

TEXTE

59/2022

Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Abschlussbericht

TEXTE 59/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3718 54 102 0

FB000727

Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Abschlussbericht

von

Dr.-Ing. Christine Huth, Melissa Forstreuter,
Manfred Liepert, Robert Arlt
Möhler + Partner Ingenieure AG

mit Unterauftragnehmer

Prof. Dr. Dominik Kupfer, Sebastian Hild, Hannes Raff
W2K Rechtsanwälte Partnerschaft mbB

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
mailto:info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Möhler + Partner Ingenieure AG
Prinzstraße 49
86153 Augsburg

Abschlussdatum:

November 2021

Fachliche Betreuung:

Fachgebiet I 2.3 Lärminderung im Verkehr
Percy Appel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Zugvorbeifahrten mit abgeflachten Stellen am Rad, den sogenannten Flachstellen, können für Anwohnende eine deutliche Lärmbelastung bedeuten. Deshalb beleuchtet das vorliegende Forschungsvorhaben Möglichkeiten eine Instandhaltung von Rädern über ein „akustisches Kriterium“ festzulegen.

Hierfür wurde ein Vorschlag für eine gehörgerechte Detektion von Flachstellen entwickelt, der basierend auf dem Maximalpegel und der Schienenbeschleunigung bei einem vorbeifahrenden Wagen Flachstellen erkennt. Zur Bewertung der Flachstellen wird in einem zweiten Schritt ein Grenzwert vorgeschlagen. Im Rahmen einer juristischen Bewertung wurden Möglichkeiten der Implementierung des „akustischen Flachstellenkriteriums“ in die Rechtsordnung vorgestellt. Auch Möglichkeiten einer betrieblichen Umsetzbarkeit wurden diskutiert.

Um die durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten zu erfassen, wurde eine Befragung von Akteuren im Bereich Schienengüterverkehr, Schienenpersonenverkehr und Eisenbahninfrastruktur durchgeführt. Während für das Rollmaterial eine Abschätzung hinsichtlich der flachstellenbezogenen Instandhaltungskosten möglich war, zeigte sich, dass im Bereich der Infrastruktur die durch Flachstellen verursachten Kosten aktuell nicht erfasst werden. Auf Basis dieser Befragungsergebnisse wurden mögliche Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen im deutschen Schienennetz diskutiert.

Abstract: Measurement of wheel flats and investigation of an acoustic maintenance criterion

Trains passing with wheel flats mean a significant noise exposure for residents. Therefore, the present research project sheds light on the possibility of defining the maintenance of wheels by an “acoustical criterion for flat spots”.

For this purpose, a detection of wheel flats was developed in a manner that corresponds to our hearing sensation and is based on the maximum level and the rail acceleration during the train passing with a flat spot. In a second step, a limit value was proposed to evaluate the flat spot.

In the context of a legal evaluation options for implementing this “acoustic criterion for flat spots” were presented. Opportunities for the operational feasibility were also discussed.

In order to determine the maintenance costs caused by flat spots, a survey of stakeholders in the field of rail freight transport, rail passenger transport and rail infrastructure was carried out. In the field of freight and passenger transport, an estimation of the maintenance costs caused by flat spots was feasible. However, in the field of infrastructure the maintenance costs caused by flat spots are currently not gathered. Based on the survey results possible motivation strategies were discussed to reduce the number of flat spots on the German railway infrastructure.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung	18
Summary	24
1 Einführung in den Forschungsgegenstand und Motivation	30
2 Ausformungen von Radformfehlern und Lärmentstehung	32
2.1 Entstehungsmechanismen und Geräuschentwicklung singularer Radformfehler	33
2.1.1 Flachstelle	33
2.1.2 Materialauftragung	35
2.1.3 Ausbröckelungen, Löcher und Ablätterung	36
2.1.4 Eindrückungen auf der Lauffläche	37
2.2 Entstehungsmechanismen und Geräuschentwicklung periodischer Radformfehler	37
2.2.1 Exzentrizität, Ovalität, Polygonisierung	37
2.3 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Ausformung und Lärmentstehung von Flachstellen	39
3 Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen	40
3.1 Vertragsrechtliche Aspekte	40
3.2 Normative Regelungen	41
3.3 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zu Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen	43
4 Abschätzung der verursachten Lärmbelastung	44
4.1 Schallemissionen von Flachstellen	44
4.2 Railway, Noise and Vibration	45
4.3 Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht	46
4.4 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten hinsichtlich der verursachten Lärmbelastung durch Flachstellen	49
5 Messverfahren ohne geometrische Vermessung des Rads zur Detektion von Flachstellen	50
5.1 Flachstellenortung mittels HF-Strom (Tandem System)	50
5.2 Flachstellendetektion mittels Körperschall	51
5.3 Flachstellendetektion mittels Doppler-Effekt	52
5.4 Flachstellenerkennung mit Telematik	53

5.5	Akustische Flachstellendetektion auf Basis von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI)	54
5.6	ACoustic Railway Monitoring System acramos von psiacoustic in Kombination mit Argos® von HBK	54
5.7	Lasergestützte Radkraftdiagnose LASCA und Monitoringsystem MONI von INNotec Systems GmbH	56
5.8	Wheel Monitoring System (WMS) von Müller-BBM Rail Technologies	58
5.9	Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten unterschiedlicher Flachstellendetektionsverfahren	61
6	Durchführung von Messungen zur Bereitstellung der Datengrundlage	62
6.1	Randbedingungen der Messungen	62
6.2	Datenbasis	65
6.3	Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten für die durchgeführten Messungen	69
7	Evaluierung der Flachstellenakzeptanz	70
7.1	Analysen der Signale bei Vorbeifahrten mit Flachstellen	70
7.1.1	Die Schalldruckpegelgrößen	70
7.1.2	Die psychoakustischen Größen (Zwicker und Fastl, 1999)	71
7.1.3	Das Schienenbeschleunigung	72
7.2	Detektion akustisch auffälliger Flachstellen	73
7.2.1	Herangehensweise	73
7.2.2	Statistische Signifikanzprüfung zur Extraktion der relevanten Messgrößen	73
7.2.3	Detektion von Flachstellen basierend auf einer Maxima-Analyse	76
7.2.4	Verifikation des Zusammenhangs	82
7.3	Beschreibung der Lästigkeit einer Flachstelle	86
7.3.1	Psychoakustische Experimente	86
7.3.1.1	Hörversuchsreihe 1: Kategorialeinstufung zur Bestimmung der Akzeptanz einer Flachstelle	87
7.3.1.2	Hörversuchsreihe 2: Rangfolgenbestimmung zur Lästigkeit von Flachstellen	87
7.3.1.3	Auswahl der Signale	88
7.3.2	Zusammenhang der Lästigkeit einer Flachstelle mit dem Flachstellenindikator Müller-BBM Rail Technologies	88
7.3.3	Zusammenhang der Lästigkeit einer Flachstelle mit anderen Analysegrößen	91
7.4	Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Evaluierung der Flachstellenakzeptanz	96
8	Spezifikationsvorschlag zur Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen und Möglichkeiten einer Automatisierung	98
8.1.1	Allgemeine Spezifikation für die Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen	98

8.1.2	Möglichkeiten der Automatisierung zur Flachstellendetektion	100
9	Ermittlung von Kosten und betrieblicher Umsetzbarkeit	101
9.1	Durchführung einer Akteursbefragung.....	101
9.1.1	Recherche zu Ansprechpersonen und Experten.....	101
9.1.2	Erstellung der Fragebögen	105
9.1.3	Teilnehmende	105
9.1.4	Ergebnisse der Befragung	107
9.1.4.1	Allgemeiner Teil des Fragebogens	107
9.1.4.2	Flachstellenbezogener Teil des Fragebogens	109
	Bereich Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr.....	109
	Bereich Infrastruktur	112
9.1.4.3	Abschätzung der Folgeschäden im Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr .	113
9.1.4.4	Kostenabschätzung.....	115
	Bereich Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr.....	115
	Bereich Infrastruktur	116
9.1.4.5	Abschließender Teil	117
9.2	Abschätzung der aktuellen Kosten.....	120
9.2.1	Fahrzeughalter	121
9.2.2	Infrastrukturunternehmen	125
9.3	Kostenabschätzung für eine frühere Behebung von Flachstellen	127
9.3.1	Motivation und Vorgehensweise.....	127
9.3.2	Abhängigkeit der Infrastrukturbeanspruchung durch Flachstellen auf die Kostensparnis	127
9.3.3	Abhängigkeit der durch Flachstellen verursachten Fahrzeuginstandhaltungen auf die Kostensparnis	129
9.3.3.1	Abhängigkeit der bisher durch Flachstellen verursachten Fahrzeuginstandhaltungen	129
9.3.3.2	Abhängigkeit der durch eine zeitnahe Behebung neu verursachten Fahrzeuginstandhaltungen	130
9.3.3.3	Verknüpfung der bisherigen und neuen Fahrzeuginstandhaltungskosten	130
9.3.4	Modellierung der Gesamtkostensparnis	132
9.4	Darstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit.....	134
9.5	Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Kostenermittlung und betrieblichen Umsetzbarkeit.....	139
10	Rechtliche Bewertung und Vorschläge für ein Fördersystem.....	141

10.1	Verwendung eines Lästigkeitszuschlags für Vorbeifahrten mit Flachstellen.....	141
10.1.1	Versuchskonzept.....	141
10.1.2	Versuchsmethode	142
10.1.3	Ergebnisse der Hörversuche: Quantifizierung der Lästigkeit einer Flachstelle	143
10.2	Berücksichtigung von akustisch auffälligen Flachstellen über einen Grenzwertvorschlag mit Bezug zur TSI Noise.....	146
10.3	Rechtliche Bewertung der Umsetzung eines akustischen Flachstellenkriteriums	153
10.3.1	Aufgabenstellung	153
10.3.2	Vorschläge zur Änderung des rechtlichen Rahmens	153
10.3.2.1	Änderung des AEG	153
10.3.2.2	Änderung der EBO	154
10.3.3	Begründung.....	154
10.3.3.1	Verortung des Regelungsvorschlags im Eisenbahnrecht.....	154
10.3.3.2	Verortung des Regelungsvorschlags in der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO)	156
10.3.3.3	Rechtmäßigkeit des § 21 Abs. 6 EBO	157
10.3.3.4	Das Eisenbahnbundesamt als zuständige Behörde	168
10.3.3.5	Erforderlichkeit der Notifizierung bei der Kommission	169
10.3.4	Ergebnis.....	170
10.4	Vorschläge für eine Förderungssystem.....	171
10.4.1	Mögliche Verteilung der finanziellen Buße / Belohnung.....	171
10.4.2	Mögliche Finanzierungen des Anreizsystems	172
10.5	Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur rechtlichen Bewertung und Vorschlägen für ein Fördersystem	173
11	Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ – Umsetzung und Handreichung	174
12	Quellenverzeichnis	176
A.1	Auswahl der Signale für die Hörversuche	180
A.2	Fragebogen zu Flachstellen im Schienenverkehr für die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)	182
A.3	Fragebogen zu Flachstellen im Schienenverkehr für die Infrastrukturunternehmen	186

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Stufe 1 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“	19
Abbildung 2:	Stufe 1 und 2 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“	20
Abbildung 3:	Stufe 1, 2 und 3 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“	21
Abbildung 4:	Szenario zur betrieblichen Umsetzbarkeit des „Akustischen Instandhaltungskriteriums“	22
Figure 5:	Step 1 of the proposed “acoustic maintenance criterion“	25
Figure 6:	Step 1 and 2 of the proposed “acoustic maintenance criterion“	26
Figure 7:	Step 1, 2 and 3 of the proposed “acoustic maintenance criterion“	27
Figure 8:	Operating feasibilities.....	28
Abbildung 9:	Abbildung einer Flachstelle	34
Abbildung 10:	Materialauftragung auf einem Rad	35
Abbildung 11:	Ausbröckelungen auf der Lauffläche	36
Abbildung 12:	Linienförmige Eindrückungen auf der Lauffläche	37
Abbildung 13:	Schematische Darstellung einer Polygonisierung	38
Abbildung 14:	Schematische Darstellung des Sinuslaufs.....	38
Abbildung 15:	Abstrahlung einer unbegrenzten Linienschallquelle begrenzt auf die Dauer der Vorbeifahrt	46
Abbildung 16:	Beispiel für die Auswertung einer Güterzugvorbeifahrt	47
Abbildung 17:	Messwerte der Differenz aus Maximalpegel und Vorbeifahrtsexpositionspegel in verschiedenen Abständen für ca. 5.000 Güterzüge.....	48
Abbildung 18:	Messung der vertikalen Schienenkopfschwingung nach DIN CEN/TR 16891, empfohlene Messpositionen am Schienenfuß: a, b und c.	52
Abbildung 19:	Detektion von Flachstellen mittels Doppler-Effekt	53
Abbildung 20:	Schematischer Aufbau der Sensoren für das Messsystems acramos®	55
Abbildung 21:	Sensoren des Messsystems Argos® OOR.....	55
Abbildung 22:	Schematischer Aufbau des Mess-Systems	56
Abbildung 23:	WMS-Sensor und Mikrofon	59
Abbildung 24:	Entwicklung der Flachstellen über der Zeit für alle Räder eines Fahrzeugs mit 8 Achsen.....	60
Abbildung 25:	Verifikationsmessung an den Rädern der 3. Achse	60
Abbildung 26:	Lage der Messstelle an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld..	62
Abbildung 27:	Schematischer Messaufbau für die Datenerfassung.....	63

Abbildung 28:	Messstelle mit Messmikrofonen und Messstation an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld	64
Abbildung 29:	Messaufnehmer des WMS-Messsystems (links) und der Beschleunigungsmessung (rechts)	64
Abbildung 30:	Analyse der Datenbasis hinsichtlich Zuglängen.....	67
Abbildung 31:	Analyse der Datenbasis hinsichtlich Geschwindigkeiten.....	67
Abbildung 32:	Analyse der Datenbasis hinsichtlich der mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies detektierten Flachstellen.....	68
Abbildung 33:	Zeitverläufe der relevanten Messgrößen und Markierung aller deutlichen Maxima	77
Abbildung 34:	Hörkabine der Firma Möhler+ Partner	86
Abbildung 35:	Versuchsdesign für die erste Hörversuchsreihe	87
Abbildung 36:	Versuchsdesign für die zweite Hörversuchsreihe	88
Abbildung 37:	Akzeptanz der Signale mit Flachstelle gegenüber dem gemessenen Flachstellenindikator	89
Abbildung 38:	Verwendung des Flachstellenindikators zur Bestimmung einer Akzeptanzgrenze	90
Abbildung 39:	Rang in Lästigkeit versus <i>Flachstellenindikator</i>	91
Abbildung 40:	Rang in Lästigkeit versus L_{Amax}	92
Abbildung 41:	Rang in Lästigkeit versus <i>Lautheit</i>	93
Abbildung 42:	Rang in Lästigkeit versus <i>Schwankungsstärke</i>	93
Abbildung 43:	Rang in Lästigkeit versus <i>Schärfe</i>	94
Abbildung 44:	Messaufbau zur Flachstellendetektion	98
Abbildung 45:	Standorte der Messstationen des Lärm-Monitoring des Eisenbahn-Bundesamts	99
Abbildung 46:	Marktanteile der Wagenhalter 2016, abgeleitet aus der Flottengröße	101
Abbildung 47:	Die sechs größten Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen im Schienenpersonennahverkehr 2017 (mit einer Betriebsleistung von 667 Mio. Zugkilometern)	103
Abbildung 48:	Marktanteil aller teilnehmenden Unternehmen im jeweiligen Bereich	107
Abbildung 49:	Relevanz von Flachstellen hinsichtlich der verursachten Kosten für die Bereiche SGV und SPV.....	118
Abbildung 50:	Anteile von Instandhaltungskosten für Flachstellen an den Betriebskosten pro Jahr.....	125
Abbildung 51:	Modellierung der durch Flachstellen verursachten Kosten an den Wagen, aufgetragen über dem Prozentsatz an Wagen mit Flachstellen.....	131

Abbildung 52:	Gesamtkostenabschätzung verursacht durch Flachstellen, aufgetragen über dem Prozentsatz an Wagen mit Flachstellen	132
Abbildung 53:	Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion an Monitoring-Stationen	136
Abbildung 54:	Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion am Fahrzeug	137
Abbildung 55:	Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion an Infrastruktur und Fahrzeug.....	138
Abbildung 56:	Pegelzeitverlauf der Zugvorbeifahrt mit und ohne Flachstelle	141
Abbildung 57:	Ablauf einer Sequenz für den Lästigkeitsabgleich.....	142
Abbildung 58:	Beispielhafte Pegeländerung der Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle im Verlauf des Hörversuchs.....	143
Abbildung 59:	Resultierende Pegelunterschiede für die 16 beurteilten Signale, um die gleiche Lästigkeit wie die Vorbeifahrt mit Flachstelle zu erzeugen	144
Abbildung 60:	Notwendige Pegelanhebung der Vorbeifahrt ohne Flachstelle für eine gleiche Lästigkeit wie die Vorbeifahrt mit Flachstelle, aufgetragen über dem Unterschied im A-bewerteten Maximalpegel L_{Amax} der Vorbeifahrten mit und ohne Flachstelle	145
Abbildung 61:	Schematischer Ablauf zur Berücksichtigung von Flachstellen auf Basis eines Pegelzuschlags für die Lästigkeit der Flachstelle .	146
Abbildung 62:	Analysen von Zugvorbeifahrten hinsichtlich des A-bewerteten Maximalpegels bei einer Wagnvorbeifahrt mit Flachstelle..	147
Abbildung 63:	A-bewerteter Maximalpegel der Flachstelle über der von den Versuchspersonen beurteilten Akzeptanz	149
Abbildung 64:	Abgeschätzter Mittelungspegel des Flachstelle über der von den Versuchspersonen beurteilten Akzeptanz	151
Abbildung 65:	Gleichgewicht der Kostenverteilung Infrastruktur und Fahrzeug	172
Abbildung 66:	Vorschlag für ein „Akustischen Instandhaltungskriterium für Flachstellen“	175

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prozentsatzes der detektierten Flachstellen bei Modellierung und Überprüfung des Ansatzes20
Table 2:	Percentage of detected flats25
Tabelle 3:	Kategorisierung von Radformfehlern mit Abbildungen der einzelnen Fehler32
Tabelle 4:	Übersicht der katalogisierten Fehler zu Flachstellen und Materialauftragung. Fehlerklasse 3 entspricht Nebenfehler, Fehlerklasse 4 entspricht Hauptfehler.40
Tabelle 5:	Zulässige Rundlaufabweichungen für übliche Raddurchmesser und Geschwindigkeiten von Güterwagen42
Tabelle 6:	Datenlieferung des Monitoring-Systems MONI57
Tabelle 7:	Ergebnisliste der WMS-Messung, welche in Datenbank abgespeichert sind.....65
Tabelle 8:	Ergebnisse der Analysen für die Stichprobe „keine Flachstelle wahrnehmbar“74
Tabelle 9:	Ergebnisse der Analysen für die Stichprobe „Flachstelle wahrnehmbar“74
Tabelle 10:	Signifikanzprüfung zwischen den beiden Stichproben „kein Flachstelle wahrnehmbar“ und „Flachstelle wahrnehmbar“ ...75
Tabelle 11:	Matrix der auftretenden Maxima innerhalb der relevanten Messgrößen78
Tabelle 12:	Logische Verknüpfung aller vier Messgrößen zur akustischen Detektion von Flachstellen im Messsignal81
Tabelle 13:	Trefferquote mit logischer Verknüpfung unterschiedlicher Messgrößen für die Datenbasis der 21 Zugvorbeifahrten82
Tabelle 14:	Matrix der auftretenden Maxima innerhalb der relevanten vier Messgrößen für die 5 neuen Zugvorbeifahrten und Flachstellendetektion anhand dieser Messgrößen83
Tabelle 15:	Trefferquote mit logischer Verknüpfung unterschiedlicher Messgrößen für die Datenbasis der 5 weiteren Zugvorbeifahrten84
Tabelle 16:	Erweiterung der Datenbasis für eine Detektion mit A-bewertetem Pegel und Schienenbeschleunigung85
Tabelle 17:	Bestimmtheitsmaß der einzelnen Analysegrößen mit dem Ergebnis der subjektiven Beurteilungen zur Lästigkeit92
Tabelle 18:	Multiple Regressionsanalyse anhand $L_{Amax}/2$ kHz Oktavpegel/Schwankungsstärke95
Tabelle 19:	Transportkapazitäten SGV 2015.....102
Tabelle 20:	Ausgewählte Unternehmen im SGV für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung102
Tabelle 21:	Transportkapazitäten im Personennahverkehr 2015.....103

Tabelle 22:	Ausgewählte Unternehmen im SPV für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung	104
Tabelle 23:	Ausgewählte Unternehmen der Infrastruktur für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung	104
Tabelle 24:	Übersicht der Unternehmen, die an der Befragung teilnahmen	105
Tabelle 25:	Bandbreite der Abschätzungen zu Lebensdauer, Anschaffungs- und Betriebskosten	122
Tabelle 26:	Bandbreite der Abschätzungen zu den prozentualen Anteilen der Instandhaltungskosten	122
Tabelle 27:	Kostenabschätzung der Instandhaltung an Güterwagen verursacht durch Flachstellen	123
Tabelle 28:	Kostenabschätzung der Instandhaltung an Triebfahrzeugen verursacht durch Flachstellen	123
Tabelle 29:	Kostenabschätzung Anschaffung, Betrieb und Instandhaltungskosten	124
Tabelle 30:	Detektion der im Messzeitraum vorbeifahrenden Wagen mit einem Flachstellenindikator > 5	128
Tabelle 31:	Fehlerklassen entsprechend dem AVV, Anhang 2	135
Tabelle 32:	Beispielhafter Antwortverlauf der Versuchsperson	143
Tabelle 33:	Auszug aus der TSI Noise, Abschnitt 4.2.3 Grenzwerte für das Vorbeifahrtgeräusch	149
Tabelle 34:	Unterschiede zwischen $L_{A_{fmax}}$ und $L_{A_{eq}}$ für die einzelnen Wagen	151
Tabelle 35:	Übersicht aller Signale mit dem nach Müller-BBM Rail Technologies gemessenen Flachstellenindikator	180

Abkürzungsverzeichnis

a	Schienenbeschleunigung
α	Signifikanzniveau
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AVV	Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
COTIF	Convention relative aux transports internationaux ferroviaires (Übereinkommen über die internationale Beförderung auf der Schiene)
d	Rad Durchmesser
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DS-Wert	Dynamischer Schwankungs-Wert
DTZ	Dieseltriebzug
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EN	Europäische Norm
ERegG	Eisenbahnregulierungsgesetz
ETZ	Elektrotriebzug
EU	Europäische Union
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
F	psychoakustische Schwankungsstärke
FBOA	Festbrems-Ortungs-Anlage
FL	Flachstelle
FLI	Flachstelleninduzierter Kostenfaktor Infrastruktur
GG	Grundgesetz
GG-Sohle	Grauguss-Sohle
GZ	Güterzug
HF	Hochfrequenz
HOA	Heißläufer-Ortungs-Anlage
IEC	International Electrotechnical Commission (International elektrotechnische Kommission)
IHK_{FL SGV Tr}	jährliche Instandhaltungskosten für einen Triebwagen des SGV
IHK_{FL SGV Gw}	jährliche Instandhaltungskosten für einen Güterwagen des SGV
IHK_{FL SPV Tr}	jährliche Instandhaltungskosten für einen Triebwagen des SPV
IHK_{Radsatz}	Instandhaltungskosten für eine Radsatzaufbereitung
K_{FL} (gesamt)	gesamte durch Flachstellen verursachte Instandhaltungskosten
K_{FL} (Infra)	an der Infrastruktur durch Flachstellen verursachte Instandhaltungskosten
K_{FL} (Fzg)	am Fahrzeug durch Flachstellen verursachte Instandhaltungskosten
K_{FL} (Fzg, bisher)	bisherige recherchierte jährliche Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen

K_{FL} (Fzg, neu)	neu anfallende Kosten, sofern eine Flachstelle akustisch detektiert wurde
K-Sohle	Komposit-Sohle
l	Länge einer Flachstelle
L_a (t)	Momentaner (Schienen-) Beschleunigungspegel
L_{Aeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel
L_{Afmax}	A-bewerteter Maximalpegel
L_{AF} (t)	A-bewerteter momentaner Schalldruckpegel (Zeitkonstante fast)
L_{eq Tp}	äquivalenter Dauerschallpegel für die Vorbeifahrtzeit T _p
L_{eq Tp korr}	korrigierter äquivalenter Dauerschallpegel für die Vorbeifahrtzeit T _p
L_{2kHz oct}	2-kHz- Oktavband-Pegel
LASCA	Lasergestützte Radkraftdiagnose zur Ermittlung von Rad-Schiene-Kräften und Bewertung von Laufflächenschäden unter Betriebsbedingungen (Innotec)
LEA	Landeseisenbahnaufsicht
LCC	Life-Cycle-Costs (Lebenszykluskosten)
LL-Sohle	Low noise, low friction -Sohle
ΔL	Pegelunterschied
ΔL_{Amax}	Unterschied im A-bewerteten Maximalpegel
MONI	System für das Monitoring des Schienenverkehrs, des Lärms sowie der Luft- und Körperschalldetektion unter Betriebsbedingungen (Innotec)
N	psychoakustische Lautheit
N_{FLÜ}	Anzahl der Flachstellenüberfahrten
N_{SGV Tr}	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Triebwagen des SGV, extrapoliert auf 1 Jahr
N_{SGV Gw}	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Güterwagen des SGV, extrapoliert auf 1 Jahr
N_{SPV Tr}	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Triebwagen des SPV, extrapoliert auf 1 Jahr
OOR	Out of roundness
PZ	Personenzug
p	Prozentsatz an standardmäßig in Bezug auf Flachstellen instandgehaltene Wagen
q	Prozentsatz an aufgrund des akustischen Flachstellenkriteriums instandgehaltene Fahrzeuge
Q_{stat}	Statische Last
Q_{dyn}	Dynamische Last
r	Radius
R	psychoakustische Rauigkeit
R	Korrelationskoeffizient
R²	Bestimmtheitsmaß
RL	Richtlinie
RLOA	Rundlauf-Ortungs-Anlage
Δr	Abweichung von der idealisierten Rundheit eines Rades

S	psychoakustische Schärfe
SGV	Schienengüterverkehr
SPV	Schienenpersonenverkehr
SGV	Schienengüterverkehr
TEL	Vorbeifahrexpositionspegel (Transit exposure level)
T_p	geometrische Vorbeifahrtzeit am Mikrofonmessquerschnitt
TSI Noise	Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeug – Lärm“
TWINS	Track Wheel Interaction Noise Software
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VO	Verordnung
V-Sohlenschwellwert	Schwellwert zur Identifizierung von Verbundstoffklotzbremsen
V-Sohle	Verbundstoffbremssohle
VPI	Verband der Güterwagenhalter in Deutschland
WTMS	Wayside Train Monitoring Systems (Wegzugüberwachungssysteme)
WMS	Wheel Monitoring System

Zusammenfassung

Unter dem Hashtag **#Leise Schiene** hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur zusammen mit der Deutschen Bahn AG beschlossen, bis 2030 die Zahl der von Lärm betroffenen Personen zu halbieren. Eine der Maßnahmen hierbei ist das Umrüsten auf lärmgeminderte Bremsen. Aufgrund der durch diese Maßnahme leiseren Güterzüge können jedoch andere Störgeräusche deutlicher in den Vordergrund treten, so beispielsweise auch das als sehr störend empfundene Geräusch von abgeflachten Stellen am Rad, den Flachstellen. Aktuell erfolgt die Instandhaltung von Flachstellen planmäßig bei Erreichen eines geometrischen Grenzwerts der abgeflachten Stelle oder außerplanmäßig bei vom Triebführer wahrgenommenen Vibrationen oder Geräuschentwicklungen. Die durch Flachstellen verursachte Geräuschentwicklung wird jedoch für den Instandhaltungsprozess nicht in Betracht gezogen. Ziel des hier vorliegenden Forschungsvorhabens war es, ein akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen zu ermitteln. Letztendlich sollen damit dann akustisch auffällige Flachstellen vom deutschen Schienennetz verbannt werden. Durch die dadurch möglicherweise frühere Instandhaltung des Rollmaterials – so die Hypothese – könnte zudem die Schieneninfrastruktur und das Rollmaterial geschont und somit Kosten für die Instandhaltung für die betreffenden Schienenverkehrsakteure reduziert werden.

Einführend erfolgte eine Recherche zu der durch Flachstellen verursachten Lärmbelastung (Kapitel 4) und veröffentlichten Detektionsverfahren für Flachstellen (Kapitel 5). Eine Messreihe an einer Bahnstrecke (Kapitel 6) lieferte die Datenbasis für eine ausführliche Untersuchung mit dem Ziel einer gehörgerechten Detektion und Bewertung von Flachstellen (Kapitel 7). Des Weiteren wurden auf Basis einer Befragung von Akteuren im Bereich Schienengüterverkehr, Schienenpersonenverkehr und Eisenbahninfrastruktur die durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten ermittelt. Auf Basis der Befragungsergebnisse wurde die potentielle Kostenersparnis bei einer früheren Behebung der Flachstellen abgeschätzt (Kapitel 9). In einem letzten Aspekt wurde die Berücksichtigung des akustischen Flachstellenkriteriums im rechtlichen Rahmen bewertet (Kapitel 10). Abschließend wird der resultierende Vorschlag für ein **„akustisches Instandhaltungskriterium von Flachstellen“** als Handreichung für den Leser zusammengefasst (Kapitel 11).

Grundsätzlich gehört der **Radformfehler Flachstelle** zur Gruppe der sogenannten „singulären Fehler“ und entsteht durch Materialabtragung beim Gleiten des Rades auf der Schiene. Beim Abrollen des Rades kommt es durch das impulshaltige Schlagen der flachen Lauffläche auf den Schienenkopf zu dem charakteristischen störenden periodischen Klopfgeräusch. (Kapitel 2)

Die Bewertung von Flachstellen erfolgt im Schienengüterverkehr vornehmlich nach dem **Allgemeinen Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV)**. Hierin werden Flachstellen für Raddurchmesser über 840 mm mit einer geometrischen Länge von mehr als 60 mm als Hauptfehler mit der notwendigen Maßnahme „Aussetzen“ definiert. Dieser Wert findet sich ebenfalls in der normativen **Regelung DIN EN 15313:2016-09 „Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung“**. (Kapitel 3)

Als Grundlage für die Erarbeitung des hier zu ermittelnden akustischen Flachstellenkriteriums wurden zunächst **Messungen** an einer stark befahrenen Strecke durchgeführt. Die Datenbasis umfasste im Messzeitraum von einem Monat insgesamt ca. 3.000 Zugvorbeifahrten, davon 1130 Güterzüge und 1825 Personenzüge. Bei den Messungen wurden die Schalldrucksignale im Abstand von 7,5 m und 25 m aufgezeichnet. Das Wheel Monitoring System (WMS) von Müller-BBM Rail Technologies erfasste darüber hinaus den von Müller-BBM Rail Technologies entwickelten Flachstellenindikator. Die Flachstellendetektion des WMS basiert auf der Erkennung der Impulsanregung verursacht durch den Schlag zwischen Schiene und Rad.

Entsprechend dieses Flachstellenindikators besaßen 79 % der im Messzeitraum vorbeifahrenden Güterzüge (888 von 1130) und 23 % der Personenzüge (428 von 1825) eine Flachstelle mit einem Indikator ≥ 5 . Weiterhin wurde für die weiteren Analysen das Beschleunigungssignal an der Schiene erfasst. (Kapitel 6)

Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte „Akustische Instandhaltungskriterium“ beruht auf einem 3-stufigen Ansatz. In einer **ersten Stufe** steht hierbei die **Detektion der Flachstelle** bei Vorbeifahrt. (Kapitel 7.2)

Abbildung 1: Stufe 1 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Zur Erarbeitung dieser ersten Stufe waren zunächst die relevanten Analysegrößen für eine **gehörgerechte Flachstellendetektion** zu extrahieren. Hierfür wurden für eine repräsentative Auswahl von 14 Zugvorbeifahrten mit hörbarer Flachstelle und 14 Zugvorbeifahrten ohne hörbare Flachstelle verschiedene klassische akustische und auch psychoakustische Analysegrößen statistisch ausgewertet.

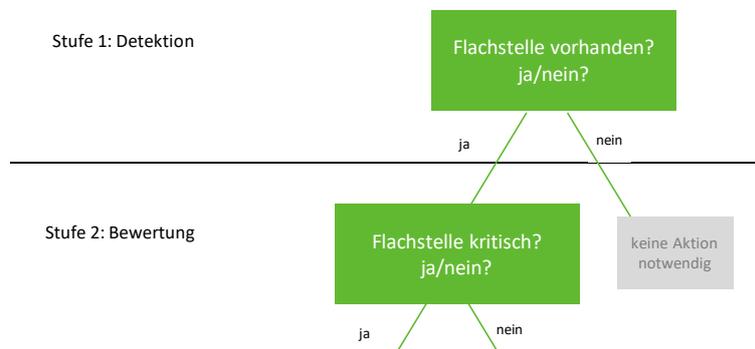
Die Analysegrößen mit den statistisch signifikantesten Unterschieden zwischen diesen beiden Stichproben - und somit geeignet für eine Flachstellendetektion - waren die Maximalwerte der psychoakustischen Schwankungsstärke F_{\max} , der psychoakustischen Lautheit N_{\max} , des 2kHz-Oktavpegels $L_{2\text{kHzoct}}$, der psychoakustischen Schärfe S_{\max} und des A-bewerteten Pegels $L_{AF\max}$. Basierend auf den Maxima dieser Analysegrößen wurde in Kombination mit den Maxima der Schienenbeschleunigung a_{\max} eine logische Verknüpfung zur Detektion einer Flachstelle erarbeitet. Im Rahmen der Modellierung mit insgesamt 21 Signalen wurde die Güte der Detektion überprüft, indem der Prozentsatz der richtig und falsch detektierten Flachstellen ermittelt wurde. Werden bei der Detektion die vier Analysegrößen $L_{AF\max}$, a_{\max} , $L_{2\text{kHz-oct max}}$ und F_{\max} berücksichtigt, so resultiert ein Prozentsatz von 97 % für die korrekte Detektion von hörbarer Flachstelle. Fließen lediglich die beiden Größen $L_{AF\max}$, a_{\max} in die Detektion ein, so resultiert ein Prozentsatz von 85 %. Bei einer Überprüfung des Ansatzes mit 50 „neuen“ Signalen, die nicht bei der Modellierung verwendet wurden, resultierte ein Prozentsatz von 72 %.

Tabelle 1: Prozentsatzes der detektierten Flachstellen bei Modellierung und Überprüfung des Ansatzes

Datenbasis	berücksichtigte Größen	hörbare Flachstelle		nicht hörbarer Flachstelle	
		detektiert	nicht detektiert	detektiert	nicht detektiert
Modellierung (21 Signale)	$L_{Amax} a_{max} L_{2kHz-oct max} F_{max}$	97 %	3 %	17 %	83 %
	$L_{Amax} a_{max}$	85 %	15 %	6 %	94 %
Überprüfung (50 Signale)	$L_{Amax} a_{max}$	72 %	28 %	26 %	74 %

In dieser ersten Stufe erfolgt also die Detektion von Flachstellen. In der **zweiten Stufe** wird die Flachstelle dann **bewertet**, mit dem Ziel akustisch auffällige Flachstellen zu ermitteln. Diese werden im Folgenden als „kritische Flachstellen eingestuft und bezeichnet. (Kapitel 7.3)

Abbildung 2: Stufe 1 und 2 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“



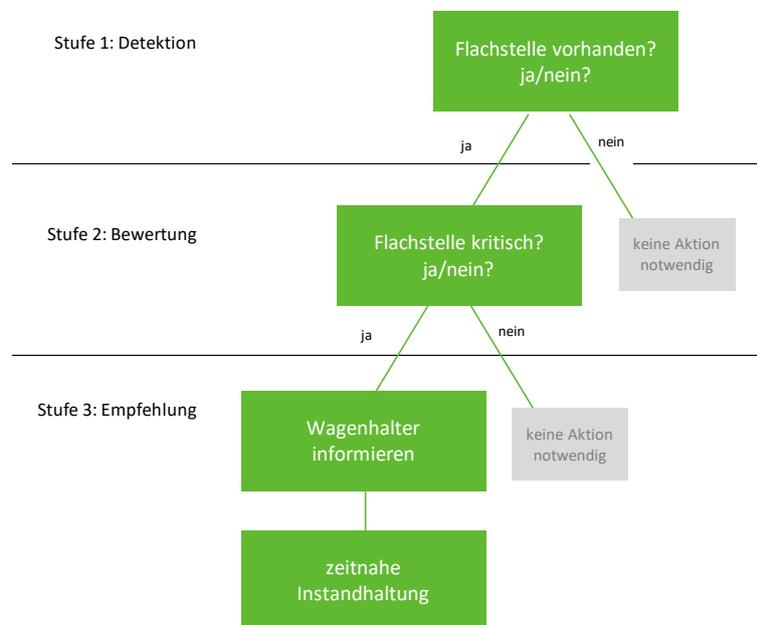
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Hierfür wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Hörversuche zur Lästigkeit und Akzeptanz unterschiedlicher Flachstellensignale durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der von den Probanden bewerteten Lästigkeit der Flachstelle mit verschiedenen Analysegrößen gab Auskunft darüber, welche der Analysegrößen die tatsächliche Lästigkeit am besten abbilden kann. Während der Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies nur eine sehr geringe Korrelation mit der Lästigkeit aufwies, fand sich die höchste Korrelation für die maximale Lautheit und den A-bewerteten Maximalpegel. Der Prozentsatz der Akzeptanz unterschiedlicher Flachstellensignale wurde dem A-bewerteten Maximalpegel der jeweiligen Flachstelle gegenübergestellt. So konnte durch Festlegen einer Akzeptanzgrenze ein Grenzwert hinsichtlich des A-bewerteten Maximalpegels vorgeschlagen werden. Für eine Akzeptanzgrenze von beispielsweise 50 % resultierte hierfür ein A-bewerteter Maximalpegel von 85 dB(A).

Die aktuell gültige rechtliche Regelung sowohl für Neuzulassungen als auch für die Umrüstung von Bestandswagen zur Bestimmung eines Grenzwertes für das Vorbeifahrtgeräusch ist die TSI Noise (Technische Spezifikation für die Interoperabilität – Lärm). Deshalb soll der hier erarbeitete Grenzwertvorschlag in Anlehnung an diese Regelung formuliert werden. Da hierin jedoch alle Grenzwerte als Mittelungspegel angegeben sind, erfolgte im Folgenden eine Abschätzung hinsichtlich des einzuhaltenden Grenzwerts für das akustische Instandhaltungskriteriums von Flachstellen als Mittelungspegel. Aus wissenschaftlicher Sicht wäre jedoch zur besseren Abbildung der Eigenschaften einer Flachstelle ein Grenzwert als Maximalpegel längerfristig wünschenswert. (Kapitel 10.2)

Bei Überschreiten dieses Grenzwerts für das akustische Instandhaltungskriteriums von Flachstellen wird dann in der **dritten Stufe** die Empfehlung zur **notwendigen Instandhaltung** ausgesprochen. Um Möglichkeiten einer rechtlichen Umsetzung dieser Empfehlung darzustellen, erfolgte diesbezüglich eine rechtliche Bewertung. (Kapitel 10.3)

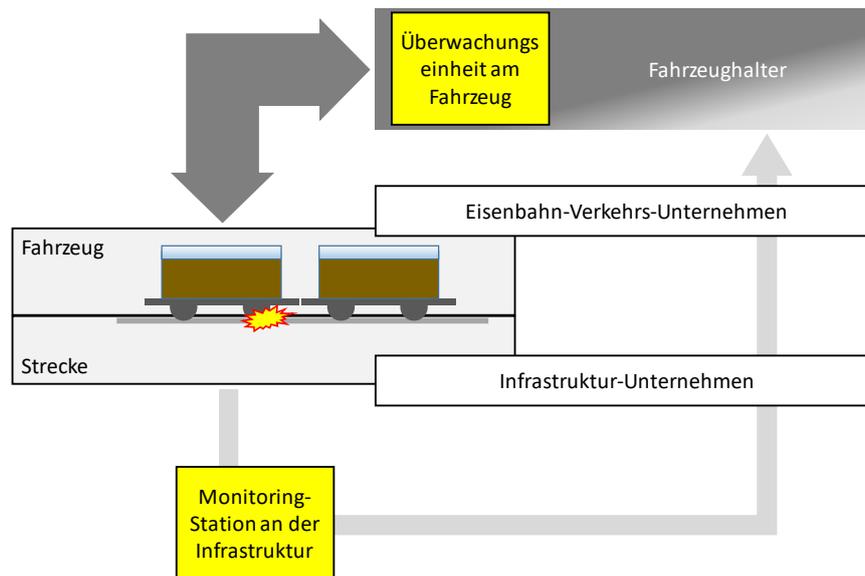
Abbildung 3: Stufe 1, 2 und 3 des vorgeschlagenen „Akustischen Instandhaltungskriteriums“



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Für eine **betriebliche Umsetzung des „akustischen Instandhaltungskriteriums“** wurde zunächst das Szenario eines Monitorings an der Infrastruktur beschrieben. Als Erweiterung hierzu wurde das Szenario einer fahrzeugseitigen Überwachungseinheit zur Flachstellendetektion diskutiert. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Messsystem mit Auswertung der Größen Schalldruckpegel und Schienenbeschleunigungspegel ist zunächst für ein Monitoring-Szenario an der Infrastruktur prädestiniert, wengleich die Erweiterung auf ein fahrzeugseitiges Szenario den Vorteil einer schnelleren Behebung von Flachstellen in Aussicht stellt. Hierzu wäre jedoch noch weitere Forschungsarbeit zur gesicherten fahrzeugseitigen Flachstellendetektion nötig. (Kapitel 9.4)

Abbildung 4: Szenario zur betrieblichen Umsetzbarkeit des „Akustischen Instandhaltungskriteriums“



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Ein weiterer wesentlicher Baustein des Forschungsvorhabens war die **Befragung von Akteuren** aus den Bereichen Schienengüterverkehr, Schienenpersonenverkehr und der Eisenbahninfrastruktur hinsichtlich **anfallender Kosten durch Flachstellen**. (Kapitel 9.1 bis 9.3)

Nach telefonischer Recherche von Kontaktpersonen in den passenden Betrieben und der Verteilung von Fragebögen nahmen aus dem Schienengüterverkehr Unternehmen mit einem Marktanteil von ca. 64 %, aus dem Schienenpersonenverkehr mit einem Marktanteil von ca. 15 % und dem Bereich Eisenbahninfrastruktur mit einem Marktanteil von über 80 % an der Befragung teil.

Für das Rollmaterial konnten jährliche Instandhaltungskosten je Wagen aufgrund von Flachstellen von ca. 500 € für Güterwagen, ca. 2.300 € für Triebwagen des Schienengüterverkehrs bzw. von ca. 1.600 € für Triebwagen des Schienenpersonenverkehrs recherchiert werden. Im Bereich der **Eisenbahninfrastruktur** konnten jedoch von den an der Befragung teilnehmenden Unternehmen **keine Angaben zu durch Flachstellen verursachte Instandhaltungskosten** gemacht werden. Wenngleich angenommen wird, dass die Belastung der Infrastruktur durch die Anzahl der Überfahrten durch einen Wagen mit Flachstellen in direktem Zusammenhang steht, erfolgt dennoch keine separate Erfassung von Folgeschäden durch Flachstellen. Darüber hinaus existieren keine validierten Schädigungsmodelle, welche die Schädigung der Infrastruktur durch Räder bzw. Flachstellen beschreiben können. Dies wäre ein wichtiger Meilenstein für die Bewertung des tatsächlich möglichen Kosteneinsparungspotentials durch eine frühere Behebung von Flachstellen.

Für die Modellierung der durch Flachstellen verursachten Gesamtkosten K_{FL} (gesamt) wurde zunächst die Summe aus den an Infrastruktur K_{FL} (Infra) und Fahrzeug K_{FL} (Fzg) anfallenden Kosten angesetzt.

$$K_{FL}(\text{gesamt}) = K_{FL}(\text{Infra}) + K_{FL}(\text{Fzg})$$

Da keine Informationen zu den an der Infrastruktur verursachten Kosten vorlagen, wurden die an der Infrastruktur anfallenden Kosten durch eine Variable, multipliziert mit der Anzahl an Flachstellenüberfahrten, gebildet. Zur Abbildung der an den Fahrzeugen anfallenden Kosten wurden die in den Befragungen recherchierten bisherigen Instandhaltungskosten und die nach dem neuen Instandhaltungskriterium anfallende Kosten berücksichtigt. Durch eine schrittweise Reduzierung des Wagenanteils mit Flachstellen wurde auf Basis dieser Zusammenhänge die Kostenverteilung skizziert.

Schließlich wurden mögliche **Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen im Schienenverkehr** betrachtet. Hierbei werden die Möglichkeiten einer Strafzahlung bei Vorhandensein einer Flachstelle oder ein Anreizsystem durch Belohnung diskutiert. Die Finanzierung eines solchen Anreizsystems wäre über eingesparte Kosten an der Infrastruktur denkbar, ist jedoch aufgrund der fehlenden Daten zu den Instandhaltungskosten an der Infrastruktur aufgrund von Flachstellen aktuell nicht abschätzbar. Alternativ wird ein mögliches Anreizsystem vergleichbar zum Bonusprogramm der Umrüstung auf lärmgeminderte Bremsen vorgeschlagen. (Kapitel 10.4)

Summary

Under the hashtag # **Quiet Rail**, the Federal Ministry of Transport and digital Infrastructure together with Deutsche Bahn AG decided to reduce the number of noise affected persons by 50 %. To reach this target one of the measures is to convert the conventional cast iron brakes to noise reduced brakes. However, due to the thus quieter freight trains other annoying noises come more clearly to the fore, such as the annoying noise of flattened spots on the wheel. Currently, the maintenance of flat spots is carried out on schedule when reaching a geometrical limit value or unscheduled as soon as vibrations or a noise level is perceived by the train driver. However, the noise caused by flat spots is not taken into account for the maintenance process. So, the aim of this research project was to determine an acoustic maintenance criterion for flat spots to in the end banish all acoustically critical flat spots from the German train infrastructure. The possibly earlier maintenance of the rolling stock could also protect the railway infrastructure and the trains themselves and thus reduce maintenance costs for all involved railway stakeholders.

Introducing to this topic a literature research was done regarding the noise exposure caused by flat spots (chapter 4) and published detection procedures for flat spots (chapter 5). A measurement campaign on a railway track (chapter 6) provided the database for a detailed investigation for a detection and evaluation in a manner that corresponds to our hearing sensation of flat spots (chapter 7). Furthermore, the maintenance costs caused by flat spots were appraised based on a survey of stakeholders in the field of rail freight transport, rail passenger transport and rail infrastructure. On the basis of the survey results, the potential cost savings due to a maintenance taking place earlier were estimated (chapter 9). Finally, the proposed acoustic maintenance criterion for flat spots was considered within the legal framework (chapter 10). In conclusion, the “acoustic maintenance criterion for flat spots” is summarized in a practical guidance for the reader (chapter 11).

Basically, **wheel flats** belong to the group of “single defects” and is caused by material loss when sliding on the rail. While rolling, the impulsive beat of the flat spot on the rail causes a characteristic annoying periodic knocking noise (chapter 2).

The evaluation of wheel flats follows mainly the “**General Contract for the use of Railway Freight**” (“Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen”). There wheel flats with a geometrical length of more than 60 mm (for wheel diameters above 840 mm) are defined as main defect and the respective wagons are to be suspended. The same value of 60 mm can be found also in the normative regulation **DIN EN 15313:2016-09** (Railway applications - In-service wheelset operation requirements - In-service and off-vehicle wheelset maintenance) (chapter 3).

To perform further analysis and investigations within the framework of this research project a **measurement campaign** was conducted. During the measurement period of one month about 3.000 train passes, in particular 1.130 freight trains and 1.825 passenger trains, were measured. The sound pressure signal was recorded at the distance of 7.5 m and 25 m. Furthermore, the Wheel Monitoring System (WMS) of Müller-BBM Rail Technologies gathered the flat indicator developed by Müller-BBM Rail Technologies. The flat spot detection of the WMS is based on the detection of the impulse excitation caused by the impact between the wheel and the rail. According to this flat indicator 79 % of the passing freight trains (888 of 1.130) and 23 % of the passing passenger trains (428 of 1.825) showed a value of ≥ 5 . Additionally, the acceleration signal on the rail was recorded for further analysis (chapter 6).

The „*acoustic maintenance criterion*“ developed in this research project is based on a 3-stage approach. The *first step* covers the *detection of a flat spot* during train passing (chapter 7.2).

Figure 5: Step 1 of the proposed “acoustic maintenance criterion”



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

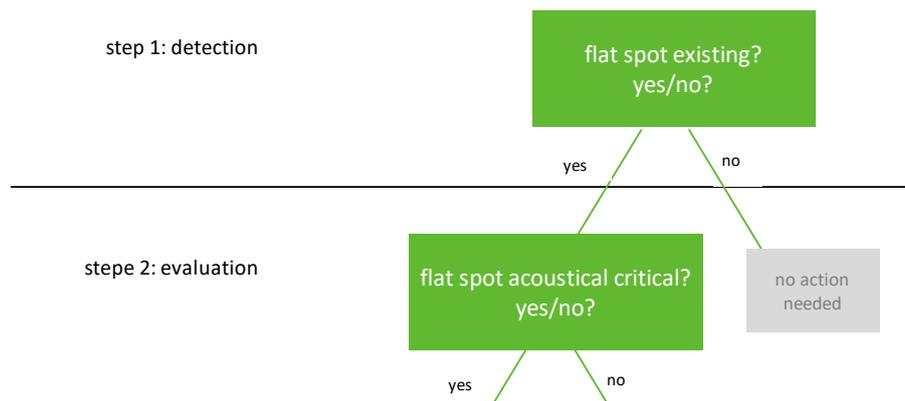
In order to develop this first stage, the relevant analysis quantities for a detection in a manner that corresponds to our hearing sensation had to be extracted. For this purpose, various classical acoustic and psychoacoustic analysis quantities were statistically evaluated for a representative sample of 14 trains passing by with an audible flat spot and 14 trains passing by without an audible flat spot. The quantities with the statistically most significant differences between these two samples – and thus suitable for the flat spot detection – were the maximum values of the psychoacoustic fluctuation strength F_{max} , the psychoacoustic loudness N_{max} , the 2kHz-octave-band level $L_{2kHzoct}$, the psychoacoustic sharpness S_{max} and the A-weighted level L_{AFmax} . Based on the maxima of these analysis quantities combined with the maximum value of the rail acceleration a_{max} , a logical combination for the detection of a flat spot was developed. In the context of the modelling with a total of 21 signals, the quality of the detection was evaluated by determining the percentage of correctly and incorrectly detected flat spots. If the four quantities L_{AFmax} , a_{max} , $L_{2kHzoct}$ and F_{max} are taken into account during the detection, a percentage of 97 % for the correct detection of audible flat spots is yielded. If only the two magnitudes L_{AFmax} and a_{max} are taken into account, a percentage of 85 % resulted. A review of the approach containing 50 “new” signals that hadn’t been taken into account in modelling led to a percentage of 72 %.

Table 2: Percentage of detected flats

datenbase	considered magnitudes	audible flat spots		non audible flat spots	
		detected	not detected	detected	not detected
modeling (21 signals)	L_{Amax} a_{max} $L_{2kHz-oct}$ F_{max}	97 %	3 %	17 %	83 %
	L_{Amax} a_{max}	85 %	15 %	6 %	94 %
verification (50 signals)	L_{Amax} a_{max}	72 %	28 %	26 %	74 %

While in this first stage, a flat spot is detected, in the *second stage*, the *flat spot is evaluated* in order to identify the acoustically critical ones (chapter 7.3).

Figure 6: Step 1 and 2 of the proposed “acoustic maintenance criterion”



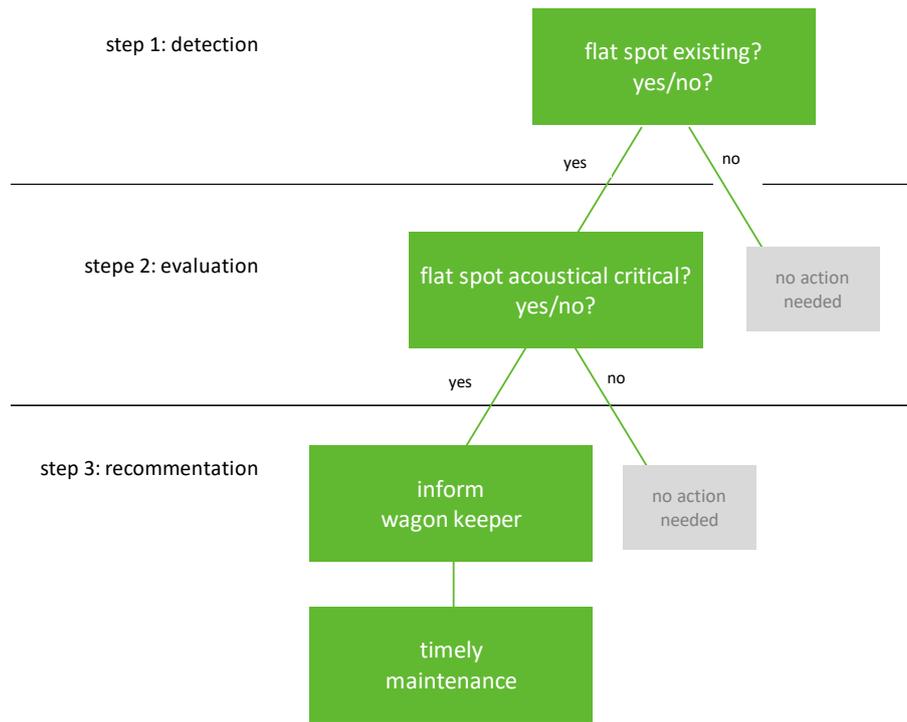
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

For this purpose, listening tests were carried out on the annoyance and acceptance of different flat spot signals. Comparing of the annoyance assessed by the subjects with different analysis quantities provided information about the most representative magnitude to describe the annoyance. While the flat spot indicator developed by Müller-BBM Rail Technologies showed only a very low correlation with the annoyance, the highest correlation resulted for the maximum loudness and the maximum A-weighted level. The percentage of acceptance of different flat spot signals was compared with the A-weighted maximum level to propose a limit value for the A-weighted level by setting a threshold of acceptance. For an acceptance threshold of 50 %, for example, an A-weighted maximum level of 85 dB(A) resulted.

