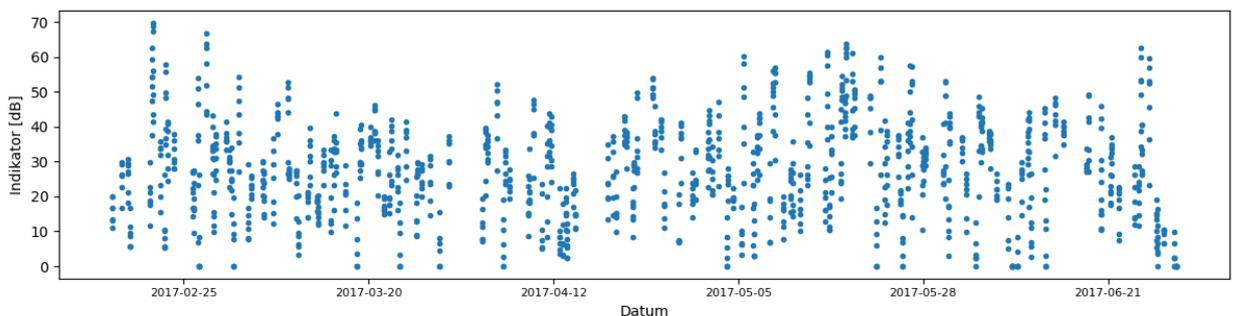


Abbildung 16: Summe der Peakstärken einzelner Messungen während rund 4 Monaten

2.1.8.2. Abhängigkeit des Indikators von der Geschwindigkeit

Es ist davon auszugehen, dass die Werte des Indikators von der Fahrgeschwindigkeit des Wagens zum jeweiligen Messzeitpunkt abhängen.

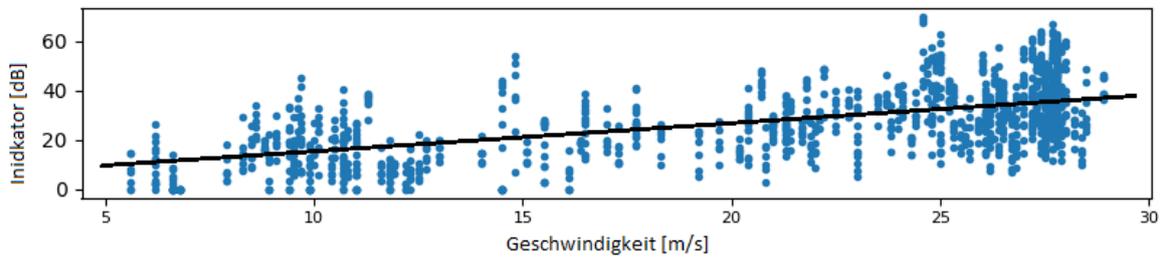


Abbildung 17: Indikator eines einzelnen Wagens in Abhängigkeit der Geschwindigkeit während rund 4 Monaten

Abbildung 17 zeigt alle berechneten Indikatoren eines einzelnen Wagens in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit (m/s). Die Geschwindigkeit scheint mit der Grösse des Indikators zu korrelieren: Bei Steigender Geschwindigkeit werden im Mittel höhere Indikatorwerte gemessen.

2.1.9. Auffällige Wagen ohne Flachstellenmeldung

Der oben beschriebene Algorithmus wurde auf alle Geräte angewandt. Die Geräte mit einer Auffälligkeit, die aber nicht als Flachstelle gemeldet wurden, sind hier aufgelistet. Diese Geräte müssen noch nach Gemeinsamkeiten untersucht werden.

2.1.9.1. Zeitlich begrenzte Abweichungen

Bei den in Tabelle 2 aufgeführten Wagen zeigt der Flachstellenindikator während einem begrenzten Zeitraum (in der Regel ein bis 2 einzelne Messungen) eine Abweichung vom Normalzustand auf ohne anschließenden Radsatztausch. Es konnten bisher keine Ursachen dazu gefunden werden.

Serial	Datum bzw. Bereich	Wagen	Gattung
1007-000356	4.5*	3385 4956 167-2	Taschenwagen T3000
1007-000487	26.4	3780 4975 829-5	Doppelcontainertragwagen 80'
1007-000622	1.6	3780 4975 776-8	Doppelcontainertragwagen 80'
1007-000865	15.5	3780 4975 947-5	Doppelcontainertragwagen 80'
1007-000924	23.4	3780 4993 562-0	Taschenwagen T2000

Tabelle 2: Wagen mit zeitlich begrenzter Abweichung

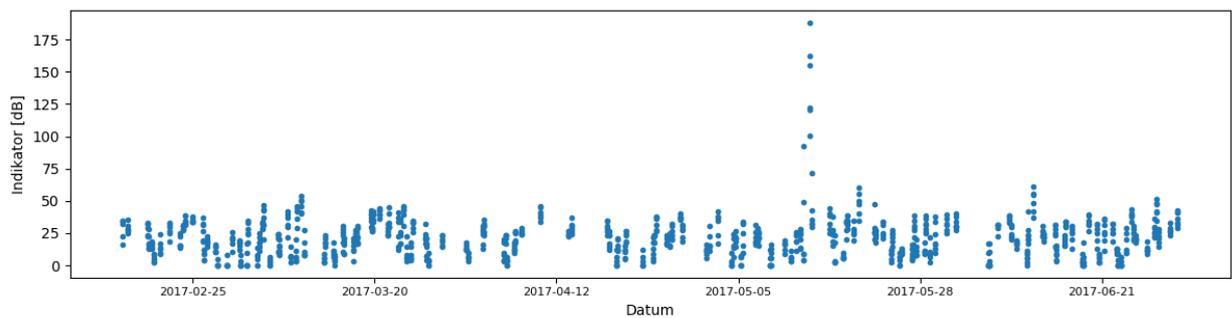


Abbildung 18: Beispiel 1: Kurzzeitig hoher Indikator am 15. Mai (1007-000865; 3780 4975 947-5)

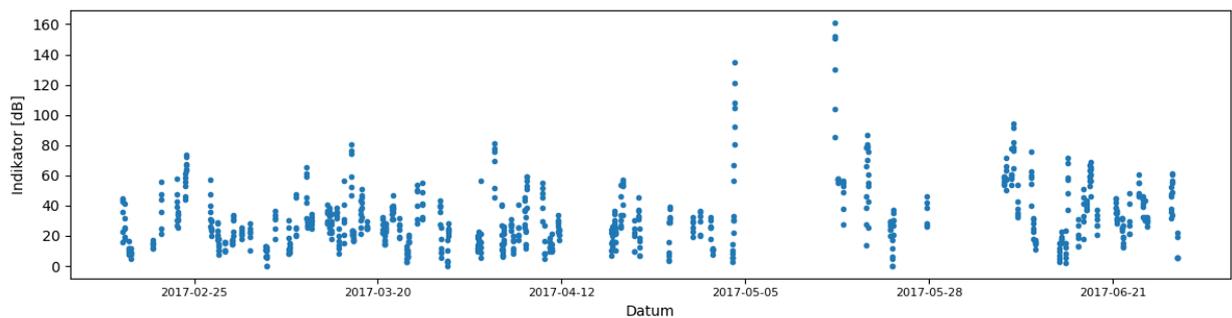


Abbildung 19: Beispiel 2: Kurzzeitig hohe Indikatoren in der ersten Maihälfte (1007-000356; 3385 4956 167-2)

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen jeweils die Indikatoren eines einzelnen Wagens über einen Zeitraum von rund 4 Monaten. Interessantes Detail: Der Wagen 33 4956 162-2 erhielt in der ersten Maihälfte während einem Werkstattaufenthalt neue Bremsklötze, jedoch fand kein Radsatztausch statt.

2.1.9.2. Dauerhaft hohe Anzahl Peaks

Die folgenden Wagen haben dauerhaft eine grosse Anzahl Peaks verursacht. Bisher konnte noch keine Schlüssige Begründung gefunden werden.

Serial	Wagen	Gattung
1007-000152	33854956046-8	Taschenwagen T3000
1007-000253	33854956059-1	Taschenwagen T3000
1007-000284	33854956051-8	Taschenwagen T3000
1007-000300	33854956010-4	Taschenwagen T3000
1007-000308	33854956054-2	Taschenwagen T3000
1007-000416	37844962007-9	Doppelcontainerertragwagen 90'
1007-000630	37804961115-5	Doppelcontainerwagen 90'
1007-000854	37844962001-2	Doppelcontainerertragwagen 90'
1007-000871	37804961118-9	Doppelcontainerwagen 90'
1007-000967	37844962035-0	Doppelcontainerertragwagen 90'
1007-000997	33854552147-2	Containerertragwagen 60'

Tabelle 3: Wagen mit dauerhaft hoher Anzahl Peaks

Abbildung 20 zeigt eine typische Auswertung eines Wagens mit andauernd hohen Indikator-Werten. Besonders fällt auf, dass vor allem eine grosse Anzahl von Oberwellen den Werten wie bei Flachstellen entspricht. Es kann zum heutigen Stand nicht ausgeschlossen werden, dass diese Wagen tatsächlich Flachstellen-ähnliche Schadbilder aufweisen. Dies ist bei künftigen Werkstattberührungen zu prüfen.

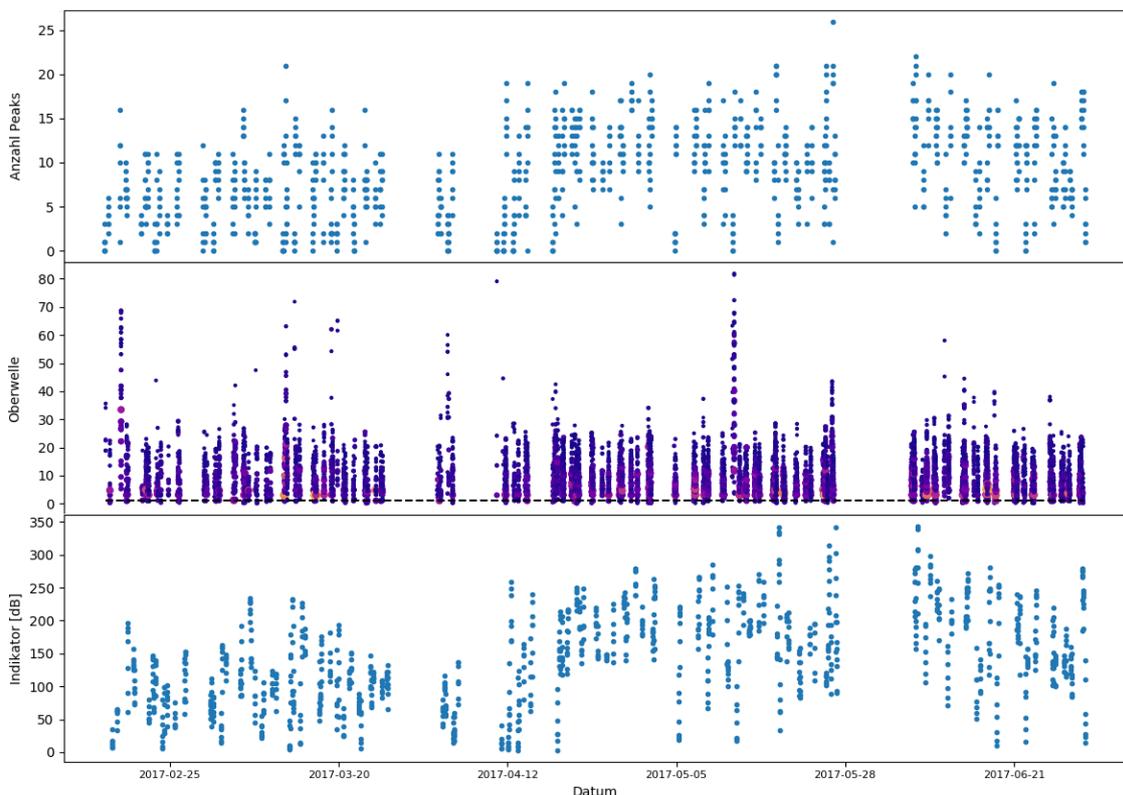


Abbildung 20: Beispielhafte Messdaten eines Wagens mit dauerhaft hohen Werten über alle Verarbeitungsformen

2.1.10. Erkenntnisse

Folgende Schlüsselerkenntnisse können aus dem bisherigen Projektverlauf gezogen werden:

- 1) Die bisherigen Messungen und Auswertungen lassen voraussichtlich ein Erkennen einer Flachstelle zu. Basis der Erkenntnis bildet eine Veränderung der Anzahl auftretenden Frequenz-Peaks an mehreren Fahrzeugen mit Gemeldeter Flachstelle.
- 2) Frequenzen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sind häufig vorhanden, vor allem die 1./3./5. Oberwelle, daraus können z.B. Raddurchmesser zurückgerechnet werden.
- 3) Messungen von ca. 4 Sekunden Dauer sind ausreichend, damit verbunden ist...
- 4) ... ein energieschonendes Verfahren im Gerät möglich.
- 5) Die alleinige Betrachtung der Beschleunigungen der vertikalen z-Achse ist ausreichend für die Auswertung.
- 6) Das Verfahren geht von der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit über die Messdauer aus. Ist dies nicht der Fall, fallen die Peaks deutlich kleiner und Breiter aus.

2.1.11. Verbesserungen

2.1.11.1. Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Um eine Filterung vornehmen zu können muss die Grundfrequenz bekannt sein. Die Grundfrequenz ist Abhängig vom Raddurchmesser und der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit kann über GPS bestimmt werden. Der Raddurchmesser ist unbekannt. Desweiteren möchte man den zusätzlichen Energieverbrauch für das Verfahren möglichst geringhalten.

Der energieverbrauch kann geringgehalten werden, wenn die Messung dann stattfindet, wenn das Telematik System sowieso läuft und nicht im Sleepmode ist. Dies ist z.B. während der GPS Suche der Fall. Jedoch ist dann die Geschwindigkeit nur am Ende der Messung bekannt.

Es ist noch nicht entschieden ob eine Filterung überhaupt nötig ist.

Da die Grundfrequenzen der 1. Und 5. Oberwelle sehr häufig auftreten. Kann nach diesen Peaks gesucht werden auf Basis einer relativ ungenauen Geschwindigkeitsinformation. Danach steht eine sehr Genaue Frequenz relativ zur Datenlage zur Verfügung, die unabhängig von der Abtastrate, GPS und dem Raddurchmesser ist.

Ist die Grundfrequenz bekannt kann über einen Längeren Zeitraum hinweg der Raddurchmesser bestimmt werden. Die dafür nötige genaue Abtastrate kann genau mit dem Systemquarz gemessen werden. Als letzte unbekanntes Fehlerquelle bleibt die GPS Geschwindigkeit.

Mit der genauen Grundfrequenz kann die Peak-Erkennung präzisiert erfolgen. Alle Peaks, die kein vielfaches sind, könnten somit ignoriert werden.

Durch Anlernen der häufig auftretenden Frequenzen (z. B. 1., 3. und 5. Oberwelle) können diese geringer gewichtet werden oder komplett ignoriert werden.

Das Anlernen kann pro Geschwindigkeit erfolgen.

2.1.11.2. Geräte-Implementierung

Um den Einfluss der Messung auf den Energieverbrauch gering zu halten, kann die Messung und Berechnung während der GPS Positionsbestimmung durchgeführt werden. Einerseits steht somit die Geschwindigkeit am Ende der Messung zur Verfügung. Andererseits ist dies bei fast gleichbleibendem Energieverbrauch möglich, da die CPU ohnehin während der Messung aktiv sein muss.

2.1.11.3. *Optimierung Messverfahren für Phase 2*

Aufgrund der Erkenntnisse werden Änderungen für die restliche Testdauer vorgenommen:

- 1) Reduktion der Messdauer auf 10 Sekunden
- 2) Erhöhung der Mindestgeschwindigkeit während zur Messung auf 40 km/h
- 3) Erhöhung der Anzahl Messungen pro Tag auf bis zu 6
- 4) Reduktion des Abstandes zwischen zwei Messungen auf minimal 1 Stunde

2.1.12. **Nächste Schritte**

2.1.12.1. *Zeitlich begrenzte Abweichungen*

Die unter 2.1.12.1 Fälle von zeitlich begrenzten Abweichungen zum normalen Verhalten müssen vertieft abgeklärt werden. Als mögliche Ursache soll insbesondere geprüft werden, ob eine Flachstelle zwar aufgetreten ist, aber durch den weiteren Betrieb abgetragen wurde.