The currently valid legal regulation regarding the limit values of the pass-by noise for both new vehicles and converted vehicles is the TSI Noise (Technical Specification for the Interoperability). Therefore, the proposed limit value developed the present research project should be formulated based on this regulation. However, since all limit values in this regulation are specified as average levels, the limit value for the acoustic maintenance criterion for flat spots was also estimated as an average level. From a scientific point of view, however, to describe the annoyance of the flat spot best, a limit value defined as a maximum level would be desirable (chapter 10.2).

If this limit value for the acoustic maintenance criterion of flat spots is exceeded, in a **third stage** the **necessary maintenance** is then recommended. A legal assessment has been carried out in order to evaluate the possible ways of implementing this recommendation in a legal manner (chapter 10.3).

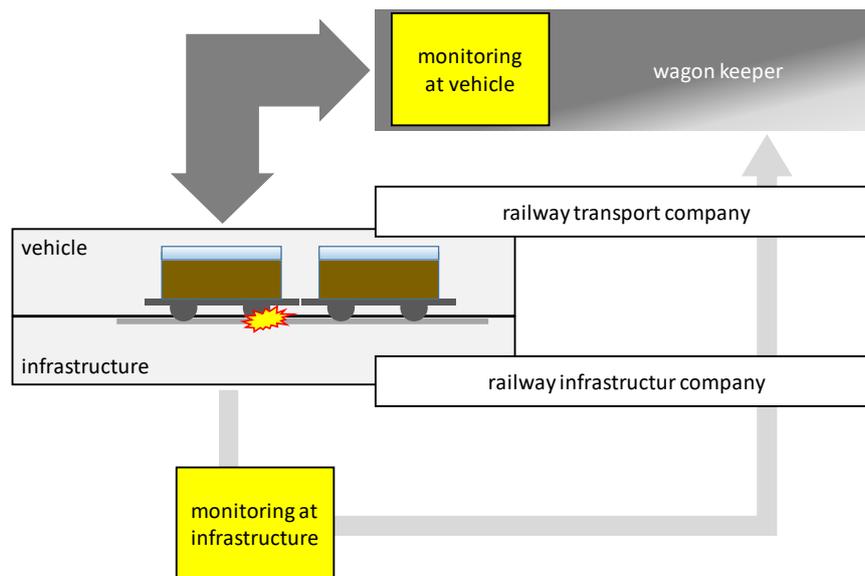
Figure 7: Step 1, 2 and 3 of the proposed “acoustic maintenance criterion”



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

To discuss *operating feasibilities of the "acoustic maintenance criterion"*, first a monitoring scenario at the infrastructure was described. As add-on, a vehicle monitoring scenario for flat spot detection was discussed. Although the proposed measuring system based on the quantities sound pressure level and rail acceleration would be predestined for an infrastructure based monitoring, the vehicle based add-on promises the advantage of a faster elimination of flat spots. For this purpose, however, further research work on a reliable vehicle based flat spot detection would be necessary (chapter 9.4).

Figure 8: Operating feasibilities



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Another essential aspect of the research project was a **survey of stakeholders** in the field of rail freight transport, rail passenger transport and rail infrastructure regarding the **costs caused by flat spots** (chapter 9.1 bis 9.3). First the contact persons were researched in the respective companies by phone. Then, the questionnaires were distributed. Finally companies with a market share of about 64 % from the field of rail freight transport, with a market share of about 15 % from the field of rail passenger transport companies and with a market share of over 80 % from the field of rail infrastructure companies took part in the survey.

For the rolling stock, annual maintenance costs per wagon due to flat spots of around 500 € for freight wagons, around 2.300 € for freight locomotives and around 1.600 € for passenger locomotives could be investigated. In the area of **railway infrastructure**, however, the participating companies could **not provide any information** on the maintenance costs caused by flat spots. Although it is assumed that the strain on the infrastructure is directly related to the number of trains crossing with flat spots, there is no separate acquisition of subsequent damages by flat spots. Moreover, there are no validated damage models that can describe the effect of flat spots on the infrastructure. This would be an important milestone for the evaluation of the possible cost savings due to an earlier maintenance of flat spots.

To model the total costs $K_{FL}(\text{total})$ caused by flat spots, the costs caused by flat spots on the infrastructure $K_{FL}(\text{infra})$ and on the vehicle $K_{FL}(\text{veh})$ were totaled.

$$K_{FL}(\text{total}) = K_{FL}(\text{infra}) + K_{FL}(\text{veh})$$

Since no information was available on the infrastructure costs, these costs were estimated by a variable multiplied by the number of trains crossing with flat spots. To define the costs incurred on the vehicles, the results of the stakeholder survey were integrated and additionally maintenance costs due to the new maintenance criterion were considered. By stepwise reducing the percentage of wagons with flat spots, the cost savings were thus sketched.

Finally, possible ***motivation strategies to reduce the number of flat spots*** were considered. The possibilities of a penalty fee in case of an existing flat spot versus an incentive system in case of no existing flat spot were reflected. The financing of such an incentive system would be possible through savings in infrastructure costs. However, due to the lack of data on infrastructure maintenance costs caused by flat spots currently this information can not be estimated. As an alternative, an incentive system comparable to the bonus program for noise-reduced brakes is proposed (chapter 10.4).

1 Einführung in den Forschungsgegenstand und Motivation

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und die Deutsche Bahn AG haben gemeinsam ein Lärminderungsziel für die nächsten 10 Jahre beschlossen. So soll bis *2030 die Hälfte aller Anwohnenden an Bahnstrecken vom Schienenlärm entlastet* werden (BMVI, 2020). Davor wiederum war das Lärmschutzziel *2020 die Halbierung des Schienenlärms*. Folgende Instrumente wurden hierbei zur Erreichung dieses Ziels herangezogen:

- ▶ Die Umrüstung auf lärmarme Bremstechnik an Güterwagen
- ▶ Lärmabhängige Trassenpreise
- ▶ Lärmschutz an der Infrastruktur im Rahmen des freiwilligen Programms der Lärmsanierung an Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes

Die technische Umsetzung des ersten Punktes, der Umrüstung auf lärmarme Bremssysteme an Güterwagen, erfolgt durch Austausch der bisher eingesetzten „lauten“ Klotzbremsen mit Grauguss-Bremssohlen durch sogenannte LL-Sohlen (Low Noise, Low-Friction). Neue Güterwagen werden werksseitig bereits mit sog. K-Sohlen (Komposit-Bremssohlen) ausgeliefert. Diese reduzieren bei Fahrzeugen, bei denen die Bremssohlen auf die Radfahrfläche wirken, das Rad-Schiene-Geräusch. Im Gegensatz zu den bisherigen Grauguss-Bremssohlen rauhen die Komposit-Bremssohlen aufgrund ihres elastischen Materials die Fahrfläche der Bremssohlen nicht auf.

Vor allem für Güterwagen, bei denen die Bremsklötze meist auf die Radlaufflächen wirken und dadurch die Summe der Rauheiten an den Kontaktflächen Rad/Schiene höher ist als bei Personenwagen, ist ein großer Effekt zu verzeichnen. Personenwagen werden in Deutschland grundsätzlich scheibengebremst.

Die neu verwendeten Bremssohlen rauhen die Radlaufflächen deutlich weniger auf, so dass das Rollgeräusch weniger Emissionen verursacht. Die Pegelminderung durch die neuen Bremssysteme beträgt nach der Rechenvorschrift Schall 03 in Anlage 2 der 16. BImSchV (16. BImSchV, 1990) 5 dB(A) bei 100 km/h auf einem durchschnittlichen Gleis. In der Realität beträgt die Pegelminderung je nach Zustand der Laufflächen und Fahrgeschwindigkeit auf durchschnittlichem Gleis bis zu 7 dB(A). In Verbindung mit einem glatten Gleis oder dem besonders überwachten Gleis haben sich nach eigenen Messungen noch höhere Pegelminderungen von 8 bis 10 dB(A) ergeben.

Werden in einem Zugverband Bremssysteme mit LL-Sohlen oder K-Sohlen und GG-Sohlen kombiniert, so kann es aufgrund der unterschiedlichen Bremskurven (Abhängigkeit der Geschwindigkeit eines bremsenden Zuges vom Bremsweg) vermehrt zu einem Blockieren einzelner Radsätze kommen. Dies kann zu einem Gleiten der Räder auf dem Gleis führen, sofern kein Antiblockiersystem verwendet wird. Da die Räder aus einer weicheren Legierung als die Schiene bestehen, wird das Material der Räder an der Stelle, an der das Rad über die Schiene gleitet, abgenutzt und es entstehen Flachstellen.

Ein Nebeneffekt der Lärmverringerung durch die Umrüstung ist eine größere akustische Auffälligkeit bei Abweichungen des Radsatzes von der ideal runden Form. So können bei einer Verringerung des Abrollgeräuschs generell andere Geräuschquellen, wie zum Beispiel die überwiegend impulshaltigen Geräuschanteile von Flachstellen, in den Vordergrund treten.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll in einem ersten Schritt analysiert werden, welche Pegelerhöhungen in Abhängigkeit von der Flachstellenausprägung zu erwarten sind, bzw.

welche Geräusche bei betroffenen Anwohnern eine relevante zusätzliche Belästigung auslösen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen über die von der Flachstellenausprägung abhängige Akzeptanzschwelle soll betrachtet werden, wie ein darauf basierendes akustisches Instandhaltungskriterium dazu beitragen kann, den Schienenverkehrslärm zu reduzieren und gleichzeitig Kosten beim Unterhalt von Wagenmaterial und Infrastruktur zu senken.

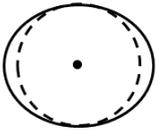
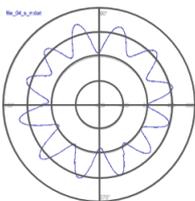
So kann es bei Einhaltung eines akustisch begründeten Flachstellenkriteriums zu eventuell kürzeren Wartungsintervallen kommen und dadurch zu höheren Kosten. Dem gegenüber könnten jedoch auch geringere Kosten für die Wartung an Infrastruktur und Wagen durch eine frühzeitigere Behebung der Schäden stehen, da das Wagenmaterial und die Infrastruktur geschont werden. Durch eine Kostenbetrachtung sollen die jeweiligen Instandhaltungskosten beleuchtet und einander gegenübergestellt werden.

2 Ausformungen von Radformfehlern und Lärmentstehung

Die unterschiedlichen Radformfehler basieren auf unterschiedlichen Entstehungsmechanismen und führen zudem zu unterschiedlichen akustischen Auswirkungen. Im Weiteren werden die Entstehungsmechanismen und die daraus resultierenden akustischen Auswirkungen dargestellt.

Radformfehler können grundsätzlich in zwei Hauptkategorien aufgeteilt werden. Dies sind singuläre Fehler (Abweichungen vom Rundlauf ohne regelmäßige Wiederholung innerhalb einer Radabwicklung) und regelmäßig wiederkehrende Fehler (periodische Abweichung vom Rundlauf innerhalb einer Radabwicklung). Innerhalb dieser Hauptkategorien gibt es weitere Unterscheidungen durch die Ausformung und Entstehung des Laufflächendefekts. Eine Übersicht über die für die Rollgeräusentstehung relevanten Radformfehler ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 3: Kategorisierung von Radformfehlern mit Abbildungen der einzelnen Fehler

Singuläre Fehler		Periodische Fehler	
Flachstellen		Exzentrizität	
Materialauftragungen		Ovalität	
Ausbröckelungen		Polygonisierung	
Abblätterungen			

Singuläre Fehler

Eindrückungen



Periodische Fehler

Quelle: VPI - Verband der Güterwagenhalter e.V. und Netinera Deutschland GmbH und Müller-BBM Rail Technologies

Eine Auflistung von Schäden an Radsätzen enthält Anhang C der DIN EN 15313:2016-09 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung. Die dort enthaltene Aufzählung beinhaltet Schäden an der Radlauffläche, aber auch Schäden am Spurkranz oder der Achswelle, die jedoch keinen relevanten Einfluss auf das Rollgeräusch haben. Die in der DIN aufgeführten Radformfehler sind diejenigen, bei denen ein Einfluss auf das Rollgeräusch unterstellt wird. Diese werden im Folgenden dargestellt.

2.1 Entstehungsmechanismen und Geräuschentwicklung singulärer Radformfehler

Bei der Erarbeitung der vorliegenden Forschungsarbeit hat sich herausgestellt, dass eine akustische Trennung zwischen Laufflächenfehlern und Flachstellen nur schwer möglich ist. Aus diesem Grunde wurde die Forschungsaufgabe nach Rücksprache mit dem Forschungsgeber erweitert und umfasst neben den Flachstellen alle anderen singulären Radformfehler bzw. Laufflächenfehler. In diesem Bericht wurde der Einfachheit halber die Begrifflichkeit „Flachstelle“ für alle Laufflächenfehler genutzt.

2.1.1 Flachstelle

In diesem Kapitel 2.1.1 wird der Begriff Flachstelle im engeren Sinne abweichend von der weiteren Verwendung des Begriffes in dieser Forschungsarbeit verstanden und beschrieben. Definitionsgemäß ist eine Flachstelle eine Abflachung der Lauffläche an einer singulären Stelle des Rades. In den meisten Fällen treten Flachstellen aufgrund des Entstehungsmechanismus an beiden Rädern eines Radsatzes an derselben Stelle auf (siehe hierzu Kapitel 2.2).

Flachstellen entstehen durch das Gleiten des Rades auf der Schiene. Bei den im Eisenbahnbereich üblichen starren Achsen kann bei zu geringer Haftreibung während des Bremsvorgangs der Radsatz blockieren und über die Schiene gleiten. Die Flachstelle entsteht dann an beiden Rädern der Achse gleichermaßen. In Ausnahmefällen entstehen Flachstellen auch einseitig, z.B. beim einseitigen Hemmschuhauflauf in einem Rangierbahnhof.

Bei dem Gleitvorgang wird Material fast ausschließlich vom Rad abgetragen, da am Rad die Kontaktfläche über den gesamten Gleitvorgang dieselbe bleibt, während die Schiene unter dem Rad weggleitet. Zudem besteht das Rad aus einer weicheren Legierung als die Schiene, was der Abnutzung am Rad gegenüber der Schiene förderlich ist. Dieser Gleitvorgang wirkt wie ein Abschleifen der konkaven Kontaktfläche am Rad. Infolge des Gleitvorgangs kommt es zu Reibungshitze. Diese kann zum einen ein Aushärten der Flachstelle verursachen, zum anderen aber auch zusätzlichen Materialtransport an die der Flachstelle benachbarte Stellen der

Lauffläche auslösen. Der Rand der Flachstelle weist kurz nach der Entstehung einen Grat am Rand auf, der durch die mechanische Beanspruchung abgerundet wird.

Die Ausdehnung einer Flachstelle in tangentialer Richtung (Länge einer Flachstelle) wird durch Intensität und Dauer des Gleitvorgangs beeinflusst. Je länger ein Gleitvorgang dauert, desto länger (in tangentialer Richtung) und tiefer ist eine Flachstelle. Die longitudinale Ausdehnung der Flachstelle (Breite einer Flachstelle) wird in erster Linie durch die Breite des Schienenkopfs beschränkt, daher ist die longitudinale Ausdehnung der Flachstelle meist geringer als die Breite der Lauffläche. Dies hat als Nebeneffekt zur Folge, dass die Flachstelle durch den Sinuslauf des Rades (Details hierzu siehe auch Kapitel 2.2.1) nicht bei jeder Radumdrehung im Rad-Schiene-Kontakt wirksam wird und je nach relativer Position zu mehr oder weniger erhöhter Geräuscentwicklung führt.

Die Geräuscentwicklung einer Flachstelle wird beim Abrollen durch das impulshaltige Schlagen der flachen Lauffläche auf den Schienenkopf charakterisiert. Entsprechend wird die Flachstelle als periodisches Klopfen, das das Rollgeräusch überlagert, wahrgenommen. Gleichzeitig entstehen bei den Flachstellen hohe dynamische Kräfte, die den Oberbau bis zum Schienenbruch beeinträchtigen können. Durch die dauernden Schläge kann das Lager des Radsatzes beschädigt werden. Hierdurch kann eine unzulässige Erwärmung des Radsatzlagers (sogenannter Heißläufer) entstehen, was wiederum als betriebsgefährlicher Schaden eingestuft wird.

Abbildung 9: Abbildung einer Flachstelle



Quelle: VPI - Verband der Güterwagenhalter e.V.

2.1.2 Materialauftragung

Materialauftragungen entstehen durch thermische Überbeanspruchung der Räder. Der Materialauftrag entsteht durch Aufschweißungen von Bremssohlen- oder Schienenmaterial. Der Entstehungsmechanismus wird durch Überhitzen von Rädern hervorgerufen, der z.B. durch blockierte Bremschuhe ausgelöst werden kann. Durch die Reibungshitze wird loses Material thermisch auf die Lauffläche aufgetragen. Die Lage der Materialauftragung auf der Lauffläche ist daher zufällig verteilt. Die beiden Räder eines Radsatzes weisen daher auch nicht zwingend dieselben Auftragungen auf.

Die Geräuschentwicklung durch eine Materialauftragung ähnelt der einer Flachstelle und zeichnet sich durch geschwindigkeitsabhängige periodische Klopfgeräusche aus. Die Impulshaltigkeit des Geräuschs infolge von Materialauftragungen ist im Vergleich zur Flachstelle aufgrund des langsamer ansteigenden Übergangs in der Regel geringer ausgeprägt.

Materialauftragungen können im ungünstigsten Fall zum Verkeilen von Bremssohlen und damit zum Blockieren der Räder führen.

Abbildung 10: Materialauftragung auf einem Rad



Quelle: VPI - Verband der Güterwagenhalter e.V.

2.1.3 Ausbröckelungen, Löcher und Ablätterung

Ausbröckelungen oder Löcher auf der Lauffläche sind ein Ergebnis von Materialermüdung. Durch Überbeanspruchung des Rades (z.B. thermische Überbeanspruchung bei langen Gefällestrrecken) entstehen Materialausbrüche, die sich mit der weiteren Laufleistung vergrößern.

Ausbröckelungen sind vermehrt auch im Bereich von nicht behobenen Flachstellen (in der Mitte der Flachstelle) anzutreffen. In diesem Fall wird durch die Hitzeentwicklung bei der Entstehung der Flachstelle das Metall in Martensit umgewandelt. Das umgewandelte Material kann durch die mechanische Beanspruchung ausbröckeln. Das Ergebnis sind Löcher mit einer Tiefe bis zu mehreren Millimetern im Zentrum einer Flachstelle.

Die Anordnung der Ausbröckelungen auf der Radlauffläche ist stochastischer Natur, d.h. die Anordnung ist zufällig und es sind keine periodischen Muster zu erkennen. Durchgehende Ausbröckelungen, wie in Abbildung 11 dargestellt, treten durch langzeitige Überbeanspruchung von Rädern auf und sollten in der Praxis keine Rolle spielen, da diese in der Instandhaltung bereits deutlich früher erkennbar werden.

Tritt die Ausbröckelung in Verbindung mit einer Flachstelle auf, so ist die Geräuschentwicklung auf die Ausbröckelung *und* die Flachstelle zurückzuführen. Akustisch ist diese kombinierte Schadstelle nicht zu trennen.

Abbildung 11: Ausbröckelungen auf der Lauffläche



Quelle: VPI - Verband der Güterwagenhalter e.V.

2.1.4 Eindrückungen auf der Lauffläche

Nach DIN EN 15313 werden weiterhin Eindrückungen auf der Lauffläche als Schadensart von Radsätzen aufgeführt. Hierbei bilden sich auf der Lauffläche unregelmäßig geformte oder linienförmige Vertiefungen.

Abbildung 12: Linienförmige Eindrückungen auf der Lauffläche



Quelle: Netinera Deutschland GmbH

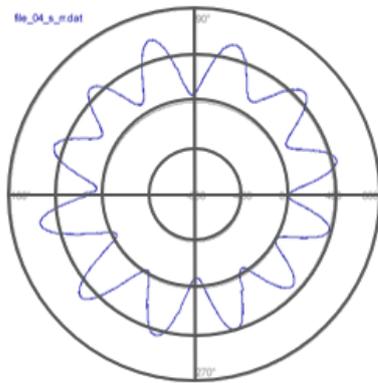
2.2 Entstehungsmechanismen und Geräuschentwicklung periodischer Radformfehler

2.2.1 Exzentrizität, Ovalität, Polygonisierung

Periodische Radformfehler zeichnen sich durch Abweichungen der Radlauf­fläche von der idealen Kreisform aus. Nach DIN EN 15313 wird als periodische Rundlauf­abweichung ein Schaden an der Rundheit in einer gleichmäßigen Form bezeichnet. So wird hier z.B. die Außermittigkeit (Exzentrizität) oder ein Schaden mit einer höheren Periodizität aufgeführt, wie etwa ein wellenförmig un­rundes Rad (Polygonisierung).

Als Polygonisierung versteht man eine wellenförmige Abnutzung des Rad. Die Anzahl der vorhandenen Wellen wird als die Ordnung der Polygonisierung bezeichnet. Abbildung 13 stellt somit ein Rad mit einer Polygonisierung der 12. Ordnung dar.

Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Polygonisierung



Quelle: Müller-BBM Rail Technologies

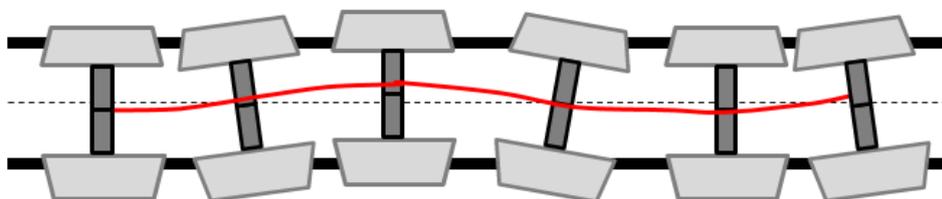
Auch eine Verformung des Radquerschnitts (Ovalisierung) kann in diesem Sinne den periodischen Radformfehlern zugeordnet werden.

Fehlerhafte Muster auf dem Rad, welche nicht berechnet werden können oder zufällig sind, werden als stochastische bzw. unregelmäßige Radlaufabweichungen bezeichnet.

Die Abweichung von der idealisierten Rundheit eines Rads mit dem Radius r wird in der DIN EN 15313 mit der Größe Δr gekennzeichnet.

Diese Radformfehler können zum einen durch periodische Kräfteinwirkungen durch den Sinuslauf des Radsatzes entstehen (siehe Abbildung 14). Der sogenannte Sinuslauf (Kratowille, 2004) tritt bei Rad-Schiene-Systemen mit sich nach außen hin verjüngenden Rädern, die starr miteinander gekoppelt sind, auf. Aufgrund von Massenkräften und der Aufhängung von zwei Radsätzen im Drehgestell sowie durch die Ungenauigkeit der Gleisverlegung entstehen Schlingerbewegungen des Radlaufs, welche als Sinuslauf bezeichnet werden. Zum anderen kann die gleichmäßig auf Schwellen angeordnete Schienenlagerung ursächlich für solche Radformfehler sein.

Abbildung 14: Schematische Darstellung des Sinuslaufs



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Eine Erkennung von periodischen Radformfehlern ist durch Sichtkontrolle nicht möglich.

Die Geräuschentwicklung von periodischen Radformfehlern wird durch die periodischen dynamischen Kräfte, welche beim Überfahren der Schwellen auftreten, beim Abrollen des Rades auf der Schiene charakterisiert. Entsprechend wäre zu erwarten, dass eine Polygonisierung als periodisches An- und Abswellen des Geräuschpegels, das dem Rollgeräusch überlagert ist, wahrgenommen wird. In dem Bericht „Schallemissionen von Laufflächendefekten“ kommen die Autoren Maly, Dinobl und Jaksch (Maly, Jaksch und Dinobl, 2016) jedoch zu dem Ergebnis, dass Polygonisierungen nahezu in keinem Fall eine akustisch wahrnehmbare Auffälligkeit erzeugen.

Durch die dynamischen Kräfte, welche beim Abrollen des unrunder Rades auftreten können, können Schäden am Oberbau und am Radsatzlager entstehen.

2.3 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Ausformung und Lärmentstehung von Flachstellen

Zu **Radformfehlern** zählen neben **Flachstellen** beispielsweise Materialauftragungen, Ausbröckelungen, Abblätterungen, Exzentrizitäten, Ovalitäten oder Polygonisierungen.

Diese können grundsätzlich in

- ▶ singuläre Fehler, die eine Abweichung vom Rundlauf ohne regelmäßige Wiederholung innerhalb einer Radabwicklung darstellen, und
- ▶ periodische Fehler, die im Gegensatz dazu eine periodische Abweichung darstellen,

kategorisiert werden. Flachstellen fallen hierbei unter die **singulären Fehler**.

Flachstellen entstehen durch das Gleiten des Rades auf der Schiene. Beim Gleitvorgang des Rades auf der Schiene wird Material vom Rad abgetragen, da das Rad aus einer weicheren Legierung besteht als die Schiene. Am Rand der Flachstelle befindet sich kurz nach Entstehung ein Grat, der bei weiterem Betrieb abgeflacht wird.

Wenn bei den im Eisenbahnbereich üblichen starren Achsen ein Radsatz blockiert, treten damit normalerweise beidseitig gleichermaßen Flachstellen auf.

Beim Abrollen des Rades mit einer Flachstelle kommt es zu einem **impulshaltigen Schlagen der flachen Lauffläche auf den Schienenkopf**. Dieses periodische Klopfen charakterisiert das typische Geräusch eines vorbeifahrenden Wagens mit Flachstelle.

Auch die Schadfälle Materialauftragung, Ausbröckelung, Abblätterungen oder Eindrückungen der Lauffläche zählen zu den **singulären Fehlern** und können ähnliche Geräuschentwicklungen wie Flachstellen hervorrufen.

Exzentrizitäten, Ovalitäten oder Polygonisierungen gehören zu den **periodischen Fehlern** und zeichnen sich durch Abweichungen der Radlauffläche von der idealen Kreisform aus. In der Veröffentlichung von Maly et al. (Maly, Jaksch und Dinobl, 2016) kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass beispielsweise Polygonisierungen nahezu in keinem Fall eine akustisch wahrnehmbare Auffälligkeit erzeugen.

3 Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen

3.1 Vertragsrechtliche Aspekte

Wenngleich auch Flachstellen an Personenzügen auftreten können, sollen im Folgenden zunächst die vertragsrechtlichen Aspekte beim Güterverkehr betrachtet werden. Der Einsatz von Güterwagen im Streckennetz deutscher und europäischer Eisenbahnen kann durch ein Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) im Auftrag des jeweiligen Wagenhalters erfolgen. Der Wagenhalter überlässt dem EVU den Güterwagen zur Beförderung von Gütern im Streckennetz des Eisenbahninfrastrukturunternehmens (EIU). Die Bedingungen zur Überlassung der Güterwagen werden in einem „**Allgemeinen Vertrag für die Verwendung von Güterwagen**“ geregelt (AVV, 1. Januar 2019). Dieser Vertrag wird innerhalb des Übereinkommens über den internationalen Eisenbahnverkehr (COTIF: Convention relative aux transports internationaux ferroviaires, Übereinkommen zum internationalen Schienenverkehr) verwendet.

In diesem Vertrag werden in Anlage 9 die vorgeschriebenen Kontrollen über den Zustand der übergebenen Wagen geregelt. In dem zur Anlage 9 wiederum gehörigen Anhang 1 ist der verbindlich einzuhaltende Zustand der Güterwagen definiert. Für die darin definierten Mängel sind Maßnahmen und Fehlerklassen definiert, die bei Auftreten eines Fehlers zu beachten sind.

Tabelle 4 zeigt den Ausschnitt aus Anhang 1, welcher unter dem Fehlercode 1.3 die entsprechenden Radformfehler aufführt. Die Unterpunkte 1.3.3 (Flachstellen), 1.3.4 (Materialauftragungen) und 1.3.5 (Löcher, Ausbröckelungen und Ablätterungen an der Lauffläche) beschreiben die Fehler an der Radlauffläche. Die Definition der Fehlerklasse richtet sich hierbei nach der Auswirkung auf die Verkehrstauglichkeit. Die *Fehlerklasse 3* wird demnach als „Nebenfehler“ definiert, bei welchem „mit erheblichen Auswirkungen auf die Verkehrstauglichkeit“ bzw. mit „Auswirkungen auf die Betriebsabwicklung“ zu rechnen ist. Die *Fehlerklasse 4* wird als „Hauptfehler“ beschrieben. Dies sind „Fehler, bei welchen die Verkehrstauglichkeit nicht gewahrt ist oder die zur Betriebsgefährdung führen können, sowie Fehler, die zu Personenschäden führen können“ (AVV S.65). Als Maßnahme wird für Nebenfehler das Ausschalten der Bremse angegeben, für Hauptfehler das „Aussetzen“ des Wagens, d.h. die Weiterbeförderung des Wagens wird unterbrochen, bis der Mangel beseitigt ist.

Eine Betrachtung der Auswirkungen dieser Fehler auf die Geräuschentwicklung findet sich hingegen in der AVV nicht.

Tabelle 4: Übersicht der katalogisierten Fehler zu Flachstellen und Materialauftragung. Fehlerklasse 3 entspricht Nebenfehler, Fehlerklasse 4 entspricht Hauptfehler.

Bauteil	Code	Mängel / Kriterien / Hinweise	Maßnahmen	Fehlerklasse
Radreifen oder entsprechende Teile des Vollrads	1.3.3	Flachstellen		
	1.3.3.1	Rad Durchmesser > 840 mm und Flachstellen mit einer Länge von > 60 mm	Aussetzen	4
	1.3.3.2	Rad Durchmesser: 630 mm < d < 840 mm, Flachstellen mit einer Länge von > 40 mm	Aussetzen	4
	1.3.3.3	Rad Durchmesser < 630 mm und Flachstellen mit einer Länge von > 35 mm	Aussetzen	4

Bauteil	Code	Mängel / Kriterien / Hinweise	Maßnahmen	Fehlerklasse
	1.3.4	Materialauftragung		
	1.3.4.1	Rad Durchmesser > 840 mm, Materialauftragungen mit einer Länge von > 60 mm oder > 1 mm Höhe	Aussetzen	4
	1.3.4.2	Rad Durchmesser > 840 mm, Materialauftragungen mit einer Länge von > 10 mm < 60 mm und < 1 mm Höhe	M + R1 (Bremse ausschalten)	3
	1.3.4.3	Rad Durchmesser: 630 mm < d < 840 mm, Materialauftragung mit einer Länge > 40 mm oder Höhe > 1mm	Aussetzen	4
	1.3.4.4	Rad Durchmesser: 630 mm < d < 840 mm, Materialauftragung mit einer Länge > 10 mm < 40 mm und Höhe < 1mm	M + R1 (Bremse ausschalten)	3
	1.3.4.5	Rad Durchmesser < 630 mm, Materialauftragungen mit einer Länge > 35 oder Höhe > 1mm	Aussetzen	4
	1.3.4.6	Rad Durchmesser < 630 mm, Materialauftragungen mit einer Länge > 10 mm < 35 mm und Höhe < 1mm	M + R1 (Bremse ausschalten)	3
	1.3.5	Löcher, Ausbröckelungen oder Ablätterungen an der Lauffläche		
	1.3.5.1	Rad Durchmesser > 840 mm, Länge von > 60 mm	Aussetzen	4
	1.3.5.2	Rad Durchmesser: 630 mm < d < 840 mm, Länge von > 40 mm	Aussetzen	4
	1.3.5.3	Rad Durchmesser < 630 mm, Länge > 35	Aussetzen	4

Quelle: eigene Darstellung nach Anhang 1 des Allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV, 1. Januar 2019)

3.2 Normative Regelungen

Als Folge des Eisenbahnunfalls von Viareggio im Jahr 2009 wurde 2016 die Europäische Norm EN 15313 überarbeitet und in der deutschen Fassung DIN EN 15313:2016-09 **„Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung“** veröffentlicht. Das Ziel dieser Überarbeitung war die Schaffung gemeinsamer Untersuchungskriterien für Radsatzwellen von Güterwagen, ein System der Rückverfolgbarkeit für Radsätze von Güterwagen und spezifische Instandhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der unterstützten Radsatzlast. Auf dieser Grundlage legt die Norm zur Sicherstellung von Sicherheit und Interoperabilität die Grenzwerte für eingebaute und ausgebaute Radsätze und die durchzuführenden Maßnahmen, für welche besondere Werte im Instandhaltungsplan festzulegen sind, fest. Innerhalb des Instandhaltungsplans wird strukturiert die Zeitplanung der Instandhaltung aufgeführt, sowie welche Aufgaben, Tätigkeiten, Verfahren und Hilfsmittel zur Durchführung notwendig sind.

Die darin definierten Grenzwerte dienen ausschließlich der Sicherheit des Betriebs. Akustische Kriterien beim Betrieb werden nicht erwähnt. Bei den für die Ausdehnung von Flachstellen genannten Grenzwerten handelt es sich um zulässige Höchstwerte für den größten auf der Lauffläche festgestellten Schaden. Werden diese Werte überschritten, sollen die Schäden durch Abdrehen der Räder (Reprofilierung) beseitigt werden. Bei Unterschreitung dieser Werte (sowohl hinsichtlich der Länge der Flachstelle als auch bei mehreren Flachstellen des Rades) erfolgt keine Maßnahme. Jedoch können auch unterhalb der genannten Werte bereits auffällige Geräusche auftreten.

Üblicherweise betragen die Raddurchmesser bei Güterwagen 860 mm, wobei eine Fahrgeschwindigkeit bis zu 100 km/h die Regel ist. Für diese Kombination beträgt der Längengrenzwert D nach Tabelle 7 der DIN EN 15313:2016-09 für den Laufflächenschaden 60 mm.

Dieser Wert entspricht auch demjenigen, welcher im „Allgemeinen Vertrag für die Verwendung von Güterwagen“ bei Überschreiten als Kriterium für das „Aussetzen“ des Wagens angegeben wird (siehe Tabelle 4).

Für Rundlaufabweichungen Δr entsprechend Kapitel 2.2.1 werden im Anhang G der DIN EN 15313:2016-09 lediglich Richtwerte für die Abweichung vom idealen Rundlauf genannt. Diese sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Konkrete Werte sollen laut DIN im Instandhaltungsplan festgelegt werden.

Weiterhin beschreibt die Norm, dass Rundlaufabweichungen „bei mittlerer und schwerer Instandhaltung festgestellt werden“ können. Hier wird als zulässige Abweichung vom Radius des Rads Δr bei den üblichen Radgrößen (Durchmesser des Rads > 840 mm) und Fahrgeschwindigkeiten (zwischen 60 und 160 km/h) der Wert 1 mm angegeben. Dieser Wert entspricht auch der maximalen Höhe von Materialauftragungen entsprechend dem Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (vergleiche Tabelle 4).

Tabelle 5: Zulässige Rundlaufabweichungen für übliche Raddurchmesser und Geschwindigkeiten von Güterwagen

Durchmesser des Rades $d > 840$ mm	Zulässige Rundlaufabweichung (Δr) in mm
Geschwindigkeit $v_{\max} < 60$ km/h	1,5
Geschwindigkeit $60 < v_{\max} < 160$ km/h	1,0

Quelle: eigene Darstellung; Auszug aus Tabelle G1 DIN EN 15313:2016-09

Im Weiteren regelt die Norm unter Abschnitt 6.5 die zur Erkennung von Schäden erforderlichen Prüfungen und Inspektionen. Hierin wird zunächst erläutert, dass die Verfahren zur Feststellung der Beschädigung sofern nicht anders angegeben manuell, visuell oder automatisch (beispielsweise durch eine im Gleis eingebaute Detektionsanlage) erfolgen sollen. Im Weiteren werden verschiedene Beschädigungen und deren mögliche Feststellungsverfahren beschrieben. So werden für die Beschädigung „Überwalzung“ als mögliche Feststellungsverfahren die Sichtprüfung mit dem bloßen Auge, die Erkennung mit einer Detektionsanlage im Gleis und die Messung der Überwalzung aufgezählt. Bei der Feststellung von Beschädigungen auf der Lauffläche wird hingegen zusätzlich zur Sichtprüfung, der Erkennung mittels Detektionsanlage und der Messung der Rundheit die „Erkennung mit dem Ohr“ angeführt. Somit wird hier für Schäden an der Lauffläche eine akustische Detektion als Feststellungsverfahren beschrieben.

Unter Abschnitt 7 der DIN EN 15313:2016-09 wird die Instandhaltung von eingebauten Radsätzen geregelt. Entsprechend Abschnitt 7.1 dieser Norm soll der Instandhaltungsplan folgende Angaben beinhalten:

- a) die jeweiligen Intervalle und Kriterien für maßgebliche Kontrollen;
- b) die Intervalle und Kriterien für zerstörungsfreie Prüfungen;
- c) die Intervalle und Kriterien für die verbindlichen betrieblichen Instandhaltungsmaßnahmen
- d) die Intervalle und Kriterien für Fahrzeuge, die nicht der Richtlinie 2008/57/EG unterliegen“ [DIN EN 15313:2016-09, S.44]

Abschnitt 9 der Norm beschreibt weiterhin Maßnahmen, die an einem Radsatz nach einem Schaden verursachenden Vorfall während des Betriebs durchgeführt werden müssen oder nicht im Instandhaltungsplan enthalten sind. Hier ist wiederum unter Abschnitt 9.3 die Erkennung von Rundlaufabweichungen mittels ortsfester Anlage im Gleis folgendermaßen aufgeführt. „Wird auf der Strecke am Radsatz dieser Schaden festgestellt und ist die Abweichung größer als der zulässige [...] Wert, dann muss der Radsatz innerhalb kürzester Zeit von einem technischen Sachverständigen untersucht werden, [...]“ (DIN EN 15313:2016-09, 2016).

3.3 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zu Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen

Zur Bewertung von Rädern hinsichtlich Flachstelle stehen im Schienengüterverkehr vornehmlich die Inhalte des

- ▶ Allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV) im Mittelpunkt.

Des Weiteren steht als normative Regelung die

- ▶ DIN EN 15313:2016-09 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung

zur Verfügung.

Beide Dokumente kategorisieren Flachstellen bezüglich geometrischer Abweichungen vom Rad. So werden entsprechend des AVV (Anhang 1) Flachstellen mit einer Länge von mehr als 60mm (bei Raddurchmessern über 840 mm) als Hauptfehler mit der notwendigen Maßnahme „Aussetzen“ bewertet.

Übereinstimmend hierzu findet sich in der DIN EN 15313 (Tabelle 7) für Raddurchmesser von 840 mm eine Längengrenzwert für Flachstellen von 60 mm.

4 Abschätzung der verursachten Lärmbelastung

Die Datengrundlage für eine Abschätzung der akustischen Auswirkungen von Flachstellen ist bislang gering. Aus der Literaturrecherche haben sich folgende Erkenntnisquellen ergeben:

- ▶ Maly, T., Dinhobl, G., Jaksch, M., „Schallemissionen von Laufflächendefekten“ von 2016
- ▶ Thompson, D., „Railway Noise and Vibration“ von 2009
- ▶ Möhler, U., et al, „Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht“ von 2017

Die Erkenntnisse aus diesen Veröffentlichungen werden im Folgenden dargestellt:

4.1 Schallemissionen von Flachstellen

In der Veröffentlichung „Schallemissionen von Laufflächenschäden“ (Maly, Jaksch und Dinhobl, 2016) wird von Langzeitmessungen mit dem Mess-Systemen Argos® und acramos® (Kapitel 5.6) berichtet. Die Detektion von Flachstellen mit dem Messsystem acramos® beruht auf einer Messung der Schienen- und Schwellenbeschleunigungen mittels Beschleunigungssensoren. Für die vorliegende Untersuchung wurden über eine Dauer von 2 Monaten insgesamt 3.787 Zugvorbeifahrten (davon ca. 20 % Güterzüge) an einer Messstelle nordöstlich von Wien akustisch und hinsichtlich des Auftretens von Flachstellen erfasst.

In dieser Studie wurde als Anfangshypothese angenommen, dass die folgenden charakteristischen Größen am ehesten mit den gemessenen Schallemissionen korrelieren.

- ▶ die Länge einer Flachstelle l ,
- ▶ die von einer Achse erzeugte maximale Schienenbeschleunigung a und
- ▶ die Rundlaufabweichung Δr

Jedoch weisen die Autoren dieser Studie darauf hin, dass die Zusammenhänge dieser Größen mit den Emissionen nicht immer eindeutig waren.

Die statistische Analyse ergab, dass Flachstellen ($l \geq 20\text{mm}$) überwiegend an Güterwagen und selten an Triebfahrzeugen auftreten. Die Häufigkeit von Flachstellen wurde in dieser Studie mit jeder 750. Achse relativ gering ermittelt. Deutlich häufiger traten demgegenüber hohe Schienenbeschleunigungen und Rundlaufabweichungen ebenfalls vorwiegend an Güterwagen auf.

Durch die geringe Zahl von detektierten Flachstellen sind die statistischen Aussagesicherheiten von Zusammenhängen zwischen Flachstelle und akustischen Kenngrößen nach Aussage der Autoren gering. Die akustischen Kenngrößen mit den besten Zusammenhängen zu detektierten Flachstellen sind in dieser Untersuchung zum einen der sogenannte Spitzenachspegel $L_{A01,10\text{ms}}$. Dies ist der Spitzenwert des A-bewerteten Pegels, der in der Umgebung der vorbeifahrenden Achsen ermittelt wurde und mit einer sehr kurzen Zeitkonstante von 10 ms gemessen wurde, um durch Flachstellen verursachte Schlaggeräusche besser auflösen zu können. Zum anderen erwies sich in der vorliegenden Untersuchung der Modulationsgrad des gemessenen 2 kHz-Oktavbands als geeigneter Indikator für die akustische Auswirkung von singulären Laufflächenschäden. Der Modulationsgrad des 2-kHz-Oktavbands beschreibt hierbei die Änderung der Amplitude des Pegels der Frequenzen im Bereich zwischen 1,4kHz und 2,8kHz.

Die daraus ermittelten akustischen Auffälligkeiten von Achsen mit detektierten Flachstellen sind in hohem Maß von den mittleren Spitzenpegeln der unauffälligen Achsen desselben Zuges bzw. Fahrzeugs abhängig. Entsprechend der vorliegenden Untersuchung treten bei lauten Fahrzeugen die akustischen Auswirkungen von (geometrisch) auffälligen Achsen in den Hintergrund. Die Abweichungen von den unauffälligen Achsen betragen 0 bis 3 dB. Werden jedoch die Flachstellen im Zugverband mit „leisen“ Achsen betrachtet, erhöhen sich die Abweichungen der auffälligen von den unauffälligen Achsen auf bis zu 10 dB. Diese Beobachtung bestätigt die Erwartung, dass mit zunehmender Umrüstung der Güterwagenflotte auf K-Sohlen bzw. LL-Sohlen die Emissionen von Flachstellen eine größere Rolle spielen werden.

Anhand der Auftrittshäufigkeit von Laufflächendefekten und eines typischen Verkehrsszenarios wurde zudem der Effekt der Laufflächendefekte auf den Mittelungspegel nachts L_{night} abgeschätzt. Dabei wurde bereits unterstellt, dass alle Güterzüge auf lärmarme Bremsysteme umgestellt sind. Die errechnete Erhöhung des Mittelungspegels beträgt demnach lediglich 0,4 dB. Die Autoren kommen daher zu dem Schluss, dass der Mittelungspegel nicht geeignet ist, kurzzeitige Emissionskomponenten zu berücksichtigen.

Diese Einschätzung erscheint als berechtigt. Vielmehr könnte die Betrachtung der auftretenden Maximalpegel verursacht durch Laufflächendefekte einen wesentlichen Aspekt zur Beschreibung der Lärmbelastung darstellen.

4.2 Railway, Noise and Vibration

David Thompson stellt in seinem Buch „Railway, Noise and Vibration“ (Thompson, 2009) in Kapitel 10.3 „Impact noise due to wheel flats“ (Schlaggeräusch durch Flachstellen) einen theoretischen Ansatz zur Prognose der Geräuschemission durch Flachstellen vor.

Die „abrollende“ Flachstelle, die bei höheren Fahrgeschwindigkeiten von der Schiene abzuheben beginnt, wird hierbei als nichtlineare Anregung betrachtet. Diese findet zusammen mit dem „Rauheitsspektrum“ des Rades Eingang in ein lineares, spektrales Modell für den Rad-Schiene-Kontakt.

Mit diesem linearen Modell des Rad-Schiene-Kontakts werden verschiedene Situationen abrollender Räder mit verschiedenen Achslasten, verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, verschiedenen Flachstellenlängen und frischen bzw. ausgefahrenen Flachstellen schalltechnisch prognostiziert.

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird anhand einzelner Berechnungen für die Geschwindigkeiten 30, 50, 80 und 120 km/h sowohl für das Flachstellengeräusch als auch für das „ungestörte“ Rollgeräusch berechnet. Demnach steigt die Schalleistung des Flachstellengeräusches in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v des Zuges entsprechend des Zusammenhangs $20 \cdot \log_{10}(v)$ an. Die Schalleistung des Rollgeräusches steigt jedoch in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v des Zuges sogar mit $30 \cdot \log_{10}(v)$ an. Das Flachstellengeräusch weist bei üblichen Fahrgeschwindigkeiten zwar eine höhere Schalleistung auf, jedoch nimmt der Abstand zwischen Flachstellengeräusch und Rollgeräusch demnach mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Auf einer verriffelten Schiene übersteigt die Schalleistung des Rollgeräusches das Flachstellengeräusch rechnerisch ab 120 km/h. D.h. im Umkehrschluss, dass das Flachstellengeräusch bei üblichen Geschwindigkeiten von ca. 80 bis 100 km/h auf glatten Schienen und bei sonst glatter Radlauffläche dominiert. Die Dominanz des Flachstellengeräusches nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit ab. **Flachstellen dominieren** den Geräuscheindruck besonders **bei langsam fahrenden Zügen**.

Weiterhin wird in dem Buch „Railway, Noise and Vibration“ festgestellt, dass die „ausgefahrere“ Flachstelle geringere Schalleistung aufweist als die frische Flachstelle gleicher Tiefe mit scharfen Kanten, obwohl die Länge der Flachstelle gegenüber dem frischen Zustand zugenommen hat. Das **Abrunden der Kanten** führt demnach zu einer Reduzierung des Schlaggeräusches.

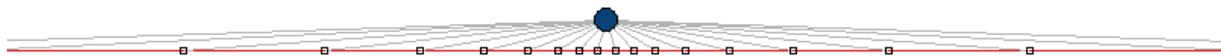
Die **Tiefe der Flachstelle** hat ebenfalls Einfluss auf die abgestrahlte Schalleistung. Die Differenz zwischen einer 1 mm und einer 2 mm tiefen Flachstelle beträgt hiernach geschwindigkeitsabhängig zwischen 1 und 5 dB. Dabei nimmt der Unterschied zwischen der kürzeren und der längeren Flachstelle tendenziell mit steigender Geschwindigkeit ab. Bei einer neuen Flachstelle (nicht ausgefahren) beträgt der Unterschied über 100 km/h dann nur noch 1 dB.

Mit **zunehmender Radlast** nimmt die Schallabstrahlung einer ansonsten gleichen Flachstelle ebenfalls zu. Die Erhöhung der Schalleistung bei Verdoppelung der Radlast von 50 kN auf 100 kN beträgt ca. 3 dB.

4.3 Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht

Dieses Gutachten (Möhler et al., 2018a) wurde im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz von einem Teil der in der vorliegenden Studie beteiligten Autoren von Möhler + Partner Ingenieure AG zusammen mit der ZEUS GmbH sowie dem Deutschen Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e.V. durchgeführt. Die Autoren dieser Untersuchung schlagen für die Beurteilung von Schienenverkehrslärm ein rechnerisches Prognosemodell unter Berücksichtigung des Maximalpegels vor. Hierzu wird die Berechnung der Schalleistung einer Vorbeifahrt nach Schall 03 (16. BImSchV, 1990) verwendet und abgewandelt. Anstelle der gleichförmigen Verteilung der Schalleistung auf den Schienenweg auf Basis der zeitlichen Mittelung wird die Schalleistung der Vorbeifahrt als Linienquelle mit der Länge des Zuges modelliert, die durch eine Aneinanderreihung von Berechnungsschritten mit unterschiedlichen Positionen der Quelle entlang der Strecke wandert (Abbildung 15).

Abbildung 15: Abstrahlung einer unbegrenzten Linien-schallquelle begrenzt auf die Dauer der Vorbeifahrt



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

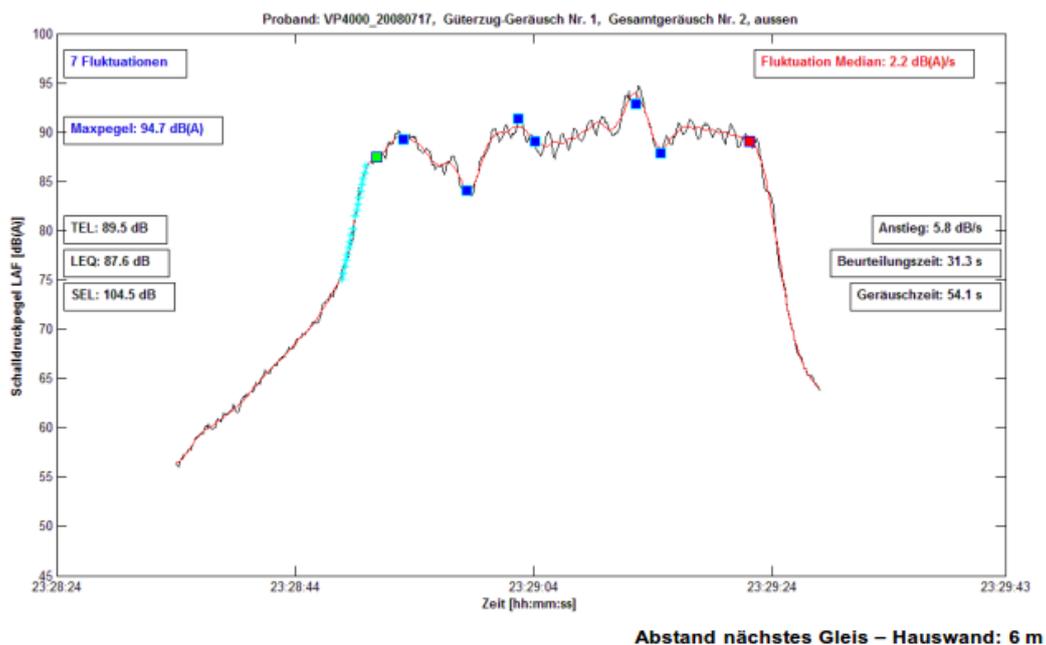
Die zeitliche Aneinanderreihung der Berechnungsergebnisse an einem Berechnungspunkt ergibt einen ansteigenden Verlauf mit einem Plateau und einer abfallenden Flanke.

Da die Linien-schallquelle eine über ihre Länge (der Zuglänge) gleichmäßige Verteilung der Schalleistung aufweist, ist die Höhe des Ergebnisses nur von der Lage der Linienquelle zum Berechnungspunkt abhängig. Somit entsteht ein gleichförmiger (glatter) Zeitverlauf des Pegels. Flachstellen würden hierbei jedoch als im Zugverband mitrollende punktuelle Erhöhungen der Schalleistung (Punktschallquelle) erscheinen und somit am Berechnungspunkt einzelne Spitzen erzeugen. Diese müssten durch einen abstandsabhängigen Zuschlag berücksichtigt werden. Hierfür wird die Methode der skandinavischen Rechenvorschrift Nord 2000 (Jonasson und

Storeheier, 2001) verwendet. Dabei wird für Teilquellen mit besonders hoher Emission (wie z.B. Lüfter oder Flachstellen) auf den berechneten Maximalpegel ein abstandsabhängiger Aufschlag von 3 dB bei 10 m Abstand vergeben, der mit zunehmendem Abstand (bei 300 m) gegen Null geht. Damit sollen „Geräuschanteile, die nicht explizit in der Richtlinie abgebildet werden, wie schadhafte Radsätze (Flachstellen, Polygone) oder besonders laute Aufbauten von Güterwagen, berücksichtigt werden.“ (Möhler et al., 2018b)“

Für das in der Maximalpegeluntersuchung vorgeschlagen Prognosemodell wird ein ähnlicher Zuschlag vorgeschlagen: Einzelne kurzzeitige Ereignisse werden durch einen abstandsabhängigen Pegelzuschlag berücksichtigt. Grundlage zur Prognose dieses Zuschlags sind die Messdaten aus der zugrundeliegenden Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur wirkungsorientierten Bewertung von Verkehrslärm auf den Nachtschlaf (Müller et al.) Hierbei wurden von Schallmessungen vor dem Fenster bei 33 Probanden insgesamt etwa 5.000 Güterzug und 2.000 Personenzugvorbeifahrten in folgender Form ausgewertet:

Abbildung 16: Beispiel für die Auswertung einer Güterzugvorbeifahrt



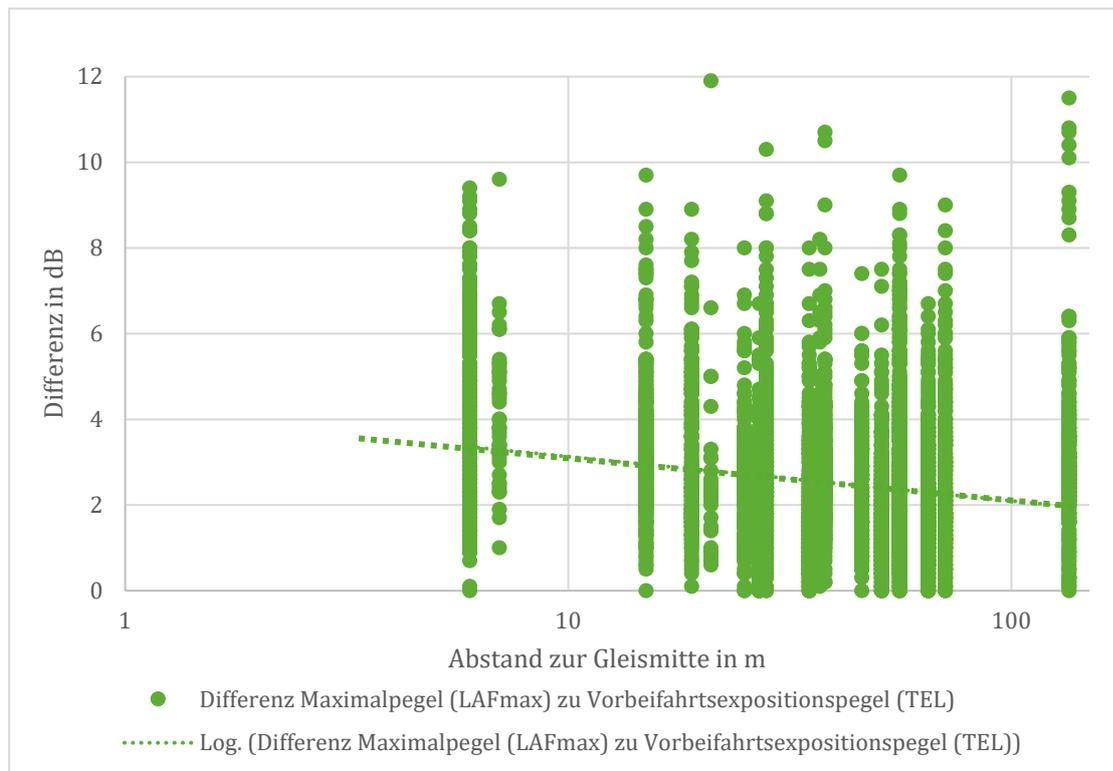
Quelle: (Möhler et al. 2018).