2.1.12.2. *Dauerhaft auffällige Fahrzeuge*

In Kapitel 2.1.9.2 sind Fahrzeuge mit andauernd hohen Messwerten aufgelistet. Deren Ursache ist bisher nicht bekannt. Parallelen und/ oder Ursachen sollen soweit möglich eruiert werden.

2.1.12.3. *Übergang in Realisierungsphase*

Die bisherigen stark auf «Forschung» orientierten Tätigkeiten müssen in der kommenden zweiten Projekthälfte (Realisierungsphase) in eine anwendungstaugliche, robuste Form überführt werden.

Grob zusammengefasst heisst dies die Umsetzung der Verbesserungen:

- 1) Bewertung der Verwendung von Geschwindigkeitsinformationen
- 2) Implementierung des Algorithmus hin zur Auswertung auf dem Telematik System selbst
- 3) Implementierung zusätzlicher Filter-Algorithmen
(beispielsweise Geschwindigkeits-abhängige Frequenz-Selektion)

Wobei dauerhaft die Verifikation der Funktionalität sichergestellt werden muss.

Ebenso gehört die Implementierung der Datenschnittstelle, auf deren Betrachtung bisher verzichtet wurde, in die Realisierungsphase. Erst die jetzt vorhandenen Resultate lassen eine sinnvolle Beschreibung der Anforderungen an diesen automatisierten Informationsaustausch zu.

3. Realisierungsphase

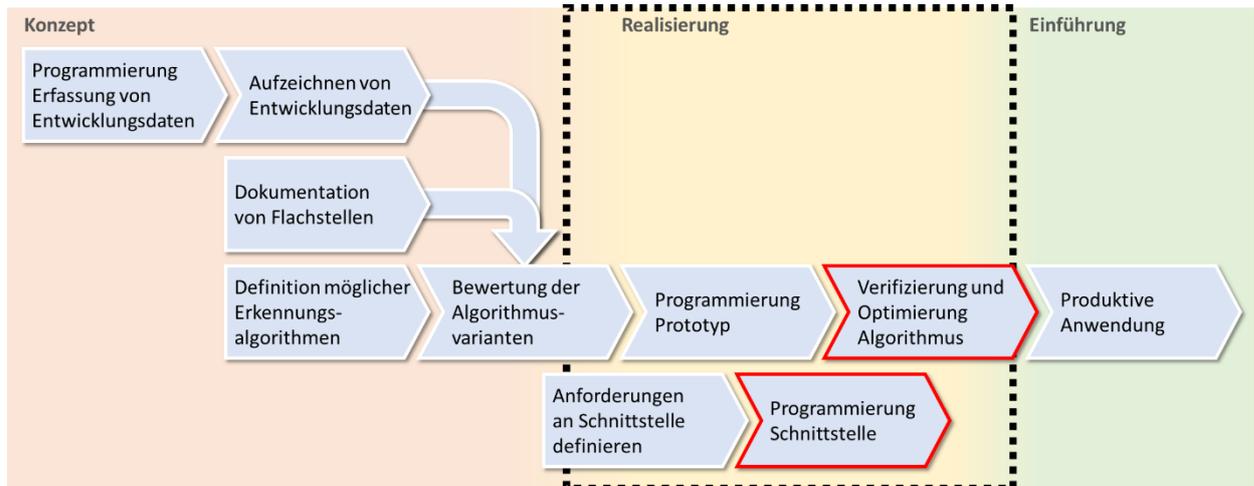


Abbildung 21: Realisierungsphase

3.1. Ziel 1: Entwicklung Erkennungsalgorithmus

3.1.1. Einleitung

Folgende Kapitel beschreiben den finalen Erkennungsalgorithmus, der als Resultat dieses Forschungsvorhabens gilt.

Die weiteren Entwicklungsschritte gegenüber der vorhergehenden Konzeptphase des Erkennungsalgorithmus auf der Telematik sind insbesondere die Punkte gemäss 2.1.12.3:

- 1) Bewertung der Verwendung von Geschwindigkeitsinformationen
- 2) Implementierung des Algorithmus hin zur Auswertung auf dem Telematiksystem selbst
- 3) Implementierung zusätzlicher Filter-Algorithmen

3.1.2. Grundlage

Die aus der Konzeptphase gewonnenen Erkenntnisse (siehe Kapitel 2.1.10) liefern die Basis für den Algorithmus. Hier nochmals zusammengefasst:

- 1) Der Algorithmus muss eine Veränderung der Anzahl und Stärke der auftretenden Frequenzpeaks erkennen.
- 2) Frequenzen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sind häufig vorhanden, vor allem die 1./3./5. Oberwelle, daraus können z.B. Raddurchmesser zurückgerechnet werden.
- 3) Messungen von ca. 4 Sekunden Dauer sind ausreichend
- 4) Die alleinige Betrachtung der Beschleunigungen der vertikalen z-Achse ist ausreichend für die Auswertung.
- 5) Das Verfahren beschränkt sich auf die Anwendung bei annähernd konstanter Geschwindigkeit. Ist dies nicht der Fall, entstehen verschwommene Peaks, die keine weiterführende Auswertung zulassen.

Im Laufe der Algorithmentwicklung zeigte sich, dass die Erkenntnis 2) «Abhängigkeit der Geschwindigkeit» nicht sinnvoll anzuwenden ist. Die Streuung der verschiedenen Raddurchmesser am Wagen beeinflusst das Resultat zu stark, ebenso wie die Variation der Streuung von Wagen zu Wagen (man beachte die grosse Streuung der Messwerte in Abbildung 17). Eine zielgerichtete Filterung ist bislang nicht möglich. Auf einen Einbezug der Geschwindigkeit musste daher verzichtet werden.

3.1.3. Erwartetes Resultat

Ziel des Algorithmus ist, auf der Telematik die Vibrationen im Zeit- und im Frequenzbereich so zu analysieren, auszuwerten und zu transformieren, dass daraus Indikatoren entstehen, die eine aussagekräftige Information über das dynamische Vibrationsverhalten des Wagens beinhalten.

Diese Indikatoren werden lokal auf dem Telematiksystem aufgezeichnet und jeweils mit historischen Messwerten verglichen. Verändert sich ein Indikator stark, lässt dies auf eine Veränderung des Vibrationsverhaltens schliessen. Unter Berücksichtigung mehrerer Indikatoren kann bei einem Anstieg mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf geschlossen werden, dass eine Flachstelle aufgetreten ist.

Folgende Indikatoren werden mit dem Algorithmus generiert:

Nr.	Indikatorname	Beschreibung	Domain
1	Signal Strength	Quadratischer Mittelwert der Signalstärke	Zeitbereich
2	Spectral Count	Anzahl der identifizierten Frequenzspektrumlinien, welche die Erkennungskriterien erfüllen	Frequenz
3	Spectral Ratio	Summe des Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) aller identifizierten Frequenzspektrumlinien	Frequenz
4	Spectral Strength	Summe der Signalstärken aller identifizierten Frequenzspektrumlinien	Frequenz

Tabelle 4: Beschreibung der Indikatoren

3.1.4. Rollout

Nach einem längeren Test auf einer Testflotte, wurde der finale Algorithmus in der Telematikfirmware erfolgreich integriert und auf die WASCOSA Wagenflotte ausgerollt.

Zusätzlich wurde die Firmware auch auf eine Flotte von 10 Wagen einer Dritt-Firma ausgerollt, da diese Wagen sehr viele Flachstellen aufweisen.

3.1.5. Validierung & Resultate

Bei der WASCOSA Wagenflotte trat seit dem Rollout der finalen Firmware (Dezember 2017) keine Flachstelle auf, um als Referenz den Algorithmus zu verifizieren. Bei einem Dritt-Wagen entstand bereits kurz nach dem Rollout eine Flachstelle, die vom Algorithmus erfolgreich erkannt wurde. Die Sichtung der Flachstelle in der Werkstatt hat dies bestätigt.

3.1.5.1. Messdatenbeispiel Wagen ohne Flachstelle

1007-001232 WheelFlat 95 kmph Z-Accel 2017-11-21 04:22:52

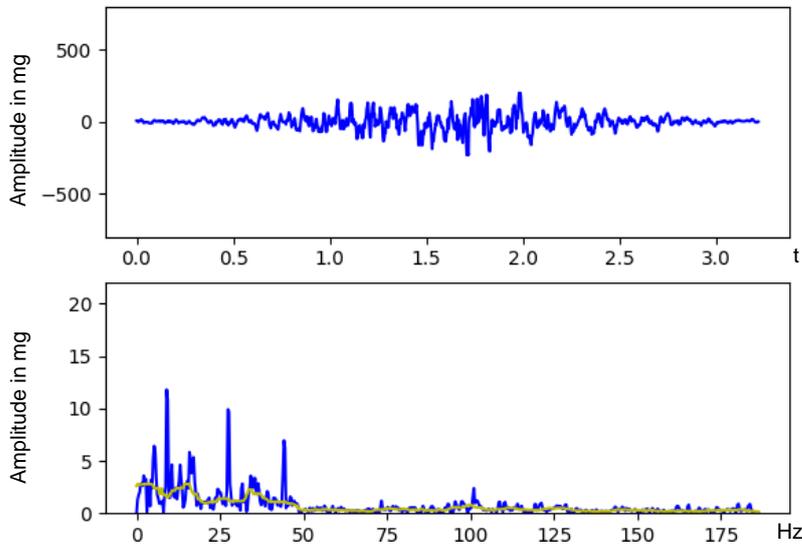


Abbildung 22: Messwerte ohne Flachstelle.

Oben: Gemessene Beschleunigungen der z-Achse während 3 Sekunden (gefiltert).

Unten: Frequenzspektrum der Messdaten (blau) inkl. dem Rauschpegel (gelb).

Abbildung 22 zeigt die Beschleunigungsdaten des Wagens während der Fahrt mit 95 km/h. Die obere Grafik zeigt die Beschleunigung in vertikaler Richtung im Zeitbereich, hochpassgefiltert. Die untere Grafik zeigt das entsprechende Frequenzspektrum. Zu diesem Zeitpunkt zeigen die Indikatoren Werte, welche erfahrungsgemäss dem Normalzustand entsprechen (Tabelle 5).

Nr.	Indikatorname	Beschreibung	Wert
1	Signal Strength	Quadratischer Mittelwert der Signalstärke im Zeitbereich	73 mg
2	Spectral Count	Anzahl der identifizierten Frequenzspektrumlinien, welche die Erkennungskriterien erfüllen, im Frequenzbereich	15
3	Spectral Ratio	Summe des Signal-zu-Rausch-Abstandes (SNR) aller identifizierten Frequenzspektrumlinien, im Frequenzbereich	108
4	Spectral Strength	Summe der Signalstärken aller identifizierten Frequenzspektrumlinien	85 mg

Tabelle 5: Messdatenbeispiel: Typische Indikatorwerte ohne Flachstelle

3.1.5.2. Messdatenbeispiel Wagen mit Flachstelle

1007-001232 WheelFlat 96 km/h Z-Accel 2017-11-23 23:48:09

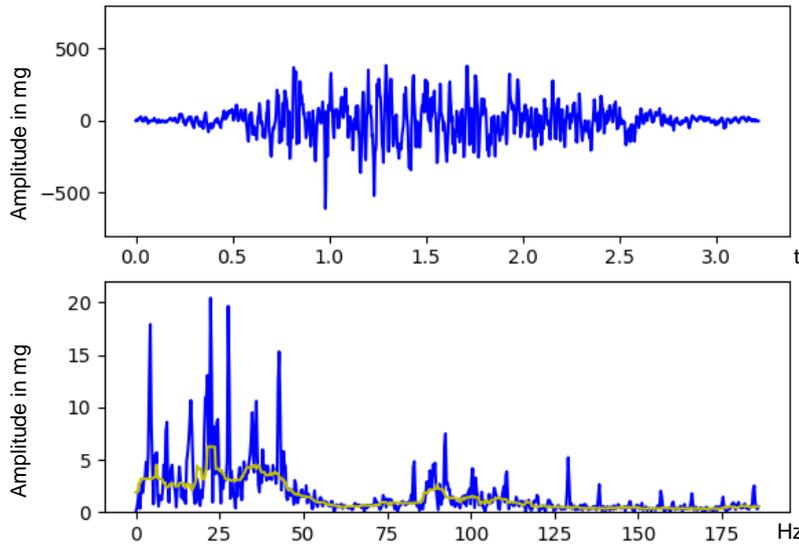


Abbildung 23: Messwerte mit Flachstelle.

Oben: Gemessene Beschleunigungen der z-Achse während 3 Sekunden (gefiltert).

Unten: Frequenzspektrum der Messdaten (blau) mit dem Rauschpegel (gelb).

Abbildung 23 zeigt die Beschleunigungsdaten des Wagens während der Fahrt mit 96 km/h. Die obere Grafik zeigt den Beschleunigungsverlauf der z-Achse im Zeitbereich, hochpassgefiltert. Im unteren Diagramm ist das entsprechende Frequenzspektrum ersichtlich.

Im Vergleich mit den Messdaten ohne Flachstelle (Abbildung 22) sind bereits von blossen Auge im Zeitbereich deutlich grössere Amplituden sichtbar (in etwa verdoppelt). Im Frequenzspektrum sind gegenüber den Messdaten ohne Flachstelle mehr und ausgeprägtere Spektrallinien sichtbar.

Es resultieren die folgenden Indikatorwerte:

Nr.	Indikatorname	Beschreibung	Wert
1	Signal Strength	Quadratischer Mittelwert der Signalstärke im Zeitbereich	270 mg
2	Spectral Count	Anzahl der identifizierten Frequenzspektrumlinien, welche die Erkennungskriterien erfüllen, im Frequenzbereich	30
3	Spectral Ratio	Summe des Signal-zu-Rausch-Abstandes (SNR) aller identifizierten Frequenzspektrumlinien, im Frequenzbereich	265
4	Spectral Strength	Summe der Signalstärken aller identifizierten Frequenzspektrumlinien	310 mg

Tabelle 6: Messdatenbeispiel: Typische Indikatorwerte mit Flachstelle

3.1.5.3. Messdatenbeispiel Wagen: Interpretation

Alle Indikatoren zeigen einen Anstieg zwischen 56% und 265% vom vorhergehenden, normalen Wert.