Abbildung 16 zeigt den A-bewerteten Schalldruckpegelverlauf (schwarze Linie) einer Zugvorbeifahrt über der Zeit im Abstand von 6 m. Des Weiteren sind der gemittelte Pegelverlauf (rote Linie), die Anfangs- (grüner Datenpunkt) und Enddetektion (roter Datenpunkt) und die extrahierten Maxima und Minima (blaue Datenpunkte) in diesem Zeitbereich dargestellt. Zusätzlich werden die berechneten Werte für den Maximalpegel, den TEL, den L_{eq} und den SEL, die Steigung der Anstiegsflanke (türkis) und die Dauer der Beurteilungszeit und der gesamten Geräuschzeit angezeigt.

Für jede Vorbeifahrt wurde die Differenz zwischen Maximalpegel $L_{pAF,max}$ und Vorbeifahrtexpositionspegel TEL gebildet. Hierbei wurden die Angaben zum Abstand des Messortes zum Gleis ausgewiesen, so dass der Zusammenhang zwischen der Differenz $L_{pAF,max} - TEL$ und dem Abstand angegeben werden kann. Diese Differenz zwischen Maximalpegel und

dem Vorbeifahrtexpositionspegel kann als Zuschlag ΔL auf den entsprechend ohne Berücksichtigung von Einzelereignissen prognostizierten Maximalpegel aufgeschlagen werden. Die Messwerte können somit zwar nicht daran unterschieden werden, ob z.B. ein Laufflächenschaden oder ein schadhafter Wagenaufbau zu Geräuschspitzen bei der Vorbeifahrt führte, dennoch können die Messungen als Hinweis auf den zu erwartenden Einfluss des Abstands auf die Differenz aus Maximalpegel und Mittelungspegel herangezogen werden. Auch im Falle von schadhaften Wagenaufbauten oder anderer Quellen resultiert die Abstandsabhängigkeit dieser Differenz aus der unterschiedlichen Pegelabnahme von Punkt- und Linienquellen.

Abbildung 17: Messwerte der Differenz aus Maximalpegel und Vorbeifahrtsexpositionspegel in verschiedenen Abständen für ca. 5.000 Güterzüge



Quelle: (Möhler et al. 2018).

Abbildung 17 zeigt die Differenz zwischen L_{AFmax} und TEL einer Vorbeifahrt über dem Abstand des Messpunkts zur Gleismitte. Die einzelnen Datenpunkte repräsentieren hierbei einzelne Vorbeifahrten von Güterzügen. Es zeigt sich bei identischen Messabständen eine große Streuung dieser Differenz. Dennoch führt die logarithmische Regression der rund 5.000 Messwerte (gepunktete Linie) zu einem abstandsabhängigen Zuschlag für kurzzeitige Geräuschspitzen von rechnerisch 4 dB in 1 m Abstand bis 2 dB in 100 m Abstand. Dies entspricht in der Größenordnung den Werten, die auch dem akustischen Einfluss von Laufflächenschäden zugeschrieben werden.

4.4 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten hinsichtlich der verursachten Lärmbelastung durch Flachstellen

Als Grundlage für Untersuchungen zu akustischen Auswirkungen von Flachstellen wurden drei Datenquellenherangezogen:

- ▶ Die Veröffentlichung „Schallemissionen von Laufflächenschäden“ von Maly, Dinobl und Jaksch,
- ▶ Das Kapitel „Impact noise due to wheel flats“ (Schlaggeräusche verursacht durch Flachstellen) im Buch „Railway, Noise and Vibration“ von David Thompson und
- ▶ Das Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenlärm in der Nacht von der Möhler + Partner Ingenieure AG, DLR und ZEUS GmbH.

In der ersten Studie wurden für 3.787 Züge Zusammenhänge zwischen dem Vorbeifahrtgeräusch, geometrischen Parametern von Radformfehlern, wie der Länge einer Flachstelle oder der Rundlaufabweichung des Rads, und der Schienenbeschleunigung überprüft. Hierbei erwiesen sich zum einen der Spitzenwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, gemessen mit einer Zeitkonstante von 10 ms, und der Modulationsgrad des 2kHz-Oktavbands als geeignete Indikatoren für die akustische Auswirkung von singulären Laufflächenschäden.

In der zweiten Veröffentlichung wird das Vorhandensein einer Flachstelle durch eine nichtlineare Anregung in einem linearen, spektralen Modell für den Rad-Schiene-Kontakt abgebildet. Damit wird der Schalleistungspegel für verschiedene Situationen, wie etwa unterschiedliche Achslasten, Fahrgeschwindigkeiten, Flachstellenlängen simuliert. Es resultiert ein Einfluss auf die Schalleistung u.a. durch das Abrunden der Kanten einer Flachstelle, durch die Tiefe der Flachstelle und ebenfalls durch die Radlast. Diese Einflüsse wiederum sind auch geschwindigkeitsabhängig.

In der Studie zum Maximalpegelkriterium wird die Schalleistung einer Zugvorbeifahrt als Linienquelle mit unterschiedlichen Positionen der Quelle entlang der Strecke modelliert. Flachstellen werden hierbei als mitrollende Punktschallquellen modelliert und erzeugen somit am Berechnungspunkt einzelne Spitzen, die durch einen abstandabhängigen Zuschlag auf den berechneten Maximalpegel berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde für die Vorbeifahrten von 5.000 Güterzügen die Differenz zwischen dem Maximalpegel und dem Vorbeifahrtsexpositionspegel in verschiedenen Abständen zur Gleismitte berechnet. Wenngleich auf Basis dieser Auswertung nicht auf die Ursache der Maximalpegelanhebung geschlossen werden kann, resultiert hiermit eine wichtige Information zur Abstandabhängigkeit dieser Differenz aufgrund der unterschiedlichen entfernungsabhängigen Pegelabnahme von Linien- und Punktschallquellen.

5 Messverfahren ohne geometrische Vermessung des Rads zur Detektion von Flachstellen

Um eine Detektion von Flachstellen nicht nur auf Basis einer geometrischen Vermessung am Rad selbst zu ermöglichen, werden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen. Die folgenden Arbeiten werden diesbezüglich detaillierter beschrieben.

- ▶ Arnoczky, P.M.: „Flachstellenortung Quo Vadis“ von 1994
- ▶ Vanderhouten, R., Deutzer, M.: „Detektion von Flachstellen an Radreifen auf der Basis von Schallmessungen am Schienenkörper“ von 2005
- ▶ Brizuela, J., Ibanez, A., Nevado, P., Fritsch, C.: “Railway Wheels Flat Detector Using Doppler Effect” von 2009
- ▶ Schweizer Bundesamt für Umwelt BAFU Forschungsprojekt „Flachstellenerkennung mit Telematik“ von 2018
- ▶ Dernbach G., Lykartsis A., Sievers L., Weinzierl S.: „Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques” von 2020

Im Weiteren werden auch kommerziell angebotenen Verfahren unterschiedlicher Hersteller dargestellt. Hierunter befindet sich ebenfalls jenes Verfahren der Firma Müller-BBM Rail Technologies, welches für die Datenerfassung zur Erarbeitung des akustischen Kriteriums in diesem Forschungsvorhaben herangezogen wurde (Abschnitt 5.6).

- ▶ ACoustic Railway Monitoring System acramos® von psiacoustic in Kombination mit Argos® von HBK
- ▶ Lasergestützte Radkraftdiagnose LASCA und Monitoringsystem MONI von INNNotec Systems GmbH
- ▶ Wheel Monitoring System (WMS) von Müller-BBM Rail Technologies

5.1 Flachstellenortung mittels HF-Strom (Tandem System)

In der Veröffentlichung „Flachstellenortung Quo Vadis?“ (Arnoczky, 1994) wird über das Tandem Messsystem aus der Schweiz berichtet. Hierbei wird ein elektrischer Kurzschluss zwischen den beiden Schienen durch eine Achsüberfahrt als Messsignal genutzt. Dazu wird durch Isolierstöße ein 1,6 m langer Schienenabschnitt einseitig elektrisch isoliert und ein hochfrequentes Messsignal eingespeist. Rollt ein Radsatz durch diesen Messabschnitt, werden die beiden Schienen elektrisch kurzgeschlossen und das Spannungssignal (HF-Signal) bricht zusammen. Diese Unterbrechung des Signals kann die Achsdurchfahrt detektieren. Zur Einrichtung des Systems müssen die Isolierstöße durch Zersägen der Schienen installiert werden, das System ist somit nicht im laufenden Betrieb installierbar.

Eine Flachstelle an einem Radsatz führt bei Fahrgeschwindigkeiten ab 40 km/h dazu, dass das Rad den Kontakt zur Schiene kurzzeitig verliert. Durchrollt nun ein Radsatz mit einer Flachstelle den Messabschnitt wird des HF-Signal kurzgeschlossen und ist wieder vollständig aufgebaut in

dem Moment, wenn das Rad aufgrund der Flachstelle abhebt. Damit eine vollständige Radabwicklung überwacht werden kann, werden zwei Messabschnitte hintereinander geschaltet.

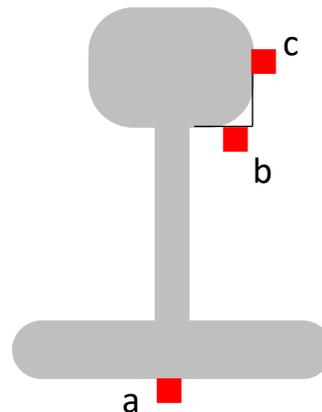
Durch die Unterbrechung des HF-Signals beim Abheben des Rades können Flachstellen entsprechend der vorliegenden Veröffentlichung ab einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h und einer Flachstellenlänge von mindestens 20 mm zu 100 % erkannt werden. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten werden auch kürzere Flachstellen erkannt. Die Dauer der Kontaktunterbrechung ist jedoch abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, der Achslast, der Form der Flachstelle und der Oberbauqualität. Um dennoch eine Aussage über die Länge der Flachstelle zu erzielen, wird die Dauer der Unterbrechung mit Korrekturwerten in eine Länge umgerechnet. Der Korrekturfaktor berücksichtigt Achslast und Fahrgeschwindigkeit, wobei erstere durch Dehnungsmessstreifen am Schienenfuß und letztere durch die Zeitdifferenz beim Durchfahren der beiden Messabschnitte bestimmt werden.

Die erzielbare Messunsicherheit bei der Ermittlung der Länge der Flachstelle beträgt nach Angaben der vorliegenden Studie $\pm 30\%$, die an einem Messzug mit definierten Flachstellen ermittelt wurde. Jedoch werden auch Ovalitäten detektiert, da auch ovale Räder aufgrund der Seitwärtsschwingungen kurzzeitig den Kontakt zur Schiene verlieren. Da jedoch weniger die akustischen Effekte als Sicherheitsaspekte für die Flachstellenortung ursächlich waren, sollten Ovalitäten unterschieden werden können. Hierfür wurde zusätzlich ein Schlagdetektor installiert, der Flachstellen als solche kennzeichnet.

5.2 Flachstellendetektion mittels Körperschall

In der vorliegenden Veröffentlichung „Detektion von Flachstellen an Radreifen auf der Basis von Schallmessungen am Schienenkörper“ (Vandenhouten und Deutzer, 2005) wird ein Verfahren beschrieben, bei dem mithilfe von Vibrationssensoren an der Schiene Flachstellen erkannt werden können. Flachstellen, die über einen Schienenabschnitt rollen erzeugen beim Auftreffen auf die Fahrfläche einen Impuls, der von der Schiene weitergeleitet wird und vom Sensor detektiert wird. Da die Auftreffstelle der Flachstelle jedoch vom Drehwinkel des Rades abhängt und in unterschiedlichen Abständen vom Sensor erfolgen kann, hängt die Höhe des Impulses nicht nur von der Ausprägung der Flachstelle sondern auch von dem zufälligen Abstand des Auftreffpunkts zur Position des Sensors ab. Der Hardware-technische Aufwand bei diesem Ansatz ist gering. Eine ähnliche Messanordnung ist auch in der DIN CEN/TR 16891:2017-03 beschrieben.

Abbildung 18: Messung der vertikalen Schienenkopfschwingung nach DIN CEN/TR 16891, empfohlene Messpositionen am Schienenfuß: a, b und c.



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG nach DIN CEN/TR 16891

Die Analyse des Beschleunigungssignals dient in der DIN CEN/TR 16891 zur Bestimmung der kombinierten Rauheit von Schiene und Rad. Ist die Rauheit der Schiene z.B. durch Messung bekannt, kann daraus auch die Rauheit des Rades ermittelt werden. Eine Erkennung von Laufflächendefekten ist in der Spezifikation eigentlich nicht vorgesehen.

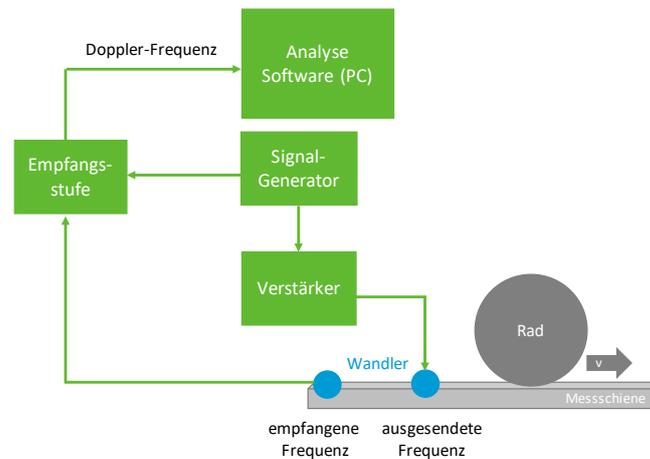
In der vorliegenden Veröffentlichung wird genau dieser Ansatz verfolgt. Das Körperschallsignal setzt sich nach Ansicht der Autoren aus den „Unebenheiten“ (Rauheit) des Radreifens und fallweise überlagerten Dirac-Impulsen (kurze, hohe Impuls) aus Flachstellen zusammen. Um diese Impulse analysieren zu können, wird das Rohsignal tiefpassgefiltert, d.h. hochfrequente nicht relevante Rauschanteile werden unterdrückt. Anschließend werden die einzelnen Radsätze separiert, in dem ein Induktionssensor verwendet wird, der durch die Erkennung des Rades den genauen Zeitpunkt der Überfahrt jeden Radsatzes kennzeichnet. Bei einem Drehgestell folgen zwei Radsätze zeitlich unmittelbar nacheinander und beeinflussen sich gegenseitig. Um dies zu eliminieren wird diejenige Flanke des an- und abschwelldenden Signals selektiert, die nicht in Richtung des nächstgelegenen folgenden oder vorigen Rades verläuft. Die verbleibende Flanke wird nun mit einer Flanke eines intakten Rades verglichen. Treten im Vergleich der Signale nun am untersuchten Radsatz einzelne zusätzliche Impulse auf, wird dieses als Flachstelle gewertet. Das Maß dieser Impulse ist dimensionslos, d.h. es kann nur eine relative Wertung des Flachstellenausmaßes ermittelt werden und nicht z.B. die Länge der Flachstelle in mm angegeben werden. Außerdem wird in der Veröffentlichung eingeschränkt, dass der Einfluss benachbarter Räder noch nicht in ausreichendem Maß kontrolliert werden kann.

5.3 Flachstellendetektion mittels Doppler-Effekt

In der Veröffentlichung „Railway Wheels Flat Detector Using Doppler Effect“ (Brizuela et al., 2010) wird ein System zur Erkennung von Flachstellen anhand von Ultraschall-Oberflächenwellen und dem Doppler-Effekt vorgestellt. Bei dieser Methode wird eine Ultraschall-Oberflächenwelle auf einem Messgleis induziert und das durch den Rad-Schiene-Kontakt reflektierte Signal gemessen. Die Frequenzverschiebung (Doppler-Effekt) des reflektierten Signals ist als Maß für die Geschwindigkeit des Rades messbar. Eine Flachstelle

verursacht nun eine Modulation - also eine Veränderung - der Geschwindigkeit des Rades, die messtechnisch detektiert werden kann.

Abbildung 19: Detektion von Flachstellen mittels Doppler-Effekt



Darstellung der einzelnen Komponenten zur Flachstellendetektion mittels Doppler-Effekt, Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG, nach (Brizuela et al., 2010)

Von Ultraschall spricht man bei Frequenzen oberhalb 16.000 Hz. Piezoelektrische Wandler bieten für die Erzeugung und Detektion von Ultraschallwellen beste Voraussetzungen. Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes verschieben sich in piezoelektrischen Materialien Ladungsträger, was zu einer makroskopischen Längenänderung führt. Auf diese Weise werden Partikel in der Luft in Schwingung versetzt und Ultraschallwellen entstehen. Solche Oberflächenwellen (mit einer Frequenz von 1 MHz) werden in der hier vorliegenden Studie auf eine Messschiene angebracht, um ein möglichst von Störgeräuschen freies Signal zu erzielen. Zudem ist der Geschwindigkeitsbereich der Fahrzeuge auf 10 bis 15 km/h begrenzt. Daher ist der Einsatz dieser Methode z.B. auf Einfahrtsgleise von Instandhaltungswerken begrenzt.

Versuche mit einem Hochgeschwindigkeitszug mit präparierten Flachstellen (20 und 30 mm) haben eine hohe Zuverlässigkeit bei der Flachstellenerkennung ergeben. Jedoch konnte die Länge der Flachstelle aus dem Signal nicht ermittelt werden.

5.4 Flachstellenerkennung mit Telematik

In einem Forschungsprojekt des Schweizer Bundesamtes für Umwelt BAFU (Bundesamt für Umwelt, 2018) wurde von der Firma WASCOSA ein Ansatz zur frühzeitigen Flachstellenerkennung mit einem Telematiksystem ohne externe Sensorik verfolgt.

Hierbei wurden insgesamt ca. 600 Wagen mit einem Telematiksystem ausgerüstet. Für den hier betrachteten Detektionsansatz wurde die Beschleunigung in z-Achse (vertikaler) den Wagen gemessen. Hierbei wurde angenommen, dass bei einem Rad mit Flachstelle einmal pro Radumdrehung eine Beschleunigung in z-Richtung verursacht wird. Durch eine Analyse des dem Zeitsignal zugeordneten Frequenzspektrums kann somit das Auftreten einer Grundfrequenz mit höheren Harmonischen als Indikator für eine Flachstelle herangezogen werden.

Die Autoren beschreiben, dass die Detektion grundsätzlich plausibel funktioniert, jedoch nicht bei allen Wagen gleichermaßen gut. Außerdem ist ein Einfluss der Infrastruktur (wie beispielsweise Weichen oder Gleiszustand) auf die Messung zu berücksichtigen.

Grundsätzlich erscheint dieser Ansatz als eine interessante Möglichkeit der fahrzeugseitigen Überwachung von Flachstellen.

5.5 Akustische Flachstellendetektion auf Basis von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI)

In ihrem Beitrag mit dem Titel „Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques“ (Dernbach et al., 2020) stellen die Autoren die Möglichkeit vor akustisch auffällige Flachstellen mit den Methoden der Künstlichen Intelligenz zu detektieren. Beim sogenannten „maschinellen Lernen“ werden Zuordnungen zwischen Eingangsdaten und Zieldaten von einem Algorithmus automatisiert „erlernt“.

Für diesen Ansatz wurden Akustikdaten am Gleis, die Zuggeschwindigkeit und die Radien der Zugräder aufgezeichnet. Die Akustikdaten wurden hinsichtlich akustisch auffälliger Geräusche von Experten „gelabelt“, d.h. akustische Auffälligkeiten wurden markiert. Als Eingangsdaten für das maschinelle Lernen wurden die drei gängigsten Analysedaten der Spracherkennung herangezogen: das rohe Audiosignal, das Frequenzspektrum über der Mel-Skala, dies ist eine Tonhöhenkala, und das sogenannten Cepstrum (das Spektrum des Spektrums), mit welchen periodische Koeffizienten im Frequenzspektrum analysiert werden können. Für die Zuordnung dieser Analysedaten zu den zugehörigen Kennzeichnungen „Flachstelle/keine Flachstelle“ wurden verschiedene Klassifizierungsalgorithmen (SVM, CNN, U-Net) getestet. Die Ergebnisse erscheinen sehr vielversprechend, jedoch empfehlen die Autoren eine Erweiterung des Datensatzes auch unter Einbeziehung von typischen Umweltgeräuschen.

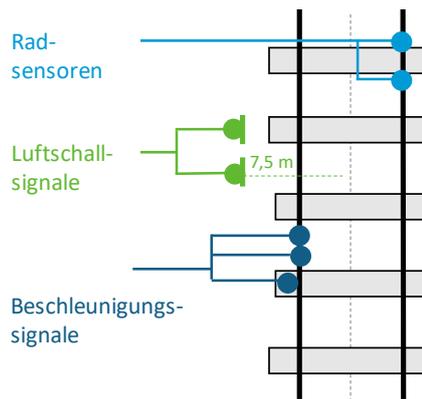
5.6 ACoustic RAilway Monitoring System acramos von psiacoustic in Kombination mit Argos® von HBK

Von der psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH in Wien wird das Messsystem acramos® (acoustic railway monitoring system) zur Überwachung von Schienenverkehrsgeräuschen angeboten (acramos®, 2015). Das System ist auf eine dauerhafte, automatisierte Überwachung der Schallemissionen von Zugvorbeifahrten ausgelegt.

In seiner Grundausstattung besteht das System laut Angaben des Herstellers aus zwei Messquerschnitten, worin jeweils zwei wetterfeste Mikrofone in 7,5 m Entfernung zur Schienenachse und 1,2m über SOK 2, zwei Radsensoren, ein Beschleunigungsaufnehmer auf der Schwelle (für die vertikale Schwellenbeschleunigung) und zwei Beschleunigungsaufnehmer auf der Schiene (für horizontale und vertikale Schienenbeschleunigung) angebracht sind.

Die Signale der Radsensoren werden dazu verwendet, den Geräuschabschnitten die jeweiligen Achsen zuzuordnen. Die „gemessenen Vorbeifahrtpegel werden dann vordefinierten Zugkategorien (z.B. S-Bahn, Doppelstock-Wendezug, Reisezug, Güterzug, Lokbaureihe) automatisch zugeordnet (acramos, 2021).“ Mit den zusätzlichen Beschleunigungsaufnehmern sollen Aussagen über Einzelachspegel und eine Optimierung der Flachstellenerkennung ermöglicht werden. Zudem soll in einer Erweiterung die indirekte Rauheit mittels einem „Pass-By-Analysis Programm“ gemessen werden können.

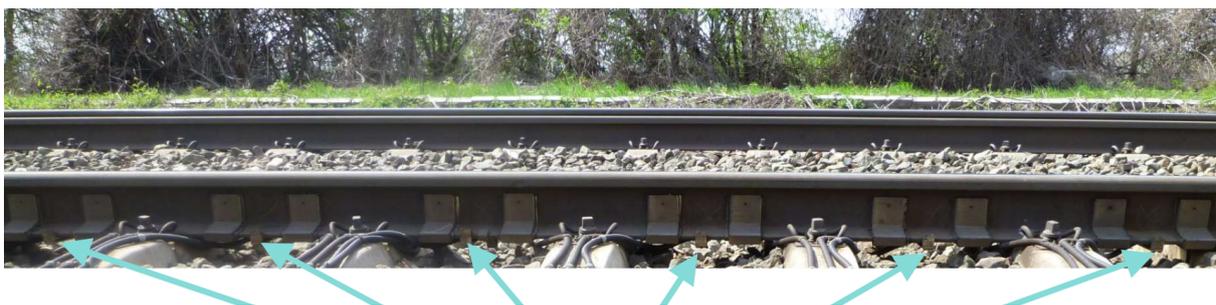
Abbildung 20: Schematischer Aufbau der Sensoren für das Messsystems acramos®



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG, nach Fehler! Linkreferenz ungültig.

In Ergänzung mit dem Argos® Messsystem der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH aus Wien wurde das System beim Bahnlärmmonitoring im Mittelrheintal im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamts eingesetzt. Mit dem Argos® WTMS System (Wayside Train Monitoring System) können verschiedene Parameter kontinuierlich überwacht werden, wie beispielsweise die Unrundheit eines Rades, den Einfluss des Oberbaus, Fahrzeuglasten und das Fahrverhalten. Das modulare System enthält in dem Modul OOR (out-of-roundness) Beschleunigungssensoren, die an beiden Schienen jeweils in sechs aufeinanderfolgenden Schwellenfächern (Zwischenräume benachbarter Schwellen) montiert werden. Mit der hintereinander geschalteten Reihe von Sensoren kann somit eine komplette Radabwicklung vermessen werden. Damit werden Abweichungen vom idealen runden Rad durch Datenanalyse errechnet. Entsprechend des Datenblatts können Abweichungen vom Rundlauf mit 0,1 m Messgenauigkeit erzielt werden. Flachstellen werden laut Datenblatt ab 30 mm Länge erkannt. Bei der Erkennung von Polygonen beschreibt der Hersteller im Datenblatt die Genauigkeit der Polygonisierung (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.1) mit Ordnung 2 bis 32.

Abbildung 21: Sensoren des Messsystems Argos® OOR



Quelle: Messung am Gleis mit ARGOS® von HBK (Maicz, 2021)

5.7 Lasergestützte Radkraftdiagnose LASCA und Monitoringsystem MONI von INNotec Systems GmbH

In Zusammenarbeit zwischen Innotec Systems GmbH und Möhler + Partner wurde in den Jahren 2013 bis 2017 ein Monitoring-System für Schienenverkehr entwickelt. Das System wurde in seiner vollen Ausbaustufe über einen Zeitraum von 2013 bis 2016 in Leutesdorf im Mittelrheintal getestet. Zur zeitsynchronen und automatischen Erfassung der interessierenden Parameter sind die Module AKUSTIK, MONI und LASCA notwendig. Radsensoren zur Steuerung der Messung, die in einem Abschnitt vor der Einfahrt in den Messquerschnitt installiert werden, und eine Aufzeichnung der meteorologischen Parameter ergänzen das System.

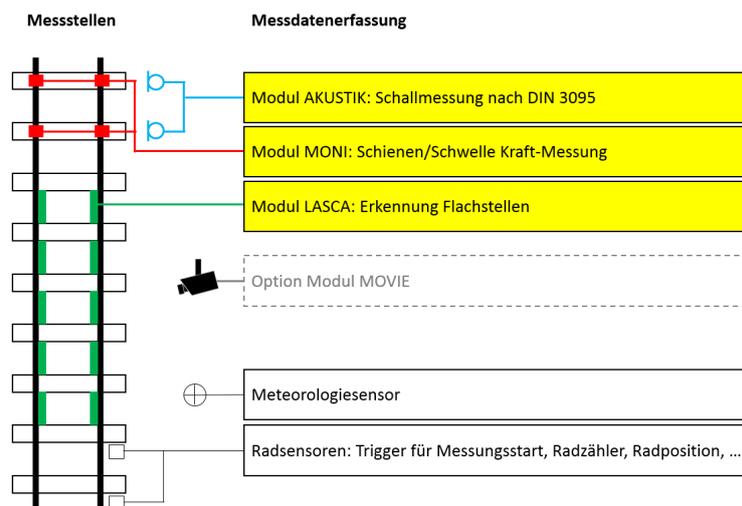
Modul AKUSTIK	Automatische Erfassung der Schalldruckzeitverläufe bei Zugvorbeifahrt und Bildung der akustischen Parameter (L_{Aeq} , TEL, L_{AFmax} , Spektrum, Zeitsignal etc.)
Modul MONI	Automatische Erkennung von Zugart, Fahrzeugart, Bremsbauart und Geschwindigkeit; zusätzlich Erkennung von Laufflächenschäden
Modul LASCA	Radgenaue Erfassung von Laufflächenfehlern und deren Klassifizierung sowie Quantifizierung

Optional kann das System durch das Modul MOVIE zur automatischen Erkennung der Fahrzeugkennzeichnung durch Video ergänzt werden.

Abbildung 22 zeigt den schematischen Aufbau des Mess-Systems mit Kennzeichnung der einzelnen Module bzw. der Optionen und möglicher Erweiterungen.

Die Daten aller Messkomponenten werden in einer gemeinsamen Auswerteeinheit mit den akustischen Daten als auch den Fahrzeuginformationen umgewandelt. Tabelle 6 fasst die Datenlieferung des Systems entsprechend der Internetpräsenz des Herstellers zusammen.

Abbildung 22: Schematischer Aufbau des Mess-Systems



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Tabelle 6: Datenlieferung des Monitoring-Systems MONI

Allgemeine Daten
Geschwindigkeit, Beschleunigung
Zugsummengewicht und Wageneinzelgewicht
Fahrzeugetkennung
Zuglänge, -anzahl der Wagen, Anzahl der Achsen, Achsgeometrie, Fahrgeschwindigkeit
Fahrzeugidentifikationsnummern
Massen, Kräfte und Lasten
Prozentuale Lastverschiebung (in Achse, Drehgestell und Fahrzeug)
Dynamisches Laufverhalten
Fehlerhaft eingestellte Drehgestelle
Gleis- und Oberbaubelastung
Überwachung der Streckenklasse und Instandhaltungs-kategorie
Messung der statischen und dynamischen Kräfteinleitung in den Oberbau
Raddefekte
Detektion von stochastischen Radunrundheiten (Flachstellen, Abspaltungen, Ausbröckelungen)
Polygonisierung
Radgenaue Detektion des Luft- und Körperschalls

Quelle: Eigene Darstellung nach Innotec Systems GmbH, 2021b

Das Modul *AKUSTIK* besteht aus einem gleisnahen, wetterfesten Mikrofon mit Toleranzgrenzen nach Klasse 1 IEC 61672, dessen Zeitsignal direkt in die gemeinsame Datenerfassung eingespeist wird und dort für die weiteren Analysen zur Verfügung steht. Die Signalerfassung dient sowohl zur Erfassung von verschiedenen Pegelgrößen wie z.B. $L_{AF}(t)$, L_{Aeq} , L_{AFmax} , sowie zur Tonaufzeichnung.

Das Modul MONI ist ein Dehnungsmesstreifen gestütztes Messsystem zur Ermittlung der Schiene-Schwellen-Kräfte. Senkrecht unter dem Schienensteg wird hierbei das Kraftsignal, angeregt durch den Rad-Schiene-Kontakt, zwischen 0,1 Hz und 20 kHz gemessen. Hierfür werden an zwei Schwellen jeweils zwei Messstellen durch einen Austausch der Zwischenlagen installiert. Die Messstrecke hat eine Länge von bis zu 10 m und entspricht somit der Abwicklung eines Rades mit Raddurchmessern bis 1273 mm.

Anhand der erfassten Daten ist nicht nur die automatische Erfassung von Zugart, Zuggeschwindigkeit und Bremsbauart (K-Sohle vs. GG-Sohle) möglich, sondern auch eine Information zur Anzahl der Wagen, Gattung der einzelnen Wagen (Gattungszeichen der DB, z.B. Omm für offene Güterwagen), Anzahl der Achsen und insbesondere der Laufflächenfehler an den Rädern.

Die Module Akustik und MONI werden auf gleicher Höhe der Strecke verbaut, um eine zeitsynchrone Datenerfassung der Akustik- und Schienen-Schwelle-Kräfte zu garantieren. So

kann das Zeitsignal des Mikrofons direkt den Daten des Moduls MONI (inklusive einer Kennzeichnung der Achsen des vorbeifahrenden Zuges) zugeordnet werden.

Das Modul LASCA ermöglicht die Detektierung und Quantifizierung von Laufflächenfehlern. Es ist „über die Radkraftdiagnose aus dem Betriebseinsatz in der Lage jedes Rad vollautomatisch zu überwachen (Innotec Systems GmbH, 2021a).“ Es ermöglicht neben statistischen Datenerhebungen auch die Sofortmeldung von Grenzwertüberschreitungen (insbesondere detaillierte Erkennung und Quantifizierung von Flachstellen, Polygonen etc.). „Auch die gezielte Untersuchung von auffälligen Verschleißerscheinungen am Rad und Drehgestell sind über die Bewertung des dynamischen Laufverhaltens der Fahrzeuge möglich. (Innotec Systems GmbH, 2021a).“

Die Ergebnisse werden bei Auswertung in einzelnen Diagrammen je Modul dargestellt. Das Modul Moni zeigt die Körperanregung, das Modul Akustik das Luftschallsignal. Bei einem möglichen Laufflächenfehler sind in beiden Modulen Überhöhungen zu erkennen. Die Ursache hierfür kann in der Auswertung des Moduls Lasca anhand einer Flachstellendetektion überprüft werden. Diese Auswertungen werden zusätzlich mit den Informationen zu den Positionen von Wagenanfang und -ende überlagert dargestellt. So kann die Position des Laufflächenfehlers achsgenau zugeordnet werden.

5.8 Wheel Monitoring System (WMS) von Müller-BBM Rail Technologies

Von der Firma Müller-BBM Rail Technologies wird ein vollautomatisches Radüberwachungssystem für Vollbahnen, Straßenbahnen und U-Bahnen angeboten (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021a).

„Das WMS überwacht vollautomatisch den Zustand der Räder schienengebundener Fahrzeuge und detektiert Laufflächenschäden wie Flachstellen und Polygonisierung (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021a).“ Folgende Parameter werden durch das WMS erfasst:

- ▶ „Radlaufflächenschäden (z.B. Flachstelle, [EN 15313])
- ▶ Polygonisierung der Radlaufflächen ([UIC B 169/DT 405], [EN 15313]).

Zusätzlich speichert das WMS die Messergebnisse für alle Räder in einer Datenbank ab und erstellt zuverlässige, schnelle und verständliche Ergebnisse über

- ▶ Schäden an den Radlaufflächen,
- ▶ Verteilung der Radschäden in der Flotte und
- ▶ zeitliche Entwicklung dieser Schäden. (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021a)“

Die Detektion basiert auf der Erkennung der Impulsanregung, verursacht durch den Schlag zwischen Schiene und Rad. Hierzu wird zunächst aus einem Referenzsignal ein Referenzspektrum berechnet. Durch eine Korrelation des Spektrums während der Überfahrt mit dem Referenzspektrum können impulshafte Vorgänge, wie sie durch Flachstellen verursacht werden, als kurzzeitige Spitze in der Korrelationsfunktion sichtbar gemacht werden. Die Prüfung der Impulshaltigkeit wird bei diesem Ansatz somit durch Betrachtung der Korrelationsfunktionen als Maß für die Ausprägung einer Flachstelle herangezogen. Der so ermittelte Flachstellenindikator ist dabei proportional zur Schwere der Laufflächenschäden.

Abbildung 23 zeigt die technische Ausführung des WMS. „Spezielle entwickelte WMS Sensoren messen den Zustand der Radlaufflächen aller vorbeifahrenden Fahrzeuge (z.B. Detektion von Flachstellen und Polygonen). Ein Fahrzeugerkennungssystem erfasst die Fahrzeuge inklusive ihrer Nummern. Optionale Mikrofone erfassen den Geräuschpegel. (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021a)“

Abbildung 23: WMS-Sensor und Mikrofon



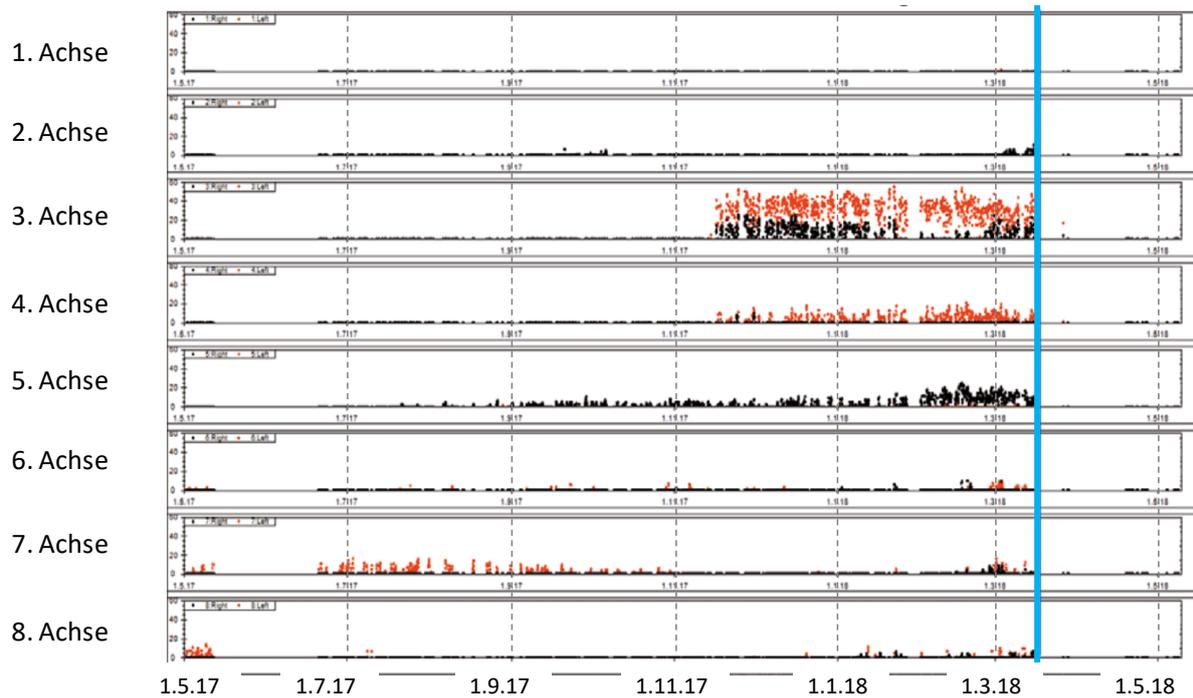
Quelle: (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021b)

Abbildung 24 zeigt eine Flachstellendetektion über der Zeit für ein Fahrzeug mit 8 Achsen. Die einzelnen Achsen sind von oben nach unten in den einzelnen Diagrammen dargestellt, die roten Datenpunkte symbolisieren die Ausprägung von Flachstellen für die linke Seite, die schwarzen Datenpunkte für die rechte Seite. Nach oben aufgetragen ist jeweils der Flachstellenindikator. Es sind insbesondere für die Räder an Achse 3 deutliche Flachstellen zu erkennen. Die blaue Kennzeichnung zeigt den Zeitpunkt der Radüberarbeitung bzw. Radwechsels an. Nach diesem Zeitpunkt werden nahezu keine Flachstellen mehr detektiert.

In Versuchsreihen des Herstellers konnten die mit dem Flachstellenindikator detektierten Flachstellen bei Radmessungen am Fahrzeug nachgewiesen, d.h. verifiziert werden.

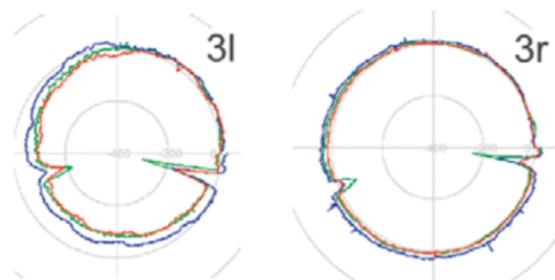
Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse dieser Verifikationsmessung. Dabei handelt es sich um eine Radrauheitsmessung am Rad, dargestellt in einem Polardiagramm. Die erkennbaren Spitzen deuten auf eine Flachstelle hin und können durch Überdrehen behoben werden.

Abbildung 24: Entwicklung der Flachstellen über der Zeit für alle Räder eines Fahrzeugs mit 8 Achsen



Rot: linke Seite, schwarz: rechte Seite, blau: Radüberarbeitung / Radwechsel (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021b)

Abbildung 25: Verifikationsmessung an den Rädern der 3. Achse



Quelle: (Müller-BBM Rail Technologies GmbH, 2021b)

5.9 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten unterschiedlicher Flachstellendetektionsverfahren

In diesem Abschnitt wurden zunächst grundlegende Verfahren betrachtet, die sich in wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit der Detektion von Flachstellen befassen. Hierbei wurden folgende verschiedene Ansätze recherchiert:

- ▶ Flachstellendetektion mittels hochfrequentem Messsignal (Kapitel 5.1)
- ▶ Flachstellendetektion mittels Körperschallmessung (Kapitel 5.2)
- ▶ Flachstellendetektion mittels Ultraschalloberflächenwellen und dem Dopplereffekt (Kapitel 5.3)
- ▶ Flachstellenerkennung mit Telematik (Kapitel 5.4)
- ▶ Flachstellenerkennung mittels Künstlicher Intelligenz (Kapitel 5.5)

Im Weiteren wurden auch kommerziell angebotene Systeme unterschiedlicher Hersteller beschrieben, die eine Flachstellendetektion anbieten. Hierbei wurden die Systeme

- ▶ Acramos® (Acoustic Railway Monitoring System) von psiacoustic in Kombination mit Argos® von HBK (Kapitel 5.6)
- ▶ Lasca (Lasergestützte Radkraftdiagnose) und Moni (Monitoringsystem) von INNotec Systems GmbH (Kapitel 5.7) und
- ▶ WMS (Wheel Monitoring System) von Müller-BBM Rail Technologies (Kapitel 5.8)

vorge stellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meisten Systeme eine Detektion über eine Messstelle an der Infrastruktur durchführen, lediglich eines der vorgestellten Systeme detektiert über eine Messung am Fahrzeug.

6 Durchführung von Messungen zur Bereitstellung der Datengrundlage

6.1 Randbedingungen der Messungen

Um eine Datengrundlage für die akustische Beurteilung von Flachstellen zu erlangen, wurde die Firma Müller-BBM Rail Technologies im Zuge dieses Projektes mit der Einrichtung einer Messstelle mit dem mobilen „Wheel Monitoring System“ (WMS, Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 5.8) beauftragt.

Hierzu wird an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld bei km 53,7 auf dem östlichen Gleis eine Messstelle eingerichtet. Dies ist eine stark befahrene Bahnstrecke mit günstigen Schallausbreitungsbedingungen, da keine Bebauung im näheren Umfeld der Messstelle vorliegt. Abbildung 26 zeigt die Strecke im Detail.

Abbildung 26: Lage der Messstelle an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld

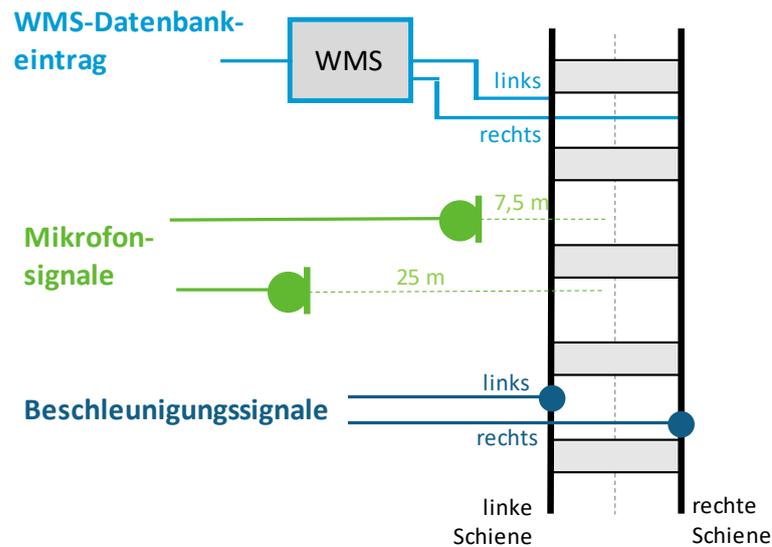


Quelle: <https://www.openrailwaymap.org/> und http://db.geopp.de/gnrailnav_servlet/GNOpenLayersV3

Das WMS-Messsystem wurde temporär im Zeitraum vom 19.12.2019 bis 17. Februar 2020 an der Messstelle installiert. Für die Analyse wurde der Zeitraum vom 13.1.2020 bis 9.2.2020 herangezogen, in welchem knapp 3000 Zugvorbeifahrten zu verzeichnen waren. Diese Datenmenge lieferte eine statistisch ausreichende Anzahl an Flachstellen für die geplanten Analysen.

Abbildung 27 zeigt den Messaufbau schematisch. Neben der WMS-Messung an beiden Schienen wurde eine akustische Messung im Abstand von 7,5 und 25 m durchgeführt. Ergänzend hierzu wurden für weiterführende Analysen Beschleunigungssensoren an beiden Schienen angebracht

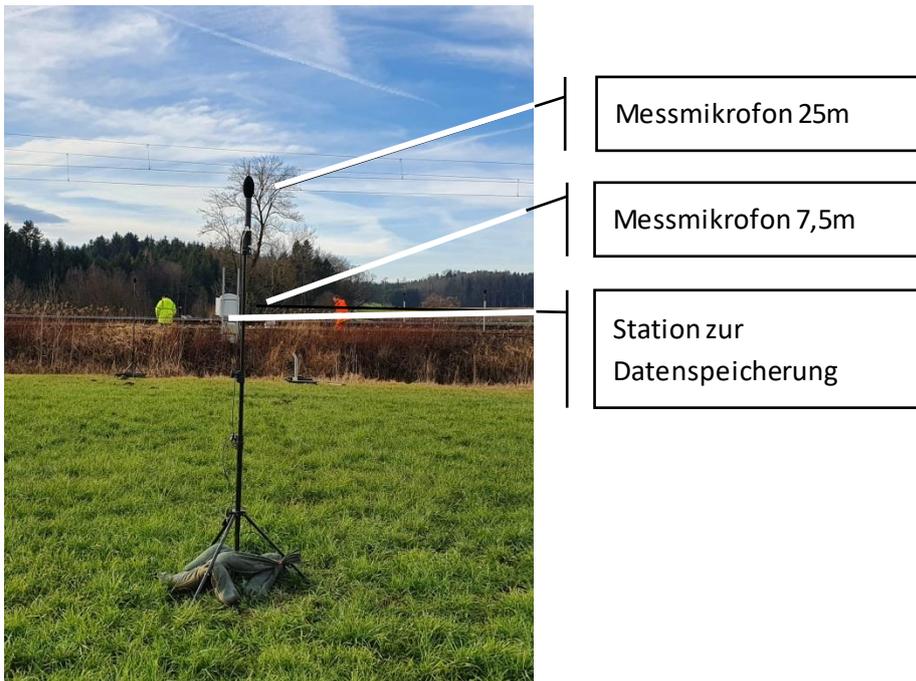
Abbildung 27: Schematischer Messaufbau für die Datenerfassung



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

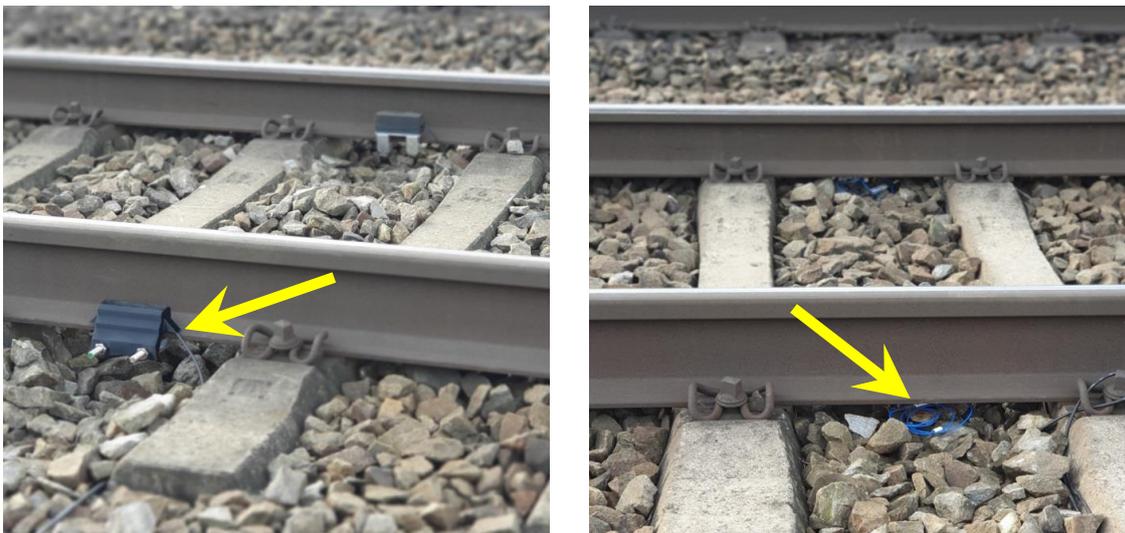
Abbildung 28 zeigt die eingerichtete Messstelle vor Ort und Abbildung 29 die Aufnehmer an den Schienen für den Flachstellenindikator des WMS-Messsystems (links) und für die Beschleunigungsmessung (rechts).

Abbildung 28: Messstelle mit Messmikrofonen und Messstation an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Abbildung 29: Messaufnahme des WMS-Messsystems (links) und der Beschleunigungsmessung (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

6.2 Datenbasis

Das WMS lieferte hierbei zu einer Datenbank zu allen im Zeitraum vom 13.01.2020 bis 09.02.2020 vorbeifahrenden Zügen unter anderem die in Tabelle 7 aufgelisteten Daten. Diese beinhalten allgemeine Daten über den Zug wie beispielsweise die Zuglänge und Wagenanzahl, sowie die Detektion von Flachstellen mittels des Flachstellenindikators, die Radrauheiten und die entstandenen Schallimmissionen.

Neben der Wagenzahl wird bei jeder Vorbeifahrt auch die Achszahl mit den jeweils zugehörigen Vorbeifahrtzeiten vom Messsystem festgehalten. Für jede Achse wird wiederum die gemessene Radrauheit und der Wert des Flachstellenindikators ausgelesen. So finden sich in Tabelle 7 Eintrag 16, 17 und 18 Messdatenreihen für alle Achsen der Zugvorbeifahrt zu Zeitpunkt, Radrauheit und Flachstellenindikator.

Die Radrauheit ist eine Größe, die die Oberflächenstruktur der Radlauffläche beschreibt. Durch das Überrollen der rauen Radlauffläche auf einer rauen Schienenfahrfläche werden dynamische Kräfte erzeugt, die sowohl Rad als auch Schiene zum Schwingen anregen. Die Radrauheit wird als Pegel der akustischen Rauheit in Dezibel angegeben.

Der Flachstellenindikator ist eine von Müller MMB entwickelte Größe, welche durch eine Messung der Impulsanregung vom Rad auf die Schiene erfolgt und nach Untersuchungen von Müller-MMB hoch mit der geometrischen Ausprägung einer Flachstelle korreliert. Der Zusammenhang zum subjektiv wahrgenommenen Geräusch, das die Flachstelle bei Vorbeifahrt auslöst, wurde jedoch noch nicht untersucht. Ein Wert von unter 5 wird hierbei nicht als Flachstelle gewertet, ab einer Größe von 5 kann man vom Vorhandensein einer Flachstelle ausgehen. Ob diese jedoch auch akustisch auffällig ist, soll im weiteren Verlauf überprüft werden.

Aus dem Array aller gemessenen Flachstellenindikatoren werden verschiedene Werte direkt in der Datenbank angegeben, wie etwa der Wert und die Achse der maximal detektierten Flachstelle (Tabelle 7, Eintrag 11, 12) oder die Menge aller detektierten Flachstellen mit den zugehörigen Zeiten (Tabelle 7, Eintrag 15, 16) oder die Summe aller detektierten Flachstellenindikatoren (Tabelle 7, Eintrag 13). Des Weiteren werden verschiedene Pegelwerte der gesamten Zugvorbeifahrt angegeben, wie z.B. der Maximalpegel L_{max} , der äquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} oder der Vorbeifahrtexpositionspegel TEL (Tabelle 7, Eintrag 21, 22 und 23).