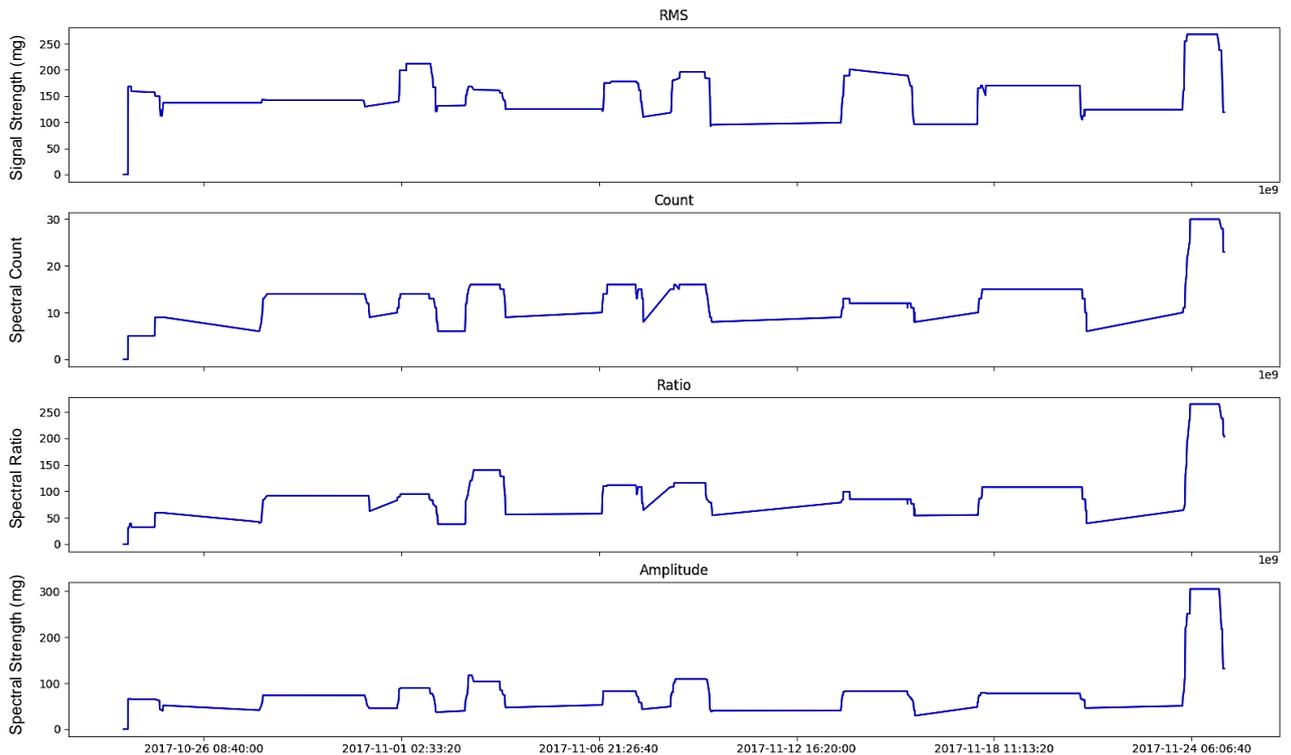


Abbildung 24: Verlauf der Indikatoren 1-4 des während rund einem Monat (vor und bei Entstehung der Flachstelle)

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Indikatoren 1 bis 4 (von Oben nach Unten: Signal Strength, Spectral Count, Spectral Ratio, Spectral Strength) während rund einem Monat vom 26. Oktober 2017 bis zum 24. November 2017.

Am 23. November 2017 ist ein deutlicher Anstieg aller Indikatoren zu verzeichnen. Die Sprünge in der Zeit davor sind vor allem auf Streckenabhängige Gegebenheiten, sehr langsame Fahrten, oder auf Stillstände zurückzuführen. Es zeigt sich aber über die gesamte Dauer ein relativ konstanter Maximalwert aller Indikatoren am ‚gesunden‘ Wagen.

Eine Untersuchung des Rades bestätigte die gemessenen Werte (Abbildung 25).



Abbildung 25: Messdatenbeispiel: Detektierte Flachstelle

3.2. Ziel 2: Schnittstellenanbindung

3.2.1. Einleitung

Basierend auf dem finalen Algorithmus zur Erkennung von Flachstellen, insbesondere auch den verwendeten Messparametern und den entwickelten Indikatoren, wurden die relevanten Grössen in einer Schnittstelle zusammengefasst.

Basis zur Implementierung bildet der SRS-Rail, der heute schon zur Integration von Telematikdaten von den Telematikherstellern in die WASCOSA-Systeme verwendet wird.

3.2.2. Zu übermittelnde Grössen

Die in Tabelle 7 dargestellten Grössen werden in Bezug auf die Flachstellenerkennung und zur Definition von zugehörigen Alarmen als relevant betrachtet. Die übermittelbaren Grössen teilen sich dabei in eine obligatorische und 3 optionale Gruppen auf, somit kann die Information je nach Anwendungsfall gezielt weitergeleitet werden.

Object	Sub Object	Unit	Description	Required
Fault Indicator		0..1 0: not plausible 1: very plausible	Indicates a plausible fault due to vibration	required
Indicators			Vibration based indicators	optional
	Signal Strength	[mg]	Filtered signal strength (RMS)	optional
	Spectral Count	[-]	Filtered number of spectral lines	optional
	Spectral Ratio	[-]	Filtered sum of spectral line signal-to-noise ratio	optional
	Spectral Strength	[mg]	Filtered sum of spectral lines	optional
Spectral Lines			List of selected lines, relates to Spectral Strength Indicator	optional
	Frequency	[Hz]	Spectral line frequency	required
	Amplitude Signal	[mg]	Spectral line amplitude	required
	Amplitude Noise	[mg]	Spectral line noise level	required
Signal Processing Parameters				optional
	MeasurementDuration	[sec]	Raw signal sampling duration	optional
	Sampling Rate	[Hz]	Raw signal sampling rate	optional
	NoiseFilterWidth	[Hz]	Noise filter width	optional
	SpectralLineMin	[mg]	Minimum spectral line to be selected	optional
	SpectralLineNoiseRatio	[-]	Minimum spectral line signal to noise ration to be selected	optional
	SpectralLineDistance	[Hz]	Minimum distance between two spectral lines to be selected	optional

Tabelle 7: Übersicht relevanter Informationen zur Übermittlung von Flachstellen-Messdaten

- 1) «Fault Indicator» (Tabelle 7: Grau schattiert)
Der Fault Indicator ist ein Wahrscheinlichkeitswert zwischen 0 und 1, der basierend auf den Messresultaten eine Flachstelle anzeigt. Er ist der einzige obligatorische Wert und ist die einfachste Art der Übermittlung. Der Wert «0» besagt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Flachstellen vorhanden sind. Lassen die Indikatoren mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Flachstelle schliessen, so gibt das System den Wert «1» aus.
- 2) «Indicators» (Tabelle 7: Orange schattiert)
Die Gruppe Indicators überträgt die jeweiligen Werte der einzelnen Indikatoren 1 bis 4, wobei es möglich ist, nur einzelne der Indikatoren zu übermitteln.
- 3) «Spectral Lines» (Tabelle 7: gelb schattiert)
Die Spectral Lines - Gruppe überträgt die einzelnen, zur Bewertung der Messung verwendeten Informationen des Frequenzbereiches: Die Peaks und das an den jeweiligen Peak-Frequenzen herrschende Rauschen.
Eine Übermittlung der Spectral Lines beinhaltet zwingend («required») alle zur Identifikation dieser Peaks notwendigen Grössen Frequenz, Amplitude und Rauschpegel.
- 4) «Signal Processing Parameters» (Tabelle 7: Grün schattiert)
Die Signal Processing Parameters sind statische Parameter, die zur Bewertung der Messungen dienen – die Regler des Algorithmus. Sie sind mittelfristig insbesondere zum Vergleich von Messwerten und zur Anpassung der Auswertung sinnvoll, beispielsweise zur Optimierung an verschiedene Wagentypen, Installationsorte, Hersteller etc.

4. Fazit

4.1. Zielerreichung

Der Algorithmus konnte auf Basis der Erkenntnisse aus der Konzeptphase erfolgreich realisiert werden.

In der kurzen Rolloutphase des finalen Algorithmus ist erst eine bestätigte Flachstelle aufgetreten, die als Referenz für die Verifikation des Algorithmus herangezogen werden konnte, diese Flachstelle wurde jedoch einwandfrei erkannt und hat die Funktionalität des Algorithmus grundsätzlich bestätigt.

Für noch präzisere Aussagen und zur weiteren Optimierung der Messparameter bedarf es weiterhin eines Vergleichs von Messdaten mit Flachstellen («Big Data»-Analysen).

Die Schnittstelle zur Übermittlung aller relevanten Daten konnte innerhalb des Projektes umgesetzt werden.

Wascosa wird den Algorithmus weiterhin auf Ihren Wagen aktiv laufen lassen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden als wertvolle Informationsquelle zur Entwicklung der zustandsbasierten Fahrzeuginstandhaltung gesehen. Es gilt in einem ersten Schritt die Belastbarkeit der Informationen weiter zu erhärten und gegebenenfalls die Messparameter weiter zu optimieren.

Für weitere Installationen gilt zu beachten, dass der Einbauort des Telematiksystems einen Einfluss auf die Detektionsfähigkeit hat. Insbesondere bei doppelwagen, aber auch bei Installationen sehr nahe an Drehgestellen, wo das nahe Drehgestell die Messwerte dominiert. Unter Umständen können aber auch hier durch eine langfristige Erfassung und Auswertung von Daten weitere Erkenntnisse gewonnen werden.