Tabelle 7: Ergebnisliste der WMS-Messung, welche in Datenbank abgespeichert sind

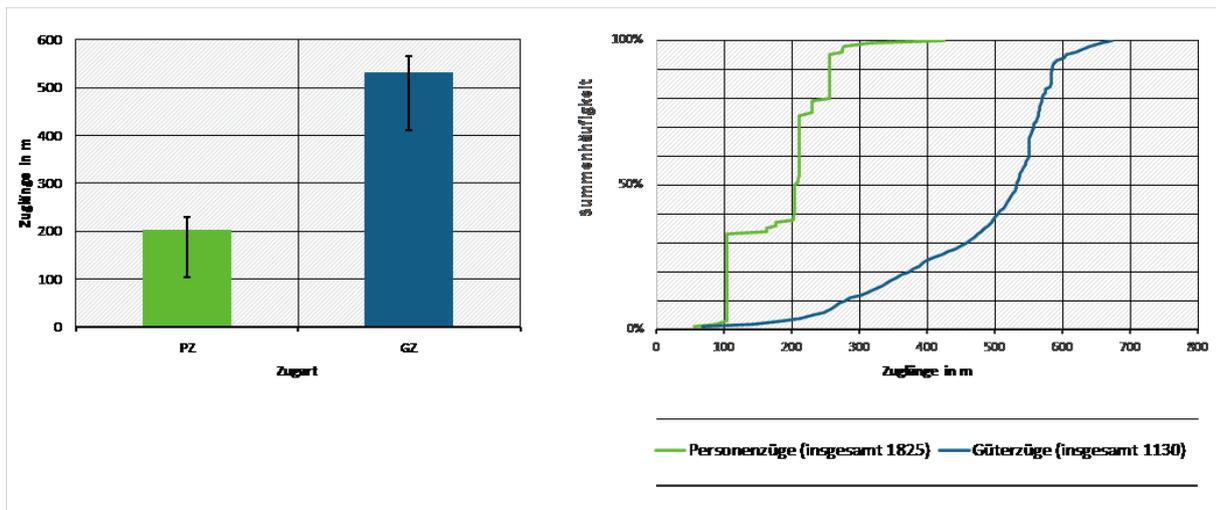
#	Bezeichnung in Datenbank	Beschreibung
01	Id	Identifikationsnummer der Vorbeifahrt
02	Messname	Erzeugter Messname der Messstation
03	Messbeginn	Zeitpunkt ab erstem Sensorsignal + 5 Sekunden Vorlaufzeit
04	Zugkategorie	Unterscheidung Güterzug / Personenzug
05	Geschwindigkeit	Mittlere gemessene Zuggeschwindigkeit in km/h
06	Zuglänge	Länge des gesamten Zuges in m

#	Bezeichnung in Datenbank	Beschreibung
07	Achsenzahl	Anzahl der Achsen des vorbeifahrenden Zuges
08	Wagenzahl	Anzahl der Wagen des vorbeifahrenden Zuges
09	Fahrtrichtung	Unterscheidung der Vorbeifahrtrichtung „true“ entspricht der Norm: Rechtsfahrten
10	Linke Schiene	Unterscheidung zwischen Messung linke Schiene („true“) bzw. rechte Schiene („false“)
11	Max Flachstelle	Wert des maximal detektierten Flachstellenindicators
12	Achse Max Flachstelle	Achse, an welcher der maximale Flachstellenindikator detektiert wurde
13	Summe Flachstellen	Summenbildung aller detektierten Flachstellenindikatoren der Zugvorbeifahrt
14	Flachstellen Achsen	Menge aller Achsen, an welchen Flachstellen detektiert wurden
15	Flachstellenzeiten	Zugehörige Zeiten, an welchen die Flachstellen detektiert wurden
16	Achszeiten	Array aller Zeiten je Achse
17	Radrauheiten	Array aller Radrauheiten je Achse
18	Radflachstellen	Array aller Flachstellenindikatoren je Achse
19	T_p	Geometrische Vorbeifahrtdauer
20	Ereignisdauer	Expositionsdauer, die zwischen den Zeitpunkten liegt, für welche der Schalldruckpegel um 10 dB unterhalb des Schalldruckpegels am Zuganfang bzw. Zugende (ISO 3095)
21	L_{max}	Spitzenpegel während der Zugvorbeifahrt mit Zeitbewertung fast
22	L_{Aeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel für T_p
23	TEL	Vorbeifahrtexpositionspegel

Nach Selektion der Vorbeifahrten hinsichtlich Zugbegegnungen und Zugbeschleunigungen lag für den Messzeitraum eine Datengrundlage von insgesamt 2955 Zugvorbeifahrten innerhalb des Messquaders vor, hiervon waren 1130 Vorbeifahrten von Personenzügen und 1825 Vorbeifahrten von Güterzügen.

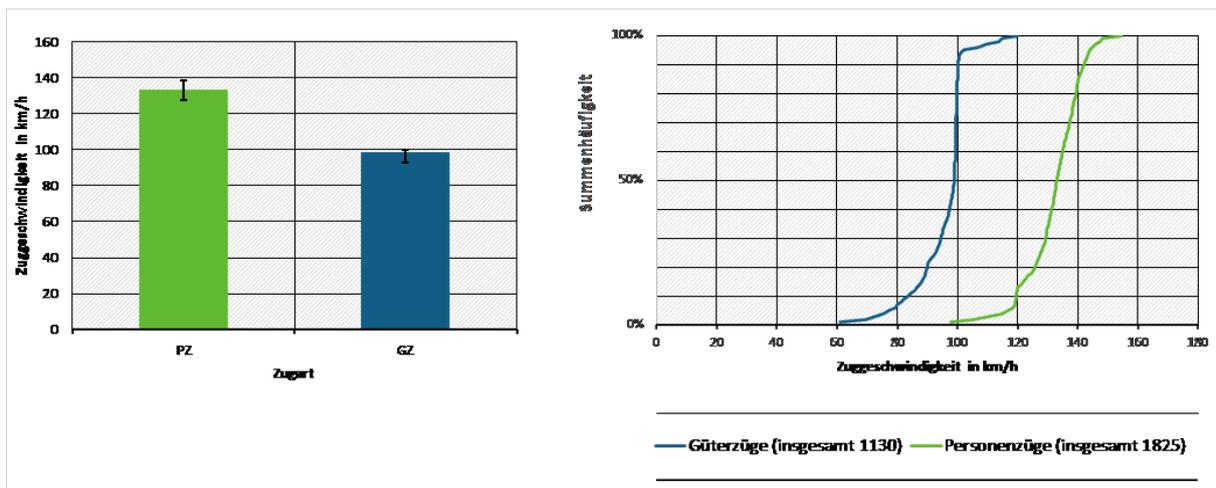
Die Länge der vorbeifahrenden Züge lag hierbei zwischen 32 und 673 m, die Geschwindigkeit zwischen 43 und 154 km/h. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen eine Analyse aller 1130 Personenzüge und 1825 Güterzüge hinsichtlich der Verteilung der Zuglängen und Vorbeifahrtgeschwindigkeiten. Im Mittel (50%-Wert) betrug somit die Zuglänge für Personenzüge 203 m und für Güterzüge bei 531 m. Die mittlere Geschwindigkeit betrug für die Personenzüge 133 km/h und für die Güterzüge 99 km/h.

Abbildung 30: Analyse der Datenbasis hinsichtlich Zuglängen



Links: Darstellung der der mittleren Zuglängen (50%- Wert mit 25%- und 75%-Interquartil) aller Vorbeifahrten im Messzeitraum Rechts: Detaillierte Darstellung der Summenhäufigkeiten aller Zuglängen der 1825 Personenzüge und 1130 Güterzüge. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Abbildung 31: Analyse der Datenbasis hinsichtlich Geschwindigkeiten



Links: Darstellung der der mittleren Zuggeschwindigkeiten (50%- Wert mit 25%- und 75%-Interquartil) aller Vorbeifahrten im Messzeitraum Rechts: Detaillierte Darstellung der Summenhäufigkeiten aller Zuggeschwindigkeiten der 1825 Personenzüge und 1130 Güterzüge. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Im Folgenden werden die durch den Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies detektierten Flachstellen statistisch ausgewertet. Die maximal detektierten Werte des Flachstellenindikators beliefen sich bei den Personenzügen zwischen 5 und 40, für Güterzüge zwischen 5 und 196.

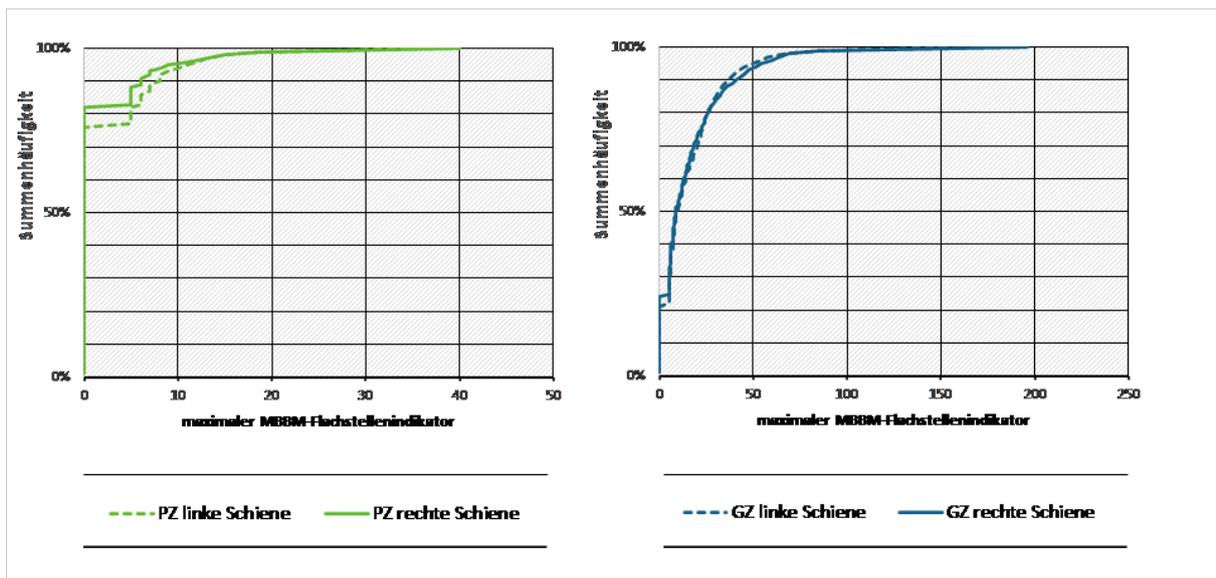
Abbildung 32 zeigt die Summenhäufigkeiten aller mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies maximal an einem vorbeifahrenden Zug detektierten Flachstellen. Der dargestellte Prozentsatz veranschaulicht somit den Prozentsatz an Vorbeifahrten, bei welchen der jeweilige Flachstellenindikator angezeigt wurde.

Somit wurde bei den Personenzügen insgesamt bei 80 % der Vorbeifahrt keine Flachstelle detektiert (Flachstellenindikator = 0), bei den Güterzügen hingegen weisen nur 20 % keine

Flachstelle auf (Flachstellenindikator = 0). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei etwa 20 % aller Personenzugvorbeifahrten (428 von 1825) und bei etwa 80 % aller Güterzugvorbeifahrten (888 von 1130) Flachstellen durch das Messsystem detektiert wurden.

Für beide Zugarten finden sich für die rechte und linke Schiene vergleichbare Werte (durchgezogene gegenüber gestrichelten Linien).

Abbildung 32: Analyse der Datenbasis hinsichtlich der mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies detektierten Flachstellen



Darstellung der Summenhäufigkeit aller maximalen Flachstellenindikatoren nach Müller-BBM Rail Technologies für die 1825 Personenzüge (links) und 1130 Güterzüge (rechts). Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

6.3 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten für die durchgeführten Messungen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden von Müller-BBM Rail Technologies Messungen mit dem WMS (Wheel Monitoring System) durchgeführt. Zusätzlich wurde am Gleis die Schienenbeschleunigung aufgezeichnet. Es erfolgte eine statistische Auswertung der Zusammensetzung der Zugvorbeifahrten hinsichtlich Güter- und Personenverkehr bzw. hinsichtlich der Flachstellendetektion mittels des WMS.

Im Folgenden erfolgt eine Kurzzusammenfassung der Datengrundlage.

Messort:	Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld bei km 53,7 auf dem östlichen Gleis
Messsignale:	WMS linke Schiene, WMS rechte Schiene, Mikrofon Abstand 7,5m, Abstand 25m, Beschleunigungssignal an der linken Schiene, an der rechten Schiene
Messzeitraum:	ca. 1 Monat
Zugvorbeifahrten:	ca. 3000, Güterzüge insgesamt 1130, Personenzüge insgesamt 1825
Flachstellendetektion mittels WMS (Flachstellenindikator ≥ 5):	Güterzüge: 888 von 1130 (79%) Personenzüge: 428 von 1825 (23%)

Der mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies ermittelte Prozentsatz an detektierten Flachstellen von 79 % für Güterzüge und 23 % für Personenzüge erscheint hoch. Jedoch erfolgte damit noch keine Einstufung, ob es sich hierbei um akustisch auffällige Flachstellen handelt. Mit diesen Messungen wurde nun eine Datenbasis erstellt, auf deren Grundlage die weiteren Untersuchungen zur subjektiven Auffälligkeit von Flachstellen erfolgen können.

7 Evaluierung der Flachstellenakzeptanz

Der wesentliche Ansatz dieses Forschungsvorhaben ist es „akustisch auffällige“ Flachstellen zu erkennen und möglich zeitnah Instand zu halten. Deshalb wird in dem folgenden Kapitel untersucht, inwieweit auftretende Flachstellen subjektiv als noch akzeptabel betrachtet werden. Dies wird im Weiteren als „Flachstellenakzeptanz“ bezeichnet.

Um diese Flachstellenakzeptanz zu evaluieren, stellte sich zunächst die Frage, ob und wenn ja mit welchen akustischen Größen die Detektion einer Flachstelle geleistet werden kann. Um die Auffälligkeit einer Flachstelle möglichst gut zu beschreiben, sollen vielfältige Analysegrößen des Schalldrucksignals, wie etwa klassische Schalldruckpegelgrößen und auch psychoakustische Empfindungsgrößen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Zudem wird die Schienenbeschleunigung als Messgröße herangezogen, um sicherzustellen, dass keine Schlaggeräusche am Aufbau zu einer Fehldetektion führen.

In einem zweiten Schritt soll dann die detektierte Flachstelle auch hinsichtlich ihrer Akzeptanz bzw. ihrer akustischen Lästigkeit eingestuft werden. Auch hier stellt sich dann die Frage, welche Messgrößen maßgeblich für die Lästigkeit der vorliegenden Flachstelle verantwortlich sind. Jedoch müssen diese beiden Fragestellungen zwangsläufig nicht mit denselben Größen gelöst werden. Deshalb wurden die beiden folgenden Kernfragen formuliert, welche in den Kapiteln 7.2 und 7.3 detailliert behandelt werden.

*Anhand welcher (Mess- bzw. Analyse-) Größen können **akustisch auffällige Flachstellen detektiert** werden?*

*Mit welchen (Mess- bzw. Analyse-) Größen kann die **Lästigkeit einer akustisch auffälligen Flachstelle** beschrieben werden?*

Vorab soll jedoch zunächst auf die zur Klärung der Fragestellungen herangezogenen Analysegrößen eingegangen werden.

7.1 Analysen der Signale bei Vorbeifahrten mit Flachstellen

7.1.1 Die Schalldruckpegelgrößen

Der Maximalpegel ist der A-bewertete Spitzenpegel mit der Zeitbewertung „fast“, welcher in dem Signalausschnitt der Vorbeifahrt mit Flachstellen auftritt und in dB(A) angegeben wird.

Der 2-kHz-Oktavpegel gibt den linearen (unbewerteten) Schalldruckpegel im Oktavband mit der Mittenfrequenz von 2kHz an.

Der Crest-Faktor (oder auch Scheitelfaktor) gibt das Verhältnis des lokalen Maximalwerts einer Größe zum Effektivwert an. Innerhalb dieser Studie wurde der Crest-Faktor für das Verhältnis zwischen $L_{A\max}$ und L_{Aeq} bestimmt.

7.1.2 Die psychoakustischen Größen (Zwicker und Fastl, 1999)

Die Lautheit gehört zu den grundlegenden psychoakustischen Empfindungsgrößen und besitzt einen großen Einfluss auf die Lästigkeit. Grundsätzlich ist die Lautheit einer Zugvorbeifahrt zwar hoch korreliert mit dem gemessenen Pegel, jedoch können Geräusche mit demselben Pegel durchaus unterschiedliche Lautheiten hervorrufen. So ist die Lautheit zum Beispiel zusätzlich abhängig von der Frequenz, der Bandbreite und der Dauer des Signals. Ein Sinuston ruft bei 100 Hz mit 40 dB in etwa dieselbe Lautheit hervor wie ein Sinuston bei 1000 Hz mit nur 20 dB. Die Lautheit wird in der Einheit „sone“ angegeben, was vom lateinischen sonare (klingen) abgeleitet ist. Der Referenzwert 1 sone bezieht sich hierbei auf die Lautheit eines Sinustons bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Schalldruckpegel von 40 dB. Die Lautheit spiegelt - wie alle anderen Empfindungsgrößen - Empfindungen im richtigen Verhältnis wider: so bedeutet eine Verdoppelung des Zahlenwerts auch tatsächlich eine Verdoppelung der Empfindung.

Die Berechnung der Lautheit ist in der DIN 45631 genormt. In die Berechnung der Lautheit fließen neben den spektralen Eigenschaften eines Geräuschs auch zeitliche Parameter des Signals mit ein.

Die Schärfe ist eine weitere grundlegende Empfindungsgröße. Eine Haupteinflussgröße der Schärfe ist die spektrale Zusammensetzung eines Geräuschs, die sogenannte Klangfarbe. Zur Modellierung der Schärfe wird die Lautheit über einer gehörgerechten Frequenzskalierung (der Barkskala) aufgetragen und der Schwerpunkt der Fläche gebildet. So geht neben der Frequenz des Geräuschs insbesondere auch die Bandbreite des Geräuschs in die Berechnung der Schärfe mit ein. Die Schärfe wird in der Einheit „acum“ angegeben, entsprechend dem lateinischen Wort acer (scharf). Der Referenzwert 1 acum bezieht sich auf ein Schmalbandrauschen bei einer Frequenz von 1000 Hz und einem Schalldruckpegel von 60 dB.

Zur einheitlichen Berechnung der Schärfe liegt die Norm DIN 45692 „Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe“ vor.

Die Hörempfindungen Schwankungsstärke wird insbesondere durch amplituden- oder frequenzmodulierte Signale hervorgerufen. Wird ein Ton bei einer Frequenz von 1000 Hz in seiner Amplitude zu 100 % moduliert und die Geschwindigkeit dieser Modulation verändert, so kann das Gehör bei langsamen Modulationsfrequenzen zunächst der Schwankung sehr gut folgen und es entsteht die Empfindung der Schwankungsstärke. Diese Empfindung ist bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz am deutlichsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das menschliche Gehör besonders sensibel auf die Modulationsfrequenz von Sprache bei normaler Sprechgeschwindigkeit (ca. 4 Silben pro Sekunde) ist. Die Schwankungsstärke wird in der Einheit „vacil“ angegeben, entsprechend dem lateinischen Wort vacillare (schwanken). Der Referenzwert 1 vacil bezieht sich auf einen zu 100%-amplitudenmodulierten 1kHz-Sinuston und einem Schalldruckpegel von 60 dB.

Die Hörempfindung Rauigkeit entsteht, wenn bei einem schwankenden Geräusch die Geschwindigkeit der (Frequenz- oder Amplituden-) Modulation in der Art und Weise erhöht wird, dass das Gehör dieser Modulation nicht mehr folgen kann. Es entsteht ein raues, schnarrendes Geräusch. Das Maximum für die Sensitivität der Rauigkeitsempfindung liegt bei einer Modulationsfrequenz von 70 Hz. Steigt die Modulationsfrequenz über 300 Hz, verschwindet die Hörempfindung Rauigkeit und es ist ein Mehrklang wahrnehmbar. Die Rauigkeit wird in der Einheit „asper“ angegeben, entsprechend dem lateinischen Wort „asper“ (rau). Der Referenzwert 1 asper bezieht sich auf einen zu 100 %-amplitudenmodulierten 1 kHz- Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 60 dB.

7.1.3 Das Schienenbeschleunigung

Die Schienenbeschleunigung gibt den an der Oberfläche der Schiene gemessenen Körperschall in m/s^2 wieder. Neben der hörbaren und messbaren Luftschwingung (Schallimmission) kann Schall auch in Festkörpern weitergeleitet werden. Durch die plastische Verformung eines Körpers (hier der Schiene) entsteht Körperschall. Für impulshaltige Schallentstehungsmechanismen, wie beispielsweise bei einer Flachstelle, ist das Beschleunigungssignal von Bedeutung. Dieses gibt an, ob und wie stark ein Körper von der bisherigen Schwingungsgeschwindigkeit abgebremst oder beschleunigt wird. Diese Beschleunigung wird in der vorliegenden Studie am Schienenfuß vertikal durch einen Accelerometer gemessen. Körperschall wird durch Vibration spürbar oder durch Umwandlung in Luftschall hörbar. Das Beschleunigungssignal hat demnach große Ähnlichkeit mit den erzeugten Schallemissionen. Durch das Aufschlagen der Flachstelle eines Rades auf die Schiene ist eine kurzzeitige Erhöhung der Schienenbeschleunigung zu erwarten.

7.2 Detektion akustisch auffälliger Flachstellen

7.2.1 Herangehensweise

Zentrale Fragestellung dieses Abschnitts ist anhand welcher akustischen oder psychoakustischen Mess- bzw. Analysegrößen akustisch wahrnehmbare Flachstellen detektiert werden können. Hierfür wurden ausführliche Signalanalysen durchgeführt, um diese dann für die Signale mit und ohne wahrnehmbaren Flachstellen im Anschluss zu vergleichen. So sollen die relevanten Größen, hinsichtlich derer sich Signale mit und ohne akustisch wahrnehmbare Flachstellen unterscheiden, extrahiert werden.

7.2.2 Statistische Signifikanzprüfung zur Extraktion der relevanten Messgrößen

Eine Signifikanzprüfung wird grundsätzlich herangezogen, um zu überprüfen, ob sich zwei Datenmengen bezüglich der in Augenschein genommenen Größe statistisch voneinander unterscheiden. Ziel dieses Ansatzes war es hier also relevante Messgrößen zu extrahieren, die sich bei Signalen **mit akustisch auffälligen Flachstellen** von denen **ohne akustisch auffällige Flachstellen** statistisch unterscheiden. Hierfür wurden aus den zur Verfügung stehenden Signalen zwei Stichproben mit je 14 Signalen ausgewählt. Kriterium der ersten Stichprobe war, dass akustisch **keine Flachstelle wahrnehmbar** ist, Kriterium der zweiten Stichprobe hingegen, dass akustisch **eine Flachstelle wahrnehmbar** ist. Anhand der Signifikanzprüfung zwischen diesen beiden Stichproben in Bezug auf eine spezielle Messgröße kann somit jeweils für diese Messgröße eine Aussage darüber getroffen werden, ob bzw. wie sehr sich die beiden Stichproben hinsichtlich dieser Messgröße voneinander unterscheiden. Je geringer der resultierende p-Wert bei einer Signifikanzprüfung ausfällt, desto deutlicher ist der Unterschied hinsichtlich der betrachteten Messgröße.

Ein signifikanter Unterschied hinsichtlich einer Messgröße kann somit auch auf eine mögliche Messgröße zur Unterscheidung zwischen akustisch auffälligen und akustisch nicht auffälligen Flachstellen hindeuten. Die Stichproben wurden hinsichtlich verschiedener Messgrößen auf signifikante Unterschiede überprüft.

Hierfür wurden je 14 Signale mit einer nach Müller-BBM Rail Technologies detektierten Flachstelle ($FL > 5$) ausgewählt, die an genau dieser Stelle jedoch **keine hörbare Flachstelle** bzw. **eine akustisch auffällige Flachstelle** aufwiesen. Für den detektierten Flachstellenzeitpunkt t_{FL} wurden folgende Messwerte des Signals erhoben:

- ▶ der A-bewertete Schalldruckpegel $L_A(t_{FL})$
- ▶ die psychoakustische Lautheit $N(t_{FL})$
- ▶ die psychoakustische Schärfe $S(t_{FL})$
- ▶ die psychoakustische Schwankungsstärke $F(t_{FL})$
- ▶ die psychoakustische Rauigkeit $R(t_{FL})$
- ▶ die Schienenbeschleunigung $a(t_{FL})$
- ▶ der Pegel der 2-kHz-Oktave $L_{2kHz}(t_{FL})$

Zusätzlich wurde der Mittelwert L_{Aeq} der gesamten Zugvorbeifahrt ausgewertet und das Pegelverhältnis $L_A(t_{FL})/L_{Aeq}$ gebildet, um damit zu überprüfen, ob der Pegel zum Zeitpunkt der hörbaren bzw. nicht hörbaren Flachstelle den Mittelwert der gesamten Zugvorbeifahrt überschreitet.

Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen zunächst die analysierten Messgrößen für die beiden unabhängigen Stichproben.

Tabelle 8: Ergebnisse der Analysen für die Stichprobe „keine Flachstelle wahrnehmbar“

Signal	L_{Aeq} in dB	$L_A(t_{FL})$ in dB	$L_A(t_{FL}) /$ L_{Aeq}	$L_{2kHz}(t_{FL})$ in dB	$a(t_{FL})$ in m/s^2	$N(t_{FL})$ in sone	$S(t_{FL})$ in acum	$F(t_{FL})$ in vacil	$R(t_{FL})$ in asper
01	83,98	82,40	0,98	82,89	364,51	64,90	4,00	0,26	0,23
02	80,62	83,70	1,04	84,23	1465,70	65,40	3,90	0,23	0,38
03	80,04	83,50	1,04	83,16	539,988	66,30	4,10	0,23	0,29
04	87,26	81,10	0,93	82,38	267,80	64,80	4,20	0,27	0,36
05	79,62	81,52	1,02	79,88	245,02	59,00	3,80	0,29	0,22
06	87,56	83,50	0,95	92,63	643,34	69,60	4,30	0,19	0,26
07	82,41	82,04	1,00	79,59	539,14	65,20	4,60	0,23	0,33
08	83,98	80,90	0,96	77,59	430,50	58,70	4,00	0,18	0,29
09	80,62	82,50	1,02	81,95	388,46	63,53	3,90	0,28	0,28
10	82,41	85,60	1,04	76,01	373,12	75,55	4,30	0,28	0,35
11	83,44	81,03	0,97	82,07	307,35	61,63	4,00	0,27	0,23
12	82,15	80,94	0,99	78,93	252,05	57,60	4,15	0,23	0,27
13	79,64	78,14	0,98	79,67	241,94	51,59	3,70	0,21	0,3
14	86,27	90,88	1,05	89,55	869,94	97,16	4,90	0,27	0,33

Tabelle 9: Ergebnisse der Analysen für die Stichprobe „Flachstelle wahrnehmbar“

Signal	L_{Aeq} in dB	$L_A(t_{FL})$ in dB	$L_A(t_{FL}) /$ L_{Aeq}	$L_{2kHz}(t_{FL})$ in dB	$a(t_{FL})$ in m/s^2	$N(t_{FL})$ in sone	$S(t_{FL})$ in acum	$F(t_{FL})$ in vacil	$R(t_{FL})$ in asper
01	83,44	91,40	1,10	92,22	3506,98	105,70	6,50	0,54	0,08
02	89,29	90,70	1,02	88,7	1401,11	101,90	4,80	0,30	0,31
03	85,86	85,3	0,99	85,76	2036,01	73,50	4,40	0,49	0,31
04	82,15	87,60	1,07	87,53	1381,69	77,60	5,10	0,52	0,34
05	82,58	84,4	1,02	85,77	506,97	71,60	5,60	0,49	0,38

Signal	L _{Aeq} in dB	L _A (t _{FL}) in dB	L _A (t _{FL}) / L _{Aeq}	L _{2kHz} (t _{FL}) in dB	a (t _{FL}) in m/s ²	N (t _{FL}) in sone	S (t _{FL}) in acum	F (t _{FL}) in vacil	R (t _{FL}) in asper
06	88,92	91,01	1,02	89,67	1820,71	107,23	4,97	0,42	0,49
07	79,64	85,53	1,07	87,66	416,42	80,84	4,30	0,40	0,55
08	79,38	88,68	1,12	89,03	2275,98	93,13	4,93	0,30	0,5
09	85,26	90,02	1,06	93,04	2436,10	96,37	5,38	0,82	0,37
10	86,27	91,9	1,07	93,54	1792,20	103,70	4,90	0,46	0,37
11	90,03	89,2	0,99	87,54	1285,64	96,80	5,30	0,45	0,48
12	84,97	85,94	1,01	87,94	260,34	73,56	4,45	0,37	0,28
13	78,42	82,53	1,05	83,55	174,85	69,79	3,88	0,46	0,25
14	79,80	80,7	1,01	79,48	353,37	62,20	3,98	0,44	0,24

Im Folgenden wurden nun Signifikanzprüfungen zwischen diesen beiden Stichproben für alle analysierten Messgrößen durchgeführt.

Auf einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) resultierte zwischen den beiden Stichproben für alle Größen, ausgenommen der Rauigkeit, ein signifikanter Unterschied (p -Wert < 5 %).

Dargestellt ist dies in Tabelle 10 jeweils für beide durchgeführten Signifikanzprüfungen, dem t-Test und dem Mann-Whitney-U-Test. Vorab wurde anhand des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft. Bei nicht vorliegender Normalverteilung der Stichproben ist das Ergebnis des Mann-Whitney-U-Tests vorzuziehen.

Entsprechend der Signifikanzprüfung finden sich somit die signifikantesten Unterschiede zwischen den beiden Stichproben für die Messgröße Schwankungsstärke ($p=0,001$), gefolgt von der Lautheit ($p=0,021$), dem Pegel des 2-kHz-Oktavbands ($p=0,099$), der Schärfe ($p=0,147$) und dem A-bewerteten Pegel ($p=0,192$). Im weiteren Vorlauf könnten diese Größen somit als mögliche Deskriptoren zur Unterscheidung zwischen akustisch auffälligen und akustisch nicht auffälligen Flachstellen fungieren.

Tabelle 10: Signifikanzprüfung zwischen den beiden Stichproben „kein Flachstelle wahrnehmbar“ und „Flachstelle wahrnehmbar“

analysierte Größe	Normalverteilung der Stichproben (Shapiro-Wilk-Test)	p-Wert	
		t-Test	Mann-Whitney-U-Test
L _A (t _{FL})	nein	0,001	0,192
L _A (t _{FL}) / L _{Aeq}	ja	0,561	1,225
L _{2kHz} (t _{FL})	ja	0,099	0,173
a (t _{FL})	nein	0,493	2,119

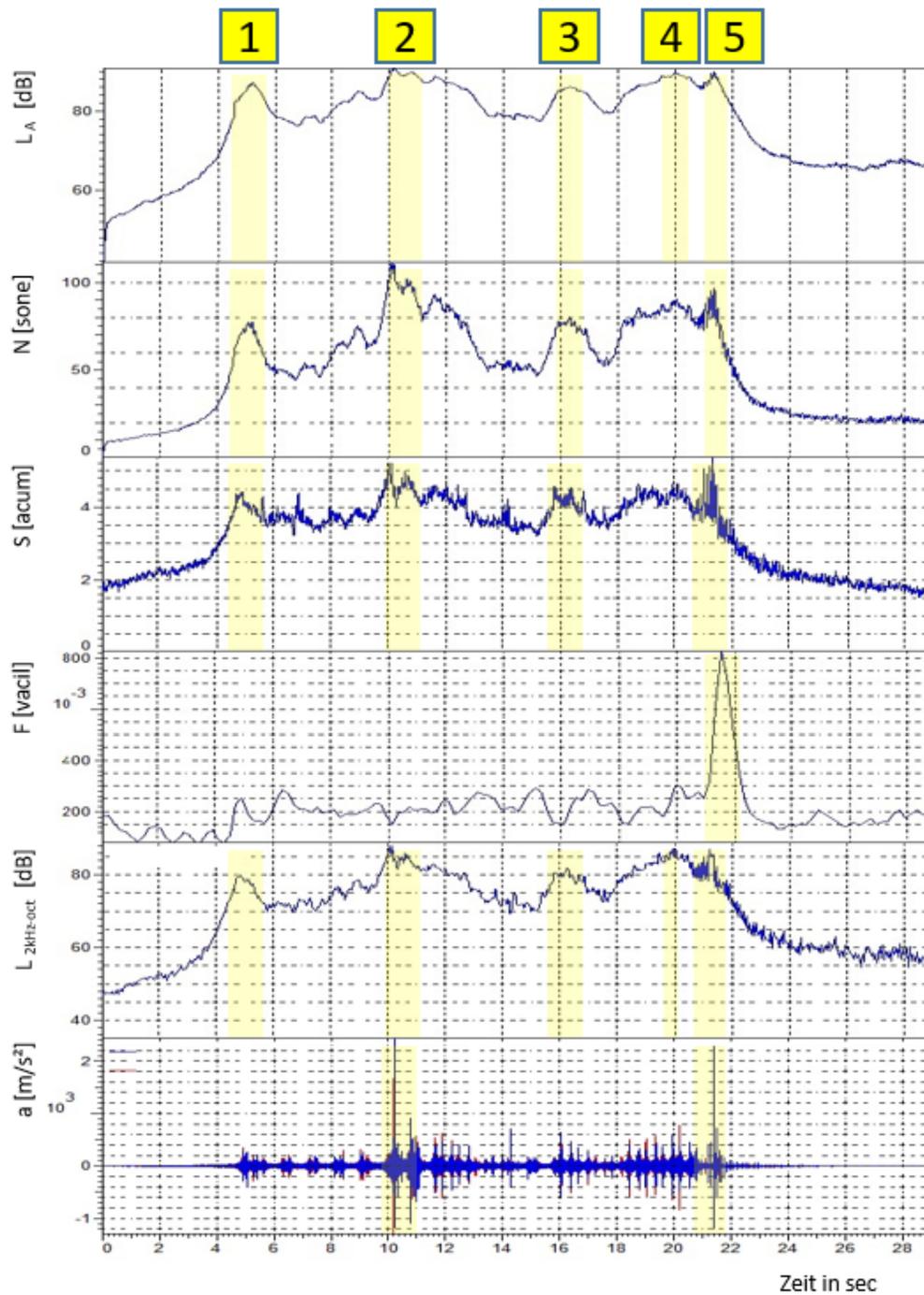
analysierte Größe	Normalverteilung der Stichproben (Shapiro-Wilk-Test)	p-Wert	
		t-Test	Mann-Whitney-U-Test
N (t_{FL})	nein	0,037	0,021
S (t_{FL})	ja	0,147	0,205
F (t_{FL})	nein	0,002	0,001
R (t_{FL})	ja	11,850	8,458

7.2.3 Detektion von Flachstellen basierend auf einer Maxima-Analyse

Anhand dieser statistischen Analysen konnte nun abgeschätzt werden, welche Größen für die Detektion einer Flachstelle als relevant einzustufen sind. Um eine Detektion anhand dieser Größen durchzuführen, wurde 21 weitere willkürlich gewählte Signale, herangezogen und hinsichtlich ihrer Maxima in den relevanten Größen analysiert. Zur Entwicklung des Detektionsansatzes wurden händische Analysen durchgeführt. Auf diese Weise können im Anfangsstadium der Analyse mögliche Fehler durch eine Automatisierung verhindert werden. Ziel ist es zunächst Zusammenhänge zwischen den automatisierbaren Messgrößen aufzudecken, die eine Detektion von akustisch auffälligen Flachstellen ermöglichen. In einem zweiten Schritt steht dann die Automatisierung dieser erarbeiteten Zusammenhänge mit einer möglichst geringen Fehleranfälligkeit.

Für die händische Analyse wurden die Zeitverläufe maßgeblicher Messgrößen hinsichtlich aller deutlich auftretenden Maxima innerhalb der gesamten Zugvorbeifahrt betrachtet. Abbildung 33 zeigt als Beispiel die Zeitverläufe der relevanten Messgrößen Schwankungsstärke, Lautheit, 2-kHz-Oktavpegel, Schärfe und A-bewerteten Pegel für eine Vorbeifahrt übereinander aufgetragen. Zusätzlich wurde der Zeitverlauf der Beschleunigung an der Schiene als Parameter herangezogen, um die Datenbasis durch eine zweite Eingangsmessgröße zu stabilisieren. Hinzu kommt, dass durch eine alleinige akustische Betrachtung des Schallsignals Verwechslungen mit ähnlichen Geräuschcharakteristiken, die bei einer Zugvorbeifahrt auftreten können, wie beispielsweise dem Flattern eines Spanngurtes, auftreten könnten.

Abbildung 33: Zeitverläufe der relevanten Messgrößen und Markierung aller deutlichen Maxima



Zeitverläufe der Messgrößen von oben nach unten: A-bewerteter Schalldruckpegel L_A in dB, Lautheit N in sone, Schärfe S in acum, Schwankungsstärke F in vacil, 2-kHz-Oktavpegel $L_{2\text{kHz-oct}}$ in dB und Beschleunigung a in m/s^2 . In den gelb markierten Bereich findet sich in den jeweiligen Messgrößen ein deutliches Maximum. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Auf diese Art und Weise wurden die Zeitverläufe aller relevanten Messgrößen einander gegenübergestellt und alle in diesen Messgrößen vorkommenden deutlichen Maxima dokumentiert. Die Definition des „deutlichen Maximums“ erfolgte bei der händischen Auswertung zunächst auf Erfahrungswerten. Eine Analyse aller Maxima in den einzelnen Messgrößen resultiert bei dem dargestellten Beispiel in insgesamt 5 Maxima.

Im Folgenden wurde durch Abhören der Signale überprüft, inwieweit an den Stellen dieser Maxima eine Flachstelle wahrnehmbar ist, um so die Maxima in die beiden Kategorien „Flachstelle wahrnehmbar“ (Tabelle 11) und „keine Flachstelle wahrnehmbar“ zu unterteilen. Für diese beiden Kategorien wurden nun die Maxima hinsichtlich ihrer Ausprägung zusammengefasst. Unterschieden wurde hier zwischen globalen Maxima (Wert „1“), zweit deutlichsten ausgeprägten lokalen Maxima (Wert „2“), weiteren lokalen Maxima (Wert „3“) und kein Maximum (Wert „0“).

Tabelle 11 zeigt für alle 21 analysierten Signale die resultierende Matrix für alle innerhalb der relevanten Messgrößen auftretenden Maxima.

Tabelle 11: Matrix der auftretenden Maxima innerhalb der relevanten Messgrößen

Zugvorbeifahrt	Anzahl Max	Schwankungsstärke F	Lautheit N	2kHz-Oktavbandpegel $L_{2kHz-oct}$	Schärfe S	A-bewerteter Pegel L_A	Beschleunigung a	FL hörbar? ja/nein
01	1	3	3	3	3	3	3	nein
	2	3	3	3	3	3	2	nein
	3	1	2	1	1	2	1	ja
	4	3	3	3	3	3	3	nein
	5	2	1	2	2	2	1	ja
02	1	3	3	3	3	3	3	nein
	2	1	1	1	1	1	2	ja
	3	2	2	2	2	2	1	nein
	4	1	0	0	0	0	0	nein
03	1	2	1	2	0	1	1	ja
	2	3	3	1	1	2	3	nein
	3	3	2	3	0	3	2	ja
04	1	1	0	0	1	0	0	nein
	2	1	1	1	2	2	3	ja
	3	3	2	3	3	1	1	ja
05	1	3	1	1	1	1	0	nein
	2	2	2	2	0	2	0	ja
06	1	2	3	3	3	3	3	nein
	2	3	2	3	2	2	2	ja
	3	3	3	3	3	3	3	ja

	4	1	1	1	1	1	1	ja
07	1	0	3	3	3	3	0	nein
	2	1	1	1	2	1	1	ja
	3	0	3	3	3	3	3	nein
	4	0	3	2	0	3	3	nein
	5	3	2	3	1	2	2	ja
08	1	2	2	2	1	2	2	ja
	2	3	3	3	0	3	3	nein
	3	1	1	1	2	1	1	ja
09	1	3	1	3	3	3	0	nein
	2	1	3	1	1	1	1	Ja
	3	3	3	3	3	3	0	nein
10	1	1	1	1	1	3	1	Ja
	2	0	3	3	3	1	0	nein
11	1	1	0	0	1	0	0	nein
	2	0	3	0	0	3	3	nein
	3	1	1	1	2	1	1	Ja
	4	0	3	3	3	3	3	nein
	5	0	3	3	0	3	3	nein
12	1	2	2	3	3	1	0	nein
	2	0	3	0	0	0	0	nein
	3	0	3	0	0	0	0	nein
	4	3	3	3	3	3	0	nein
	5	1	1	1	1	2	1	Ja
13	1	0	3	3	0	3	0	nein
	2	0	1	1	3	1	3	nein
	3	2	2	2	1	2	2	Ja
	4	2	3	3	3	3	1	nein
14	1	3	3	3	3	3	0	nein
	2	0	1	1	1	1	3	nein
	3	2	2	2	2	2	1	ja
15	1	3	2	3	3	2	2	ja
	2	1	1	1	1	1	1	ja
	3	0	3	2	2	3	3	nein
	4	3	3	3	3	3	3	ja

16	1	0	2	2	2	2	0	nein
	2	1	1	1	1	1	1	ja
	3	1	0	3	0	3	0	nein
17	1	0	3	3	0	3	0	nein
	2	1	1	1	2	1	1	ja
	3	0	3	3	3	3	0	nein
	4	0	3	3	3	3	0	nein
	5	2	2	2	2	1	2	2
18	1	0	3	3	3	3	0	nein
	2	1	1	1	1	1	1	ja
	3	0	3	3	3	3	0	nein
	4	3	3	0	3	3	0	nein
	5	2	2	2	2	2	2	ja
	6	0	3	3	3	3	3	0
19	1	1	2	3	2	2	3	nein
	2	1	1	1	1	1	1	ja
	3	0	3	3	3	3	3	nein
	4	3	3	2	3	3	3	nein
20	1	3	2	3	0	2	0	nein
	2	3	3	0	0	3	0	nein
	3	1	3	1	3	3	1	ja
	4	2	1	3	1	1	0	nein
21	1	0	1	3	1	1	0	nein
	2	1	3	1	3	3	1	ja

Wert „1“: globales Maximum, Wert „2“: lokales Maximum nach globalem Maximum, Wert „3“: weiteres lokales Maximum, Wert „0“: kein Maximum.

Bereits auf den ersten Blick zeigt die Farbgebung einen deutlichen Unterschied zwischen den Maxima mit hörbarer Flachstelle und denen ohne Flachstelle. Anhand einer logischen Verknüpfung der vorliegenden Maxima sollte nun im weiteren Verlauf dieser Zusammenhang formalisiert werden. Hierfür wurde insbesondere für eine spätere praktische Umsetzung auf messtechnisch möglichst einfach erfassbare Messgrößen Wert gelegt. So basiert der erarbeitete Zusammenhang zur Detektion einer Flachstelle auf

- ▶ der psychoakustischen Schwankungsstärke F ,
- ▶ der Schienenbeschleunigung a ,
- ▶ dem A-bewerteten Pegel L_A und

► dem Oktavpegel $L_{2\text{kHz-Okt}}$.

Ziel der Verknüpfung war eine möglichst hohe Trefferquote für die Messwerte in Tabelle 11 mit hörbarer Flachstelle als „Flachstelle detektiert“ bzw. für die Messwerte in Tabelle 11 ohne Flachstelle als „keine Flachstelle detektiert“ zu produzieren. Es resultierte hierfür eine doppelte UND-Verknüpfung (\wedge) mit drei Termen, wobei innerhalb der einzelnen Terme zusätzlich ODER-Verknüpfungen (\vee) vorliegen. Tabelle 12 zeigt den Zusammenhang und erläutert die Formalisierung.

Tabelle 12: Logische Verknüpfung aller vier Messgrößen zur akustischen Detektion von Flachstellen im Messsignal

1. Term		2. Term		3. Term
$(a=1) \vee (a=2)$	\wedge	$(L_{2\text{kHz}=1}) \vee (L_{2\text{kHz}=2}) \vee (L_{2\text{kHz}=3})$	\wedge	$(L_A=1) \vee (L_A=2) \vee (L_A=3)$
\vee				
$(F=1) \vee (F=2)$				
Erläuterungen				
<p>Beschleunigungssignal weist entweder das globale oder das nächsthöhere Maximum auf</p> <p>oder</p> <p>Schwankungsstärke weist entweder das globale oder das nächsthöhere Maximum auf</p>	und	<p>2kHz-Oktavpegel weist ein lokales Maximum auf</p>	und	<p>A-bewerteter Pegel weist ein lokales Maximum auf</p>

Werden die vorliegenden 21 Signale anhand dieses Formalismus analysiert, so ergibt sich folgendes Bild hinsichtlich der Flachstellendetektion: In den insgesamt 21 Zugvorbeifahrten befanden sich nach akustischer Bewertung insgesamt 33 Flachstellen (siehe Tabelle 13). Von diesen 33 Flachstellen werden mit der oben beschriebenen Verknüpfung der Messgrößen insgesamt 32 als Flachstelle richtig detektiert, eine Flachstelle wird hingegen nicht erkannt. Die Rate der richtig detektierten Flachstellen beträgt somit 97 %, die Rate der fälschlicherweise nicht detektierten Flachstellen 3 %. Werden die restlichen im Signal vorkommenden Maxima betrachtet, bei welchen akustisch keine Flachstelle wahrnehmbar ist, so ergibt sich folgendes Bild: Von den insgesamt weiteren 47 in Frage kommenden Signalstellen mit Maximum im Zeitverlauf werden insgesamt 39 Signalstellen (83 %) richtig als „keine Flachstelle“ erfasst, bei 8 Signalstellen (17 %) wird fälschlicherweise eine Flachstelle detektiert.

Wird schrittweise die Anzahl der Eingangsgrößen zur Detektion der Flachstellen reduziert, so resultieren bei Verwendung von den drei Eingangsgrößen A-bewertetem Pegel, Schwankungsstärke und Beschleunigung die gleichen Trefferquoten. Es kann somit bei der Detektion ohne Verringerung der Detektionsqualität auf den 2kHz- Oktavpegel verzichtet werden. Wird hingegen die Detektion ohne die Eingangsgröße Schwankungsstärke durchgeführt, so reduziert sich die Trefferquote für die hörbaren richtig detektierten Flachstellen auf 85 %.

Tabelle 13: Trefferquote mit logischer Verknüpfung unterschiedlicher Messgrößen für die Datenbasis der 21 Zugvorbeifahrten

Datenbasis: 21 Zugvorbeifahrten					
		Anzahl der Maxima		80	
		davon Flachstelle ...		hörbar	
		Anzahl		33	
		davon Flachstelle ...		nicht hörbar	
		Anzahl		47	
Input zur Detektion		detektiert	nicht detektiert	detektiert	nicht detektiert
- A-bewerteter Pegel, - 2kHz-Oktavpegel - Schwankungsstärke, - Beschleunigung,	Anzahl	32	1	8	39
	Trefferquote	97 %	3 %	17 %	83 %
- A-bewerteter Pegel, - Schwankungsstärke, - Beschleunigung	Anzahl	32	1	8	39
	Trefferquote	97 %	3 %	17 %	83 %
- A-bewerteter Pegel, - Beschleunigung	Anzahl	28	5	3	44
	Trefferquote	85 %	15 %	6 %	94 %

Da die Optimierung der logischen Verknüpfung zur Flachstellendetektion an derselben Datenbasis (21 Zugvorbeifahrten) erfolgte, ist üblicherweise eine sehr gute Übereinstimmung der Prognose zu erwarten. Wesentlich ist im Folgenden eine Überprüfung der Detektionsqualität mit einer neuen Signalauswahl zur Verifikation des Zusammenhangs.

7.2.4 Verifikation des Zusammenhangs

Um die Qualität der Formel zu überprüfen, wurden weitere 5 bisher nicht analysierte Zugvorbeifahrten ausgewertet. Tabelle 14 zeigt zum einen die Ergebnisse der Maxima-Auswertung für die zur Detektion benötigten Messgrößen (Spalten F , $L_{2\text{kHz-oct}}$, L_A und a). In den drei letzten Spalten ist das Ergebnis der Flachstellendetektion der tatsächlichen Hörbarkeit einer Flachstelle an dieser Position gegenübergestellt, um so die Qualität der Detektion überprüfen zu können. Es resultiert somit in den insgesamt 25 Bewertungen eine falsche Detektion. Dies entspricht einer Rate von 95 % für die korrekte Detektion bzw. von 5 % für die falsche Detektion.

Tabelle 14: Matrix der auftretenden Maxima innerhalb der relevanten vier Messgrößen für die 5 neuen Zugvorbeifahrten und Flachstellendetektion anhand dieser Messgrößen

Zugvorbeifahrt	# Max	F	L _{2kHz-oct}	L _A	a	Flachstelle detektiert? ja / nein	Flachstelle hörbar? ja / nein	Detektion korrekt? ja / nein
2129	1	1	2	2	0	ja	ja	ja
	2	0	1	1	1	ja	ja	ja
	3	2	3	3	2	ja	ja	ja
	4	3	3	3	0	nein	nein	ja
2244	1	0	0	2	0	nein	nein	ja
	2	0	1	1	1	Ja	ja	ja
	3	0	0	0	0	nein	nein	ja
	4	0	0	0	0	nein	nein	ja
2070	1	0	0	0	1	nein	nein	ja
	2	1	1	1	0	ja	ja	ja
	3	2	2	2	2	ja	ja	ja
	4	0	3	3	0	nein	nein	ja
	5	3	3	3	0	nein	ja	nein
1935	1	0	3	3	3	nein	nein	ja
	2	0	3	3	3	nein	nein	ja
	3	0	3	3	3	nein	nein	ja
	4	3	2	2	3	nein	nein	ja
	5	2	3	1	1	ja	ja	ja
	6	1	1	1	2	2	ja	ja
2238	1	0	0	3	0	nein	nein	ja
	2	0	3	3	0	nein	nein	ja
	3	3	0	3	3	nein	nein	ja
	4	2	3	3	3	ja	ja	ja
	5	0	1	2	2	ja	ja	ja
	6	1	2	1	1	1	ja	ja

Wert „1“: globales Maximum, Wert „2“: lokales Maximum nach globalem Maximum, Wert „3“: weiteres lokales Maximum, Wert „0“: kein Maximum.

Tabelle 15: Trefferquote mit logischer Verknüpfung unterschiedlicher Messgrößen für die Datenbasis der 5 weiteren Zugvorbeifahrten

Datenbasis: 5 Zugvorbeifahrten					
		Anzahl der Maxima			
		25			
		hörbar		nicht hörbar	
		12		13	
Input zur Detektion	davon Flachstelle ...	detektiert	nicht detektiert	detektiert	nicht detektiert
		Anzahl			
	davon Flachstelle ...				
- A-bewerteter Pegel, - 2kHz-Oktavpegel - Schwankungsstärke, - Beschleunigung,	Anzahl	11	1	0	13
	Trefferquote	92 %	8 %	0 %	100 %
- A-bewerteter Pegel, - Schwankungsstärke, - Beschleunigung	Anzahl	11	1	0	13
	Trefferquote	92 %	8 %	0 %	100 %
- A-bewerteter Pegel, - Beschleunigung	Anzahl	8	4	0	13
	Trefferquote	67%	33 %	0 %	100 %

Da eine Umsetzung des Detektionsalgorithmus auf Basis der gängigen Messgrößen des A-bewerteten Schalldruckpegels und der Schienenbeschleunigung relativ einfach umsetzbar wäre, wurde eine weitere Verifikation mit einer größeren Datenmenge jedoch nur für die Input-Größen A-bewerteter Schalldruckpegel und Schienenbeschleunigung durchgeführt.

Hierfür wurden insgesamt 50 Signale hinsichtlich darin auftretender akustisch auffälliger Flachstellen untersucht. Hierfür wurden bei jedem der 50 Signale bis zu 5 Maxima im Schalldruckpegel zur Bewertung herangezogen. Tabelle 16 listet die resultierenden Trefferquoten auf. Insgesamt wurden von 100 hörbaren Flachstellen 72 als „Flachstelle“ erkannt bzw. von den 118 Maxima ohne hörbare Flachstelle insgesamt 74 % korrekt als „keine Flachstelle“ erkannt.

Tabelle 16: Erweiterung der Datenbasis für eine Detektion mit A-bewertetem Pegel und Schienenbeschleunigung

Erweiterte Datenbasis: 50 Zugvorbeifahrten					
	Anzahl der Maxima	218			
	davon Flachstelle ...	hörbar		nicht hörbar	
	Anzahl	100		118	
	davon Flachstelle ...	detektiert	nicht detektiert	detektiert	nicht detektiert
Input zur Detektion					
- A-bewerteter Pegel, - Beschleunigungspegel	Anzahl	72	28	31	87
	Trefferquote	72 %	28 %	26 %	74 %

Während bei der händischen Auswertung die Definition des „deutlichen Maximums“ zunächst auf Erfahrungswerten basierte, erfolgte im nächsten Schritt für die automatisierten Umsetzung die Definition über Mittelungsverfahren des Pegelverlaufs, eine Peak-Detektion und eine Betrachtung von Nachbar-Peaks in festgelegten Zeitfenstern. An dieser Stelle befindet sich eine Stellschraube, die mit großen Datenmengen justiert werden kann.

Die umgesetzte automatisierte Flachstellenerkennung beruht auf den beiden Eingangsgrößen des A-bewerteten Schalldruckpegels und des Beschleunigungspegels.

7.3 Beschreibung der Lästigkeit einer Flachstelle

Während im vorangegangenen Kapitel die Detektion der Flachstelle bei einer Zugvorbeifahrt im Mittelpunkt stand, soll im weiteren Verlauf die Beschreibung der Lästigkeit dieser Flachstelle im Fokus stehen. Die zentrale Fragestellung hierbei ist: *Mit welchen (messtechnischen) Größen kann die Lästigkeit einer Flachstelle beschrieben werden?*

Um die Belästigung durch Flachstellen bzw. die Akzeptanz von Flachstellen zu untersuchen, wurden psychoakustische Experimente (Hörversuche) durchgeführt. Das Versuchsdesign und die Randbedingung dieser Hörversuche werden im Folgenden erläutert.

7.3.1 Psychoakustische Experimente

Alle Hörversuche wurden mit 20 Versuchspersonen durchgeführt. Die Darbietung erfolgt über Kopfhörer (elektrostatische Kopfhörer der Lamda-Serie des Herstellers Stax) in der Hörkabine der Firma Möhler + Partner. Dieser zeichnet sich durch ein ruhiges und neutrales Umfeld aus, um die Versuchspersonen in ihrer Beurteilung nicht abzulenken.

Abbildung 34: Hörkabine der Firma Möhler+ Partner



In einer ersten Hörversuchsreihe lag der Fokus auf der grundsätzlichen Unterscheidung eines Flachstellensignals zwischen „akzeptabel“ und „nicht akzeptabel“. In einer weiteren Hörversuchsreihe sollte anhand von repräsentativen Signalen mit Flachstellen direkt eine Beurteilung der Lästigkeit dieser Signale erfolgen. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

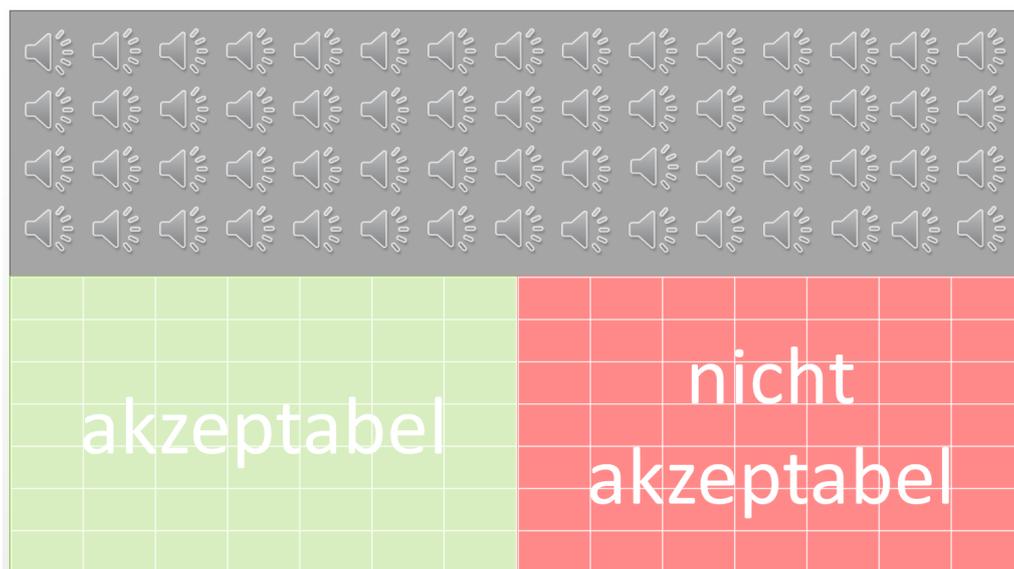
7.3.1.1 Hörversuchsreihe 1: Kategorialeinstufung zur Bestimmung der Akzeptanz einer Flachstelle

Für die Durchführung eines Hörversuchs saßen die Versuchspersonen einzeln im Abhörraum und sahen auf dem Bildschirm das in Abbildung 35 dargestellt Versuchsdesign. Durch Klicken auf die Soundsymbole konnte die Versuchsperson sich die zu beurteilenden Zugvorbeifahrten anhören. Die Versuchspersonen sollten nun die Signale hinsichtlich ihrer Lästigkeit beurteilen. Hierfür wurde den Versuchspersonen vorab erklärt, dass nicht die Zugvorbeifahrt als solche, sondern lediglich die vorhandene Flachstelle bei der Vorbeifahrt in das Urteil zur Lästigkeit einfließen sollte.

Die Aufgabe der Versuchsperson bestand nun darin diese Symbole einer der beiden Kategorien (grün: „akzeptabel“, rot: „nicht akzeptabel“) zuzuordnen. Hierfür konnten die Soundsymbole durch drag&drop auf der Oberfläche verschoben werden. Durch wiederholtes Anhören der Signale konnte die Versuchsperson ihr Urteil immer wieder überprüfen und gegebenenfalls korrigieren. Am Ende des Experiments mussten somit alle Signale vom oberen grauen Feld in das grüne oder rote Feld verschoben worden sein.

Durch die sehr einfache Aufgabenstellung können bei dieser Methode relativ viele Signale von einer Versuchsperson bewertet werden. Die Anzahl der zu bewertenden Signale bei diesem Experiment betrug insgesamt 60.

Abbildung 35: Versuchsdesign für die erste Hörversuchsreihe



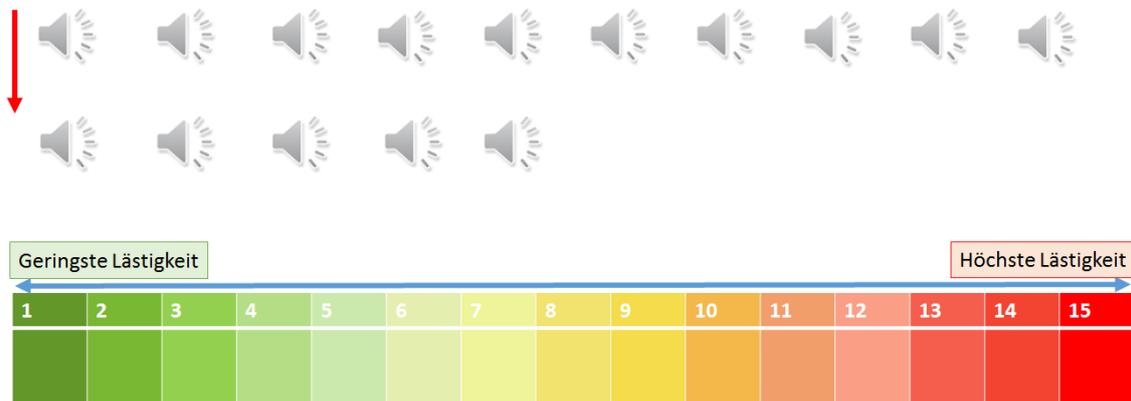
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

7.3.1.2 Hörversuchsreihe 2: Rangfolgenbestimmung zur Lästigkeit von Flachstellen

Auch für dieses Experiment befanden sich die Versuchspersonen einzeln im Abhörraum. Abbildung 36 zeigt die Versuchsoberfläche, die auf dem Bildschirm zu sehen war. Auch hier konnten die Versuchspersonen durch Anklicken der Soundsymbole die Zugvorbeifahrten beliebig oft anhören. Die Aufgabe in diesem Experiment war es jedoch nun eine Reihenfolge hinsichtlich der empfundenen Lästigkeit herzustellen. Hierfür waren die Symbole in die entsprechende Reihenfolge zu bringen. Abschließend war noch der rote Pfeil bei der Zugvorbeifahrt zu positionieren, bei der die Flachstelle als nicht mehr akzeptabel empfunden wurde.

Da die Aufgabenstellung bei dieser Methode deutlich komplizierter ist, kann hier nur eine geringere Anzahl an Signalen beurteilt werden. Insgesamt wurde die Anzahl der zu bewertenden Signale deshalb bei dieser Versuchsreihe auf 15 begrenzt.

Abbildung 36: Versuchsdesign für die zweite Hörversuchsreihe



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

7.3.1.3 Auswahl der Signale

Da es in einem Hörversuch nicht möglich ist eine zu große Anzahl von Zugvorbeifahrten subjektiv beurteilen zu lassen, war zunächst eine Vorauswahl zu treffen.

Neben einer je Zugkategorie vergleichbaren Vorbeifahrtgeschwindigkeit wurde als Auswahlkriterium das Vorhandensein möglichst einer *separaten* Flachstelle an einer Achse festgelegt. So sollten eventuell zusätzlich auftretenden Belästigungseffekte durch mehrere aufeinander folgende Flachstellen bei den Hörversuchen möglichst vermieden werden. Auf Basis der von Müller-BBM Rail Technologies übergebenen Informationen zu den Messungen bezüglich der Flachstellen-Achsen und den Flachstellenzeiten (Tabelle 7 Zeile 14 und 15) wurden im Folgenden die in Frage kommenden Vorbeifahrten aus der Datenbank ausgewählt.

Da die gesamte Zugvorbeifahrt für eine subjektive Beurteilung zu lang wäre, wurde aus dem Signal der Zugvorbeifahrt der Abschnitt mit Flachstelle mithilfe eines Schallbearbeitungsprogramms ausgeschnitten. Insgesamt resultierten 60 Signale mit einer Länge von je 5 Sekunden. Der von dem WMS angegebene Flachstellenindikator dieser Signale lag hierbei zwischen 5 und 196. Tabelle A1 im Anhang 1 listet alle ausgewählten Signale entsprechend der Bezeichnung in der Datenbank auf.

7.3.2 Zusammenhang der Lästigkeit einer Flachstelle mit dem Flachstellenindikator Müller-BBM Rail Technologies

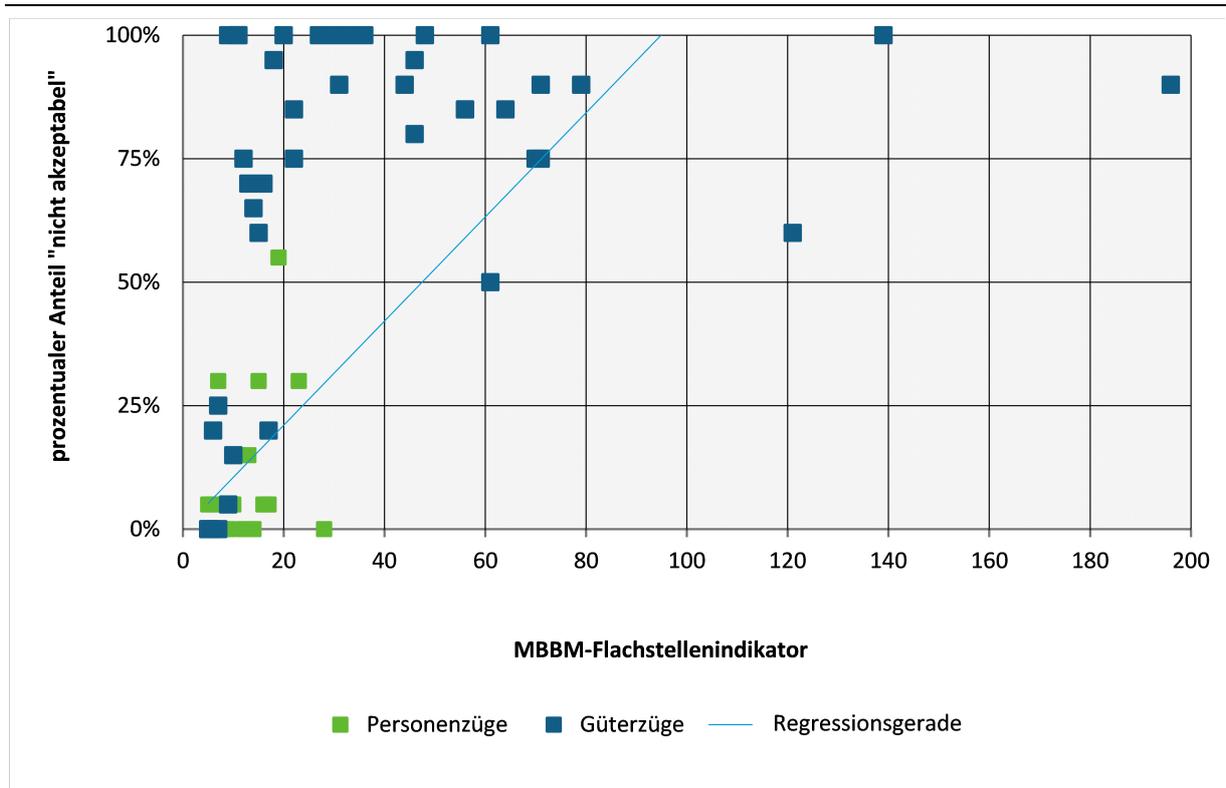
Der bisherige Ansatz eine Flachstelle zu charakterisieren, erfolgt üblicherweise über die geometrische Ausprägung einer Flachstelle (siehe auch Abschnitt 3). Die Fragestellung, die dieser Arbeit nun zu Grunde lag, war zunächst, ob dieser Ansatz bezüglich der akustischen Ausprägung einer Flachstelle zielführend ist. Um die geometrische Ausprägung einer Flachstelle bei der hier durchgeführten Messkampagne abschätzen zu können, wurde auf den vom Wheel-

Monitoring-System der Firma Müller-BBM Rail Technologies erfassten Flachstellenindikator zurückgegriffen. Dieser weist eine hohe Korrelation zur geometrischen Länge einer Flachstelle auf.

Deshalb sollte nun in einem ersten Schritt der Zusammenhang der Akzeptanz einer Vorbeifahrt mit Flachstelle mit dem Flachstellenindikator überprüft werden. Hierfür werden die Ergebnisse aus der ersten Hörversuchsreihe herangezogen. In Abbildung 37 repräsentiert jeder Datenpunkt eines der 60 bewerteten Signale mit Flachstelle, wobei die Signale von Güterzügen rot und die von Personenzügen blau dargestellt sind. Die Bewertung aller 20 Versuchspersonen als „nicht akzeptabel“ für jedes Signal mit Flachstelle wurde hierfür prozentual ausgewertet und über dem gemessenen Flachstellenindikator aufgetragen. Der Wert von 100 % resultiert somit nur, wenn alle Versuchspersonen das Signal als „nicht akzeptabel“ eingestuft haben, der Wert von 0% hingegen nur, wenn alle Versuchspersonen das Signal als „akzeptabel“ eingestuft haben.

Um zu überprüfen, ob mit Hilfe des Flachstellenindikators die Akzeptanz der Flachstellensignale abgebildet werden kann, wurde für den Zusammenhang dieser beiden Größen das Bestimmtheitsmaß berechnet. Mit einem Wert von 0,24 resultiert jedoch eine sehr geringe Korrelation zwischen Akzeptanz und Flachstellenindikator. Betrachtet man Abbildung 38 fällt insbesondere auch auf, dass für den Wert von 100% „inakzeptabel“ eine sehr große Bandbreite an Werten für den Flachstellenindikator (10 bis 196) resultiert.

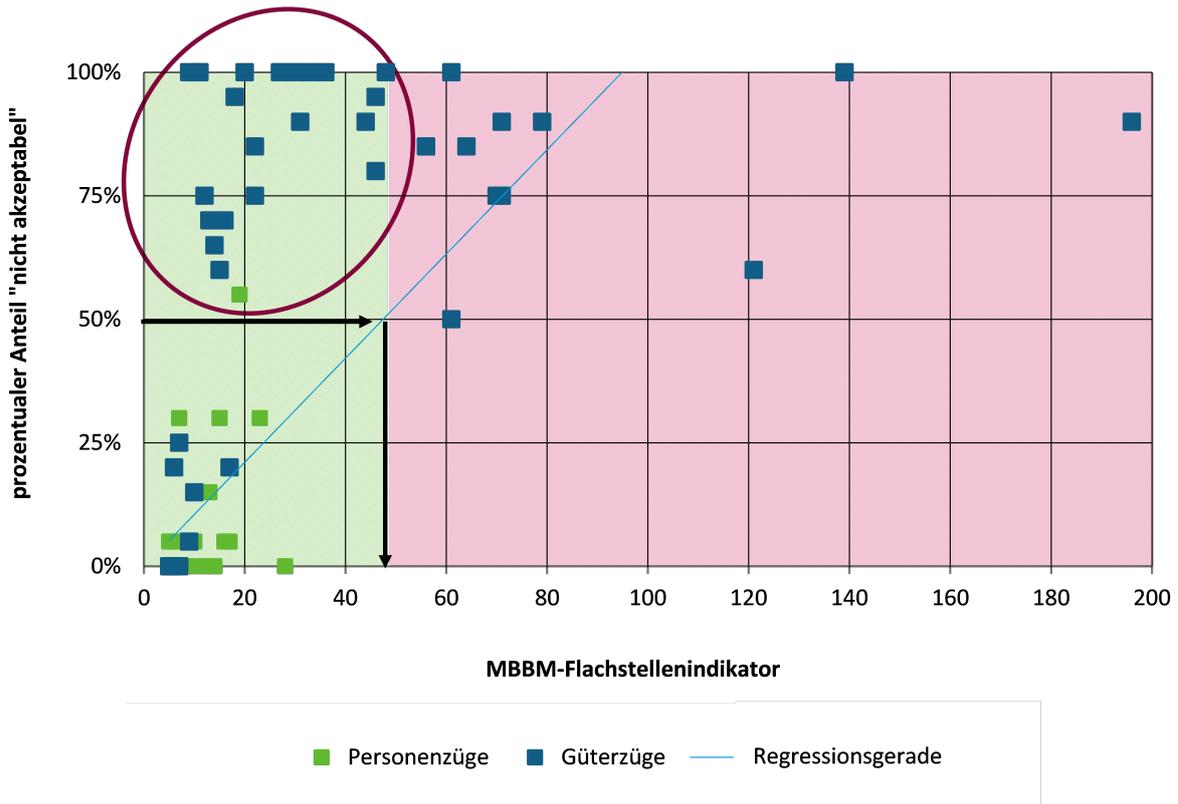
Abbildung 37: Akzeptanz der Signale mit Flachstelle gegenüber dem gemessenen Flachstellenindikator



Prozentsatz der Antworten „nicht akzeptabel“ aller 20 Versuchspersonen bei Beurteilung der 60 Signale mit Flachstelle gegenüber dem nach rechts aufgetragenen Flachstellenindikator. Grün: Flachstellen an Personenzügen, dunkelblau: Flachstellen an Güterzügen. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Im Folgenden soll dennoch die Möglichkeit der Definition einer Akzeptanzgrenze auf Basis des Flachstellenindikators überprüft werden. Hierfür wurde in Abbildung 38 zunächst eine beispielhaft eine Akzeptanzgrenze von 50 % festgelegt. Dies würde mit den vorliegenden Daten im Mittel einem Flachstellenindikator von 45 entsprechen. Würde man diesen Wert somit als messbare Akzeptanzgrenze festlegen, würden in Abbildung 38 alle Signale im grünen Bereich als „akzeptabel“ und alle Signale im roten Bereich als „inakzeptabel“ eingestuft werden. Dies wiederum würde jedoch einer Fehlerquote von 33 % hinsichtlich fälschlicher Weise als akzeptabel eingestuftur Flachstelle bedeuten.

Abbildung 38: Verwendung des Flachstellenindikators zur Bestimmung einer Akzeptanzgrenze



Die Definition einer Akzeptanzgrenze von 50 % resultiert eine Grenze für den Flachstellenindikator von 48 (schwarzer Pfeil). Der grün hinterlegte Bereich würde demnach als „akzeptabel“, der rot hinterlegte Bereich als „inakzeptabel“ eingestuft werden. Die im roten Kreis markierten Datenpunkte würden somit fälschlicher Weise als „akzeptabel“ eingestuft werden. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

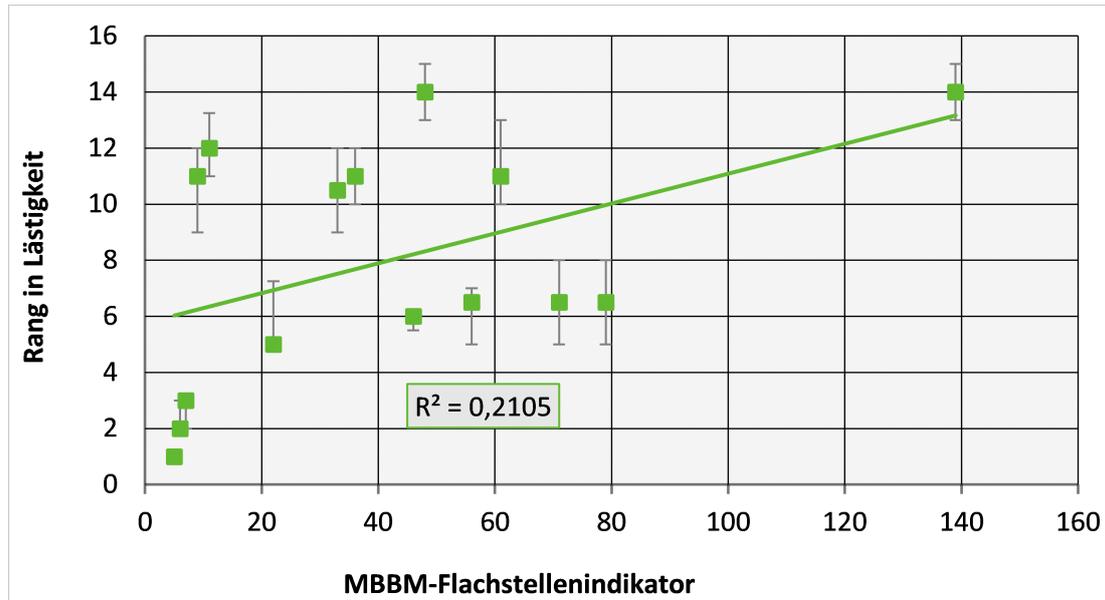
Es scheint somit, dass die geometrische Ausprägung einer Flachstelle, die anhand des Flachstellenindikators indirekt bewertet wurde, kein ausreichendes Maß für die durch die Flachstelle hervorgerufene Belästigung darstellt. Deshalb sollten im Rahmen der zweiten Hörversuchsreihe alternative Messgrößen, welche die Belästigung durch einen Flachstelle beschreiben können, betrachtet werden.

In der zweiten Hörversuchsreihe wurde die Lästigkeit von 15 repräsentativen Signalen mit Flachstelle bewertet. Als Ergebnis des in Kapitel 7.3.1.2 beschriebenen Experiments resultiert für jede der 20 Versuchspersonen eine Reihenfolge der 15 Flachstellensignale hinsichtlich ihrer Lästigkeit. Abbildung 39 zeigt den Rang der Lästigkeit für die 15 Signale in Abhängigkeit des jeweiligen gemessenen Flachstellenindikators. Jeder Datenpunkt symbolisiert somit eine

Zugvorbeifahrt, die im Hörversuch bezüglich ihrer Lästigkeit beurteilt wurde. Ein geringer Rang bedeutet hierbei eine geringe Lästigkeit, ein hoher Rang hingegen eine hohe Lästigkeit.

Auch hier zeigt sich ähnlich wie in der ersten Hörversuchsreihe keine hohe Korrelation zwischen dem Urteil der Versuchspersonen, dem Rang in Lästigkeit und dem Flachstellenindikator. Wiederum resultiert mit 0,21 ein sehr geringer Wert für das Bestimmtheitsmaß.

Abbildung 39: Rang in Lästigkeit versus Flachstellenindikator



Median und Interquartile der Beurteilung von 20 Versuchspersonen für den Rang in Lästigkeit gegenüber dem **Flachstellenindikator** der Signale. Das Bestimmtheitsmaß für diese beiden Größen R^2 beträgt 0,2105. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

7.3.3 Zusammenhang der Lästigkeit einer Flachstelle mit anderen Analysegrößen

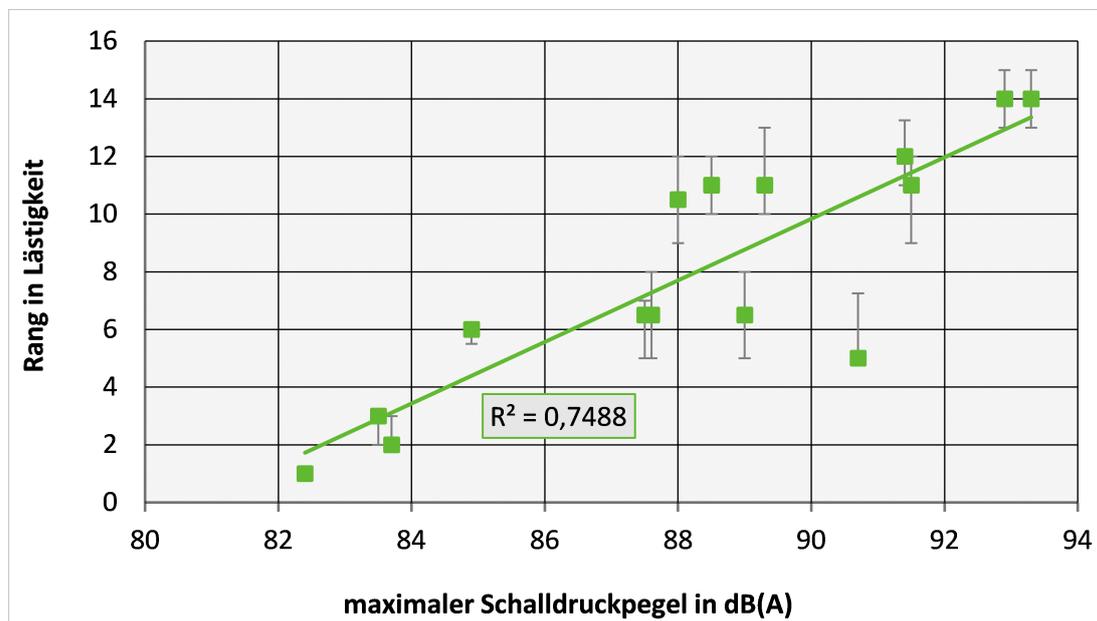
Im Folgenden sollen Abhängigkeiten zwischen der von den Versuchspersonen beurteilten Lästigkeit mit ausgewählten Analysegrößen aus Kapitel 7.1.1 bzw. 7.1.2 überprüft werden. Abbildung 40 bis Abbildung 43 zeigt deshalb die Lästigkeit der Zugvorbeifahrten jeweils über einer Analysegröße. Wiederum symbolisiert jeder Datenpunkt eine Zugvorbeifahrt. Abbildung 40 zeigt die Lästigkeit gegenüber dem A-bewerteten Maximalpegel der jeweiligen Vorbeifahrt, Abbildung 41 gegenüber der maximalen Lautheit, Abbildung 42 gegenüber der maximalen Schwankungsstärke und Abbildung 43 gegenüber der maximalen Schärfe.

Ein wesentliches auch optisch in Abbildung 40 und Abbildung 41 erkenntliches Ergebnis ist, dass für die Analysegrößen „maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel“ und „maximale psychoakustische Lautheit“ eine gute Korrelation zur subjektiv empfundenen Lästigkeit der Vorbeifahrt mit Flachstelle besteht. Dies bestätigt sich auch anhand des jeweiligen Bestimmtheitsmaßes.

Tabelle 17: Bestimmtheitsmaß der einzelnen Analysegrößen mit dem Ergebnis der subjektiven Beurteilungen zur Lästigkeit

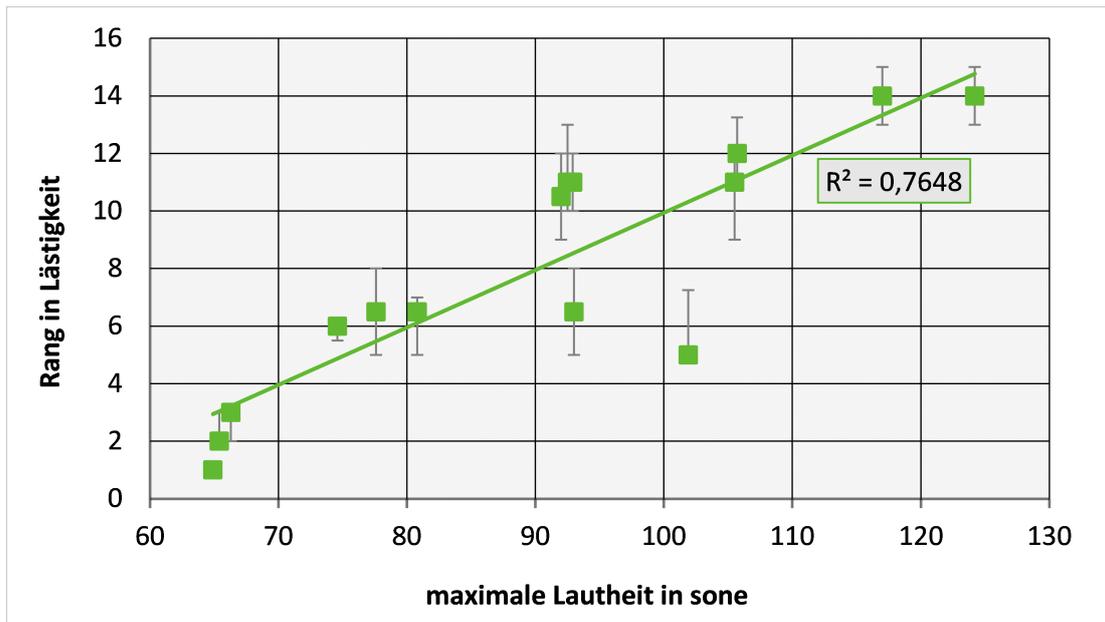
Analysegröße	Bestimmtheitsmaß R^2	Korrelationskoeffizient R
A-bewerteter Maximalpegel	0,7488	0,78
Lautheit	0,7648	0,88
Schwankungsstärke	0,4644	0,68
Schärfe	0,6663	0,82

Abbildung 40: Rang in Lästigkeit versus L_{Amax}



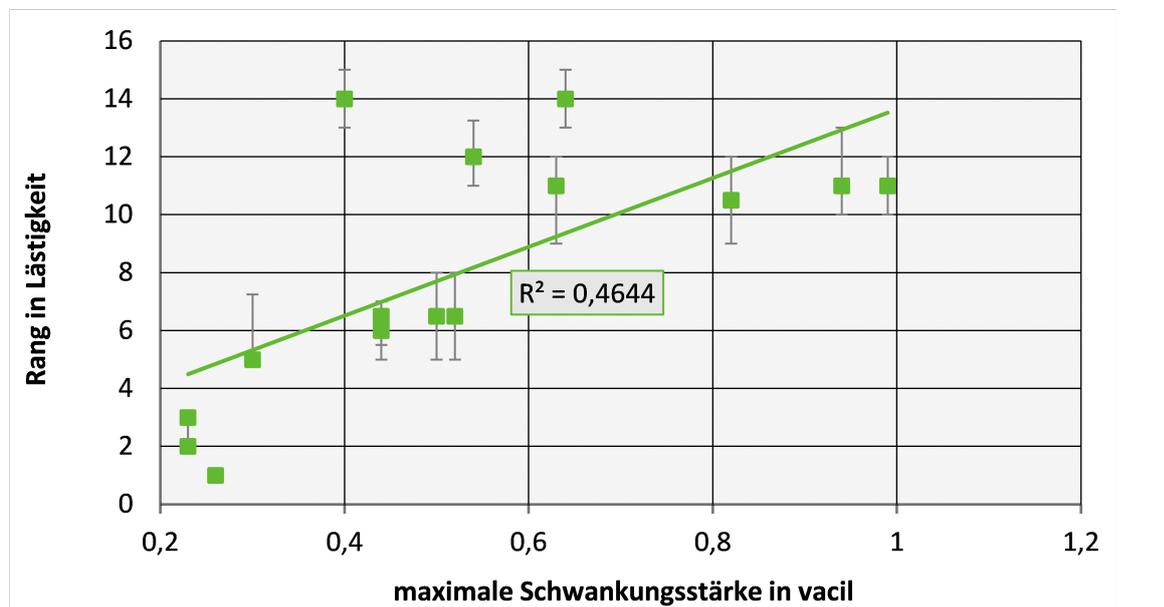
Median und Interquartile der Beurteilung von 20 Versuchspersonen für den Rang in Lästigkeit gegenüber dem gemessenen **A-bewerteten Maximalpegel** der Signale mit Flachstelle. Das Bestimmtheitsmaß für diese beiden Größen R^2 beträgt 0,7488, der Korrelationskoeffizient R beträgt 0,87. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Abbildung 41: Rang in Lästigkeit versus *Lautheit*



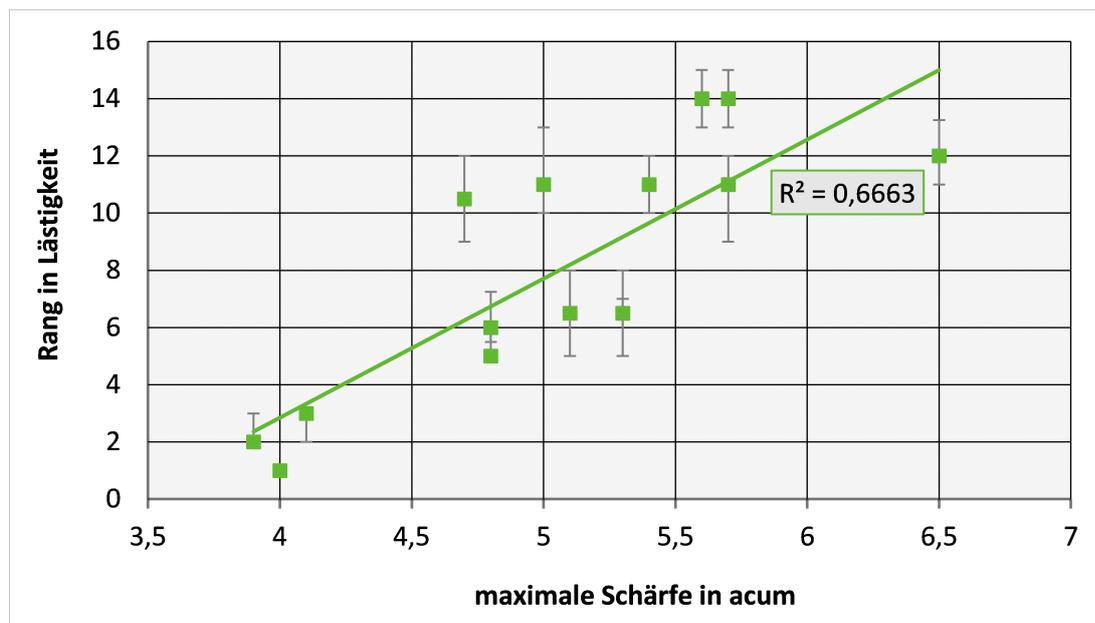
Median und Interquartile der Beurteilung von 20 Versuchspersonen für den Rang in Lästigkeit gegenüber der berechneten **Lautheit** der Signale mit Flachstelle. Das Bestimmtheitsmaß für diese beiden Größen R^2 beträgt 0,7648, der Korrelationskoeffizient R beträgt 0,875. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Abbildung 42: Rang in Lästigkeit versus *Schwankungsstärke*



Median und Interquartile der Beurteilung von 20 Versuchspersonen für den Rang in Lästigkeit gegenüber dem berechneten **Schwankungsstärke** der Signale mit Flachstelle. Das Bestimmtheitsmaß für diese beiden Größen R^2 beträgt 0,4644, der Korrelationskoeffizient R beträgt 0,68. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Abbildung 43: Rang in Lästigkeit versus Schärfe



Median und Interquartile der Beurteilung von 20 Versuchspersonen für den Rang in Lästigkeit gegenüber der berechneten **Schärfe** der Signale mit Flachstelle. Das Bestimmtheitsmaß für diese beiden Größen R^2 beträgt 0,6663, der Korrelationskoeffizient R beträgt 0,82. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Um festzustellen, welche Messgrößen in welcher Kombination die Lästigkeit einer Flachstelle am besten widerspiegeln, wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Mittels multipler Regressionen wird versucht, eine Variable (hier der Rang in Lästigkeit) durch eine oder mehrere weitere Variablen (hier die Messgrößen) zu erklären. Anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) kann dargestellt werden, wie gut eine Messgröße ein Ergebnis (hier die Lästigkeit) vorhersagt. Dieser Wert wird in der folgenden Tabelle als Varianzaufklärung in Prozent angegeben.

Bei einer maximal möglichen Varianzaufklärung von 100 % kann eine Messgröße (oder eine Kombination von Messgrößen) ein Ergebnis vollständig prognostizieren. Dieser Wert liegt zunächst bei einer alleinigen Verwendung des L_{Amax} zur Prognose der Lästigkeit bei 75 % (siehe Tabelle 18 Spalte 2), wird zusätzlich der Pegel des 2kHz-Oktavbandes mit in das Modell aufgenommen, steigert sich der Wert auf 81 % (siehe Tabelle 18 Spalte 3), eine zusätzliche Einbeziehung der Schwankungsstärke kann diesen Wert auf 89 % anheben (siehe Tabelle 18 Spalte 5). Je nach gewünschter Güte der Lästigkeitsprognose sollte somit auf die entsprechenden Größen zurückgegriffen werden.

Tabelle 18: Multiple Regressionsanalyse anhand L_{Amax} /2 kHz Oktavpegel/Schwankungsstärke

	L_{Amax}	L_{Amax} + 2 kHz Oktavpegel	L_{Amax} + Schwankungsstärke	L_{Amax} + 2 kHz Oktavpegel + Schwankungsstärke
Varianzaufklärung des Rang in Lästigkeit	75%	81%	87%	89%
zusätzliche Varianzaufklärung		+ 6%	+ 12%	+ 14%

7.4 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Evaluierung der Flachstellenakzeptanz

Um die Akzeptanz von Flachstellen zu evaluieren, wurden zunächst Analysen der Schalldrucksignale an der Strecke und der Beschleunigungssignale am Gleis durchgeführt. Hierzu kamen klassische akustische Schalldruckpegel- bzw. Beschleunigungspegelgrößen zum Einsatz, aber auch psychoakustische Größen, wie etwa die Lautheit, die Schärfe oder die Schwankungsstärke.

Für die Erarbeitung eines Detektionsalgorithmus wurden statistische Analysen zwischen zwei unabhängigen Stichproben mit je 14 Signalen durchgeführt, eine der Stichproben mit wahrnehmbarer Flachstelle, die andere ohne wahrnehmbare Flachstelle. Es resultierten insbesondere signifikante Unterschiede hinsichtlich der Schwankungsstärke, der Lautheit, dem Pegel des 2kHz-Oktavbands, der Schärfe und dem A-bewerteten Pegel.

Basierend auf eine Analyse der Maxima dieser Größen wurde eine logische Verknüpfung zur Detektion von Flachstellen von folgenden Größen erarbeitet:

- ▶ psychoakustischen Schwankungsstärke
- ▶ A-bewerteter Pegel
- ▶ 2-kHz Oktavpegel
- ▶ Schienenbeschleunigung

Eine Auswertung von 21 Zugvorbeifahrten resultierte mit dieser Verknüpfung in einer Trefferquote (hörbare Flachstelle korrekt detektiert) von 97 %, hingegen wurden 17 % der Maxima von nicht hörbaren Flachstellen fälschlicherweise als Flachstelle detektiert.

Wird als Input für die Detektion lediglich der A-bewertete Pegel und die Schienenbeschleunigung verwendet, reduziert sich die Trefferquote (hörbare Flachstelle korrekt detektiert) für die 21 Signale auf 85 %. Eine Erweiterung der Datenbasis um 50 Signale resultierte hier in einer Trefferquote von 72 %.

Im weiteren Verlauf sollte die von einer Flachstelle ausgehende akustische Belästigung quantifiziert werden. Hierfür wurden psychoakustische Experimente zur akustischen Akzeptanz von Flachstellen und der Lästigkeit von Flachstellen durchgeführt. Anhand von 60 Signalen mit einem Flachstellenindikator nach Müller-BBM Rail Technologies zwischen 10 und 196 wurden Versuchspersonen nach der Akzeptanz dieser Signale befragt. Es resultierte jedoch für eine große Bandbreite des Flachstellenindikators (von ca. 10 bis 140) ein Prozentsatz von 100 hinsichtlich der Inakzeptanz dieser Flachstelle. Ebenso fand sich für ein und denselben Wert des Flachstellenindikators (ca. 10) eine Bandbreite von 0 % inakzeptabel bis 100 % inakzeptabel. In einem weiteren Hörversuch wurde zudem für 15 Signale die Lästigkeit der Flachstelle direkt von den Versuchspersonen bewertet. Auf diese Weise ist die Darstellung der Lästigkeit der Flachstelle in Abhängigkeit von anderen Analysegrößen möglich und der Zusammenhang anhand eines Bestimmtheitsmaßes quantifizierbar.

Hierbei resultierten folgende Werte für das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang der Lästigkeit der Flachstelle mit

- ▶ dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies: 0,21
- ▶ dem maximalen Schalldruckpegel: 0,75
- ▶ der psychoakustischen Lautheit: 0,76
- ▶ der psychoakustischen Schwankungsstärke: 0,46
- ▶ der psychoakustischen Schärfe: 0,67

Mittels einer multiplen Regressionsanalyse wurde im weiteren Verlauf überprüft, welche Kombinationen dieser Größen die Lästigkeit einer Flachstelle am aussagekräftigsten beschreiben können. Hierbei beschreibt der resultierende Prozentsatz, wie gut die jeweiligen Eingangsgrößen die Lästigkeit abbilden können (100% entspricht einer vollständigen Abbildung). Es ist zu erkennen, dass der A-bewertete Schalldruckpegel bereits 75 % der Lästigkeit abbilden kann.

- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel: 75 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + 2 kHz- Oktavpegel: 81 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + Schwankungsstärke: 86 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + 2 kHz- Oktavpegel + Schwankungsstärke: 88 %

8 Spezifikationsvorschlag zur Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen und Möglichkeiten einer Automatisierung

8.1.1 Allgemeine Spezifikation für die Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen

Für die Detektion von Flachstellen gemäß dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Verfahren sind Messungen am Gleis notwendig. Im Folgenden wird ein Vorschlag für mögliche Rahmenbedingungen für die Datenerfassung spezifiziert.

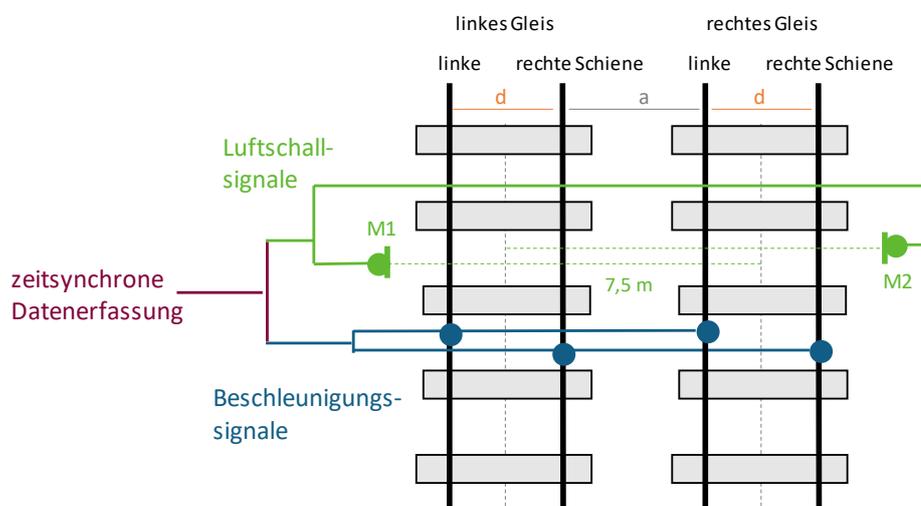
Messpositionen

Abbildung 44 skizziert den vorgeschlagenen Messaufbau mit den Messpositionen an einer zweigleisigen Strecke. Die Messpositionen für die Erfassung des Luftschalls sind gemäß DIN EN ISO 3095 „Messung der Geräuschemissionen von spurgebundenen Fahrzeugen“ in einem Abstand von 7,5 m von der Mittellinie des Gleises in einer Höhe von 1,2 m oberhalb Schienenoberkante anzuordnen. Um Flachstellen beidseitig detektieren zu können, ist auf beiden Seiten des Gleises ein Messpunkt vorzusehen. Zur Flachstellendetektion an einem Gleis, soll jeweils das der Radscheibe zugewandte Mikrofon herangezogen werden. Dies bedeutet entsprechend Abbildung 44 folgende Zuordnung zwischen Gleis/Schiene und Mikrofon und resultiert in folgende reale Abstände zwischen Mikrofon und Rad (bei einer Spurweite d von 1,458 m und einem Gleisabstand a von 3,5 m - $2 \cdot 1,458$ m):

- linke Gleis /linke Schiene: Mikrofon M1 $7,5 \text{ m} - a - (3/2) \cdot d = 2,979 \text{ m}$
- linkes Gleis / rechte Schiene Mikrofon M2 $7,5 \text{ m} - (1/2) \cdot d = 6,771 \text{ m}$
- rechtes Gleis /linke Schiene Mikrofon M1 $7,5 \text{ m} - (1/2) \cdot d = 6,771 \text{ m}$
- rechtes Gleis / rechte Schiene Mikrofon M2 $7,5 \text{ m} - a - (3/2) \cdot d = 2,979 \text{ m}$

Für eine einheitliche Flachstellendetektion sind diese realen Abstände mittels Abstandsgesetz für die Auswertung rechnerisch anzugleichen.

Abbildung 44: Messaufbau zur Flachstellendetektion



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

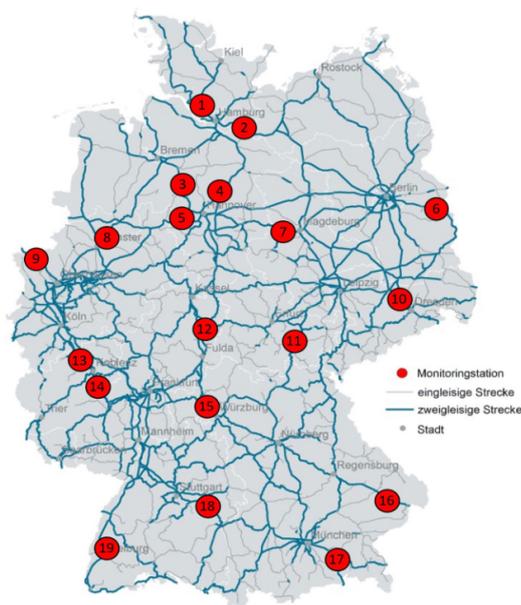
Als Messposition für die Erfassung der Schienenbeschleunigung sind Schwingungsmessungen an der Schiene durchzuführen. Hierfür sind Beschleunigungsaufnehmer an der rechten und linken Schiene anzubringen.

Schalldruck- und Beschleunigungssignale sind zeitsynchron zu erfassen.

Bei Lärmmonitoring-Stationen wird üblicherweise das Luftschallsignal im normgerechten Abstand (DIN 38452-1:2020-03 - Entwurf, 2020) von 7,5 m zur Gleismitte und 1,2 m Höhe über Schienenoberkante erfasst. Bei zweigleisigen Strecken findet sich auch am gegenüberliegenden Gleis der Strecke ein Messpunkt in diesem Abstand. Hierbei wird mit zwei Mikrofonen gemessen, die jeweils über das nahe Gleis hinweg die Schallemissionen des Zuges auf dem entfernten Gleis erfassen. Um diese beiden Mikrofone für die Flachstellendetektion jeweils für beide Schienen eines Gleises verwenden zu können, ist demnach eine Anpassung der gemessenen Pegel entsprechend dem Abstandsgesetz nötig.

Die Lärm-Monitoring-Stationen des Eisenbahn-Bundesamts erfassen im deutschen Schienenverkehrsnetz an 19 Messstationen mehr als zwei Drittel des gesamten Schienengüterverkehrs (Isert et al., 2021) Abbildung 45 zeigt die Lage der einzelnen Messstationen im deutschen Schienennetz. An diesen Messstellen wäre somit ein Monitoring bezüglich Flachstellen in einem repräsentativen Umfang auf dem deutschen Schienennetz möglich. Zudem wird an den Lärm-Monitoring-Stationen bereits das Luftschallsignal erfasst. Eine Erweiterung des Messaufbaus um die Messgröße Schienenbeschleunigung entsprechend der vorgeschlagenen Spezifikation wäre somit langfristig eine zielführende Möglichkeit Wagen mit schadhafte Rädern flächendeckend zu überprüfen. Hierfür wäre der Einsatz des vorgeschlagenen Detektionsverfahren zunächst an einer einzelnen Monitoring-Station automatisiert und in Echtzeit umzusetzen und zu überprüfen.

Abbildung 45: Standorte der Messstationen des Lärm-Monitoring des Eisenbahn-Bundesamts



Quelle: Isert et al., 2021

Messgrößen

Die grundlegenden Messgrößen sind der Zeitverlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels $L_{AF}(t)$ und der Zeitverlauf der Schienenbeschleunigung $L_a(t)$.

Datenauswertung

Aus dem Zeitverlauf der Messgrößen ist eine Maximums-Detektion durchzuführen. Eine logische Verknüpfung der Maxima der beiden Signale $L_{AF}(t)$ und $L_a(t)$ gibt Aufschluss über den Zeitpunkt einer vorhandenen akustisch auffälligen Flachstelle. Diese Auswertung sollte zukünftig an der Messstation automatisiert und in Echtzeit erfolgen.

8.1.2 Möglichkeiten der Automatisierung zur Flachstellendetektion

Um mit einer großen Datenmenge von Zugvorbeifahrten, wie etwa bei Monitoring-Stationen, möglichst in Echtzeit eine Flachstellendetektion durchführen zu können, ist eine Automatisierung des vorgeschlagenen Algorithmus unerlässlich.

Als Eingangsgrößen stehen hier die momentanen Schalldruck- und Beschleunigungspegel der jeweiligen Zugvorbeifahrt. Im nächsten Schritt erfolgt die Maximums-Detektion für beide Größen mit Rückgabe von Zeitpunkt und Ordnung der Maxima. Ein Aufeinandertreffen der entsprechenden Maxima zum selben Zeitpunkt, löst schließlich die Flachstellendetektion aus.

Die Rückführung dieser Zeitinformation zu den Informationen bezüglich Achs- / Radposition könnte zukünftig die notwendige Information für eine Initiierung einer Instandhaltung geben.

9 Ermittlung von Kosten und betrieblicher Umsetzbarkeit

9.1 Durchführung einer Akteursbefragung

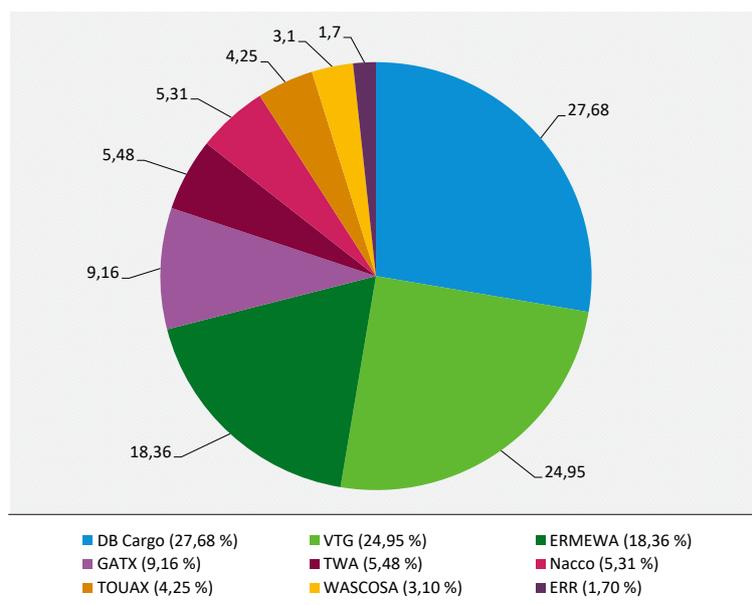
9.1.1 Recherche zu Ansprechpersonen und Experten

Um Informationen zu den Kosten und zur betrieblichen Umsetzbarkeit eines akustischen Flachstellenkriteriums zu erhalten, wurden Experteninterviews durchgeführt. Hierfür wurde zunächst eine Recherche zu möglichen Unternehmen und den jeweiligen Ansprechpersonen durchgeführt. Als zu befragende Unternehmen wurden sowohl Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen (EVU) aus dem Schienengüterverkehr (SGV), dem Schienenpersonenverkehr (SPV), als auch dem Bereich Infrastruktur ausgewählt.

Die Ermittlung potentieller Unternehmen für die Expertenbefragung erfolgte neben einer allgemeinen Marktrecherche insbesondere anhand der Liste der Mitglieder des VPI (Verband der Güterwagenhalter in Deutschland) und des VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) sowie der zugelassenen Eisenbahn-Verkehrs- und Eisenbahninfrastrukturunternehmen des Eisenbahnbundesamts. Neben der Größe der eigenen Fahrzeugflotte sowie der Verkehrsleistung bzw. für Infrastrukturunternehmen der Länge und der Art des Streckennetzes, war der Bezug zu Deutschland (Sitz / Zweigstelle) ein Kriterium für die Auswahl.

Abbildung 46 zeigt beispielhaft den recherchierten Marktanteil der Wagenhalter 2016, abgeleitet aus der Flottengröße (Wettbewerber-Report Eisenbahn2017/18, mofair e.V., NEE e.V., VPI e.V.). So besitzen die DB Cargo AG mit 27,68 % und die VTG AG mit 24,96 % bereits mehr als die Hälfte aller Waggonen.

Abbildung 46: Marktanteile der Wagenhalter 2016, abgeleitet aus der Flottengröße



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG, nach Wettbewerber-Report Eisenbahn 2017/2018, mofair e.V., Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V. und VPI e.V.

Betrachtet man die Transportkapazitäten im Schienengüterverkehr 2015, so besteht der Großteil der Fahrzeugtypen aus offenen und flachen Wagen. (Tabelle 19)

Tabelle 19: Transportkapazitäten SGV 2015

Fahrzeugtyp	Anzahl in DE
gedeckte Wagen	21.931
offene Wagen	59.945
flache Wagen	55.421
sonstige Wagen	3.846
E-Loks	1.627
D-Loks	984
Gesamt:	143.754

Quelle: Statistisches Bundesamt 2018

Insgesamt wurden zur Kontaktaufnahme 14 Unternehmen aus dem Bereich SGV mit Sitz in Deutschland ausgewählt. Tabelle 20 listet die Unternehmen mit der jeweils recherchierten Fahrzeugflotte auf.

Tabelle 20: Ausgewählte Unternehmen im SGV für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung

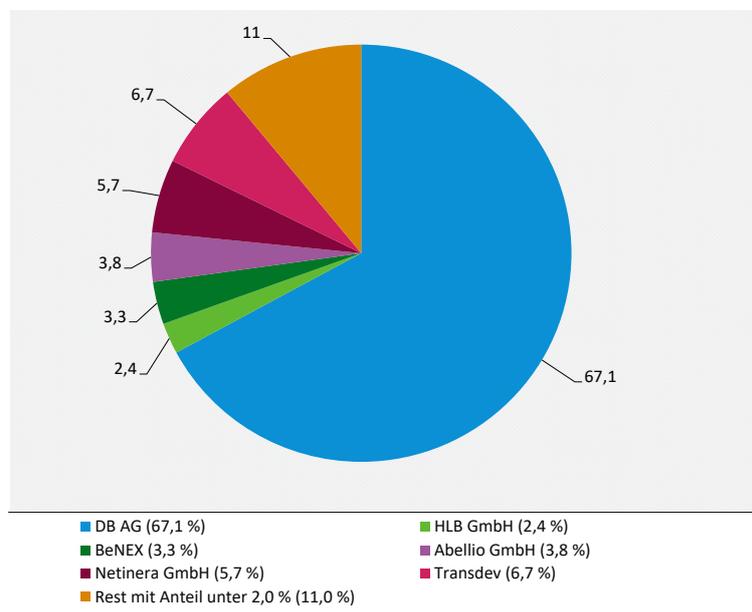
Unternehmen	Fahrzeugflotte
VTG	> 90.000 Wagen
DB Cargo	> 80.000 Wagen
Transwaggon GmbH	> 10.000 Wagen
European Rail Rent	> 4.000 Wagen
On Rail GmbH	~ 4.000 Wagen
CFL Cargo DE	~ 3.000 Wagen
ORV GmbH	~ 2.000 Wagen
VPS Verkehrsbetriebe	> 1.000 Wagen
TX Logistik	~ 1.000 Fahrzeuge
BoxXpress	~ 1.000 Fahrzeuge
Havelländische Eisenbahn	< 1.000 Fahrzeuge
RheinCargo GmbH	< 1.000 Fahrzeuge

Egoo mbH	~ 500 Fahrzeuge
Railpool	< 500 Lokomotiven

Wagen = Güterwagen, Fahrzeuge = Wagen und Lokomotiven

Im Schienenpersonennahverkehr ist wiederum mit 67,1 % die DB AG am deutlichsten vertreten. Die im Jahr 2017 erbrachte Betriebsleistung der größten Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen ist in Abbildung 47 dargestellt.