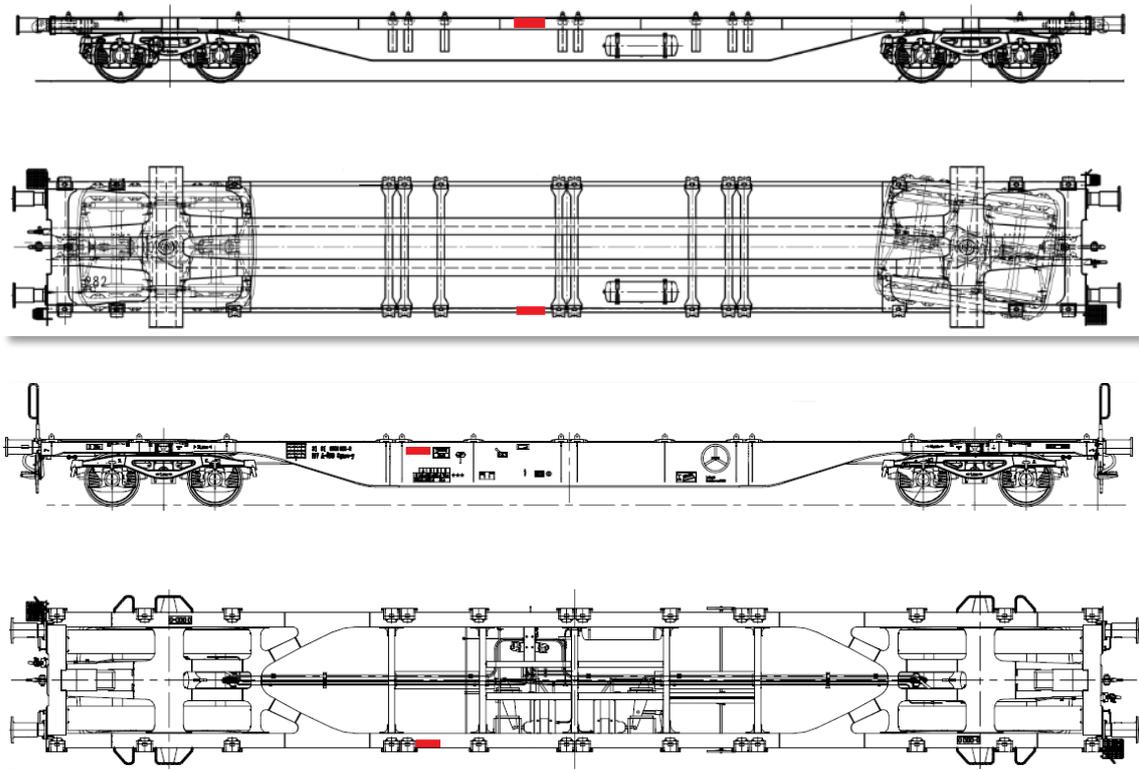
4.2. Dank

Die gewonnenen Erkenntnisse und das entstandene Detektionsverfahren ist das Resultat einer konstruktiven und guten Zusammenarbeit mit den Partnern der Savvy Telematics Systems AG, namentlich Herrn Felix Schwarz und Herrn Daniel Alberti, sowie der kasasi GmbH, insbesondere Herrn Martin Forster.

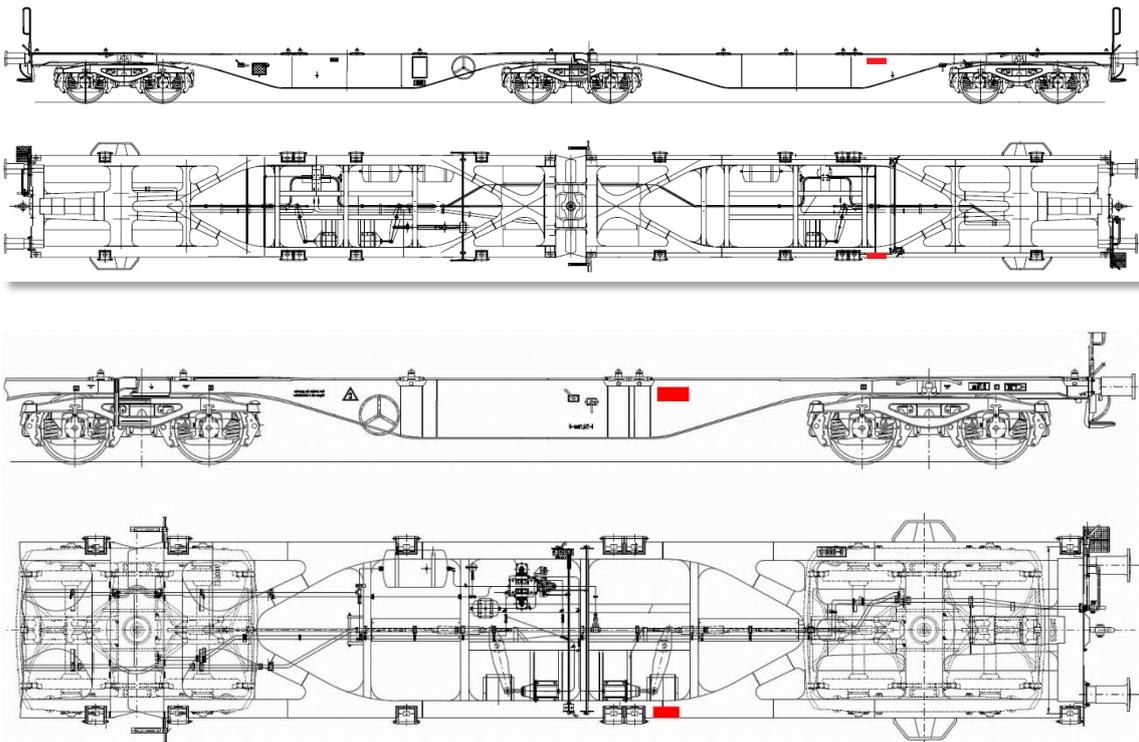
Ohne die Mitfinanzierung der Schweizerischen Eidgenossenschaft wäre die Entwicklung einer Flachstellendetektion in dieser Form und in dieser Geschwindigkeit nicht möglich gewesen. Insbesondere gilt der Dank hier Herrn Fredy Fischer und Herrn Dr. Christoph Wenger.

A Telematik: Einbauorte an WASCOSA-Intermodalwagen

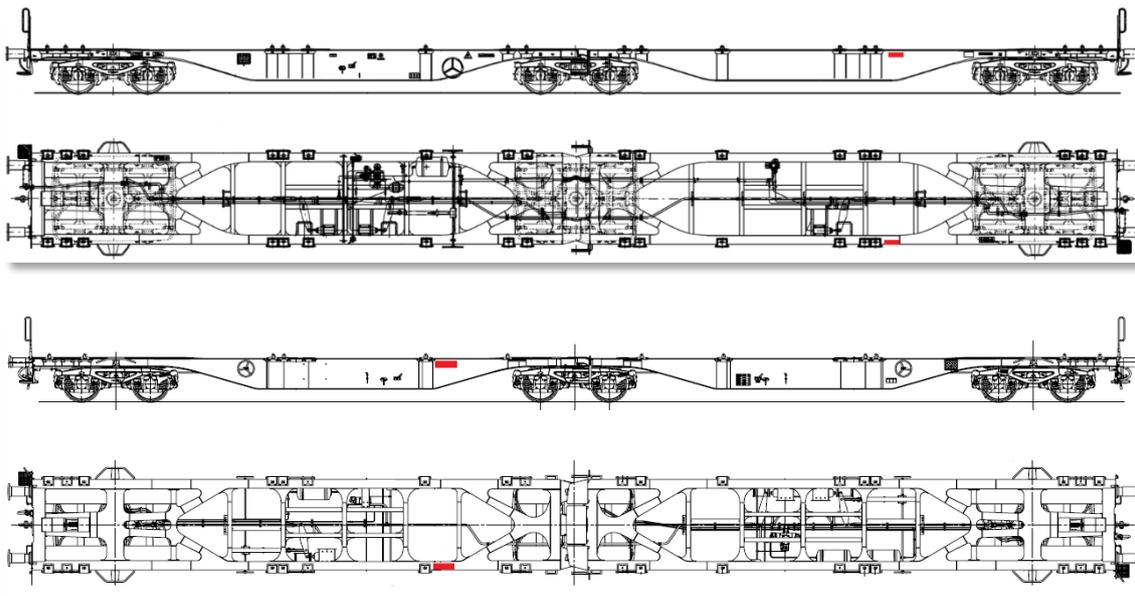
A-i Containertragwagen 60'