Abbildung 47: Die sechs größten Eisenbahn-Verkehrs-Unternehmen im Schienenpersonennahverkehr 2017 (mit einer Betriebsleistung von 667 Mio. Zugkilometern)



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG, nach Wettbewerber-Report Eisenbahn 2017/2018, mofair e.V., Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V. und VPI e.V.

Tabelle 21 fasst die Transportkapazitäten im Personennahverkehr in Abhängigkeit der eingesetzten Fahrzeugtypen zusammen.

Tabelle 21: Transportkapazitäten im Personennahverkehr 2015

Fahrzeugtyp	Anzahl in DE
Lokomotiven	1.142
Triebwagen/-züge	5.581
Personenwagen	4.397
Gesamt:	11.120

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2018

Die in der folgenden Tabelle 22 mit der jeweiligen Fahrzeugflotte aufgeführten Unternehmen wurden für die Akteursbefragung im Bereich SPV Deutschland ausgewählt.

Tabelle 22: Ausgewählte Unternehmen im SPV für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung

Unternehmen	Fahrzeugflotte
DB AG	~ 5.000 Fahrzeuge
Alpha Trains Europa GmbH	> 500 Fahrzeuge
Transdev GmbH	> 250 Fahrzeuge
Netinera Deutschland GmbH	> 250 Fahrzeuge
Abellio GmbH	> 250 Fahrzeuge
Hessische Landesbahn GmbH	< 250 Fahrzeuge
BeNEX GmbH	< 250 Fahrzeuge

Fahrzeuge = Triebwagen und Lokomotiven

Die Auswahl geeigneter Eisenbahninfrastrukturunternehmen erfolgte anhand ihres Anteils der Betriebslänge am deutschen Streckennetz. Dieses umfasste 2018 gemäß Statistischem Bundesamt eine Betriebslänge von ca. 40.000 km.

Tabelle 23: Ausgewählte Unternehmen der Infrastruktur für die Kontaktaufnahme zur Akteursbefragung

Unternehmen	Betriebslänge
DB Netz AG	~ 35.000 km
Hessische Landesbahn GmbH	> 500 km
Deutsche Regionaleisenbahn GmbH	> 500 km
RegioInfra Gesellschaft mbH & Co. KG	> 250 km
Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH	> 250 km
Osthannoversche Eisenbahnen AG	> 250 km
Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH	> 200 km
Westfälische Landes-Eisenbahn GmbH	> 200 km
SWEG Schienenwege GmbH	> 200 km
LWS Lappwaldbahn Service GmbH	> 100 km

BayernBahn GmbH	> 100 km
Rurtalbahn GmbH	~ 100 km

9.1.2 Erstellung der Fragebögen

Für die Durchführung der Befragung wurden alternative Fragebögen für die Eisenbahn-Verkehrs- und Infrastruktur-Unternehmen erstellt.

Grundsätzlich wurde im Fragebogen folgende Struktur beachtet:

- ▶ Allgemeiner Teil
- ▶ Fragen zur flachstellenbezogenen Instandhaltung
- ▶ Fragen zur Abschätzung von Folgeschäden
- ▶ Fragen zur Kostenabschätzung
- ▶ Abschließender Teil

Die Fragebögen können im Anhang A.2 und A.3 eingesehen werden.

Zusammen mit einem Begleitschreiben des Umweltbundesamt wurden die Fragebögen an die ausgewählten Unternehmen verschickt. Zusätzlich zu den Fragebögen wurden mit einzelnen Teilnehmenden vertiefende Interviews am Telefon geführt.

9.1.3 Teilnehmende

Von den entsprechend Tabelle 20, Tabelle 22 und Tabelle 23 kontaktierten Unternehmen nahmen schließlich die in Tabelle 24 aufgelisteten Unternehmen an der Befragung teil. So resultierte für den Bereich Schienengüterverkehr ein Rücklauf von zwei Fragebögen, einer hiervon vom Verband der Güterwagenhalter (VPI) und somit stellvertretend für eine Vielzahl der angeschriebenen Unternehmen. Im Bereich Schienenpersonennahverkehr resultierte ein Rücklauf von drei und für den Bereich Infrastruktur von zwei Fragebögen. Somit befinden sich unter den Teilnehmenden sowohl große Vertreter aus dem Schienengüterverkehr und dem Schienenpersonenverkehr als auch aus dem Bereich der Eisenbahninfrastruktur.

Tabelle 24: Übersicht der Unternehmen, die an der Befragung teilnahmen

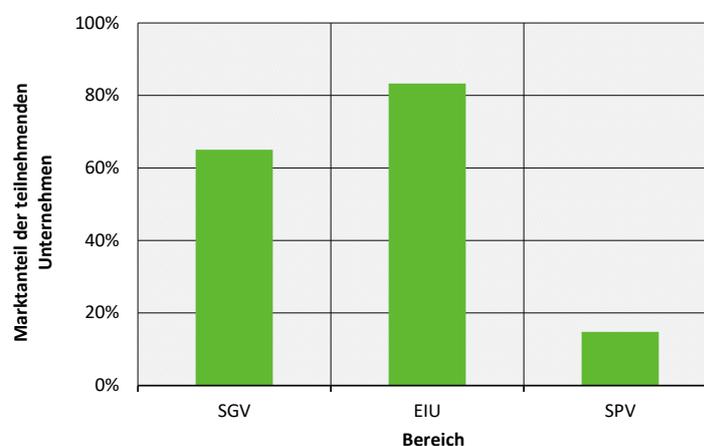
Bereich	Unternehmen	Teilnahme
Schienen-güter-verkehr	VPI (Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e.V.)	X
	VTG	
	Transwaggon GmbH	
	European Rail Rent	
	On Rail GmbH	
	ORV GmbH	
	VPS Verkehrsbetriebe	

	Havelländische Eisenbahn	
	RheinCargo GmbH	
	Egoo mbH	
	Railpool	
	DB Cargo	--
	CFL Cargo DE	--
	TX Logistik	X
	BoxXpress	--
Schienen- personen- verkehr	DB Regio	--
	DB Fernverkehr	-- *
	Alpha Trains Europa GmbH	--
	Transdev GmbH	X
	Netinera Deutschland GmbH	X
	Abellio GmbH	--
	Hessische Landesbahn GmbH	X
	BeNEX GmbH	--
Eisenbahn- infrastruktur- unternehmen	DB Netz AG	X
	Hessische Landesbahn GmbH	--
	Deutsche Regionaleisenbahn GmbH	--
	RegioInfra Gesellschaft mbH & Co. KG	--
	Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH	--
	Osthannoversche Eisenbahnen AG	--
	Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH	--

Westfälische Landes-Eisenbahn GmbH	--
SWEG Schienenwege GmbH	--
LWS Lappwaldbahn Service GmbH	--
BayernBahn GmbH	--
Rurtalbahn GmbH	X

Im Schienengüterverkehr wurden durch die Teilnahme des Verbands der Güterwagenhalter in Deutschland e.V. (VPI) Unternehmen repräsentiert, die gemeinsam einen Marktanteil von ca. 64 % abbilden. Im Bereich der Infrastruktur wird durch Teilnahme der DB Netz AG, gemessen an ihrem Anteil am aktuellen Betriebsnetz Deutschlands, ein Marktanteil von über 80 % berücksichtigt. Aus dem Bereich Schienenpersonenverkehr sind durch die Teilnahme von drei der sechs größten Unternehmen die Angaben von ca. 15 % des Marktes vertreten. Abbildung 48 veranschaulicht den Marktanteil der an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen aus den drei Bereichen Schienengüterverkehr (SGV), Schienenpersonennahverkehr (SPV) und Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen (EIU).

Abbildung 48: Marktanteil aller teilnehmenden Unternehmen im jeweiligen Bereich



SGV: Schienengüterverkehr, EIU: Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen, SPV: Schienenpersonenverkehr. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

9.1.4 Ergebnisse der Befragung

9.1.4.1 Allgemeiner Teil des Fragebogens

Im ersten und allgemeinen Teil der Expertenbefragung wurden die Art der verwalteten Fahrzeuge (Trieb-, Güter, Personenwagen oder sonstige) bzw. die Betriebslänge des verwalteten

Streckennetzes und die Rolle, die das Unternehmen im Rahmen der Instandhaltung einnimmt, befragt.

Frage 1

Für welche Art von Schienenfahrzeugen ist ihr Unternehmen als Halter im Wesentlichen verantwortlich?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Frage 1

Welche Betriebslänge umfasst das durch Ihr Unternehmen verwaltete Streckennetz?

aus dem Fragebogen für EIU

Im Bereich Schienengüterverkehr zählten alle Teilnehmenden (ca. 64 % Marktanteil in Deutschland) als Verantwortungsbereich Güterwagen, ein Unternehmen (mit knapp 1 % Marktanteil) nannte auch Triebwagen im Schienengüterverkehr. Im Bereich Schienenpersonenverkehr zählten alle Teilnehmenden (ca. 17 % Marktanteil) als Verantwortungsbereich Triebwagen, ein Unternehmen (mit knapp 7 % Marktanteil) zusätzlich Personenwagen.

Im Bereich Eisenbahninfrastruktur nannten die Teilnehmenden insgesamt eine Länge von 33.100 km als das durch sie verwaltete Streckennetz.

Die nächste Frage befragte die Rolle des Unternehmens hinsichtlich der Instandhaltung.

Frage 2

Welche Rolle nehmen Sie bzw. Ihr Unternehmen bei der Instandhaltung dieser Fahrzeuge ein?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Frage 2

Welche Rolle nehmen Sie bzw. Ihr Unternehmen bei der Instandhaltung des Streckennetzes ein?

aus dem Fragebogen für EIU

Im Bereich Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr nahmen sowohl Unternehmen an der Umfrage teil, die die Instandhaltungsaufgaben an externe Dienstleister bzw. an die entsprechende zuständige Stelle (Entity in Charge of Maintenance: ECM) weitergeben, als auch Unternehmen, die diese Aufgabe selbst übernehmen und darüber hinaus auch selbst Instandhaltungen durchführen. Im Bereich Eisenbahninfrastruktur wird bei den Teilnehmenden mit dem prozentual längsten Streckennetz die Instandhaltung von der entsprechenden zuständigen Stelle durchgeführt. Bei kleineren Eisenbahninfrastrukturunternehmen wird die Strecke teilweise selbst instandgehalten oder an externe Dienstleister für Instandhaltungen weitergegeben.

Im Folgenden wurde für die Fahrzeughalter zusätzlich die durchschnittliche Lebensdauer der jeweiligen Fahrzeuge abgefragt.

Frage 3

Wie hoch ist die durchschnittliche Lebensdauer der oben genannten Fahrzeuge?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Sowohl für den Güter- als auch für den Personenverkehr wird für die Triebwagen eine durchschnittliche Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren angegeben. Die Lebensdauer der Wagen ohne Antrieb liegt hingegen höher. So wird im Personenverkehr eine durchschnittliche Lebensdauer größer 30 Jahre angegeben, im Güterverkehr je nach Nutzung zwischen 24 und 40 Jahren.

9.1.4.2 Flachstellenbezogener Teil des Fragebogens

Bereich Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr

Im zweiten Teil der Expertenbefragung der Fahrzeughalter sollte erfasst werden, wie und wann Flachstellen an den Radsätzen des jeweiligen Fahrzeuges instandgehalten werden und welches Regelwerk hierfür herangezogen wird. Ebenfalls sollte die Häufigkeit der im Rahmen der Instandhaltung festgestellten Flachstellen quantifiziert werden.

Frage 4

Welche der an den [...] Fahrzeugen regelmäßig durchgeführten Instandhaltungen umfassen ein Prüfen und Beheben von Flachstellen an den Radsätzen und in welchen Intervallen (Lauf-km) werden diese durchgeführt?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Im Bereich Schienengüterverkehr werden die Güterwagen und deren Radsätze im Betrieb entsprechend des allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV) regelmäßig kontrolliert, wie etwa bei der Übergabe oder Abfertigung der Wagen. Sollten Wagen hierbei die Vorgaben des AVV nicht erfüllen, werden die entsprechenden Wagen mit fehlerhaften Radsätzen ausgesetzt. Die Radsätze werden ausgebaut und der Instandhaltung zugeführt.

Werden Flachstellen in der planmäßigen Instandhaltung bzw. bei Bedarfsreparaturen in der Werkstatt festgestellt, so gelten für die Wagen der Mitglieder des Verbands der Güterwagen in Deutschland die Vorgaben des „European Maintenance Guide“ (EMG). Jedoch existiert hier kein Flachstellen spezifisches Wartungsintervall.

Bei anderen Teilnehmenden aus dem Bereich des Schienengüterverkehrs wird für die Triebwagen ein Wartungsintervall zwischen 15.000 km und 30.000 km, für Güterwagen ein Intervall von ca. 15.000 km angegeben.

Im Bereich des Schienenpersonenverkehrs wird für die Triebwagen ein Wartungsintervall von 15.000 km (Verbrennungstriebwagen) bzw. 40.000 km (Elektrotriebwagen) angegeben. Des Weiteren nennt ein Teilnehmender ein Wartungsintervall von ca. 20.000 km, bei welchem Radsätze geprüft werden. Die Prüfung erfolgt hierbei als Sichtprüfung auf Vollständigkeit, auf Materialschädigungen, der Radkranz auf Anrisse, Ausbröckelungen oder Flachstellen. Bei den Personenwagen wird von einem Teilnehmenden als kürzeste Frist ein Instandhaltungsintervall von einem Monat genannt.

Frage 5

Durch welche konkreten Instandhaltungsmaßnahmen werden Flachstellen behoben?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Die Instandhaltung einer Flachstelle erfolgt entsprechend aller Teilnehmenden bei Erreichen des Grenzwerts bzw. der Verschleißgrenze durch Reprofilierung des Rades mit der Drehmaschine bzw. durch Radtausch. Hierbei kommen auch Unterflur-Radsatz-Drehmaschinen zum Einsatz, bei welchen die Bearbeitung ohne Ausbau der Räder aus dem Fahrzeug realisiert werden kann. Hierbei wird die Radsatzdrehmaschine unterhalb der Fahrschienen aufgestellt und das Fahrzeug kann über die Unterflur-Radsatzdrehmaschine rollen.

Im Bereich des Schienengüterverkehrs wurde zudem erwähnt, dass bei einer Profilierung jedes Rad des Drehgestells bearbeitet wird, um die Durchmesser toleranzen innerhalb eines Drehgestells einhalten zu können.

Im Bereich des Schienenpersonenverkehrs wurde von einem Teilnehmenden darauf hingewiesen, dass eine Flachstelle unterhalb des zulässigen Grenzwerts nicht bearbeitet wird, da hier auch die Möglichkeit besteht, dass sich die Flachstelle durch den Regelbetrieb wieder zurückbildet.

Frage 6

Inwiefern werden die Radsätze auch außerhalb von den in Frage 5 genannten Instandhaltungen, das heißt im laufenden Betrieb, auf Flachstellen geprüft?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Der Großteil der Teilnehmenden nennt als Kriterium für eine außerplanmäßige Wartung der Radsätze Bedarfsfälle, die beispielsweise durch wahrnehmbare Vibrationen, ungewöhnliche Laufgeräusche oder auch spezifische Geräuscentwicklungen vom Triebführer festgestellt werden. Des Weiteren werden Radsätze auch bei jeder weiteren planmäßigen Instandhaltung oder angewiesenem Werkstattlauf geprüft. Im Bereich der Güterwagenhalter erfolgt zusätzlich bei Wagenübergabe eine Sichtprüfung.

Darüber hinaus wurde im Bereich des Schienenpersonenverkehrs die Überwachung der Radsätze durch zusätzlich installierte Detektoren genannt.

Frage 7

Sofern Sie nicht ausschließlich für Güterwagen verantwortlich sind, auf welche Vorgaben beziehen Sie sich bei der Instandhaltung von Flachstellen?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Der Bereich Instandhaltung im Modus Schiene basiert in Deutschland u.a. auf den Vorgaben der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). Hier wird in §2 Abs. (1) allgemein gefordert,

„...Bahnanlagen und Fahrzeuge [...] so beschaffen sein [müssen], dass sie den Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Diese Anforderungen gelten als erfüllt, wenn die Bahnanlagen und Fahrzeuge den Vorschriften dieser Verordnung und, soweit diese keine ausdrücklichen Vorschriften enthält, anerkannten Regeln der Technik entsprechen.“

Hinsichtlich einer sicheren Nutzung von Güterwagen ist der verbindlich einzuhaltende Zustand des Wagens im AVV definiert. Für Triebfahrzeuge kann die DIN EN 15313:2016-09 herangezogen werden. Dies ist jedoch nicht vertraglich geregelt.

Die teilnehmenden aus dem Bereich des Schienengüterverkehrs orientieren sich für die Instandhaltung ihrer Fahrzeuge an der

- ▶ DIN EN 15313 (für Triebfahrzeuge) bzw. am
- ▶ Allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV).

Die Instandhaltung der Fahrzeuge im Bereich des Schienenpersonenverkehrs erfolgt laut der Teilnehmenden entsprechend folgender Vorgaben:

- ▶ DIN EN 15313
- ▶ Radsatzherstellerunterlagen
- ▶ Vorgaben der Fahrzeughersteller
- ▶ Herstellerinstandhaltungsprogramm und Betreiberinstandhaltungsprogramm

Frage 8

Wie viele Flachstellen werden durchschnittlich je Wartungsintervall am Fahrzeug ermittelt, die entsprechend dieses Kriteriums als kritisch einzustufen sind und eine Instandhaltung erfordern?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Eine Aussage über die Anzahl der Flachstellen je Wartungsintervall kann von den meisten Teilnehmenden nicht mit einer genauen Zahl belegt werden. Grund dafür ist entsprechend dem Verband der Güterwagenhalter in Deutschland beispielsweise bei den Güterwagen, dass Flachstellen nicht pro Fahrzeug ermittelt werden, sondern Radsätze mit unzulässigen Flachstellen ausgebaut und aufbereitet werden und dann als Komponenten auch in anderen Fahrzeugen wieder zum Einsatz kommen. Ein Teilnehmender gab an je Wartungsintervall von 15.000 km eine Anzahl von 0,02 kritischen Flachstellen je Wagen zu ermitteln.

Bei den Triebwagen im Personenverkehr beziffert ein Teilnehmender die Anzahl kritischer Flachstellen je Wartungsintervall von 15.000 bis 40.000 km mit unter 0,01. Auch bei den Triebwagen im Güterverkehr wird von einem Teilnehmenden die Anzahl kritischer Flachstellen je Wartungsintervall mit ca. 0,01 beziffert.

Es zeigte sich, dass die Anzahl kritischer Flachstellen durch die Mehrheit der Halter nicht eindeutig erfasst wird. Dies wird u.a. mit dem Vorgehen begründet, bei erforderlichen

Instandhaltungsmaßnahmen am Rad ausschließlich den schwerwiegendsten Fehler zu erfassen. Somit finden Instandhaltungen von Flachstellen statt, die jedoch im Rahmen der Dokumentation einem anderen Fehlertypen zugeordnet werden.

Frage 9

Werden generell auch Flachstellen dokumentiert, die entsprechend dieses Kriteriums nicht als kritisch einzustufen sind? Wenn ja, wie viele dieser Flachstellen werden durchschnittlich je Wartungsintervall am Fahrzeug ermittelt?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Entsprechend dem Verband deutscher Güterwagenhalter werden Flachstellen, die entsprechend der geometrischen Kriterien (im AVV) als nicht kritisch eingestuft werden, nicht dokumentiert. Ein weiterer Teilnehmender beziffert die Anzahl dieser Flachstellen bei Güterwagen auf durchschnittlich 0,01 je Wartungsintervall.

Bei den Triebwagen im Güterverkehr wird die Anzahl dieser Flachstellen auf unter 0,01 je einem Wartungsintervall von 15.000 km geschätzt, bei den Triebwagen im Personenverkehr auf ca. 0,05 je einem Wartungsintervall je 15.000 bis 40.000 km.

Bereich Infrastruktur

Der zweite Teil der Expertenbefragung der Infrastrukturunternehmen sollte herausarbeiten, welche Schäden durch Überfahrten mit Flachstellen an der Infrastruktur verursacht werden und inwiefern diese zu Instandhaltungsmaßnahmen führen.

Frage 3

Welche Folgeschäden an der Infrastruktur können durch Überfahrten mit Radformfehlern ausgelöst werden?

aus dem Fragebogen für EIU

Die teilnehmenden Eisenbahninfrastrukturunternehmen bestätigen, dass durch Überfahrten mit Radformfehlern Folgeschäden an der Infrastruktur entstehen können. Es wird erläutert, dass durch die entstehenden Schwingungen und Schläge ein Vielfaches der ungestörten dynamischen Lasten in den Ober- und Unterbau der Gleisanlage eingetragen wird und dies zu unterschiedlichen Schadensbildern führen kann. So können im Bereich von Gleisrost und Schienen an den Schweißstellen Schäden auftreten, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen, bei welchen hohe Zugspannungen in der Schiene herrschen. Im Bereich von Gleisrost und Schienenbefestigung kann der erhöhte Lasteintrag eine Schädigung der Schienenbefestigung, wie Schrauben, Dübel oder Federringe, verursachen. Im Bereich von Gleisrost und Schwelle kann sich beispielsweise bei Holzschwellen die Haltekraft für Schwellenschrauben schneller reduzieren. Der Aufbau und die Schichtstärken von Oberbau, Schotter und Schutzschichten sind nach Belastung bemessen. Übersteigt die tatsächliche Belastung die Auslastung erheblich und dauerhaft, kann es zu Schädigungen von Oberbau und Unterbau kommen. Zusätzlich werden von den Teilnehmenden Folgeschäden wie Schienenbrüche oder Spannklemmenbrüche der Schienenbefestigung genannt.

Frage 4

Welche Instandhaltungsmaßnahmen sind regelmäßig an Ihrem Streckennetz erforderlich, um diese Folgeschäden zu beheben? In welchen regelmäßigen Zeitintervallen sind diese Instandhaltungen erforderlich?

aus dem Fragebogen für EIU

Die Teilnehmenden geben an, dass keine Korrelation der erforderlichen Instandhaltung der Infrastruktur durch Radunrundheiten oder Flachstellen aufgrund des Mischverkehrs und der fehlenden Kenntnis über die Anzahl der mangelhaften Räder bekannt ist. Darüber hinaus existieren keine validierten Schädigungsmodelle, die eine Schädigung der Infrastruktur durch Räder bzw. Flachstellen quantifizieren können.

Eine Ausdifferenzierung des Instandhaltungsaufwandes nach normalem Verschleiß und Verschleiß durch Radformfehler bzw. Flachstellen erfolgt bei den Teilnehmenden nicht.

Frage 5

Inwiefern wird das Streckennetz auch außerhalb der oben genannten regelmäßigen Wartungsintervalle auf Schädigungen, die durch Überfahrten mit Radformfehlern entstanden sein könnten, geprüft?

aus dem Fragebogen für EIU

Eine Differenzierung nach Schadensursachen ist nach Angaben der Teilnehmenden nicht möglich. Das Streckennetz der DB wird beispielsweise belastungs- und geschwindigkeitsabhängig inspiziert, um so Mängel zeitnah zu beseitigen. Regelungen hierzu finden sich in verschiedenen mit dem Eisenbahnbundesamt abgestimmten Richtlinien.

Frage 6

Wie häufig ist eine zusätzliche Instandhaltung außerhalb der regelmäßigen Intervalle erforderlich?

aus dem Fragebogen für EIU

Die teilnehmenden Eisenbahninfrastrukturunternehmen geben an, dass die Instandhaltung der Infrastruktur grundsätzlich auch korrektiv also durch Schadensmeldungen erfolgt. Die Rückführung korrektiver Maßnahmen auf Schäden die ausschließlich durch Überfahrten mit Flachstellen entstehen, erfolgt jedoch nicht.

9.1.4.3 Abschätzung der Folgeschäden im Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr

Der dritte Teil des Fragenkatalogs im Güter- und Personenverkehr konzentriert sich auf die Folgeschäden von Überfahrten mit sogenannten „nicht kritischen“ Flachstellen.

Frage 10

Welche Folgeschäden am Fahrzeug resultieren aus einer Weiterfahrt mit einer Flachstelle, die aufgrund des oben genannten geometrischen Kriteriums nicht als kritisch einzustufen ist?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Die meisten Teilnehmenden können keine Folgeschäden aufgrund von „nicht kritischen“ Flachstellen benennen. Im Bereich des Schienengüterverkehrs wird von einem Teilnehmenden als möglicher Folgeschäden bei Triebwagen Vergrößerungen von Unrundheiten genannt, bei Güterwagen Ausbröckelungen auf der Lauffläche und gegebenenfalls Folgeschäden an den Federn genannt.

Im Bereich des Schienenpersonenverkehrs wird von allen Teilnehmenden darauf hingewiesen, dass das Auftreten von Folgeschäden durch Flachstellen, die entsprechend des geometrischen Kriteriums als „nicht kritisch“ eingestuft werden, nicht bekannt ist. Es wird darauf hingewiesen, dass Flachstellen, die Folgeschäden befürchten lassen, unabhängig von einem geometrischen Kriterium als kritisch eingestuft werden.

Frage 11

Wie häufig ist eine Instandhaltung der Fahrzeuge aufgrund dieser Folgeschäden erforderlich?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Der Großteil der Teilnehmenden sagt aus, dass keine Instandhaltung aufgrund von Folgeschäden erforderlich ist. Im Bereich Personenverkehr wird zudem darauf hingewiesen, dass ein Auftreten solcher Fälle Instandhaltungsfehler darstellen würden. Von einem Teilnehmenden wird die Häufigkeit für das Auftreten von Folgeschäden auf ca. 0,5 mal pro Jahr und Radsatz geschätzt.

Frage 12

Inwiefern wird aufgrund dieser Folgeschäden vom oben genannten geometrischen Kriterium abgewichen?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Sofern von den Teilnehmenden mögliche Folgeschäden genannt wurden, wird angegeben, dass von den vorgegebenen Instandhaltungskriterien „leicht“ abgewichen wird. Ein Triebfahrzeughalter aus dem Bereich Schienenpersonenverkehr nennt als zusätzliche Maßnahme das „Spardrehen“ der Radsätze zwischen 120.000 und 200.000 Lauf-km.

Im Bereich Personenverkehr wird von einem Teilnehmenden darauf hingewiesen, dass bei Vorhandensein solcher Folgeschäden die Kriterien dementsprechend angepasst werden würden.

9.1.4.4 Kostenabschätzung

Bereich Schienengüter- und Schienenpersonenverkehr

Der vierte Teil der Akteursbefragung umfasst die Abschätzung der anfallenden Kosten der jeweiligen Fahrzeuge bzw. Wagen. Hierbei sollen wenn möglich die Life-Cycle-Costs (LCC) oder deren Bestandteile (Anschaffung, Betrieb, Entsorgung) angegeben werden. Anschließend werden die gesamten Instandhaltungskosten sowie die Instandhaltungskosten für Radsätze, Flachstellen und deren Folgeschäden abgefragt.

Frage 13

Können Sie die LCC Ihrer in Frage 1 genannten Fahrzeuge abschätzen? Wenn nein, können Sie die jeweiligen Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten abschätzen?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Ein Wagenhalter aus dem Bereich Schienengüterverkehr schätzt die Life-Cycle-Kosten seiner Güterwagen auf ca. 150.000 bis 300.000 €. Hierbei werden die Anschaffungskosten der Güterwagen auf ca. 80.000 bis 146.000€ und die Betriebskosten auf ca. 70.000 bis 170.000€ über die gesamte Lebensdauer geschätzt. Vom Verband deutscher Güterwagenhalter werden die Anschaffungskosten ebenso mit ca. 100.000€ und auch die Betriebskosten über die gesamte Laufzeit mit ca. 100.000€ angegeben. Die Anschaffung von Triebwagen im Schienengüterverkehr liegt nach Angaben der Teilnehmenden zwischen 2,5 und 4,5 Mio. €, die Betriebskosten bei ca. 150.000€ pro Jahr.

Im Bereich Schienenpersonenverkehr werden die Anschaffungskosten von Triebwagen von den Teilnehmenden mit einer Bandbreite zwischen 3,5 und 20 Mio. € angegeben, die Betriebskosten mit ca. 100.000 € pro Jahr.

Insgesamt wurde nach Angaben der Teilnehmenden bei allen Zahlen aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeug- bzw. Wagentypen eine große Bandbreite gegeben.

Frage 14

Wie groß ist der Anteil an diesen Betriebskosten bzw. den LCC, der allgemein durch Instandhaltungsmaßnahmen verursacht wird?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Der durch die Teilnehmenden geschätzte Anteil der Instandhaltungskosten an den genannten Betriebskosten wird von einem Teilnehmenden für Güterwagen auf 90 % geschätzt. Für Triebwagen im Bereich Schienenpersonenverkehr wird der Anteil der Instandhaltungskosten an den Betriebskosten von einem Teilnehmenden auf 100 % geschätzt.

Frage 15

Wie groß ist der Anteil an diesen Instandhaltungskosten, der durch die Instandhaltung je Radsatz verursacht wird?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Der durch die Instandhaltung der Radsätze verursachte Anteil an den allgemeinen Instandhaltungskosten liegt laut Teilnehmenden für Güterwagen bei 40 % und für Triebwagen im Schienenpersonenverkehr zwischen 10 und 35 %.

Frage 16

Wie groß ist der Anteil an diesen Radsatz-Instandhaltungskosten, der durch Instandhaltungsmaßnahmen von Flachstellen verursacht wird?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Die durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten wiederum betragen laut Teilnehmenden für Güterwagen in etwa 40 bis 50 % der Instandhaltungskosten für die Radsätze. Für Triebwagen im Schienenpersonenverkehr wird dieser Anteil von einem Teilnehmenden auf unter 1 % geschätzt, von einem weiteren Teilnehmenden jedoch zwischen 5 und 20 % eingeordnet.

Frage 17

Wie groß ist der Anteil an den Instandhaltungskosten (Frage 15), der durch die oben genannten Folgeschäden (Frage 11) verursacht wird?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Eine Abschätzung des Kostenanteils, verursacht durch Folgeschäden aufgrund einer Weiterfahrt mit Flachstelle, die entsprechend der geometrischen Vorgaben noch nicht als kritisch eingestuft wurde, wird von nahezu allen Teilnehmenden mit 0 % beziffert. Dies entspricht der vorab von diesen Teilnehmenden geäußerten Meinung, dass eine solche Art von Folgeschäden im Grunde Instandhaltungsfehler wären und die Kriterien dementsprechend angepasst werden würden. Lediglich ein Teilnehmender schätzt den Anteil von solchen Folgeschäden an den gesamten Instandhaltungskosten auf unter 1 %.

Bereich Infrastruktur

Der vierte Teil des Fragenkatalogs für die Eisenbahninfrastrukturunternehmen soll die Instandhaltungskosten der Eisenbahninfrastruktur im Allgemeinen und in Bezug auf Überfahrten mit Flachstellen beleuchten.

Frage 7

Wie werden die Life-Cycle-Costs (LCC) von Schienenwegen grundsätzlich berechnet und können Sie diese abschätzen? Wenn nein, können Sie die jeweiligen Anschaffungs-, Betriebs- oder Entsorgungskosten abschätzen?

Frage 8

Wie groß ist der Anteil an diesen Betriebskosten bzw. den LCC, der allgemein durch Instandhaltungsmaßnahmen verursacht wird?

Frage 9

Wie groß ist der Anteil an diesen Instandhaltungskosten, der durch die Instandhaltung von den oben genannten Folgeschäden (Frage 3) verursacht wird?

aus dem Fragebogen für EIU

Leider war jedoch eine Kostenabschätzung der Life-Cycle-Costs, der Anschaffungskosten, Betriebs- oder Entsorgungskosten den Teilnehmenden nicht möglich. Als Gründe wurde von den Teilnehmenden eine große Inhomogenität des Alters des betriebenen Schienennetzes, periodisch geänderte Betriebsleistungen und verschiedene Ertüchtigungen und Teilerneuerungen der Infrastruktur genannt. Bei der Anschaffung wiederum lägen je nach Art der Anschaffung, wie etwa eine reine Schienenerneuerung oder eine komplette Gleiserneuerung, sehr unterschiedliche Anschaffungskosten vor. Ebenso finden sich aufgrund von besonderen Eigentums- und Pachtverhältnissen der Infrastruktur sehr unterschiedliche Betriebskosten.

9.1.4.5 Abschließender Teil

Im letzten Teil der Befragung wurde von den Teilnehmenden eine Einschätzung zur Relevanz von Flachstellen eingeholt. Zudem wurde die Meinung der Teilnehmenden hinsichtlich der Eignung der Vorgaben des AVV bzw. alternativ der Eignung einer intervallunabhängigen Instandhaltung auf Basis von Monitoring im Betrieb befragt.

Frage 18

Im Hinblick auf die verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von Flachstellen an Schienenfahrzeugen ein?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Frage 10

*Im Hinblick auf die an der Infrastruktur verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von **Radformfehlern insgesamt** an Schienenfahrzeugen ein?*

Frage 11

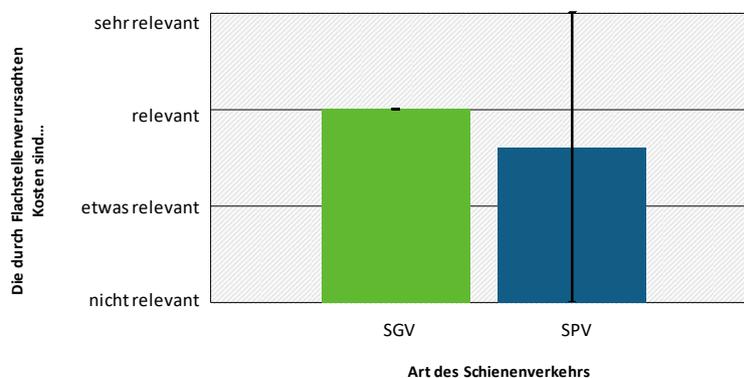
*Im Hinblick auf die an der Infrastruktur verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von **Flachstellen** insgesamt an Schienenfahrzeugen ein?*

aus dem Fragebogen für EIU

Als Antwortalternativen standen hinsichtlich der Bedeutung von Flachstellen im Hinblick auf die verursachten Kosten die Möglichkeiten „sehr relevant“, „relevant“, „etwas relevant“ und „gar nicht relevant“ zur Auswahl.

Aus dem Bereich des Schienengüterverkehrs stuften alle Teilnehmenden Flachstellen als „relevant“ im Hinblick auf die verursachten Kosten ein. Im Bereich Schienenpersonenverkehr wurde hingegen die gesamte Bandbreite der Antwortalternativen von „gar nicht relevant“ bis „sehr relevant“ gewählt. Werden die Antworten mit den Marktanteilen der jeweiligen Unternehmen gewichtet, ergibt sich folgendes Ergebnis. Im Mittel wird im SGV die Relevanz von Flachstellen hinsichtlich der verursachten Kosten einheitlich als „relevant“ eingestuft, im SPV schwanken die Antworten jedoch zwischen den Kategorien „nicht relevant“ und „sehr relevant“.

Abbildung 49: Relevanz von Flachstellen hinsichtlich der verursachten Kosten für die Bereiche SGV und SPV



Mit den Marktanteilen gemittelte Antworten zur Frage: „Wie relevant stufen Sie die Bedeutung von Flachstellen in Bezug auf die verursachten Kosten ein?“. Die Fehlerbalken zeigen die minimalen und maximalen Aussagen an. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Die Teilnehmenden aus dem Bereich der Infrastruktur konnten jedoch übereinstimmend mit den Ergebnissen aus dem Abschnitt zur Kostenabschätzung die Relevanz von Flachstellen im Hinblick auf die an der Infrastruktur verursachten Kosten nicht einstufen.

Frage 19

Inwiefern halten Sie das oben genannten geometrische Kriterium aus dem AVV als geeignet?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Frage 12

Inwiefern halten Sie das oben genannten geometrische Kriterium aus dem AVV für die Infrastruktur als geeignet?

aus dem Fragebogen für EIU

Alle Teilnehmenden aus dem Schienengüterverkehr halten das geometrische Kriterium zur Flachstellenbewertung aus dem AVV für geeignet. Es wird als ein seit Jahren bewährtes Betriebsgrenzmaß, welches den sicheren Betrieb gewährleistet, empfunden.

Im Schienenpersonenverkehr hingegen kommt dieses Grenzmaß nicht zum Einsatz und wird deshalb als nicht relevant und ungeeignet für den Schienenpersonenverkehr bewertet.

Die Teilnehmenden aus dem Bereich Eisenbahninfrastruktur erläutern, dass die geometrische Größe einer Flachstelle oder Unrundheit nicht aussagekräftig hinsichtlich der Fahrbahnbeanspruchung ist. Maßgebend für die Bewertung von unrunder Rädern oder Flachstellen sollte aus Perspektive der Eisenbahninfrastruktur die Fahrbahnbeanspruchung sein. Auch spielt beispielsweise die zulässige Fahrgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle für die Stärke des Impulses aus der Unrundheit bzw. der Flachstelle. Hier ist aus Sicht der Eisenbahninfrastruktur noch Potential für wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich dieser Zusammenhänge.

Frage 20

Wie bewerten Sie grundsätzlich eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen basierend auf Messungen an Monitoringstationen im laufenden Betrieb?

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Frage 13

Wie bewerten Sie grundsätzlich eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen, um die Anzahl von Überfahrten mit Radformfehlern zu minimieren und dadurch das Infrastrukturnetz zu schonen?

aus dem Fragebogen für EIU

Aus Perspektive des Verbands der deutschen Güterwagenhalter ist die Messung dynamischer Achslasten erprobt und auf den sicheren Betrieb der Fahrzeuge ausgelegt. Optische Methoden sind hingegen noch nicht sicher erprobt. Ein weiterer Teilnehmender aus dem Bereich Schienengüterverkehr hält eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen basierend auf Messungen an Monitoring-Stationen im laufenden Betrieb nur für „bedingt geeignet“.

Im Bereich Schienenpersonenverkehr wird von den Teilnehmenden erläutert, dass die Vermeidung von Flachstellen Priorität hat. Eine Verbesserung der Erkennung von Flachstellen auf Basis von Monitoring-Stationen ist aus ihrer Sicht nicht zu sehen. Als interessant werden hingegen automatische Laufflächendiagnosesysteme eingeschätzt, welche aktuell jedoch noch sehr kostenintensiv und allenfalls bei sehr hohem Durchsatz wirtschaftlich sind.

Wenngleich eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen teilweise von den Teilnehmenden als „wünschenswert“ angesehen wird, wird auch darauf hingewiesen, dass die Instandhaltung nicht vollständig flexibel und intervallunabhängig sein kann. Denn die Radsatzinstandhaltung orientiert sich nicht nur am Vorhandensein von Flachstellen, sondern ist auch von anderen Kriterien abhängig, wie etwa von Materialermüdung, Rissen oder Oberflächenverschleiß.

Grundsätzlich fehlen aus Perspektive der Eisenbahninfrastrukturunternehmen wie bereits vorab erläutert entsprechende Schädigungsmodelle, die eine Schädigung der Infrastruktur

durch Flachstellen oder Unrundheiten quantifizieren könnten, um eine Bewertung einer flexiblen, intervallunabhängigen Instandhaltung von Flachstellen vornehmen zu können. Es wird betont, dass ein erfolgversprechender Ansatz zur Schonung der Infrastruktur in der systematischen Vermeidung von Radformfehlern durch das EVU als zielführend angesehen wird. Des Weiteren wird angeregt analog zur Heißläuferortung (HOA) und Festbremsortung (FBOA) auch eine Rundlaufortung (RLOA) einzuführen, die grenzwertige Radsätze achsgenau identifiziert und über einen Betriebs- und ECM-Automatismus in einen fahrzeugseitigen Instandhaltungsprozess einspeist. Dies würde von Seiten der Infrastrukturbetreiber sehr begrüßt.

Frage 21

Weitere Kommentare / Hinweise zur Thematik

aus dem Fragebogen für SGV und SPV

Von Seiten des Verbands der deutschen Güterwagenhalter wird abschließend darauf hingewiesen, dass ein möglicher „akustischer“ Grenzwert zur Flachstellendetektion ausführlich bewertet werden muss. Sollte dieser zu Veränderungen in der Anzahl von Schadereignissen gegenüber den geometrischen Grenzwerten führen, wäre eine statistische Auswertung untermauert mit den durchschnittlichen Kosten je Ereignis sinnvoll. Zudem sollte die Betrachtung auf europäischer Ebene erfolgen. Eine nationale Betrachtung sei nicht ausreichend, da die Verkehre, insbesondere im Güterverkehr, international erfolgen.

Aus dem Bereich des Schienenpersonenverkehrs wird abschließend darauf hingewiesen, dass Personentriebwagen einen vergleichsweise geringen Anteil an Lärmemissionen haben. Als Gründe werden angeführt, dass sie keine Klotzbremsen besitzen und zudem die ausgereifte Gleitschutzsensorik besser vor der Bildung von Flachstellen schützt. Des Weiteren wird von einem Teilnehmenden aus dem Schienenpersonenverkehr erwähnt, dass die Bauart der Fahrzeuge und ihre Einsatzbedingungen einen großen Einfluss auf die Häufigkeit von Flachstellen und des Laufflächenverschleißes insgesamt besitzen. Zudem finden sich andere Schadensbilder, die oft eine größere wirtschaftliche Bedeutung haben.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass die Realisierung einer flexiblen und intervallunabhängigen Instandhaltung von Flachstellen, basierend auf Messungen an Monitoring-Stationen im laufenden Betrieb durch die befragten Unternehmen prinzipiell nicht abgelehnt wird. Es wird jedoch auch darauf verwiesen, dass die Vermeidung von Flachstellen durch beispielsweise Personalschulungen einen priorisierten Ansatz darstellen sollte. Zudem wird hervorgehoben, dass für die Realisierung einer derartigen Instandhaltung eine sichere Diagnose sowie eine europaweite Lösung unabdingbar ist. Weiterhin wird als alternatives Vorgehen die Einführung automatischer Laufflächendiagnosesysteme am Fahrzeug aufgeführt.

9.2 Abschätzung der aktuellen Kosten

Auf Basis der durchgeführten Akteursbefragung und weiteren Recherchen wurde nun im Folgenden abgeschätzt, welche Kosten derzeit für Wagen- und Fahrzeughalter sowie für Eisenbahninfrastrukturunternehmen durch die Instandhaltung von Flachstellen bzw. von Folgeschäden, die durch Überfahrten mit Flachstellen verursacht werden, entstehen und andererseits ob durch eine Veränderung der Wartung Kostenvorteile entstehen könnten.

9.2.1 Fahrzeughalter

Die durchschnittlichen Anschaffungskosten für einen Güterwagen belaufen sich entsprechend der Befragung (Frage 13) je nach Ausführung zwischen 80 und 150 T€, für einen Triebwagen im Güterverkehr werden die Anschaffungskosten mit 2,5 und 4,5 Mio. € angegeben. Im Personenverkehr wird eine Preisspanne zwischen 3,5 und 20 Mio. € für die Anschaffung eines Triebwagens genannt. Für die verschiedenen ICE-Züge der Deutschen Bahn AG liegen die Anschaffungskosten zwischen 18 und 33 Mio. € (Statista, 2021).

Als Betriebskosten werden für die Güterwagen Kosten von 70 bis 170 t€ für die gesamte Laufzeit von bis zu 40 Jahren angegeben, wohingegen die Betriebskosten für die Triebwagen für den Personen- und Güterverkehr mit 100 bis 150 t€ pro Jahr beziffert werden.

Tabelle 25 zeigt die Bandbreite der in der Befragung angegebenen durchschnittlichen Lebensdauer, Anschaffungs- und Betriebskosten aller Teilnehmender.

Tabelle 25: Bandbreite der Abschätzungen zu Lebensdauer, Anschaffungs- und Betriebskosten

Angaben der Fahrzeughalter	Durchschnittliche Lebensdauer	Durchschnittliche Anschaffungskosten	Betriebskosten
für Güterwagen im Güterverkehr	24 – 40 Jahre	80 – 150 t €	70 – 170 t € über gesamte Laufzeit
für Triebwagen im Güterverkehr	20 – 30 Jahre	2,5 – 4,5 Mio. €	150 t € p.a.
für Triebwagen im Personenverkehr	20 – 30 Jahre	3,5 – 20 Mio. €	100 t € p.a.

Tabelle 26 wiederum fasst die Bandbreite der Antworten aller Teilnehmenden zur Abschätzung der prozentualen Anteile der Instandhaltungskosten zusammen.

Tabelle 26: Bandbreite der Abschätzungen zu den prozentualen Anteilen der Instandhaltungskosten

Abgeschätzte Instandhaltungskosten	Prozentualer Anteil Güterwagen	Prozentualer Anteil - Triebwagen
für den gesamten Wagen	90 % der Betriebskosten	100 % der Betriebskosten
für die Radsätze eines Wagens	40 % der IH-Kosten für den gesamten Wagen	30 – 35 % der IH-Kosten für den gesamten Wagen
für Laufflächenfehler der Radsätze eines Wagens	40 – 50 % der IH-Kosten für die Radsätze eines Wagens	<1 – 20 % der IH-Kosten für die Radsätze eines Wagens
für Folgeschäden aus Flachstellen, die gemäß AVV noch keine Instandhaltungsmaßnahme auslösen	0 %	0 – < 1 %

Um eine Abschätzung zu den durchschnittlichen durch Flachstellen verursachten Kosten zu machen, wurde zunächst für den Fall, dass Teilnehmende Bandbreiten angegeben hatten, ein Mittelwert für jeden Teilnehmenden gebildet. Im Folgenden wurden die Werte der einzelnen Teilnehmenden unter Berücksichtigung einer Gewichtung entsprechend des jeweiligen Marktanteils gemittelt.

Auf diese Weise resultieren die in Tabelle 27 für Güterwagen und in Tabelle 28 für Triebwagen zusammengefassten abgeschätzten Instandhaltungskosten pro Jahr für den gesamten Wagen, die Radsätze eines Wagens, für Laufflächenfehler eines Wagens und für Folgeschäden aus Flachstellen.

Somit sind entsprechend der Teilnehmenden für Güterwagen im Mittel etwa 90 % der Betriebskosten auf Instandhaltungskosten für den gesamten Wagen zurückzuführen, die Kosten für Instandhaltungen an den Radsätzen machen hiervon wiederum etwa 40 % aus. Von diesen

wiederum sind etwa 50 % auf Laufflächenfehler der Radsätze zurückzuführen. Folgeschäden durch Laufflächenfehler konnten nicht quantifiziert werden. Werden die für eine gesamte Laufzeit von 40 Jahren im Mittel auf ca. 100 t€ geschätzten Betriebskosten auf jährliche Kosten umgerechnet, so resultieren 2.530 € Betriebskosten pro Jahr. Werden nun die prozentualen Anteile der Instandhaltungskosten berechnet, so resultieren für die Instandhaltungskosten für den gesamten Wagen 2.277€ pro Jahr, für die Radsätze 911 € pro Jahr und für Flachstellen 455 € pro Jahr.

Tabelle 27: Kostenabschätzung der Instandhaltung an Güterwagen verursacht durch Flachstellen

Abgeschätzte Instandhaltungskosten	Prozentualer Anteil	Kosten pro Jahr (Lebensdauer von 40 Jahren)
für den gesamten Wagen	90 % der Betriebskosten in Höhe von 2.530 €p.a.	90 % von 2.530 € = 2.277 €
für die Radsätze eines Wagens	40 % der IH-Kosten für den gesamten Wagen	40 % von 2.277 € = 911 €
für Laufflächenfehler der Radsätze eines Wagens	50 % der IH-Kosten für die Radsätze eines Wagens	50 % von 911 € = 455 €
für Folgeschäden aus Flachstellen, die gemäß AVV noch keine Instandhaltungsmaßnahme auslösen	0 %	0 €

Für Triebwagen fallen entsprechend der Teilnehmenden 100 % der Betriebskosten als Instandhaltungskosten an, hiervon belaufen sich im Mittel 17 % auf Instandhaltungskosten für Radsätze und davon wiederum 9 % auf Instandhaltungskosten verursacht durch Laufflächenfehler.

Werden die in der Befragung angegebenen mittleren Betriebskosten von 150 t€ für Triebwagen im Güterverkehr bzw. 106.000 € im Personenverkehr angesetzt, so resultieren schließlich für Instandhaltungskosten verursacht durch Laufflächenfehler 2.273 € pro Jahr für Triebwagen im Güterverkehr bzw. 1.606 € für Triebwagen im Personenverkehr.

Tabelle 28: Kostenabschätzung der Instandhaltung an Triebfahrzeugen verursacht durch Flachstellen

Abgeschätzte Instandhaltungskosten	Prozentualer Anteil	Kosten pro Jahr
für den gesamten Wagen	100 % der Betriebskosten in Höhe von 150 T€ (SGV) bzw. 106 T€ (SPV)	100 % von 150 T€ = 150 T€ (SGV) bzw. 100 % von 106 T€ = 106 T€ (SPV)

für die Radsätze eines Wagens	17 % der IH-Kosten für den gesamten Wagen	17 % von 150 T€ = 25.500 € (SGV) bzw. 17 % von 106 T € = 18.020 € (SPV)
für Laufflächenfehler der Radsätze eines Wagens	9 % der IH-Kosten für die Radsätze eines Wagens.	9 % von 25.500 € = 2.295 € (SGV) bzw. 9 % von 18.020 € = 1.622 € (SPV)
für Folgeschäden aus Flachstellen, die gemäß AVV noch keine Instandhaltungsmaßnahme auslösen	0,3 % der IH-Kosten für die Radsätze eines Wagens	0,3 % von 2.295 € = 77 € (SGV) bzw. 0,3 % von 1.622 € = 54 € (SPV)

Werden diese Ergebnisse einander noch einmal direkt gegenübergestellt, so ergibt sich folgendes Bild.

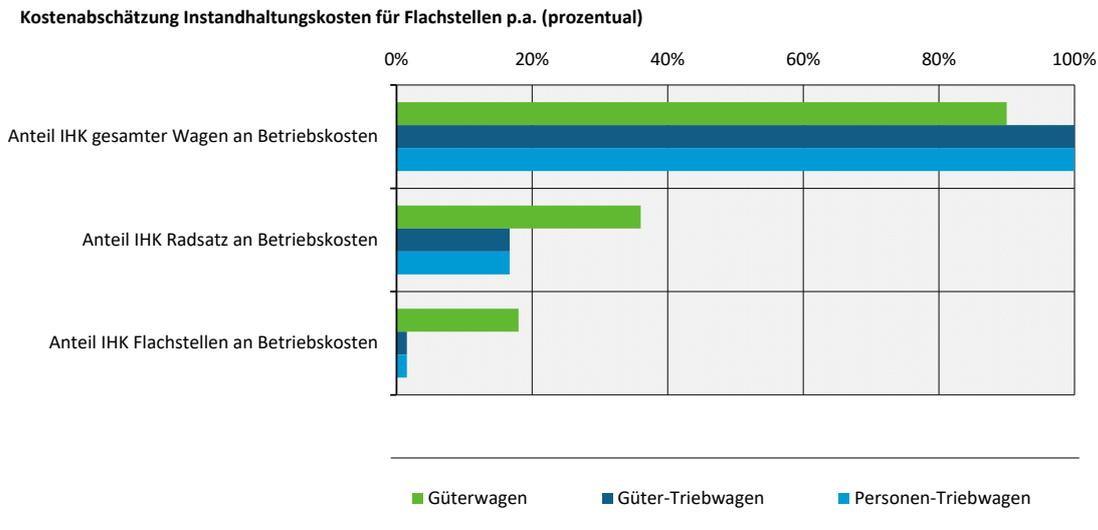
Tabelle 29: Kostenabschätzung Anschaffung, Betrieb und Instandhaltungskosten

	Güterwagen im Güterverkehr	Triebwagen im Güterverkehr	Triebwagen im Personenverkehr
Marktanteil der Teilnehmenden	93 %	1 %	8 %
Lebensdauer	40 Jahre	25 Jahre	26 Jahre
Anschaffungskosten	149.602 €	3.500.000 €	21.020.000 €
Betriebskosten p.a.	2.530 €	150.000 €	106.000 €
Instandhaltungskosten ges. Wagen p.a.	2.277 €	150.000 €	106.000 €
Instandhaltungskosten Radsatz p.a.	911 €	25.500 €	18.020 €
Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen p.a.	455 €	2.295 €	1.622 €

Abbildung 50 zeigt die resultierenden prozentualen Anteile der berechneten Instandhaltungskosten an den Betriebskosten für die drei Bereiche Güterwagen im Schienengüterverkehr, Triebwagen im Schienengüterverkehr und Triebwagen im Schienenpersonenverkehr.

Wenngleich entsprechend Tabelle 29 die absoluten durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten für Güterwagen im Vergleich zu denen für Triebwagen geringer ausfallen, ist der prozentuale Anteil an den gesamten Betriebskosten bei Güterwagen am höchsten.

Abbildung 50: Anteile von Instandhaltungskosten für Flachstellen an den Betriebskosten pro Jahr



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

9.2.2 Infrastrukturunternehmen

Eine Angabe zu den Betriebskosten oder Instandhaltungskosten im Allgemeinen bzw. den Instandhaltungskosten in Bezug auf Folgeschäden durch Flachstellenüberfahrten konnte von den teilnehmenden Eisenbahn-Infrastruktur-Unternehmen nicht gemacht werden. Insbesondere wird hier angegeben, dass durch besondere Eigentums- und Pachtverhältnisse die anfallenden Kosten nicht allgemein vergleichbar und auch keine separate Erfassung von Folgeschäden durch Flachstellen erfolgt. Zudem ist eine Korrelation der erforderlichen Instandhaltung der Infrastruktur durch Radunrundheiten oder Flachstellen aufgrund des Mischverkehrs und der fehlenden Kenntnis über die Anzahl der mangelhaften Räder nicht bekannt. Auch wird angeführt, dass es keine validierten Schädigungsmodelle gibt, die eine Schädigung der Infrastruktur durch unrunde Räder / Flachstellen quantifiziert.

Als mögliche Folgeschäden durch Flachstellenüberfahrten werden genannt:

- ▶ Brüche der Schiene oder der Spannklemmen im Bereich der Schienenbefestigung
- ▶ Gleisrost an den Schienen, an der Schienenbefestigung, an der Schwelle
- ▶ Schäden im Bereich Oberbau- Schotter-Schutzschicht

Um die Kosten für Instandhaltungen an der Infrastruktur einschätzen zu können, wurde eine Recherche zu Instandhaltungskosten im Allgemeinen an der Eisenbahninfrastruktur vorgenommen. Hierzu wurden zunächst Unternehmen aus dem Bereich des Gleisneubaus und der Gleiserneuerung kontaktiert und in Telefoninterviews befragt.

Hierbei wurde insbesondere nach den in Kapitel 9.2.2 dargestellten Informationen der Infrastrukturunternehmen zu möglichen Folgeschäden aufgrund von Flachstellenüberfahrten

recherchiert. Mit den von den Gleisbauunternehmen genannten Kosten resultierte für die notwendigen Reparaturmaßnahmen folgendes Bild:

- ▶ Schienenwechsel ca. 10.000 €
(notwendig bei Schienenbrüchen
oder Spannklemmbrüchen)
- ▶ Rostschäden
händische Reparatur ca. 10.000€
Reparatur bei Einsatz von Großmaschinen ca. 80.000 €

9.3 Kostenabschätzung für eine frühere Behebung von Flachstellen

9.3.1 Motivation und Vorgehensweise

Um eine Aussage über mögliche Kostenänderungen durch eine frühere Behebung von Flachstellen machen zu können, wurden im Folgenden die Erkenntnisse aus der Akteursbefragung zu den flachstellenbezogenen Instandhaltungskosten mit den Erkenntnissen zur Häufigkeit von Zugvorbeifahrten mit Flachstellen aus den durchgeführten Messungen ins Verhältnis gesetzt.

Zur Modellierung der hypothetischen Kostenersparnis werden im Folgenden die Abhängigkeiten der verschiedenen Größen als formalisierte Zusammenhänge dargestellt. Während Daten aus der vorliegenden Datenbasis direkt in das Modell eingearbeitet wurden, wurden unbekannte Größen als Variablen abgeschätzt und durch Variation als Kurvenschar abgebildet.

Die aus dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten waren wie folgt:

- ▶ Jährlichen Kosten der Instandhaltung für Wagen und Triebwagen im SGV und SPV verursacht durch Flachstellen gemäß Kapitel 9.2.1,
- ▶ Anzahl von Überfahrten insgesamt und mit Flachstelle, detektiert mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies, im Messzeitraum von 1 Monat.

Weitere als Variablen angesetzte Größen waren wie folgt:

- ▶ Kosten für eine Radsatzaufbereitung,
- ▶ Instandhaltungskosten verursacht durch Flachstellen an der Infrastruktur

Ziel ist es das Kosteneinsparungspotential durch ein geändertes Instandhaltungsverhalten in Bezug auf Fahrzeug und Infrastruktur zu beleuchten.

9.3.2 Abhängigkeit der Infrastrukturbeanspruchung durch Flachstellen auf die Kostenersparnis

Die Flachstellendetektion von Müller-BBM Rail Technologies beruht wie in Kapitel 5.8 beschrieben auf einer Erkennung der Impulsanregung, verursacht durch den Schlag zwischen Schiene und Rad. Demnach soll davon ausgegangen werden, dass jede von diesem System detektierte Flachstelle eine Eintragung in die Gleise als Körperschall mit sich bringt und somit zu vermeiden wäre, um die Infrastruktur zu schonen.

Deshalb wurde auf Basis der in Kapitel 6 vorgestellten Messungen und der Flachstellendetektion mittels des Flachstellenindikators von Müller-BBM Rail Technologies eine statistische Auswertung zur Häufigkeit von Flachstellen an einzelnen Wagen der vorbeifahrenden Zügen durchgeführt. In der folgenden Tabelle ist der Prozentsatz der Wagen mit einer Detektion des Flachstellenindikators (FL-Ind.) von mindestens 5 an allen im Messzeitraum vorbeigefahrenen angetriebenen und nicht angetriebenen Wagen für den Schienengüterverkehr und den Schienenpersonenverkehr aufgeschlüsselt.

Tabelle 30: Detektion der im Messzeitraum vorbeifahrenden Wagen mit einem Flachstellenindikator > 5

Wagenkategorie	Anzahl aller Überfahrten	Anzahl der Überfahrten mit FL-Ind. >5	Prozentsatz mit FL-Ind. >5
SGV – Triebwagen	1.549	298	19,24 %
SGV - Güterwagen	24.197	7.369	30,45 %
SPV – Triebwagen	944	140	14,83 %
SPV - Personenwagen	16.610	72	0,43 %
gesamt	43.300	7.879	18,20 %

Es wird angenommen, dass die Belastung der Infrastruktur durch die Anzahl der Überfahrten mit einem Wagen mit Flachstelle in direktem Zusammenhang steht. Jedoch ist der genaue Zusammenhang, wie auch in der Akteursbefragung von den teilnehmenden Infrastrukturunternehmen erwähnt, nicht bekannt und bedarf einer weiteren und vertieften Forschungsarbeit. Deshalb wurde zur Modellierung der Kostenabschätzung der *Flachstelleninduzierter Kostenfaktor Infrastruktur FLI* eingeführt. Dieser wurde in der Modellierung systematisch variiert, um einen möglichen Einfluss anhand einer resultierenden Kurvenschar beschreiben zu können.

Basierend auf diesen Informationen wurden die an der Infrastruktur verursachten Kosten K_{FL} (*Infra*) folgendermaßen berücksichtigt:

$$K_{FL} \text{ (Infra)} = N_{FLÜ} \times FLI$$

mit $N_{FLÜ}$ Anzahl der Überfahrten von Wagen mit Flachstelle,
 FLI Flachstelleninduzierter Kostenfaktor Infrastruktur.

9.3.3 Abhängigkeit der durch Flachstellen verursachten Fahrzeuginstandhaltungen auf die Kostenersparnis

9.3.3.1 Abhängigkeit der bisher durch Flachstellen verursachten Fahrzeuginstandhaltungen

Als Betrachtungszeitraum wurde im Folgenden ein Jahr angesetzt. Hierfür wurden zunächst die in Kapitel 9.2.1 abgeschätzten aktuellen jährlichen Instandhaltungskosten je Wagentypen herangezogen. Diese betragen demnach:

- ▶ an Güterwagen: 455 €
- ▶ an Triebwagen im SGV: 2.295 €
- ▶ an Triebwagen im SPV: 1.622 €

Um nun für die Gesamtheit aller Wagen die aktuell anfallenden Fahrzeuginstandhaltungskosten zu ermitteln, wurden diese Kosten mit der Gesamtheit aller Überfahrten am Messort multipliziert. Da jedoch ein und derselbe Wagen öfter am Messort passiert, wurde der resultierende Wert als erste grobe Annahme mit einem Anteil von 50 % übernommen. Der tatsächliche Anteil an individuellen Wagen müsste jedoch mit einem Video-Zugerkennungssystem erfasst werden oder in anderer Weise (bspw. Auf Basis von Wagenreihungsplänen) recherchiert werden.

Somit resultiert für die bisherigen jährlichen Instandhaltungskosten $K_{FL}(Fzg, \text{bisher})$ folgender Zusammenhang:

$$K_{FL}(Fzg, \text{bisher}) = 0,5 \times (N_{SGV Tr} \times IHK_{FL SGV Tr} + N_{SGV Gw} \times IHK_{FL SGV Gw} + N_{SPV Tr} \times IHK_{FL SPV Tr})$$

mit	$N_{SGV Tr}$	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Triebwagen des SGV, extrapoliert auf 1 Jahr
	$N_{SGV Gw}$	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Güterwagen des SGV, extrapoliert auf 1 Jahr
	$N_{SPV Tr}$	Anzahl aller an der Messstrecke vorbeigefahrenen Triebwagen des SPV, extrapoliert auf 1 Jahr
	$IHK_{FL SGV Tr}$	Jährliche Instandhaltungskosten für Triebwagen des SGV gem. Tabelle 29
	$IHK_{FL SGV Gw}$	Jährliche Instandhaltungskosten für Güterwagen des SGV gem. Tabelle 29
	$IHK_{FL SPV Tr}$	Jährliche Instandhaltungskosten für Triebwagen des SPV gem. Tabelle 29

9.3.3.2 Abhängigkeit der durch eine zeitnahe Behebung neu verursachten Fahrzeuginstandhaltungen

Wird nun davon ausgegangen, dass jeder detektierte akustisch auffällige Radlaufschaden möglichst zeitnah behoben wird, so fallen hierbei zunächst zusätzliche Instandhaltungskosten an. Diese neu anfallenden Instandhaltungskosten $K_{FL}(Fzg, neu)$ wurden im Weiteren folgendermaßen angesetzt:

$$K_{FL}(Fzg, neu) = N_{FLÜ} \times IHK_{Radsatz}$$

mit $IHK_{Radsatz}$ Instandhaltungskosten für eine Radsatzaufbereitung

An dieser Stelle findet sich jedoch zum einen die aktuell nicht genau bestimmbare Größe der Instandhaltungskosten für einen Radsatz bei sofortiger Instandhaltung. In verschiedenen Interviews wurde von einem Mindestkosten ab 600 € bis zu mehreren tausend Euro gesprochen. Deshalb wurde für die weitere Berechnung dieser Wert zunächst als Variable angesetzt, um durch die Veränderung dieser Größe den Einfluss auf die weiteren Zusammenhänge betrachten zu können. Zum anderen ist darauf hinzuweisen, dass in die Berechnungen hier als „Anzahl der Überfahrten von Wagen mit akustisch auffälligen Flachstellen“ $N_{FLÜ}$ alle Überfahrten, die mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies mit einem Wert > 5 detektierte wurden, einfließen. Die Korrelation zwischen akustischer Auffälligkeit und dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies zeigte sich jedoch in den vorangegangenen Kapiteln als nicht optimal. So erwiesen sich bei den Analysen durchaus nicht alle Flachstellen mit einem Wert > 5 als akustisch auffällig. Mit einem Ansetzen aller Überfahrten mit einem Flachstellenindikator > 5 werden die Kosten $K_{FL}(Fzg, neu)$ jedoch tendenziell eher überschätzt.

9.3.3.3 Verknüpfung der bisherigen und neuen Fahrzeuginstandhaltungskosten

Um nun die beiden Aspekte der bisherigen und der neuen Fahrzeuginstandhaltungen zu einer gemeinsamen Kostenposition $K_{FL}(Fzg)$ zu verknüpfen, wurde aus den bisherigen Kosten $K_{FL}(Fzg, bisher)$ und den neu anfallenden Kosten $K_{FL}(Fzg, neu)$ eine Summe gebildet.

$$K_{FL}(Fzg) = p \times K_{FL}(Fzg, bisher) + q \times K_{FL}(Fzg, neu)$$

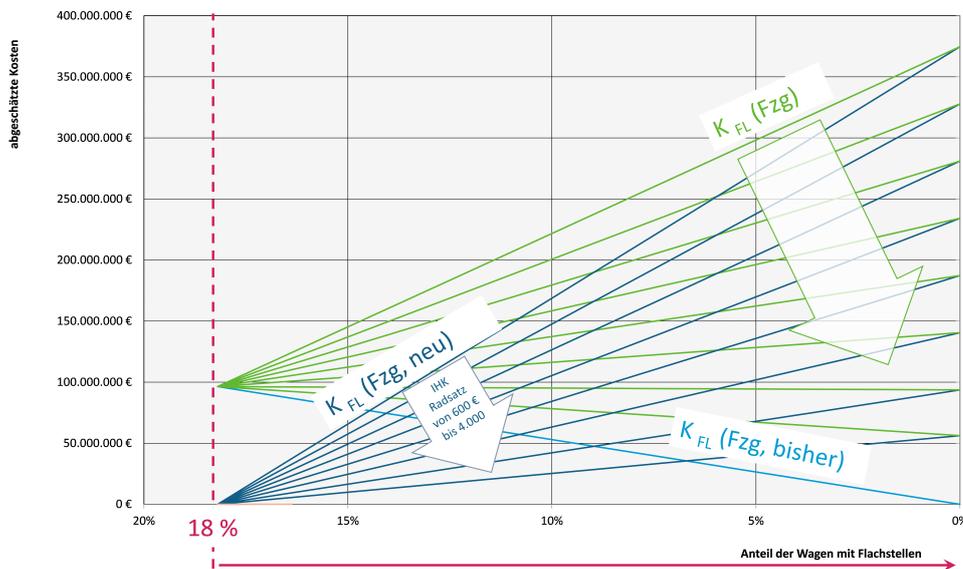
mit p Prozentsatz der Fahrzeuge, die in Bezug auf Flachstellen wie bisher instandgehalten werden,
 q Prozentsatz der Fahrzeuge, deren Flachstelle nach Flachstellendetektion an der Strecke möglichst behoben wird,
 $K_{FL}(Fzg, bisher)$ bisherigen recherchierten jährlichen Instandhaltungskosten verursacht durch Flachstellen und
 $K_{FL}(Fzg, neu)$ neu anfallenden Kosten, sofern eine Flachstelle detektiert wird.

Die Zusammensetzung der beiden Summanden $K_{FL}(Fzg, bisher)$ und $K_{FL}(Fzg, neu)$ verändert sich jedoch, je nachdem wie viele mit Flachstelle detektierte Fahrzeuge selektiert und deren Flachstellen behoben werden. So schlägt für den aktuellen Fall ohne Selektion von Flachstellen

der erste Summand vollständig zu Buche ($p=100\%$) und der zweite überhaupt nicht ($q=0\%$), wohingegen bei einer laufenden Flachstellenselektion im Betrieb der erste Summand gegen 0% geht und sich der zweite auf 100% beläuft.

Abbildung 51 zeigt nun den Verlauf der durch Flachstellen verursachten Kosten an den Fahrzeugen bei Variation der Instandhaltungskosten für eine Radsatzaufbereitung, IHK_{Radsatz} von 600 € bis 4.000 € . Es ist zu erkennen, dass die Gesamtkosten für die Fahrzeuginstandhaltung (grüne Kurvenschar) je nach Annahme der Kosten für die Radsatzaufbereitung (dunkelblaue Kurvenschar) bei einer schrittweisen Reduzierung des flachstellenbehafteten Fahrzeuge Abnahme der Flachstellen abnehmen oder zunehmen können.

Abbildung 51: Modellierung der durch Flachstellen verursachten Kosten an den Wagen, aufgetragen über dem Prozentsatz an Wagen mit Flachstellen



Abschätzung der Entwicklung von Instandhaltungskosten an den Wagen bei schrittweiser Reduzierung der flachstellenbehafteten Fahrzeuge im Schienennetz von aktuell ca. 18% auf 0% . Hellblau: $K_{FL}(\text{Fzg, bisher})$, dunkelblau: $K_{FL}(\text{Fzg, neu})$ als Kurvenschar in Abhängigkeit von den Instandhaltungskosten eines Radsatzes, grün: $K_{FL}(\text{Fzg})$ als resultierende Kurvenschar. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

9.3.4 Modellierung der Gesamtkostenersparnis

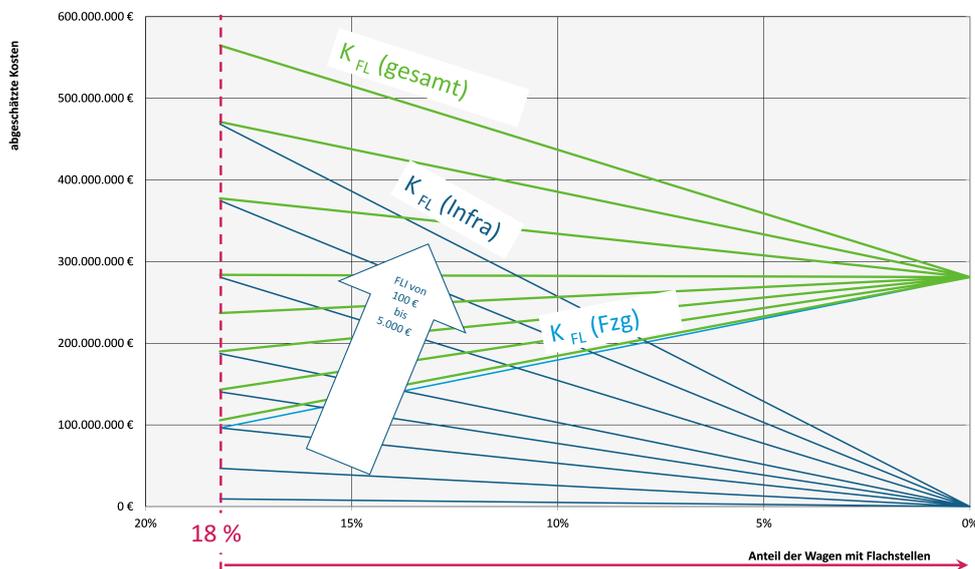
Um die Gesamtkosten für Instandhaltungen für Fahrzeuge und Infrastruktur, verursacht durch Flachstellen, zu berechnen, sind nun die Kosten an der Infrastruktur und die Gesamtkosten am Fahrzeug zu addieren.

$$K_{FL}(\text{gesamt}) = K_{FL}(\text{Infra}) + K_{FL}(\text{Fzg})$$

mit $K_{FL}(\text{gesamt})$ die Gesamtkosten verursacht durch Flachstellen,
 $K_{FL}(\text{Infra})$ die an der Infrastruktur durch Flachstellen verursachten Kosten und
 $K_{FL}(\text{Fzg})$ die an den Fahrzeugen durch Flachstellen verursachten Kosten.

Im Folgenden wurde nun diese Gesamtkostenentwicklung über dem prozentualen Anteil von Wagen mit Flachstellen dargestellt. Hierzu wurde ein Wert von 3.000 € für die Instandhaltungskosten für eine Radsatzaufbereitung, IHK_{Radsatz} zugrunde gelegt. Der Wert für den flachstelleninduzierten Kostenfaktor FLI wurde hingegen nun zwischen 100 € und 5.000 € variiert (dunkelblaue Kurvenschar). Der Einfluss dieser Kosten zeigt sich direkt in den resultierenden Gesamtkosten $K_{FL}(\text{gesamt})$ (grüne Kurvenschar). So können die Kosten je nach Höhe des flachstelleninduzierten Kostenfaktors Infrastruktur FLI in ihrer Gesamtheit entweder zunehmen oder aber auch deutlich abnehmen.

Abbildung 52: Gesamtkostenabschätzung verursacht durch Flachstellen, aufgetragen über dem Prozentsatz an Wagen mit Flachstellen



Abschätzung der Entwicklung von Instandhaltungskosten an Infrastruktur und Fahrzeug bzw. den sich daraus berechnenden Gesamtkosten verursacht durch Flachstellen bei schrittweiser Reduzierung der flachstellenbehafteten Fahrzeuge im Schienennetz von aktuell ca. 18 % auf 0 %. Grün: Verlauf der Gesamtkosten $K_{FL}(\text{gesamt})$ verursacht durch Flachstellen (Kurvenschar bei Modifikation des flachstelleninduzierten Kostenfaktor Infrastruktur FLI), dunkelblau: Verlauf der Instandhaltungskosten verursacht durch Flachstellen an der Infrastruktur $K_{FL}(\text{Infra})$ (Kurvenschar bei Modifikation des flachstelleninduzierten Kostenfaktor Infrastruktur FLI), hellblau: Verlauf der Instandhaltungskosten verursacht durch Flachstellen an den Wagen $K_{FL}(\text{Fzg})$. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Das Potential der Kostenersparnis bei Reduzierung des Anteils von Wagen mit Flachstellen ist somit direkt von der Höhe des flachstelleninduzierten Kostenfaktors FLI Infrastruktur abhängig. Eine ausführliche Analyse dieser Größe ist demnach essentiell zur Bewertung der Ergebnisse.

Hier wäre die Erarbeitung eines Schädigungsmodells, das die Schäden verursacht durch Flachstellen in Bezug auf die Fahrbahneinwirkungen und die dadurch erzeugte Fahrbahnbeanspruchung ein wichtiger Meilenstein.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem hier vorliegenden Modell ein Gerüst für die Prognose der Gesamtkostenverteilung erstellt wurde, die tatsächlichen Quantitäten jedoch von wesentlichen bis dato noch unbekanntem Parametern abhängen. Ein allgemeingültiges Ergebnis hinsichtlich der Kosteneinsparung aufgrund einer früheren Behebung von Flachstellen ist dementsprechend mit dem aktuellen Wissensstand nicht ableitbar.

9.4 Darstellung der betrieblichen Umsetzbarkeit

Wie die Messungen belegen, liegt der Schwerpunkt der Flachstellenproblematik bei Güterwagen. Deshalb wurde der Fokus für eine betriebliche Umsetzbarkeit auf den Güterwagensektor gelegt. Um für dieses Umfeld eine betriebliche Umsetzbarkeit einer schnellen Flachstellenbehebung zu analysieren, wurde mit dem Technischen Koordinator des Verbands der Güterwagenhalter e.V. ein Telefoninterview geführt. Hierfür wurde folgendes Szenario skizziert:

An einer Messstelle am Gleis wird basierend auf einer akustischen Auffälligkeit einer Flachstelle an einem Wagen im Betrieb detektiert.

- ▶ Kann auf Basis der Informationen zur Zugvorbeifahrt (Ort, Zeitpunkt, Gleis, Zugkategorie, Wagennummer) auf den Wagenhalter bzw. das entsprechend Schienenverkehrsunternehmen geschlossen werden?
- ▶ Wie kann dieser effizient über das Vorhandensein des akustisch auffälligen Flachstelle informiert werden? Welche Stellen bei Schienenverkehrsunternehmen müssten für einen optimalen Informationsfluss kontaktiert werden?
- ▶ Mit welchem zeitlichen Abstand könnte nach Information über das Vorhandensein der akustisch auffälligen Flachstelle der Wagen einer außerplanmäßigen Wartung zugeführt werden?
- ▶ Mit welchen Mehrkosten wäre dies für den Wagenhalter verbunden?

Vergleichbar zu den im AVV geregelten Vorgaben, welche Maßnahmen bei einem defekten Fahrzeug einzuleiten sind (wie etwa, ob noch eine Entladung möglich ist oder aus Sicherheitsgründen das Fahrzeug sofort ausrangiert wird), liegt dies in der Obhut der Eisenbahnverkehrsunternehmen. So wäre auch bei einer akustischen Flachstellendetektion, für den Fall, dass an einem Messpunkt der Infrastruktur ein auffälliger Wagen detektiert wird, ein Informationsfluss von Infrastruktur zu den entsprechenden Eisenbahnverkehrsunternehmen nötig. Üblicherweise entscheidet im weiteren Verlauf das EVU darüber, welche Werkstatt angefahren wird, so gibt es entsprechende Servicepunkte oder mobile Serviceeinheiten.

Der zeitliche Abstand zwischen Meldung und Ausrangieren des Wagens kann jedoch nicht quantifiziert werden, da die Umsetzung von der Schwere des Mangels abhängig ist.

Logistisch steht für einen ausrangierten Wagen üblicherweise keine Reserve zur Verfügung. Dementsprechend werden üblicherweise wichtige Auslieferungen noch vorgenommen, um dann den Mangel am Abladeort an einer dort stationierten Serviceeinheit zu beheben.

Im AVV werden in Anhang 1 sämtliche Mängel am Fahrzeug kategorisiert nach allen Bauteilen und mit einem Code versehen, aufgeführt und die entsprechenden Maßnahmen bzw. die Fehlerklasse für den jeweiligen Mangel definiert. Die Definition der Fehlerklassen findet sich in Anhang 2 und umfasst die Klassen 1 bis 5. Tabelle 31 listet die fünf verschiedenen Klassen auf.

Der Mangel Flachstellen (mit dem Code 1.3.3) wird entsprechend dem Fehlerkatalog in die Fehlerklasse 4 kategorisiert und mit der Maßnahme „Aussetzen“ belegt.

Tabelle 31: Fehlerklassen entsprechend dem AVV, Anhang 2

Fehlerklasse	Definition	Fehlerwert
1	Belangloser Fehler	0,002
2	Fehler mit geringen Auswirkungen	0,05
3	Nebenfehler	0,125
4	Hauptfehler	0,4
5	Kritischer Fehler (erhebliche Auswirkungen auf Betriebssicherheit)	1,0

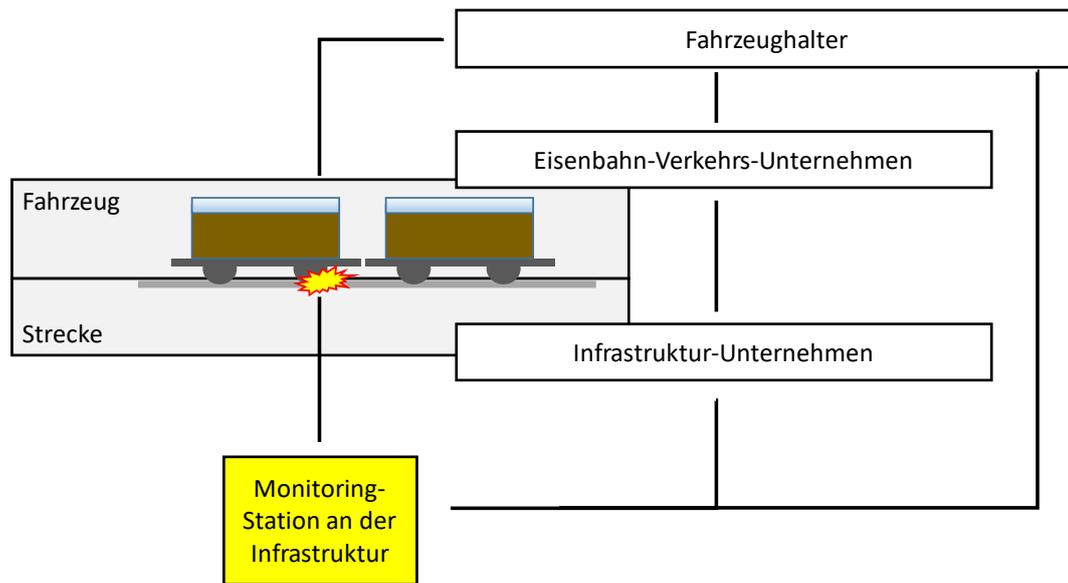
Szenario „Monitoring an der Infrastruktur“

Zunächst soll das Szenario einer Flachstellendetektion via Monitoring-Stationen an der Infrastruktur beschrieben werden. Abbildung 53 skizziert die notwendigen betrieblichen Abläufe bis zur Behebung der Flachstelle am Fahrzeug. Nach einer entsprechenden Detektion an einer Monitoring-Station an der Strecke, erhält das Infrastruktur-Unternehmen hierüber die Mitteilung. Diese kontaktieren das entsprechende Eisenbahn-Verkehrsunternehmen, welches das auffällige Fahrzeug betreibt. Für die Instandhaltungspflicht ist jedoch der Fahrzeughalter verantwortlich. Somit wird dieser vom EVU informiert, um den Mangel zu beseitigen. Ebenso ist ein direkter Informationsfluss von der Monitoring-Station an den Fahrzeughalter denkbar.

Eine zeitnahe Beseitigung eines Mangels erfolgt bei sicherheitsrelevanten Mängeln laut dem Verband der Güterwagenhalter in Deutschland üblicherweise ohne Probleme. In Bezug auf die Beseitigung einer detektierten Flachstelle wäre somit wesentlich, ob dieser Mangel als sicherheitsrelevant eingestuft wird oder nicht. Eine Flachstelle gemäß der im AVV definierten Grenzwerte wird wie oben dargestellt zwar als Hauptfehler eingestuft und das Fahrzeug muss ausgesetzt werden, eine akustisch auffällige Flachstelle dessen geometrische Abmessung jedoch nicht spezifiziert ist, ist zunächst per se kein sofort zu behebbender Fehler. Dies müsste im rechtlichen Rahmen (siehe hierzu auch Kapitel 10.3) angepasst werden. Würde eine akustisch auffälliger Flachstelle somit gemäß dem in diesem Forschungsvorhaben entwickelten „Akustischen Instandhaltungskriterium“ als sicherheitsrelevanter Mangel eingestuft, wäre das Aussetzen des Fahrzeugs und die sofortige Behebung notwendig.

Als Beispiel für ein funktionierendes System zur Detektion eines Mangels an der Infrastruktur mit gut funktionierenden betrieblichen Abläufen bei Detektion eines Mangels, kann die Heißläuferortungsanlage (HOA) aufgeführt werden (Eisenbrand, 2011, Schröbel, 2011). Mittels Infrarotsensoren im Gleisbereich kann die Temperatur der Achslager von vorbeifahrenden Zügen gemessen werden, um dadurch eine Erwärmung von Radsatzlagern rechtzeitig zu detektieren. Eine übermäßige Erwärmung der Lager könnte zu einem Achsbruch und dadurch auch im weiteren Verlauf zu Entgleisungen führen. Somit besteht ein erhebliches Sicherheitsrisiko durch Heißläufer. Im Netz der DB sind nach Stand 2007 insgesamt 420 Heißläuferortungsanlagen installiert. Nach Angaben des Verbands der Güterwagenhalter in Deutschland funktioniert für dieses Beispiel der betriebliche Ablauf von Detektion bis Behebung des Mangels mit allen Beteiligten reibungslos und in einem guten Konsens.

Abbildung 53: Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion an Monitoring-Stationen



Schematische Darstellung des notwendigen Informationsflusses bei Detektion einer Flachstelle über eine Monitoring-Station an der Infrastruktur. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

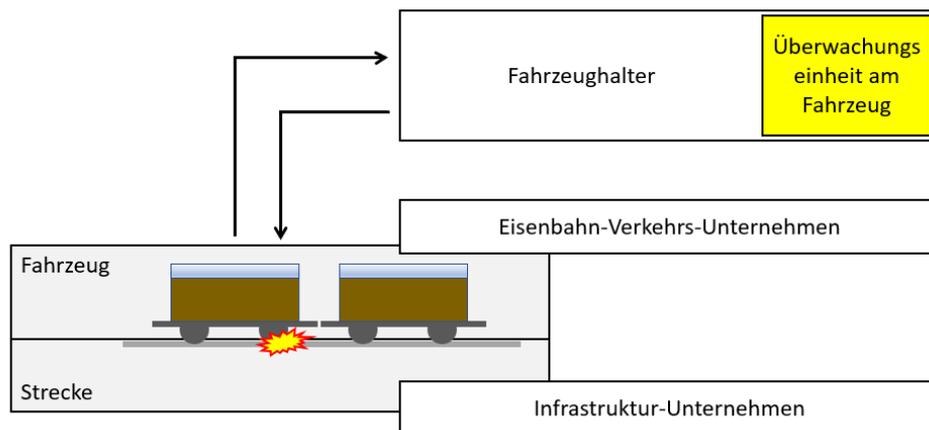
Auch ein Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur beschäftigt sich mit der Möglichkeit der Flachstellendetektion an Monitoring-Stationen an der Infrastruktur. Hierfür sollen die 19 vom Eisenbahnbundesamt betriebenen und deutschlandweit verteilten Monitoring-Stationen zur Datengewinnung herangezogen werden.

Vorteilhaft bei der Erfassung von Flachstellen an Monitoring-Stationen der Infrastruktur ist zudem, dass alle relevanten Messgrößen (siehe hierzu auch Kapitel 8.1.1) für die akustische Flachstellendetektion an der Infrastruktur erfasst werden können.

Erweiterung um das Szenario „Monitoring am Fahrzeug“

Als Erweiterung zu dem eben beschriebenen Szenario soll im Folgenden ein Szenario mit einem Monitoring-System am Fahrzeug diskutiert werden. Der große Vorteil bei einer Detektion am Fahrzeug, ist in Abbildung 54 ersichtlich. Während bei einer Detektion an der Infrastruktur verschiedene Unternehmen in den Prozess eingebunden werden müssen, könnte bei einer Detektion am Fahrzeug der Fahrzeughalter den mangelhaften Zustand seines Wagens direkt erkennen und zeitnah beheben.

Abbildung 54: Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion am Fahrzeug



Schematische Darstellung des notwendigen Informationsflusses bei Detektion einer Flachstelle über ein Monitoring-System am Fahrzeug. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Somit wäre die Verknüpfung der beiden Szenarien eine optimale Lösung, um flächendeckend eine schnelle Instandhaltung von Flachstellen sicherzustellen. Abbildung 55 skizziert die Kombination der beiden Szenarien. Hierbei sollte die größte Menge an erfassten Flachstellen optimaler Weise direkt über den „kurzen Weg“ des fahrzeugseitigen Monitorings erfolgen ergänzt durch die Überwachung an den Infrastruktur-Monitoring-Stationen des Bundes.

Der Ansatz eines fahrzeugseitigen Flachstellen-Monitorings ist auch in Übereinstimmung mit den Aussagen der Infrastrukturunternehmen in der Akteursbefragung. Hier wurde betont, „*dass ein erfolgversprechender Ansatz zur Schonung der Infrastruktur in der systematischen Vermeidung von Radformfehlern durch das EVU als zielführend angesehen wird.*“

Zusätzlich zu diesen von den Infrastrukturunternehmen genannten Systemen, wie Heißläufer-Festbrems- oder Rundlaufortungsanlagen sollte an dieser Stelle auch die Möglichkeit einer akustischen Flachstellendetektion am Fahrzeug überdacht werden. So ist denkbar, dass durch eine Implementierung eines akustischen Aufnehmers im Unterbodenbereich die wesentlichen Messgrößen zur Detektion einer akustisch auffälligen Flachstelle aufgezeichnet werden. Eine mögliche Verknüpfung mit anderen fahrzeugseitigen Ortungssystemen, wie beispielsweise der Rundlaufortung, könnte eventuell fehlende Informationen aus dem Bereich der Infrastruktur, wie die Schienenbeschleunigung, ausgleichen. Dieses große Potential sollte in weiterführenden Untersuchungen in Kooperation mit Eisenbahnverkehrsunternehmen bzw. Fahrzeughaltern ausgelotet werden. Beispielhaft hierfür wäre der in Kapitel 5.4 skizzierte Ansatz zur fahrzeugseitigen Flachstellenortung über Telematik.

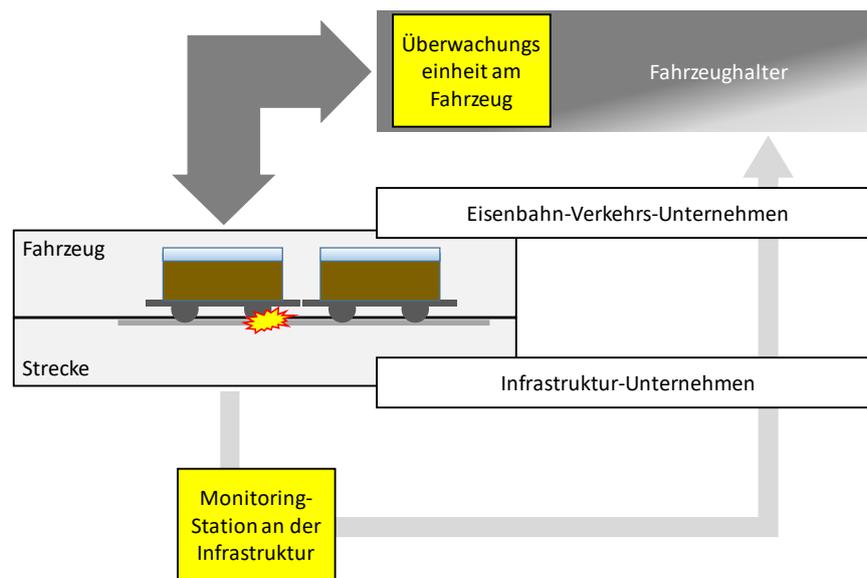
In diesem Zusammenhang soll auch auf das Potential einer Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) hingewiesen werden (Allianz pro Schiene, 2020). Bei diesen Systemen besteht der Vorteil nicht nur in einer automatischen Kupplung der Wagen, vielmehr verfügt das System auch über Strom- und Datenleitungen, die zum einen mögliche Sensoreinheiten am Wagen mit Strom versorgen können, aber auch Zustandsdaten an den Zugführer senden können. Auf diese Weise könnten fahrzeugseitige Flachstellendetektionssysteme die Information direkt und ohne zeitliche Verzögerung weitergeben.

Laut dem Vorsitzenden des VPI (VPI, 2021, 02:25), Malte Lawrence, soll die europaweite Migration dieser neuen Kupplungstechnologie bis 2030 flächendeckend ausgerollt werden.

Allerdings steht die Migration der DAK neben dem hohen Investitionsvolumen von 6,4 bis 8,6 Mrd. € vor weiteren Herausforderungen, wie etwa einer standardisierten Kupplungstechnik, dem europäischen Einigungsprozess, aber auch der Bereitschaft aller relevanten Stakeholder zur Teilnahme (Hagenlocher et al., 2020).

Von Seiten des Lärmschutzes wäre eine Umsetzung der DAK sehr begrüßenswert und würde neue Potentiale für den Lärmschutz im Schienengüterverkehr eröffnen.

Abbildung 55: Skizze der betrieblichen Abläufe für eine Flachstellendetektion an Infrastruktur und Fahrzeug



Schematische Darstellung des notwendigen Informationsflusses bei Detektion einer Flachstelle über eine Monitoring-Station an der Infrastruktur kombiniert mit einer fahrzeugseitigen Überwachung. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

9.5 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur Kostenermittlung und betrieblichen Umsetzbarkeit

Um eine Datengrundlage zur Kostenermittlung und zur betrieblichen Umsetzbarkeit zu erlangen, wurden **Akteursbefragungen und Telefoninterviews** durchgeführt. Bei der Akteursbefragung wurden Unternehmen aus dem Bereich des Schienengüterverkehrs, Schienenpersonenverkehrs und der Eisenbahninfrastruktur befragt. Insgesamt nahmen Akteure

- ▶ im Schienengüterverkehr mit einem Marktanteil von über 90 %
- ▶ im Schienenpersonenverkehr mit einem Marktanteil von ca. 15 % und
- ▶ im Bereich der Eisenbahninfrastruktur mit einem Marktanteil von über 80 %

an der Befragung teil.

Bei der Auswertung der Befragung ergaben sich **im Bereich der Eisenbahnverkehrsunternehmen bzw. Wagenhalter** für die einzelnen Wagen jährliche Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen

- ▶ für Güterwagen im Schienengüterverkehr von ca. 500 €,
- ▶ für Triebwagen im Schienengüterverkehr von ca. 2.300 € und
- ▶ für Triebwagen im Schienenpersonenverkehr von ca. 1.600 €.

Absolut betrachtet sind somit die Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen für Triebwagen deutlich höher als für Güterwagen. Relativ betrachtet ist jedoch der Anteil der Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen im Verhältnis zu den gesamten Betriebskosten für Güterwagen mit 18 % im Vergleich zu nur 2 % bei den Triebwagen am höchsten.

Im **Bereich der Infrastrukturunternehmen** konnten in der Befragung keine Kosten für Instandhaltungen aufgrund von Überfahrten mit Flachstellen ermittelt werden. Als mögliche Folgeschäden an der Infrastruktur wurden Brüche der Schiene oder der Spannklemmen im Bereich der Schienenbefestigung, Gleisrost an den Schienen, an der Schienenbefestigung, an der Schwelle oder Schäden im Bereich Oberbau- Schotter- Schutzschicht genannt. Ein fundierter Zusammenhang zwischen Überfahrten mit Flachstellen und diesen Folgeschäden ist jedoch bisher nicht erarbeitet worden. Weiterführende Untersuchungen hierzu wären zu empfehlen.

Auf Basis von statistischen Auswertungen der Messungen und Flachstellendetektion mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies (für Werte ≥ 5) wurde die Anzahl der Überfahrten mit Wagen mit und ohne Flachstellen analysiert. Werden alle Triebwagen, Güterwagen und Personenwagen betrachtet, fanden sich im Messzeitraum von 1 Monat bei insgesamt 43.300 Wagen **7.789 Wagen mit einem Flachstellenindikator ≥ 5** . Dies entspricht einem Prozentsatz von **18,2 %** aller vorbeigefahrenen Wagen.

Auf Basis dieser Daten wurde eine Berechnung zu einer möglichen Kostenänderungen durch eine frühere Behebung von Flachstellen durchgeführt. Hierzu wurde aus Mangel an Daten zu Instandhaltungskosten in der Infrastruktur der *flachstelleninduzierte Kostenfaktor FLI* eingeführt. Mit einer systematischen Variation dieses Kostenfaktors wurde der Einfluss dieser Größe auf die Gesamtkostenentwicklung bei schrittweiser Reduzierung der flachstellenbehafteten Wagen im Schienennetz dargestellt. Sofern die durch Flachstellen

verursachten Kosten an der Infrastruktur quantifiziert werden können, kann eine frühere Behebung von akustisch auffälligen Flachstellen durchaus zu einer Kostenersparnis in der Gesamtheit führen.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das in dieser Arbeit vorgeschlagene Messsystem mit Auswertung der Schalldruckpegel und Schienenbeschleunigungspegel zunächst für ein Monitoring an der Infrastruktur vorgesehen ist, da hier alle für die Detektion einer Flachstelle wichtigen Größen direkt erfasst werden können. Nachteilig ist jedoch die teilweise komplizierten betrieblichen Abläufe zur Informationsübermittlung und Behebung des Fehlers. An sicherheitsrelevanten Beispielen, wie etwa der Heißläuferortungsanlage hat sich jedoch gezeigt, dass ein solches System durchaus reibungslos mit allen Beteiligten ablaufen kann. Entscheidend wäre hier die Verankerung des akustischen Kriteriums als sicherheitsrelevanter Fehler, um einen ebenso reibungslosen Ablauf zu erzielen.

Für die Erweiterung einer fahrzeugseitigen Flachstellen-Überwachung wäre eine detailliertere Betrachtung von Detektionsalgorithmen basierend auf den am Fahrzeug erfassbaren Daten nötig. Eine deutlich frühzeitigeren Behebung von detektierten Flachstellen wäre jedoch zu erwarten. Auch wurde im Rahmen der Akteursbefragung von den Infrastrukturunternehmen angeregt analog zur Heißläuferortung oder Festbremsortung eine Rundlaufortung einzuführen, um über einen Betriebs- und ECM-Automatismus grenzwertige Radsätze in einen fahrzeugseitigen Instandhaltungsprozess einzuspeisen.

10 Rechtliche Bewertung und Vorschläge für ein Fördersystem

10.1 Verwendung eines Lästigkeitszuschlags für Vorbeifahrten mit Flachstellen

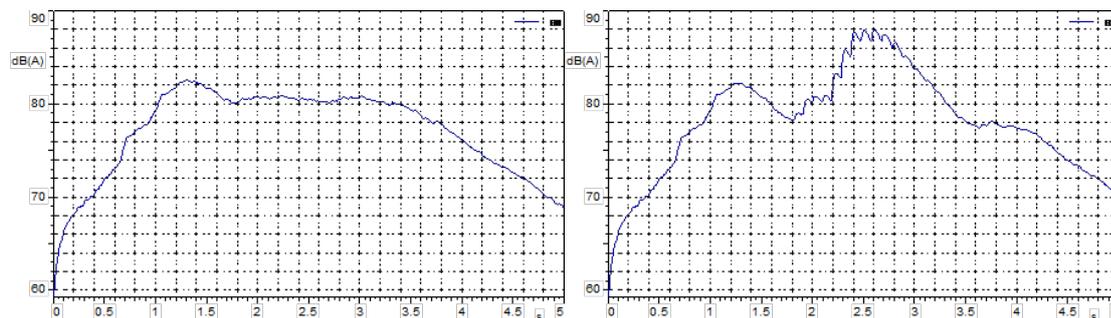
10.1.1 Versuchskonzept

In diesem ersten Versuchskonzept soll die Lästigkeit einer Flachstelle anhand eines Pegelzuschlags quantifiziert werden. Die Idee hinter diesem Konzept ist die Fragestellung, ob eine Vorbeifahrt mit Flachstelle bezüglich ihrer Lästigkeit in eine Vorbeifahrt ohne Flachstelle mit vergleichbarer Lästigkeit „umgerechnet“ werden kann. Der resultierende Pegel der Vorbeifahrt ohne Flachstelle beaufschlagt mit dem entsprechenden Zuschlag könnte im Weiteren hinsichtlich geltender Grenzwerte überprüft bzw. bewertet werden.

Hierfür wurde ein Versuch konzipiert, bei welchem Versuchspersonen gezielt die Lästigkeit einer Flachstelle bei einer Zugvorbeifahrt beurteilen sollen. Um lediglich den Einfluss der Flachstelle auf die Lästigkeit zu erfassen, sollten alle anderen Randbedingungen konstant gehalten werden. Dies wurde realisiert, indem eine Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle als Referenz-Vorbeifahrt ausgewählt wurde. Im Folgenden wurde aus verschiedenen Zugvorbeifahrten mit Flachstellen der Abschnitt der Flachstelle extrahiert, um diesen dann jeweils auf das Referenz-Signal zu legen. So entstanden Vorbeifahrten mit unterschiedlichen Flachstellen jeweils im gleichen Umfeld einer definierten Zugvorbeifahrt, so dass bei einem Vergleich zwischen Vorbeifahrt mit Flachstelle und Vorbeifahrt ohne Flachstelle ausschließlich die Lästigkeit der zusätzlichen Flachstelle beurteilt werden kann.

Abbildung 56 zeigt beispielhaft für eine Zugvorbeifahrt den Pegelverlauf der Referenz-Vorbeifahrt ohne Flachstelle (links) und den Pegelverlauf dieser Vorbeifahrt mit eingemischter Flachstelle (rechts). Auf diese Weise wurden 16 Signale mit unterschiedlichen Flachstellen erzeugt.

Abbildung 56: Pegelzeitverlauf der Zugvorbeifahrt mit und ohne Flachstelle



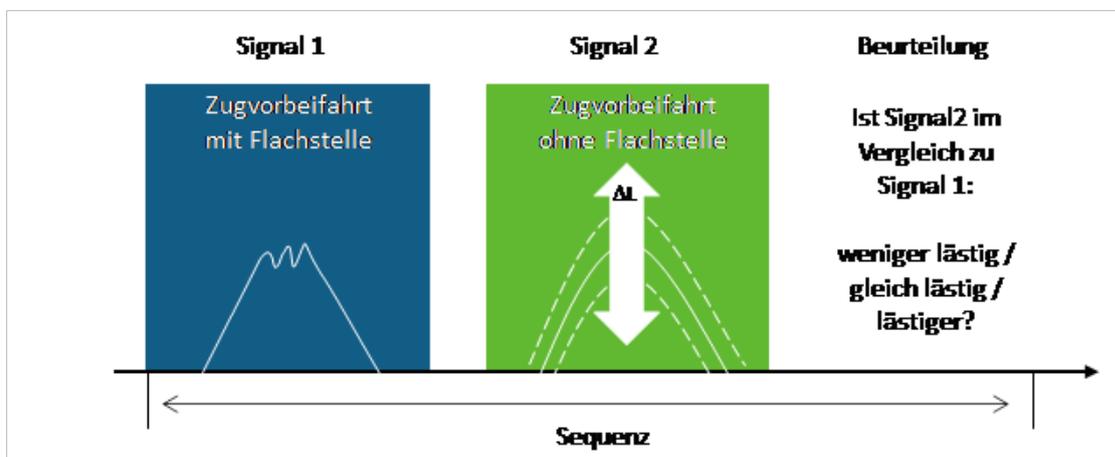
Der A-bewertete Schalldruckpegel über der Zeit für die Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle (links) und für die Zugvorbeifahrt mit eingespielter Flachstelle (rechts). Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

10.1.2 Versuchsmethode

Um den nötigen Pegelausgleich für die durch die Flachstelle verursachte Lästigkeit zu bestimmen, wurde auf eine Methode des pendelnden Einregelns zurückgegriffen. Hierzu wurde den Versuchspersonen jeweils eine Sequenz bestehend aus dem Schallpaar (Vorbeifahrt mit Flachstelle / Vorbeifahrt ohne Flachstelle) dargeboten. Darauffolgend war zu beantworten, ob die zweite Vorbeifahrt im Vergleich zur ersten weniger lästig / „gleich lästig“ oder „lästiger“ war. Je nach Antwort wird nun das Schallpaar wiederholt und der Pegel der Vorbeifahrt ohne Flachstelle angehoben oder abgesenkt oder das nächste Schallpaar dargeboten. Die Pegelanhebung bzw. -absenkung erfolgt hierbei bei der ersten Wiederholung um 2 dB, bei der zweiten um 1 dB, bei der dritten und bei jeder weiteren Wiederholung um 0,5 dB.

Abbildung 57 veranschaulicht eine Sequenz dieses Hörversuchs.

Abbildung 57: Ablauf einer Sequenz für den Lästigkeitsabgleich



Schematische Darstellung einer Sequenz für den Hörversuch mit der Methode des pendelnden Einregelns. Je nach Antwort wird in der nächsten Sequenz der Pegel von Signal 2 angepasst. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

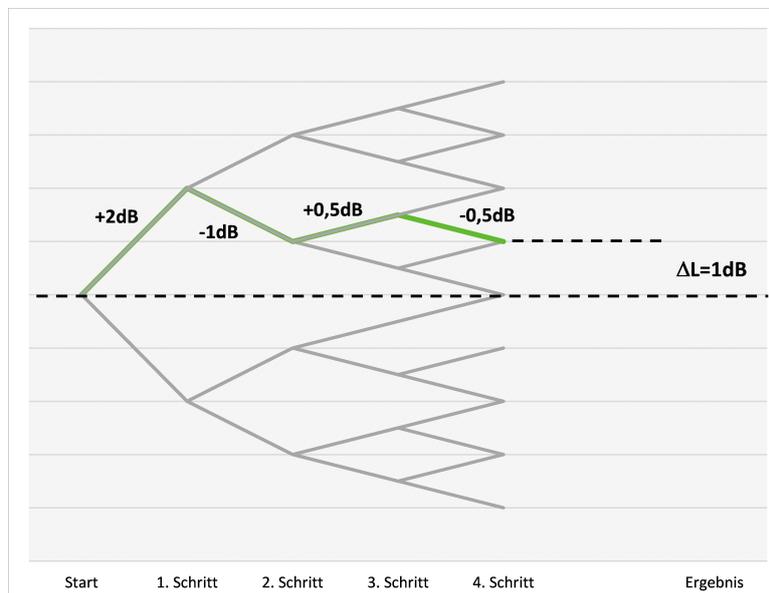
Tabelle 32 und Abbildung 58 skizziert den möglichen Ablauf zum Einpegeln eines Schallpaares in Abhängigkeit des Versuchspersonenurteils. Grau sind die möglichen Wege der Pegelanhebung bzw. -absenkung über fünf Schritte des Einregelns skizziert. Der rote Verlauf zeigt beispielhaft die Anpassung des Pegels für die jeweiligen Antworten einer Versuchsperson.

Auf diese Weise wurden alle 16 unterschiedlichen Flachstellensignale von 20 Versuchspersonen je zwei Mal bewertet.

Tabelle 32: Beispielhafter Antwortverlauf der Versuchsperson

Sequenz	Antwort der Versuchsperson	Anpassung von Signal 2
Darbietung	Signal 2 ist weniger lästig als Signal 1	+ 2 dB
Darbietung	Signal 2 ist lästiger als Signal 1	- 1 dB
Darbietung	Signal 2 ist weniger lästig als Signal 1	+ 0,5 dB
Darbietung	Signal 2 ist lästiger als Signal 1	- 0,5 dB
Darbietung	Signal 2 ist gleich lästig wie Signal 1	Ergebnis: $\Delta L = 1 \text{ dB}$

Abbildung 58: Beispielhafte Pegeländerung der Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle im Verlauf des Hörversuchs

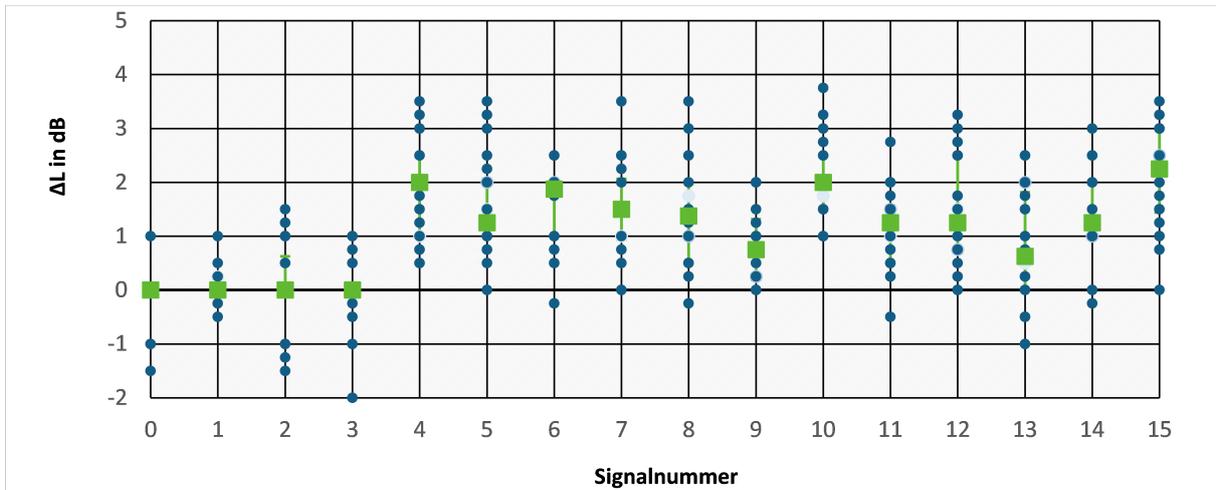


Darstellung der Pegeländerungen bis zum Erlangen des beispielhaften Ergebnisses $\Delta L = 1 \text{ dB}$ entsprechend der Antworten aus Tabelle 32. Grau sind alle möglichen Pegeländerungen skizziert, grün die entsprechend der Antworten resultierenden Pegeländerungen. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

10.1.3 Ergebnisse der Hörversuche: Quantifizierung der Lästigkeit einer Flachstelle

Abbildung 59 zeigt für alle 16 beurteilten Signale die eingeregeltere nötige Pegeldifferenz, um bei der Vorbeifahrt ohne Flachstelle die gleiche Lästigkeit zu erzeugen wie bei der Vorbeifahrt mit Flachstelle. Es resultierten somit je nach Flachstelle Pegeldifferenzen im Mittel bis zu 2,5 dB. Um zu überprüfen, ob die Versuchspersonen mit der Aufgabe zurechtkommen und zuverlässige Ergebnisse produzieren, wurde im Versuch zusätzlich eine identische Vorbeifahrt jeweils ohne Flachstelle als Signal 1 und 2 dargeboten. Dieser Vergleich entspricht „Signal 0“, bei welchem korrekter Weise eine Pegeldifferenz von 0 dB von den Versuchspersonen eingeregelt wurde.