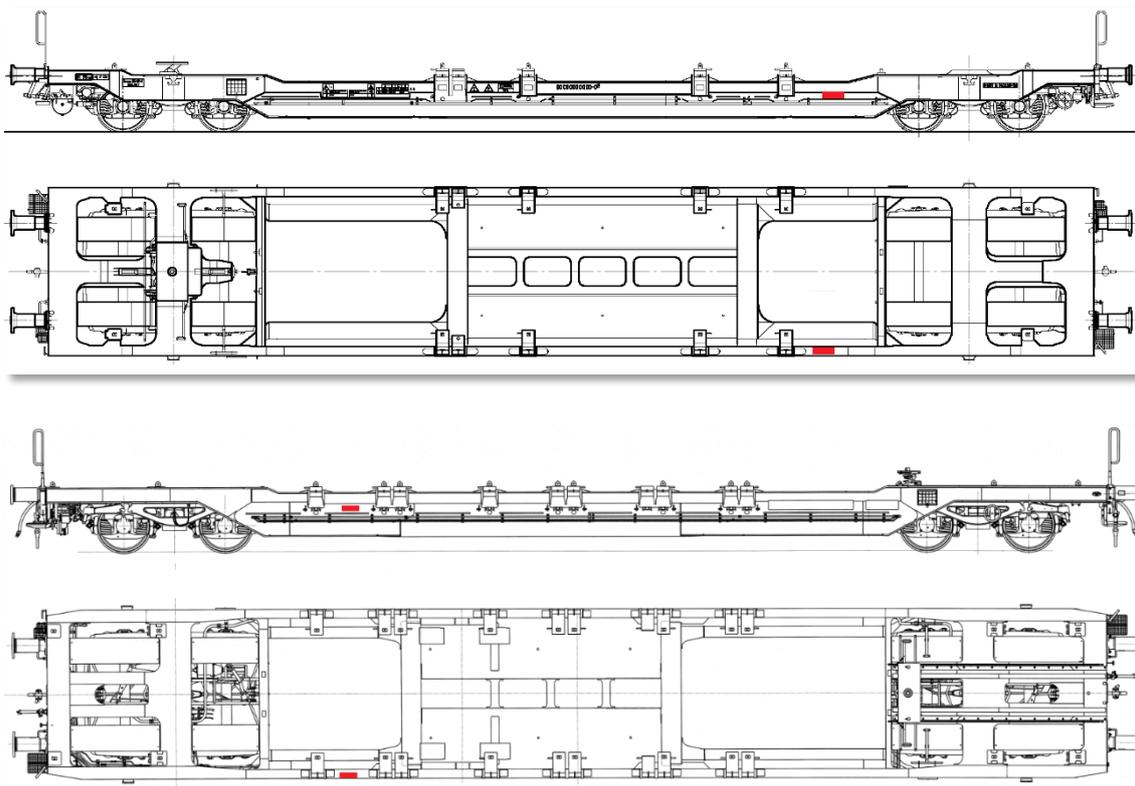
A-ii Doppelcontainertragwagen 80'



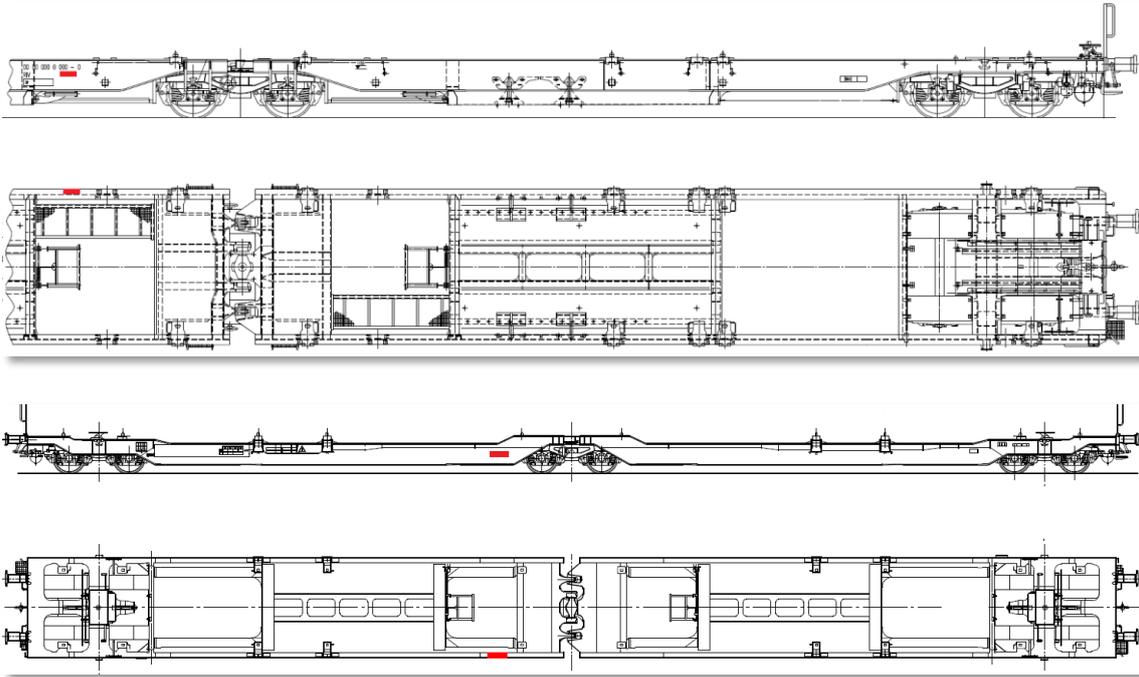
A-iii Doppelcontainertragwagen 90'



A-iv Einzeltaschenwagen

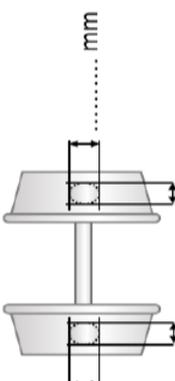
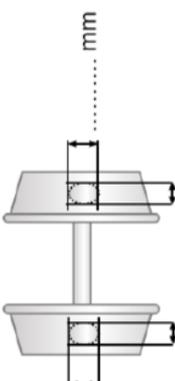
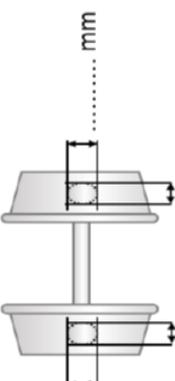
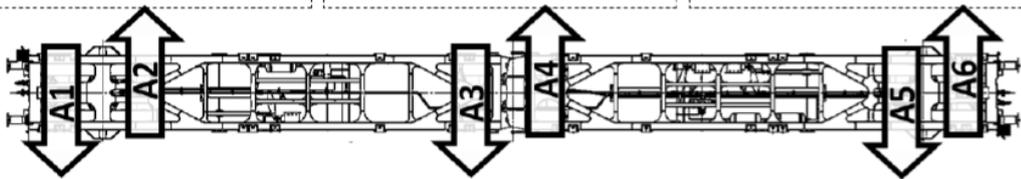
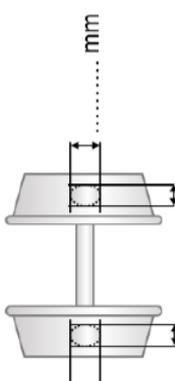
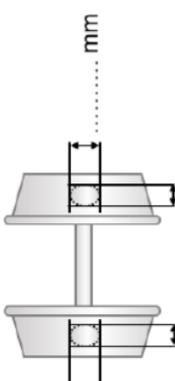
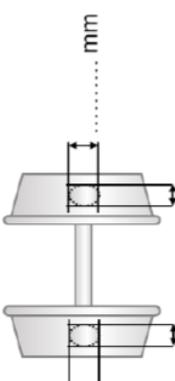


A-v Doppeltaschenwagen



B Formular zur Dokumentation von Flachstellen

wascosa	
TA-00-0209	Erfassung von Flachstellenschäden
V1.0	
Eröffnet: 08. März 2017	Geplanter Abschluss: 31. August 2017
Verwendungszweck: <input type="checkbox"/> nur Intern	<input checked="" type="checkbox"/> extern Werkstätten <input type="checkbox"/> Wagenhersteller
Diese Fachanweisung ist gültig ab dem Freigabedatum für alle Wagen, die von der Wascosa AG beauftragt werden.	
Betroffene Fahrzeuge:	
Typ	Fzg.-Nr. / -Serien / Projekt
Gattung S	-----
Hersteller	-----
Bemerkung	Ausgerüstet mit Telematik
Wagen-Nr:	-----
Fotos	
Bitte senden Sie uns Bilder der entsprechenden Flachstellen mit einem Masstab im Bild zu. Bitte Fotos eindeutig benennen (Bsp.: "1234 4568 901-5 – A2 (1).jpg").	
Einbauort Telematik und Ort der Flachstelle	
Welche Achsen weisen Flachstellen auf? (Bitte Achse ankreuzen: <input checked="" type="checkbox"/>)	Die Achsnummerierung dient nur zur Dokumentation auf Seite 2
Wo ist das Telematiksystem angebaut? (Bitte in <u>beiden</u> Wagenansichten einkreisen \emptyset)	
Für alle Achsen mit Flachstellen bitte Seite 2 ausfüllen.	
Die Unterlagen bitte senden an: flachstelle@wascosa.ch	
Datum: _____	Werkstatt: _____
© Dieses Dokument darf ohne schriftliche Zustimmung von Wascosa AG Luzern weder vervielfältigt, noch Dritten zugänglich gemacht oder in anderer Weise missbräuchlich verwendet werden.	
Seite 1 von 2	

TA-00-0209	Erfassung von Flachstellenschäden	V1.0							
<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>	<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>	<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>							
									
<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>	<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>	<p style="text-align: right;">Radsatznummer:</p>  <p>Länge der Fichst.: mm</p> <p style="text-align: right;">Breite der Fichst.: mm</p>							
<p>TA-00-0209</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><u>Erstellt von / am:</u> CBE /08.03.2017</td> <td style="width: 33%;"><u>Geändert von / am:</u></td> <td style="width: 33%;"><u>Version / Datum:</u></td> </tr> <tr> <td><u>Unterschrift:</u> </td> <td><u>Unterschrift:</u></td> <td>1.0 /08.03.2017</td> </tr> </table>	<u>Erstellt von / am:</u> CBE /08.03.2017	<u>Geändert von / am:</u>	<u>Version / Datum:</u>	<u>Unterschrift:</u> 	<u>Unterschrift:</u>	1.0 /08.03.2017	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><u>Geprüft und freigegeben von / am:</u> DSC /08.03.2017</td> </tr> <tr> <td><u>Unterschrift:</u> </td> </tr> </table>	<u>Geprüft und freigegeben von / am:</u> DSC /08.03.2017	<u>Unterschrift:</u> 
<u>Erstellt von / am:</u> CBE /08.03.2017	<u>Geändert von / am:</u>	<u>Version / Datum:</u>							
<u>Unterschrift:</u> 	<u>Unterschrift:</u>	1.0 /08.03.2017							
<u>Geprüft und freigegeben von / am:</u> DSC /08.03.2017									
<u>Unterschrift:</u> 									
<p>© Dieses Dokument darf ohne schriftliche Zustimmung von Wascosa AG Luzern weder vervielfältigt, noch Dritten zugänglich gemacht oder in anderer Weise missbräuchlich verwendet werden. Seite 2 von 2</p>									

C Schnittstelle

C-i «RailPushReceiver.wsdl»

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <!-- Published by JAX-WS RI (http://jax-ws.java.net). RI's version is Metro/2.3.2-b608 (trunk-7979; 2015-01-21T12:50:19+0000) JAXWS-RI/2.2.11-b150120.1832 JAXWS-API/2.2.12 JAXB-RI/2.2.12-b141219.1637 JAXB-API/2.2.13-b141020.1521 svn-revision#unknown. -->
- <!-- Generated by JAX-WS RI (http://jax-ws.java.net). RI's version is Metro/2.3.2-b608 (trunk-7979; 2015-01-21T12:50:19+0000) JAXWS-RI/2.2.11-b150120.1832 JAXWS-API/2.2.12 JAXB-RI/2.2.12-b141219.1637 JAXB-API/2.2.13-b141020.1521 svn-revision#unknown. -->
- <definitions
  xmlns:wssu="http://docs.oasis-open.org/wss/2004/01/oasis-200401-wss-wssecurity-utility-1.0.xsd"
  xmlns:wsp="http://www.w3.org/ns/ws-policy"
  xmlns:wsp1_2="http://schemas.xmlsoap.org/ws/2004/09/policy"
  xmlns:wsam="http://www.w3.org/2007/05/addressing/metadata"
  xmlns:soap="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/soap/"
  xmlns:tns="http://push.rail.ws.nicbase.com/"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/"
  targetNamespace="http://push.rail.ws.nicbase.com/" name="RailPushReceiverServiceV2">
- <types>
- <xsd:schema>
  <xsd:import namespace="http://push.rail.ws.nicbase.com/" schemaLocation="http://api.nic-base.com/soap/v2/RailPushReceiver?xsd=1" />
  </xsd:schema>
</types>
- <message name="push">
  <part name="parameters" element="tns:push" />
</message>
- <message name="pushResponse">
  <part name="parameters" element="tns:pushResponse" />
</message>
- <portType name="RailPushReceiverV2">
- <operation name="push">
  <input wsam:Action="http://push.rail.ws.nicbase.com/RailPushReceiverV2/pushRequest" message="tns:push" />
  <output wsam:Action="http://push.rail.ws.nicbase.com/RailPushReceiverV2/pushResponse" message="tns:pushResponse" />
</operation>
</portType>
- <binding name="RailPushReceiverPortV2Binding" type="tns:RailPushReceiverV2">
  <soap:binding transport="http://schemas.xmlsoap.org/soap/http" style="document" />
- <operation name="push">
  <soap:operation soapAction="" />
- <input>
  <soap:body use="literal" />
</input>
- <output>
  <soap:body use="literal" />
</output>
</operation>
</binding>
- <service name="RailPushReceiverServiceV2">
- <port name="RailPushReceiverPortV2" binding="tns:RailPushReceiverPortV2Binding">
  <soap:address location="http://api.nic-base.com/soap/v2/RailPushReceiver" />
</port>
</service>
</definitions>

```

C-ii «RailPushReceiver.xsd»

Flachstellenbezogener Inhalt:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
```

```
- <xs:schema xmlns:tns="http://push.rail.ws.nicbase.com/"
  xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" version="1.0"
  targetNamespace="http://push.rail.ws.nicbase.com/">
  <xs:element name="push" type="tns:push" />
  <xs:element name="pushData" type="tns:PushDataType" />
  <xs:element name="pushResponse" type="tns:pushResponse" />

  [...]

  - <xs:complexType name="FlatSpotDataType">
  - <xs:sequence>
    <xs:element name="indicatorData" type="tns:FlatSpotIndicatorDataType" nillable="true"
      minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralLineData" type="tns:FlatSpotSpectralLineDataType" nillable="true"
      minOccurs="0" maxOccurs="unbounded" />
    <xs:element name="signalProcessingParameterData"
      type="tns:FlatSpotSignalProcessingParameterDataType" nillable="true" minOccurs="0" />
  </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  - <xs:complexType name="FlatSpotIndicatorDataType">
  - <xs:sequence>
    <xs:element name="faultIndicator" type="xs:float" nillable="true" />
    <xs:element name="signalStrength" type="xs:int" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralCount" type="xs:int" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralRatio" type="xs:int" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralStrength" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
  </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  - <xs:complexType name="FlatSpotSpectralLineDataType">
  - <xs:sequence>
    <xs:element name="frequency" type="xs:float" nillable="true" />
    <xs:element name="amplitudeSignal" type="xs:int" nillable="true" />
    <xs:element name="amplitudeNoise" type="xs:int" nillable="true" />
  </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  - <xs:complexType name="FlatSpotSignalProcessingParameterDataType">
  - <xs:sequence>
    <xs:element name="measurementDuration" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="samplingRate" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="noiseFilterWidth" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralLineMin" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralLineNoiseRatio" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
    <xs:element name="spectralLineDistance" type="xs:float" nillable="true" minOccurs="0" />
  </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  [...]

  </xs:schema>
```