Abbildung 59: Resultierende Pegelunterschiede für die 16 beurteilten Signale, um die gleiche Lästigkeit wie die Vorbeifahrt mit Flachstelle zu erzeugen



Grün: Ergebnisse der Hörversuche im Mittel (Median und Interquartile), dunkelblau: Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

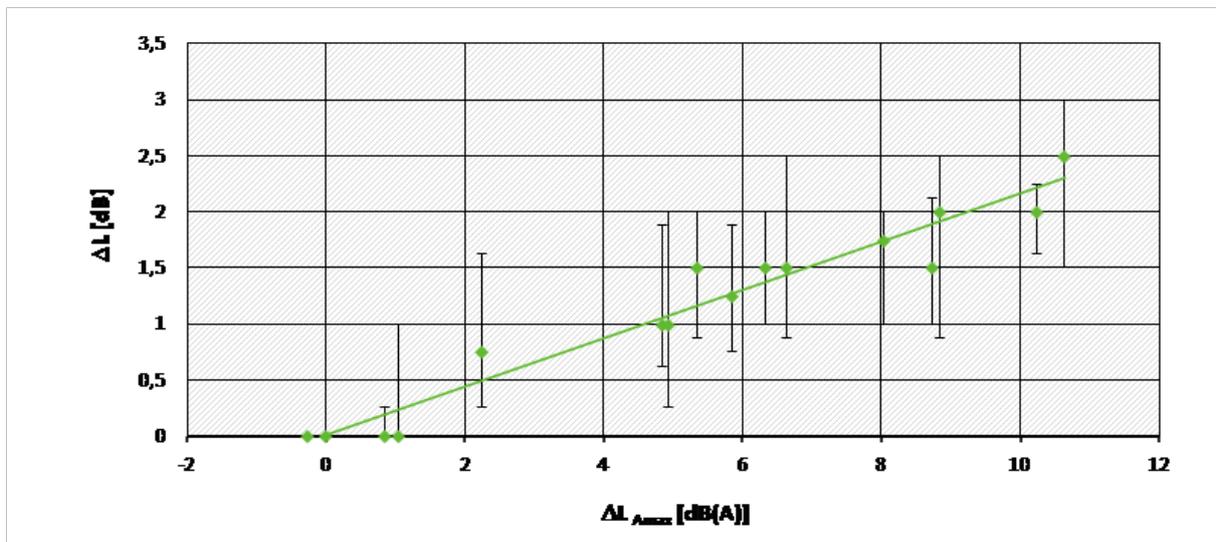
Um nun diese Pegeldifferenz, die die Lästigkeit einer Flachstelle beschreibt, als Maß anwenden zu können, wurden die beurteilten Signale hinsichtlich ihres A-bewerteten Maximalpegels analysiert und der Unterschied zwischen dem flachstellenbehafteten und dem flachstellenfreien Signal berechnet. Wird nun der eingeregelter Pegelunterschied diesem Delta im A-bewerteten Maximalpegel der Signale gegenübergestellt, so resultiert der in Abbildung 60 dargestellte Zusammenhang. Um einen Pegelunterschied im Maximalpegel von etwa 10 dB, verursacht durch die Flachstelle, auszugleichen, ist somit eine Anhebung des Gesamtsignals ohne Flachstelle um 2,5 dB nötig.

Ein Lästigkeitszuschlag in dB könnte sich somit an der durch die Flachstelle verursachte Anhebung im Maximalpegel orientieren und mit dem unten dargestellten Zusammenhang folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\text{Pegelzuschlag [dB]} = 0,25 \cdot \Delta L_{Amax}[\text{dB}]$$

Es kann somit zusammenfassend festgehalten werden, dass eine *Zugvorbeifahrt mit Flachstelle* eine vergleichbare Lästigkeit aufweist, wie eine *Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle*, deren Gesamtpegel um 25 % des durch die Flachstelle verursachten Deltas im Maximalpegel erhöht ist.

Abbildung 60: Notwendige Pegelanhebung der Vorbeifahrt ohne Flachstelle für eine gleiche Lästigkeit wie die Vorbeifahrt mit Flachstelle, aufgetragen über dem Unterschied im A-bewerteten Maximalpegel L_{Amax} der Vorbeifahrten mit und ohne Flachstelle



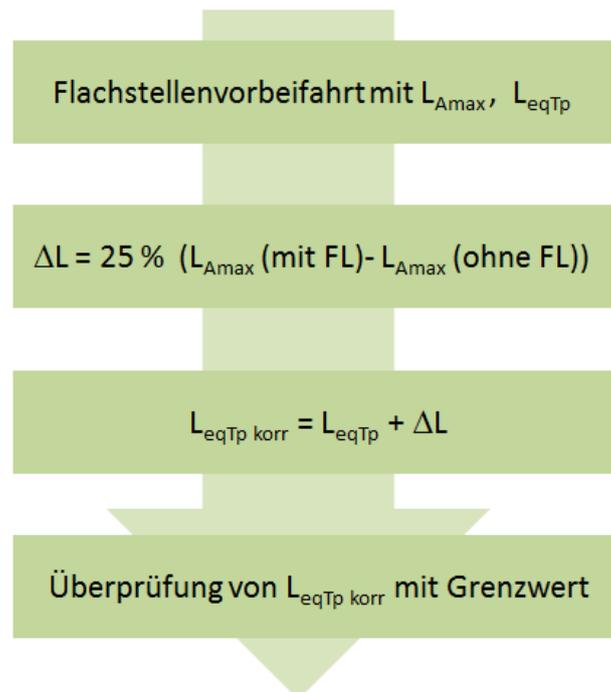
Die Datenpunkte zeigen den Median und die Interquartile der aus den Hörversuchen mit 15 Versuchspersonen resultierenden Pegelunterschiede gegenüber der Pegeldifferenz im A-bewerteten Maximalpegel der 16 beurteilten Vorbeifahrten mit und ohne Flachstelle. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Wird also eine Flachstelle detektiert, so könnte folgendermaßen vorgegangen werden:

- ▶ Bestimmung des L_{Amax} (mitFL) und des Mittelungspegels L_{eqTp}
- ▶ Abschätzung des L_{Amax} (ohneFL) durch Analyse des Pegel-Zeitverlaufs
- ▶ Berechnung des Pegelzuschlags $\Delta L = 25\% (L_{Amax}(\text{mitFL}) - L_{Amax}(\text{ohneFL}))$
- ▶ Berechnung des korrigierten Mittelungspegels pro Wagen $L_{eqTp\text{korr}}$
- ▶ Überprüfung des korrigierten und auf Achsen pro Länge gewichteten Mittelungspegels und mit den geltenden Grenzwerten (TSI Noise)

Abbildung 61 skizziert den entsprechenden Ablauf zur Berücksichtigung von Flachstellen mittels eines Lästigkeitszuschlags.

Abbildung 61: Schematischer Ablauf zur Berücksichtigung von Flachstellen auf Basis eines Pegelzuschlags für die Lästigkeit der Flachstelle



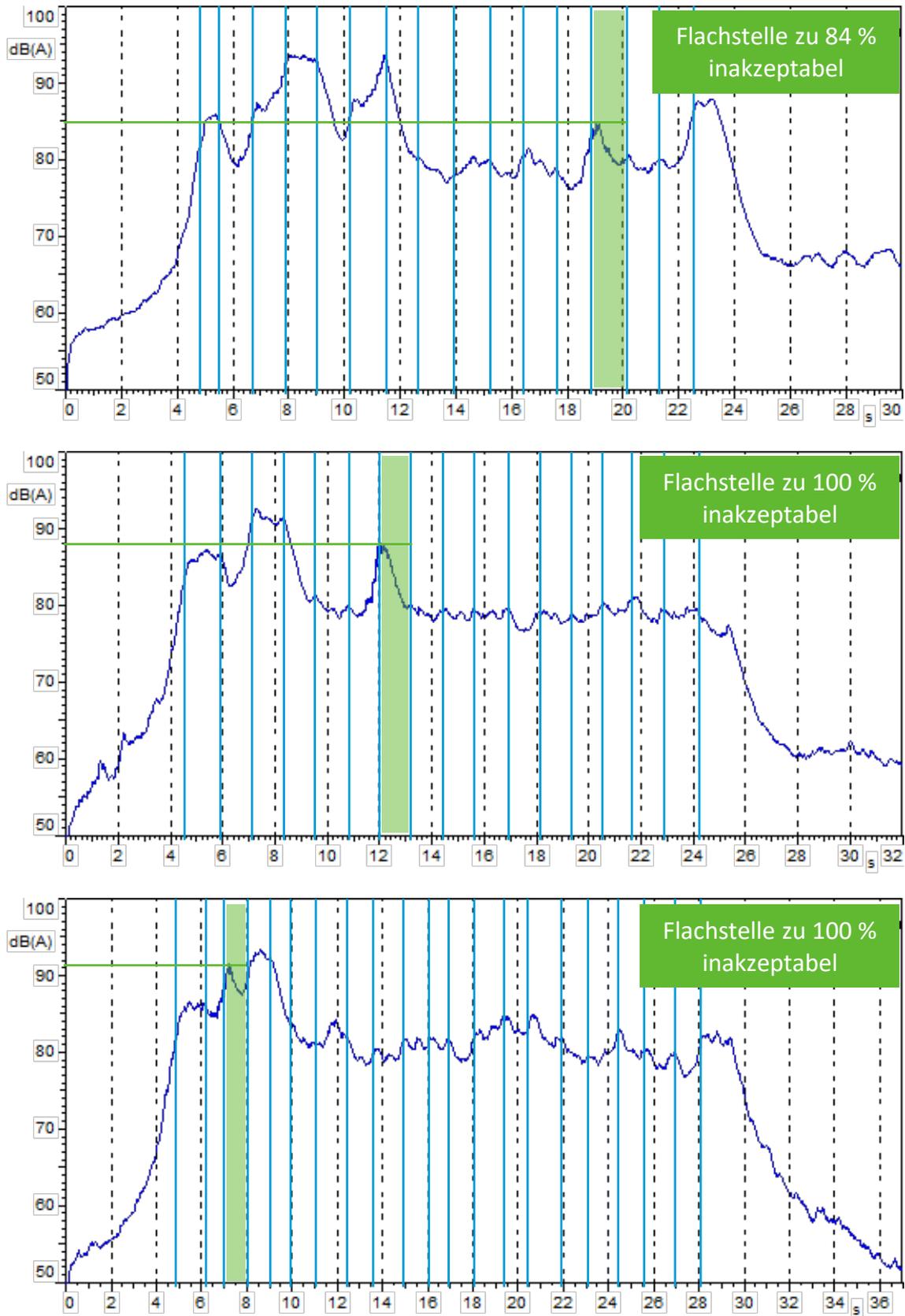
Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

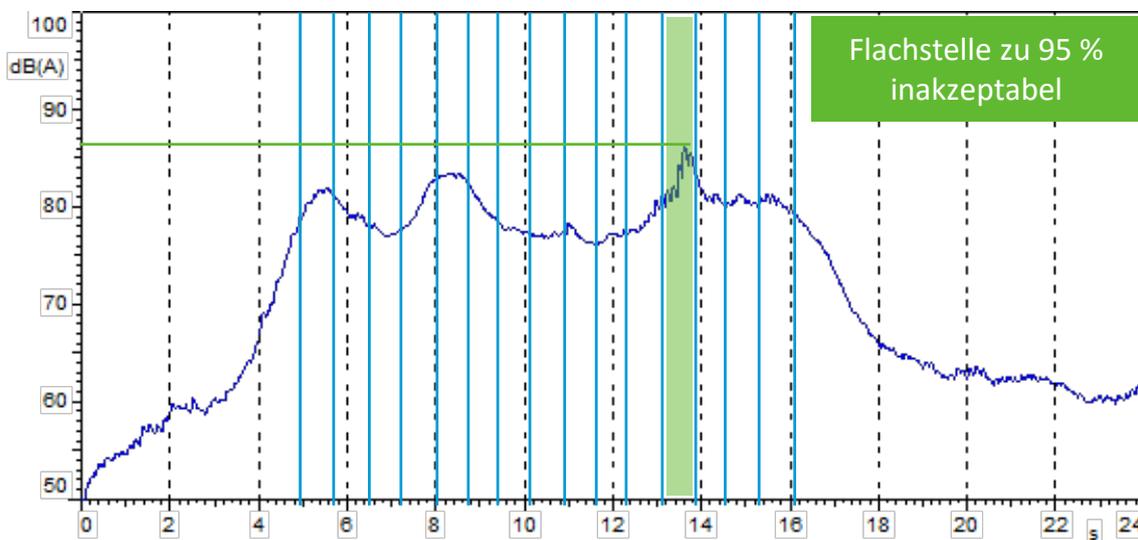
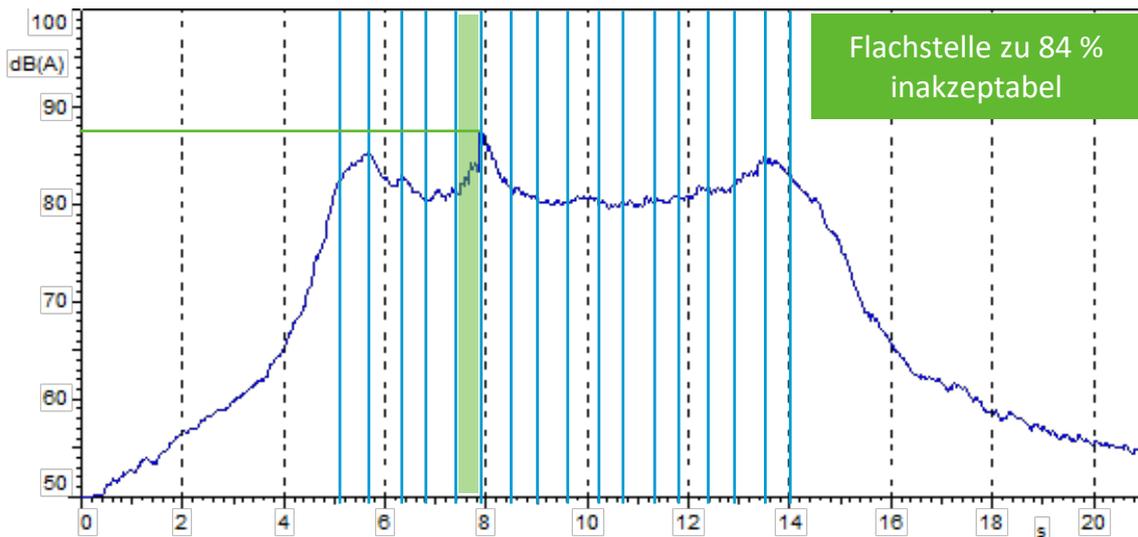
10.2 Berücksichtigung von akustisch auffälligen Flachstellen über einen Grenzwertvorschlag mit Bezug zur TSI Noise

In dem folgenden Ansatz soll die Berücksichtigung einer akustisch auffälligen Flachstelle durch Festlegung eines Grenzwerts erfolgen. Die aktuell gültige rechtliche Regelung sowohl für Neuzulassungen als auch für die Umrüstung von Bestandswagen im laufenden Betrieb ist die TSI Noise. Deshalb wird der hier erarbeitete Grenzwertvorschlag in Bezug zu dieser Regelung formuliert.

Um diesen Ansatz zu verfolgen, wurden die Signale der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Hörversuchsreihe 1 (Kapitel 7.3.1.1) hinsichtlich der durch die Flachstelle verursachten Maximalpegelanhebungen analysiert. Abbildung 62 zeigt beispielhaft fünf der Zugvorbeifahrten mit Markierung des Wagens mit Flachstelle, die im Hörversuch bewertet wurden.

Abbildung 62: Analysen von Zugvorbeifahrten hinsichtlich des A-bewerteten Maximalpegels bei einer Wagnervorbeifahrt mit Flachstelle

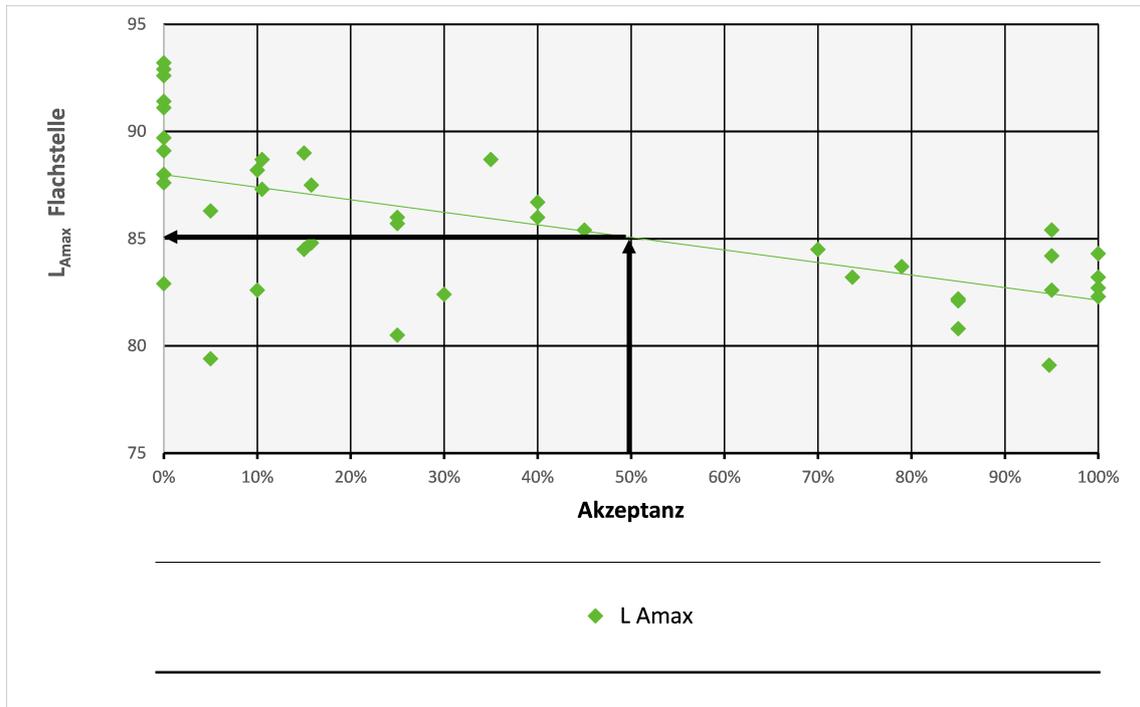




Schalldruckpegel-Zeitverlauf für fünf beispielhafte Zugvorbeifahrten mit Markierung der einzelnen Wageneinfahrzeiten (hellblaue Linien). Der grün gekennzeichnete Ausschnitt markiert die Flachstelle, der im Hörversuch hinsichtlich seiner Akzeptanz bewertet wurde. Die grüne Linie markiert den maximalen Schalldruckpegel für diese Flachstelle. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

In Abbildung 63 ist der Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel der Flachstelle und der jeweiligen Akzeptanz durch die Versuchspersonen dargestellt. Wird davon ausgegangen, dass 50 % der Personen die Vorbeifahrt des Zuges mit der akustisch auffälligen Flachstelle als akzeptabel einstufen sollen, liegt für die hier betrachteten Zugvorbeifahrten die Grenze für einen **zulässigen A-bewerteten Maximalpegel ausgelöst durch die Flachstelle demnach bei 85 dB(A)**. Ein erster Schritt bestünde somit in der Definition eines A-bewerteten Maximalpegels als Grenzwert für eine Vorbeifahrt mit Flachstelle. Für eine Akzeptanz von 30 % wäre ein Maximalpegel ausgelöst durch die Flachstelle von **ca. 86,5 dB(A)** einzuhalten.

Abbildung 63: A-bewerteter Maximalpegel der Flachstelle über der von den Versuchspersonen beurteilten Akzeptanz



Jeder Datenpunkt repräsentiert ein Signal mit Flachstelle mit dem entsprechenden A-bewerteten Maximalpegel (Ordinate) und der von den Versuchspersonen bewerteten Akzeptanz (Abszisse). Grüne Linie: linearer Zusammenhang zwischen L_{Amax} und Akzeptanz. Schwarze Pfeile: 50 % Akzeptanz finden sich bei $L_{Amax}=85$ dB(A). Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Soll nun der Bezug zur TSI Noise hergestellt werden, ist die Festlegung eines Grenzwerts als **Maximalpegel** jedoch nicht zielführend, da dort unter Abschnitt 4.2.3 die Grenzwerte für das Vorbeifahrtgeräusch der einzelnen Wagen des Zugverbands als **äquivalente Dauerschallpegel** aufgelistet sind. Tabelle 33 zeigt die entsprechenden Grenzwerte der TSI Noise: ein Güterwagen darf demnach bei Vorbeifahrt¹ mit 80 km/h einen A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel ($L_{pA\ddot{a}q, Tp}$) von 83 dB(A) nicht überschreiten.

Tabelle 33: Auszug aus der TSI Noise, Abschnitt 4.2.3 Grenzwerte für das Vorbeifahrtgeräusch

Kategorie des Teilsystems „Fahrzeug“	$L_{pA\ddot{a}q, Tp}$ (80km/h) [dB]	$L_{pA\ddot{a}q, Tp}$ (250km/h) [dB]
Elektrolokomotiven und Gleisbaumaschinen mit elektrischem Antrieb	84	99
Diesellokomotiven und Gleisbaumaschinen mit Dieselantrieb	85	entf.
ETZ	80	95
DTZ	81	96

¹ entsprechend den Vorgaben der TSI Noise

Reisezugwagen	79	entf.
Güterwagen (umgerechnet auf APL = 0,225) (*)	83	entf.
(*) APL ist die Anzahl der Radsätze geteilt durch die Länge über Puffer [m ⁻¹].		

Quelle: eigene Darstellung nach TSI Noise, Abschnitt 4.2.3 (Europäische Kommission, 2014)

Die Grenzwertdefinition in der TSI Noise erfolgt somit nicht über einen Maximalpegel, sondern über einen Mittelungspegel des Wagens bei Vorbeifahrt. Im Einzelfall, beispielsweise bei einer Vorbeifahrt mit Flachstelle, kann der Maximalpegel eines Wagens jedoch deutlich über dem Mittelungspegel des Wagens liegen und sich nur geringfügig auf den Mittelungspegel auswirken. Dies soll Tabelle 34 verdeutlichen: hier wurden für alle im Messzeitraum erfassten Wagen Mittelungs- und Maximalpegel analysiert und der Unterschied zwischen diesen beiden Größen ausgewertet. Dies wurde zum einen für die Gesamtheit aller Vorbeifahrten, zum anderen für die Vorbeifahrten mit Flachstellen ab einem Flachstellenindikator nach Müller-BBM Rail Technologies von ≥ 5 ausgewertet. Während im Mittel der Unterschied zwischen Maximal- und Mittelungspegel nur 1,5 dB beträgt, kann sich der Unterschied im Einzelfall auf bis zu 11,1 dB belaufen.

Um eine Vorbeifahrt mit Flachstelle nun auf Basis des Mittelungspegels einzustufen, wurde im Folgenden der mittlere Unterschied zwischen Maximal- und Mittelungspegel gemäß Tabelle 34 herangezogen und der Maximalpegel also um 1,5 dB abgesenkt.

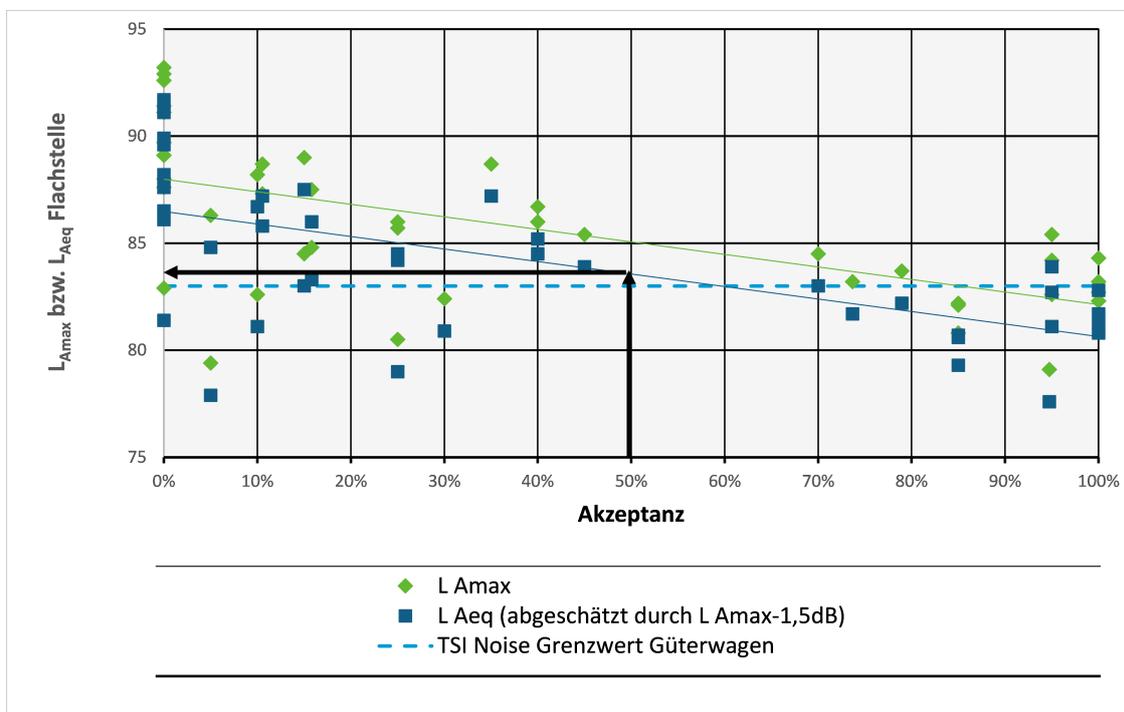
Werden die in Abbildung 63 dargestellten Datenpunkte nun um den resultierenden Mittelwert des Unterschieds zwischen Maximal- und Mittelungspegel von 1,5 dB verschoben, resultieren die in Abbildung 64 dargestellten Werte.

Wird wiederum davon ausgegangen, dass 50 % der Personen die Vorbeifahrt des Zuges mit der akustisch auffälligen Flachstelle als akzeptabel einstufen sollen, läge für die hier betrachteten Zugvorbeifahrten nun die Grenze für den **zulässigen A-bewerteten Mittelungspegel der Flachstelle bei 83,5 dB**. Für eine Akzeptanz von 30 % hingegen wäre ein A-bewerteter Mittelungspegel von **ca. 85 dB** einzuhalten.

Tabelle 34: Unterschiede zwischen $L_{A_{fmax}}$ und $L_{A_{eq}}$ für die einzelnen Wagen

Datenbasis	Maximale Abweichungen	Mittlere Abweichungen
alle Wagen im Messzeitraum von 1 Monat	11,1 dB	1,5 dB
alle Wagen mit Flachstellenindikator ≥ 5 im Messzeitraum von 1 Monat	11,1 dB	1,6 dB

Abbildung 64: Abgeschätzter Mittelungspegel des Flachstelle über der von den Versuchspersonen beurteilten Akzeptanz



Grüne Datenpunkte entsprechen der Darstellung aus Abbildung 63. Dunkelblaue Datenpunkte repräsentieren die um 1,5 dB reduzierten Signale mit Flachstelle, um den Mittelungspegel abzuschätzen (Ordinate) und die von den Versuchspersonen bewertete Akzeptanz (Abszisse). Grüne Linie: linearer Zusammenhang zwischen $L_{A_{max}}$ und Akzeptanz. Dunkelblaue Linie: linearer Zusammenhang zwischen abgeschätztem $L_{A_{eq}}$ und Akzeptanz. Hellblau gestrichelte Linie: Grenzwert der TSI Noise für Güterwagen. Schwarze Pfeile: 50 % Akzeptanz finden sich bei $L_{A_{eq}} = 83,5 \text{ dB(A)}$. Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Werden diese Werte nun in Bezug zur TSI-Noise diskutiert, so kann folgendes festgehalten werden: Wird an einem vorbeifahrenden Wagen eine Flachstelle detektiert, so wird diese von 50 % der Personen als akzeptabel eingestuft, wenn der Mittelungspegel dieser Wagen vorbeifahrt mit Flachstelle 0,5 dB über dem Grenzwert der TSI-Noise liegt. Liegt der Mittelungspegel der Vorbeifahrt mit Flachstelle ca. 2 dB über dem Grenzwert der TSI-Noise, so beurteilen nur noch 30 % der Personen die Flachstelle als akzeptabel.

Insgesamt ist jedoch kritisch anzumerken, dass bei einer Grenzwertdefinition über einen Mittelungspegel viele besonders kritische Flachstellen unterschätzt werden können.

Insbesondere wenn der Vorbeifahrtpegel ohne Flachstelle bereits niedrig ist, kann die Pegelspitze (der Maximalpegel) der Flachstelle theoretisch deutlich höher ausfallen, ohne den Grenzwert zu überschreiten, obwohl eine akustisch deutlich auffällige Flachstelle vorliegt.

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass der Wert – auch bei den EBA-Monitoring-Stationen – auf einem Gleis gemessen wird, das den Anforderungen der TSI entspricht, also entsprechend glatt, ist. Weitere wichtige Aspekte zum Abgleich mit der TSI Noise wären die Pegeltrennung der einzelnen Wagen und die Verwendung des Messequipments nach Anforderungen der TSI Noise.

Im nun folgenden Kapitel zur rechtlichen Bewertung einer möglichen Umsetzung des akustischen Kriteriums für Flachstellen wird nun beispielhaft der **äquivalente Dauerschallpegel von 85 dB(A)** als Grenzwert für das Auslösen des Flachstellenkriteriums angesetzt.

10.3 Rechtliche Bewertung der Umsetzung eines akustischen Flachstellenkriteriums

Im Folgenden wird nun ein Vorschlag zur Implementierung des akustischen Instandhaltungskriteriums in die Rechtsordnung von Prof. Dr. Kupfer² vorgestellt.

10.3.1 Aufgabenstellung

Um der Lärmbelastung durch Flachstellen entgegen zu wirken, soll mit Hilfe eines akustischen Messverfahrens an der Schiene ein flächendeckendes Flachstellenerkennungssystem eingeführt werden. Wird eine gesteigerte Lärmemission infolge von Flachstellen gemessen, müssen Instandhaltungsmaßnahmen zur Reduzierung der von den Flachstellen ausgehenden Lärmemissionen getroffen werden. Ziel der Maßnahme ist neben der Reduzierung des Schienenlärms eine Senkung der Kosten beim Unterhalt von Wagenmaterial und Infrastruktur.

Die *Möhler + Partner Ingenieure AG* hat *WZK-Rechtsanwälte* beauftragt zu prüfen, wie dieses System zur Reduzierung des Schienenverkehrslärms infolge von Flachstellen in die bestehende Rechtsordnung grundsätzlich implementiert werden könnte.

Um den Regelungen zur Reduzierung des Schienenverkehrslärms infolge von Flachstellen Rechtswirkung zu verleihen, ist es erforderlich, die aktuelle Rechtslage zu ändern (Kapitel 10.3.2). Dabei ist neben dem Verfassungsrecht insbesondere das Unionsrecht zu beachten (Kapitel 10.3.3). Im Ergebnis ist festzustellen, dass sich die hier vorgeschlagenen Änderungen gut in die neuere Rechtsentwicklung einfügen: Zur Förderung des Eisenbahnverkehrs soll die Akzeptanz seiner negativen Auswirkungen bei den Betroffenen dadurch verbessert werden, dass sich das Eisenbahnrecht von einem auf die Verhinderung von Unfällen ausgerichteten speziellen Gefahrenabwehrrecht weiterentwickelt – hin zu einem umfassenderen Gefahrenabwehrrecht, das insbesondere auch Anwohner mit ihrem Interesse wahrnimmt, vor Schienenverkehrslärm geschützt zu werden (Kapitel 10.3.4).

10.3.2 Vorschläge zur Änderung des rechtlichen Rahmens

10.3.2.1 Änderung des AEG

§ 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG wird wie folgt neu gefasst:

„§ 26 Rechtsverordnungen

(1) Zur Gewährleistung der Sicherheit und der Ordnung im Eisenbahnwesen, zum Schutz von Umwelt, Gesundheit oder von Leben und Gesundheit der Arbeitnehmer³ wird das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur ermächtigt, mit Zustimmung des Bundesrates für öffentliche Eisenbahnen Rechtsverordnungen zu erlassen

1. über die Anforderungen an Bau, Instandhaltung, Ausrüstung, Betrieb und Verkehr der Eisenbahnen nach den Erfordernissen der Sicherheit, den Erfordernissen des

² Dank schuldet der Verfasser Herrn Rechtsreferendar Sebastian Hild und Herrn Rechtsreferendar Hannes Raff für die Unterstützung bei der Recherche und für die kritische Diskussion der Inhalte.

³ Bisheriger Wortlaut: „Zur Gewährleistung der Sicherheit und der Ordnung im Eisenbahnwesen, des Umweltschutzes oder zum Schutz von Leben und Gesundheit der Arbeitnehmer“

Lärmschutzes, nach den neusten Erkenntnissen der Technik, nach den oder nach internationalen Abmachungen; dabei können insbesondere geregelt werden⁴:

§ 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG wird um lit. g ergänzt:

g) die Anordnung von Maßnahmen zur Reduzierung der von Eisenbahnfahrzeugen (Vgl. den Wortlaut von § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 lit. b) und lit. e) AEG) ausgehenden Lärmemissionen infolge von Flachstellen auf Rädern und Radsätzen;

10.3.2.2 Änderung der EBO

In § 21 wird folgender Absatz 6 neu eingefügt:

„(6) Die Räder und Radsätze der Fahrzeuge müssen so beschaffen sein, dass das Vorbeifahrgeräusch die in Nr. 4.2.3. des Anhangs der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 festgelegten Grenzwerte in der jeweils geltenden Fassung nicht infolge von Flachstellen um 2 dB (A) oder mehr überschreitet. Die Messung der Verkehrsgeräusche infolge von Flachstellen erfolgt durch das beschriebene akustische Messverfahren⁵.“

Die konkrete Ausgestaltung dieser Vorschrift wird letztendlich davon abhängen, welches Maß als Grenzwert für eine Flachstelle schlussendlich herangezogen werden wird (hierzu eingehend oben, Kapitel 9.1).

10.3.3 Begründung

Im Folgenden wird der oben dargestellte Regelungsvorschlag näher erläutert. Dafür ist die Verortung des Regelungsvorschlags im Eisenbahnrecht, namentlich in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung zu begründen – in Abgrenzung zum speziellen Schienenlärmschutzgesetz aber auch dem allgemeinen Immissionsschutzrecht (Kapitel 9.3.3.1 und 9.3.3.2). Dann ist die Vereinbarkeit des Regelungsvorschlags mit dem geltenden Recht darzustellen (Kapitel 9.3.3.3). Im Anschluss wird die Zuständigkeit der Eisenbahnaufsichtsbehörden sowie die Ermächtigungsgrundlage, auf der die Behörden den Regelungsvorschlag in der Praxis durchsetzen können, herausgearbeitet (Kapitel 9.3.3.4). Abschließend ist noch festzustellen, ob die Regelungen vor ihrer Normierung der Notifizierung bei der Europäischen Kommission bedürfen (Kapitel 9.3.3.5).

10.3.3.1 Verortung des Regelungsvorschlags im Eisenbahnrecht

Zunächst könnte einer Verortung des Regelungsvorschlags im Eisenbahnrecht ganz allgemein entgegengehalten werden: Das Eisenbahnrecht nehme sicherheitsrelevante Aspekte in Bezug. Lärmschutz sei aber kein derartiger Aspekt. Lärmschutz sei vielmehr dem sachlichen Anwendungsbereich des BImSchG zuzuordnen.

Vorliegend braucht nicht entschieden zu werden, ob der Anwendungsbereich des Eisenbahnrechts in dem Sinne – de lege ferenda – aufgeweitet werden könnte, dass es künftig genügte, Aspekte in irgendeinen Zusammenhang mit dem Verkehrsträger Eisenbahn zu bringen, um sie im Rahmen des Eisenbahnrechts zu regeln. Vielmehr ist dem Gesetzgeber ohne Weiteres die Kompetenz zuzubilligen, Schienenverkehrslärm infolge von Flachstellen an den Rädern von Eisenbahnfahrzeugen als Gefahr im Eisenbahnbetrieb zu qualifizieren. Bereits innerhalb des heute geltenden Rechtsrahmens – also ohne Einbeziehung der hier vorgeschlagenen

⁴ Bisheriger Wortlaut: ... „über die Anforderungen an Bau, Instandhaltung, Ausrüstung, Betrieb und Verkehr der Eisenbahnen nach den Erfordernissen der Sicherheit, nach den neusten Erkenntnissen der Technik oder nach internationalen Abmachungen; dabei können insbesondere geregelt werden:“

⁵ Gemäß der in Kapitel 8 vorgeschlagenen Spezifikation

Rechtsänderungen – gilt: Schienenverkehrslärm kann eine eisenbahnspezifische Gefahr darstellen.

Vgl. etwa die instruktiven Ausführungen von (Metzler in: Kühling und Otte, 2020, AEG § 5a Rn. 39) zu der bereits heute bestehenden Rechtslage – also ohne Berücksichtigung der hier vorgeschlagenen Gesetzesänderung:

*„Die Abgrenzung kann im Einzelfall mitunter schwierig sein und bedarf ggf. der Abstimmung der einzelnen Behörden. ... So können im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Eisenbahn Gefahren entstehen, deren Bekämpfung den Eisenbahnaufsichtsbehörden obliegt. Daneben können auch die Immissionsschutzbehörden, Bauaufsichtsbehörden oder Wasserbehörden etc. der Länder zuständig sein. Soweit ein Sachverhalt mehreren Rechtsregimen zugeordnet werden kann, bedarf es unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls einer spezifischen Bestimmung. Für diese Bestimmung können Überlegungen zur Effektivität der Gefahrenabwehr herangezogen werden. Auch erscheint es zulässig, die Aufgabenzuständigkeit nach dem Schwerpunkt der Gefahr zu bestimmen. **Geht der Schwerpunkt der Gefahr von eisenbahnspezifischen Besonderheiten, also dem Rad-Schienen-System, aus, sprechen gute Gründe dafür, dass die Gefahrenabwehraufgabe der zuständigen Eisenbahnbehörde obliegt.**“*

Oder etwa speziell zu der Frage, ob Schienenverkehrslärm sachlich dem sachlichen Anwendungsbereich des AEG zuzuordnen ist:

*„Gegen eine Befugnis, in einem solchen Fall einzuschreiten, kann nicht mit Erfolg eingewandt werden, dass § 5a AEG lediglich Maßnahmen zur Bekämpfung eisenbahnspezifischer Gefahren ermöglicht, zu denen Lärmgefahren nicht gehören (vgl. in diesem Sinne etwa VG Hannover, Urteil vom 26. Januar 2010 - 4 A 888/09 -, juris; VG Würzburg, Urteil vom 9. Juni 2010 - W 6 K 09.341 -, juris). Der Gesetzgeber wollte mit § 5a AEG eine allgemeine Befugnisnorm der Eisenbahnaufsichtsbehörden schaffen (vgl. hierzu OVG NRW, Urteil vom 5. Oktober 2010 - 13 A 29/10 -, juris). Zuvor hatte das Bundesverwaltungsgericht darauf hingewiesen, dass das Gesetz nicht so ausgelegt werden dürfe, dass das widersinnige Ergebnis eintrete, dass das Eisenbahnbundesamt seinen Aufgaben mangels Befugnisnorm nicht gerecht werden könne, während die allgemeinen Gefahrenabwehrbehörden mangels Zuständigkeit am Tätigwerden gehindert seien (BVerwG, Beschluss vom 13. Oktober 1994 - 7 VR 10.94 - juris = NVwZ 1995, 379). **Dass Lärmimmissionen von einer Eisenbahnanlage nicht als ‚nicht eisenbahnspezifische‘ Gefahren von vornherein aus dem Zuständigkeitsbereich der Eisenbahnbehörden herausfallen, zeigt sich gerade an dem Umstand, dass im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens die Immissionen einer Verkehrsanlage zentrale Bedeutung haben** (vgl. offenlassend OVG NRW, Beschluss vom 28. Mai 2013 - 16 A 434/11 -, juris).“⁶*

VG Düsseldorf, Urt. v. 08.01.2020 – 16 K 5474/18 – juris, Rn. 19.

Insoweit bestehen keine Bedenken dagegen, dass der Gesetzgeber § 26 AEG inhaltlich erweitert und dazu ermächtigt, in einer Rechtsverordnung auch Regelungen zum Gesundheitsschutz,

⁶ Hervorhebung nicht im Original

insbesondere zum Schutz von Anwohnern an Schienenverkehrswegen vor Schienenverkehrslärm, zu treffen. Derartige Vorschriften würden neben **§ 38 BImSchG** stehen.

Denkbar wäre es ebenfalls, entsprechende Regelungen in eine Rechtsverordnung aufzunehmen, die auf der Grundlage der Verordnungsermächtigung des § 38 BImSchG erlassen werden könnte. In der überkommenen Praxis kommt § 38 BImSchG allerdings eine lediglich geringe Bedeutung zu, weil über alle Verkehrsarten hinweg bislang die gegenüber § 38 BImSchG spezielleren Pflichten des Verkehrsrechts – insbesondere aufgrund § 6 StVG, § 57 PBefG, § 26 AEG oder § 32 LuftVG – zum Tragen kommen; *Jarass*, BImSchG, 13. Auflage 2020, § 38 Rn. 1 f.; *Storost*, in: Ule/Laubinger/Repkewitz, BImSchG, § 38, Stand: Mai 2020, Rn. B 9. Hinzu kommt, dass die Wertungen der besonderen Verkehrsvorschriften ohnehin in § 38 BImSchG hineingelesen werden. Im „*Interesse der Einheit der Rechtsordnung (ist) eine harmonisierende Rechtsauslegung anzustreben, die zu übereinstimmenden Wertungsinhalten der verschiedenen Normen führt; so ist etwa ‚unnötiger Lärm‘ i.S. von § 30 Abs. 1 StVO als ‚vermeidbar‘ i.S. von § 38 Abs. 1 Satz 2 anzusehen*“; *Knauff*, in: Führ, GK-BImSchG, 2. Aufl. 2019, § 38 BImSchG Rn. 55.

10.3.3.2 Verortung des Regelungsvorschlages in der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO)

Die Regelung zur Reduzierung von Schallemissionen, die infolge von Flachstellen auf Rädern von Eisenbahnfahrzeugen entstehen, soll in einen neuen Absatz 6 des § 21 der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO) erfolgen. Die EBO enthält grundsätzlich Vorschriften zur Eisenbahnsicherheit. Bereits heute fallen hierunter Vorschriften hinsichtlich der Beschaffenheit von Fahrzeugen (vgl. §§ 18 ff. EBO). Daher bietet es sich an, die für eine rechtskonforme Umsetzung der Flachstellenerkennung und -behebung erforderlichen Normen ebenfalls in der EBO zu verorten. Da innerhalb dieses Regelungskomplexes § 21 EBO Regelungen hinsichtlich der Räder und Radsätze trifft, fügt sich die neue Regelung gut als neuer Absatz 6 des § 21 EBO ein. Denn dann sind alle Anforderungen hinsichtlich der Beschaffenheit von Rädern und Radsätzen gebündelt in einer Norm für die Normadressaten erkennbar.

Thematisch könnte auch die Aufnahme einer entsprechenden Regelung in das **Schienenlärmschutzgesetz** in Betracht kommen. So lautet § 3 Abs. 1 SchlärmSchG: Mit Beginn des Netzfahrplans 2020/2021 am 13. Dezember 2020 ist das Fahren oder Fahrenlassen von Güterzügen, in die laute Güterwagen eingestellt sind, auf dem deutschen Schienennetz verboten. Laute Güterwagen im Sinne dieses Verbotsgesetzes sind aber nur solche, die bei ihrer Inbetriebnahme nicht den Anforderungen der TSI-Noise entsprochen haben (§ 2 Abs. 1 SchlärmSchG; vgl. BT-Drs 18/11287, S. 11 f.). In der Sache verfolgt das SchlärmSchG somit ein Verbot lauter Technologie; vereinfacht ausgedrückt: Güterwagen mit Grauguss-Bremsklotzsohlen sind verboten (Eisenbahn-Bundesamt, 2021, S. 4). Flachstellen sind aber nicht bei der Inbetriebnahme von Güterwagen vorhanden – stellen also keine laute Technologie i.e.S. dar –, sondern entstehen im laufenden Betrieb. Durch Gebrauch entstehende und dann für verstärkte Lärmentwicklung ursächliche Flachstellen liegen somit außerhalb des Fokus des SchlärmSchG. Dementsprechend erfolgt auch die Kontrolle durch das Eisenbahnbundesamt, dass die Vorgaben des SchlärmSchG im Betrieb tatsächlich eingehalten worden sind gemäß § 10 Abs. 1 S. 2 SchlärmSchG nachträglich „anhand von Wagenlisten und Fahrplanunterlagen“ – nicht aber durch die Kontrolle des tatsächlichen Eisenbahnverkehrs vor Ort (*Kramer*, GewA 2017, 455 [459]).

10.3.3.3 Rechtmäßigkeit des § 21 Abs. 6 EBO

Für die Rechtmäßigkeit des Regelungsvorschlages in der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung sind die rechtlichen Anforderungen an eine wirksame Rechtsverordnung zu wahren, vgl. Art. 80 GG. Eine Rechtsverordnung bedarf einer parlamentsgesetzlichen Ermächtigungsgrundlage. Neben einer verfassungsmäßigen Ermächtigungsnorm ist erforderlich, dass die Änderung der Verordnung formell und materiell rechtmäßig ist.

Bislang diene stets § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG als Ermächtigungsgrundlage für die Vorschriften über die Fahrzeuge in der EBO (Wagner in: Hermes, Sellner und Fehling, 2014, §26 Rn. 14) (Niekamp in: Kühling und Otte, 2020, §26 AEG Rn. 11). An der Verfassungsmäßigkeit des § 26 AEG in der hier vorgeschlagenen Fassung als Ermächtigungsnorm für den neuen Absatz 6 des § 21 EBO bestehen insoweit keine Zweifel. Für die Rechtmäßigkeit des Änderungsvorschlages (dazu oben, in Kapitel 10.3.2) verbleibt es daher bei der Prüfung der formellen (Kapitel 9.3.3.3.1) und materiellen (Kapitel 9.3.3.3.2) Rechtmäßigkeit des vorgeschlagenen § 21 Abs. 6 EBO.

10.3.3.3.1 Formelle Rechtmäßigkeit

Eine Rechtsverordnung ist formell rechtmäßig, wenn der zuständige Ordnungsgeber in einem ordnungsgemäßen Verfahren und unter Einhaltung der Formvorschriften die Verordnung erlassen hat.

a) Zuständigkeit des Ordnungsgebers

Die Zuständigkeit des Ordnungsgebers ergibt sich aus dem zum Erlass der Rechtsverordnung ermächtigenden Gesetz. Ausweislich des § 26 Abs. 1 S. 1 AEG ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) für den Erlass der EBO zuständig. Hinsichtlich der Zuständigkeit ergeben sich durch den Änderungsvorschlag keine Veränderungen.

b) Zustimmungserfordernis des Bundesrats, Art. 80 Abs. 2 GG

Nach Art. 80 Abs. 2 GG ist die Zustimmung des Bundesrates für eine Rechtsverordnung der Bundesregierung oder eines Bundesministers dann erforderlich, wenn die Rechtsverordnung den Bau und Betrieb der Eisenbahnen regelt. Das Zustimmungserfordernis findet sich zudem in § 26 Abs. 1 S. 1 AEG. Der Bundesrat muss daher der Einfügung des neuen Absatzes 6 in § 21 EBO zustimmen.

c) Zitiergebot, Art. 80 Abs. 1 S. 3 GG

Die Rechtsverordnung muss die gesetzliche Ermächtigung detailliert angeben. Sofern sich einzelne Bestimmungen der Rechtsverordnung auf unterschiedliche Ermächtigungsgrundlagen stützen, müssen alle Ermächtigungsgrundlagen, von denen letztlich Gebrauch gemacht wurde, angegeben werden. (BVerfGE 101, 1 (43 f.)) Allerdings muss nicht bei jeder einzelnen Bestimmung angegeben werden, auf welcher konkreten Ermächtigung sie beruht. (BVerfGE 101, 1 (42))

d) Form: Verkündung gem. Art. 82 Abs. 1 S. 2 GG

Die Rechtsverordnung muss vom BMVI ausgefertigt und im Bundesgesetzblatt verkündet werden.

10.3.3.3.2 Materielle Rechtmäßigkeit

Die in § 21 Abs. 6 EBO normierte „Flachstellenregelung“ ist materiell rechtmäßig, wenn sie mit der Ermächtigungsnorm und mit sonstigem Verfassungs- und formellem Gesetzesrecht vereinbar ist.

a) Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit der Ermächtigungsnorm

Als Ermächtigungsgrundlage zum Erlass des § 21 Abs. 6 EBO ist der oben (dort unter Kapitel 9.3.2.1) vorgeschlagene § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 lit. g AEG heranzuziehen.

Nach derzeitiger Rechtslage wird das BMVI zur Gewährleistung der Sicherheit und der Ordnung im Eisenbahnwesen, des Umweltschutzes oder zum Schutz von Leben und Gesundheit der Arbeitnehmer ermächtigt, mit Zustimmung des Bundesrates für öffentliche Eisenbahnen Rechtsverordnungen über die Anforderungen an Bau, Instandhaltung, Ausrüstung, Betrieb und Verkehr der Eisenbahnen nach den Erfordernissen der Sicherheit, nach den neusten Erkenntnissen der Technik oder nach internationalen Abmachungen zu erlassen. Für nichtöffentliche Eisenbahnen gelten gemäß § 26 Abs. 5 S. 1 AEG die Ermächtigungen nach § 26 Abs. 1 AEG insoweit, als die Einheit des Eisenbahnwesens es erfordert.

Bereits die bisherige Rechtslage erlaubt es dem Verordnungsgeber – wie die aktuelle Fassung des § 21 EBO zeigt – Regelungen hinsichtlich der Räder und Radsätze zu treffen. Allerdings bezwecken die bisherigen Regelungen der EBO, dass die Bahnanlagen und Fahrzeuge den Anforderungen an Sicherheit und Ordnung genügen (vgl. § 2 Abs. 1 S. 1 EBO). Durch die Neufassung des § 26 Abs. 1 S. 1 vor Nr. 1 AEG („Gesundheitsschutz“) schafft der parlamentarische Gesetzgeber für den Verordnungsgeber die Möglichkeit, bei Änderungen der EBO den Schutz der Gesundheit vor Lärmemissionen zu berücksichtigen.

Durch das Einfügen des lit. g in die nicht abschließende Aufzählung des § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG

*„Zur Gewährleistung der Sicherheit und der Ordnung im Eisenbahnwesen, zum Schutz von Umwelt, **Gesundheit** oder von Leben und Gesundheit der Arbeitnehmer wird das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur ermächtigt, mit Zustimmung des Bundesrates für öffentliche Eisenbahnen Rechtsverordnungen zu erlassen*

*1. über die Anforderungen an Bau, Instandhaltung, Ausrüstung, Betrieb und Verkehr der Eisenbahnen nach den Erfordernissen der Sicherheit, den **Erfordernissen des Lärmschutzes**, nach den neusten Erkenntnissen der Technik, nach den oder nach internationalen Abmachungen; dabei können insbesondere geregelt werden:*

...

g) Maßnahmen zur Reduzierung der von Eisenbahnfahrzeugen ausgehenden Lärmemissionen infolge von Flachstellen auf Rädern und Radsätzen;“

wird der Verordnungsgeber zudem ausdrücklich ermächtigt, Maßnahmen zur Reduzierung von Lärmemissionen anzuordnen.

Im Ergebnis werden somit durch die vorgeschlagene Änderung des § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG mögliche Bedenken hinsichtlich der Vereinbarkeit des vorgeschlagenen § 21 Abs. 6 EBO mit der Ermächtigungsnorm ausgeräumt (vgl. *Döbber*, IR 2021, 36 [37]).

b) Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit dem Recht der Europäischen Union

Die neue Vorschrift des § 21 Abs. 6 EBO muss mit dem Recht der Europäischen Union vereinbar sein. Denn das Unionsrecht genießt Anwendungsvorrang vor dem nationalen Recht.

Anwendungsvorrang bedeutet für den Fall der Kollision von Unionsrecht und nationalem Recht, dass das nationale Recht nicht angewendet werden darf. Allerdings verliert das nationale Recht deshalb nicht seine Gültigkeit.

Der Erlass des § 21 Abs. 6 EBO ist dementsprechend nur dann geeignet, das Ziel der Reduzierung von Lärmemissionen wegen Flachstellen an Fahrzeugen zu erreichen, wenn die Vorschrift im Einklang mit dem Unionsrecht steht. Das ist der Fall. Zunächst belässt das Unionsrecht den Mitgliedsstaaten Spielraum für eigene Regelungen zur Reduzierung von Lärmemissionen an Fahrzeugen (1.). Dann verstößt der hier vorgeschlagene § 21 Abs. 6 EBO nicht gegen die Europäischen Grundfreiheiten (2.). Schließlich steht der Regelungsvorschlag auch sonst in keinem Konflikt mit anderen Rechtsakten der Europäischen Union (3.).

1. Normgebungskompetenz

Es existieren verschiedene unionale Sekundärrechtsakte, die sich mit Eisenbahnen und dabei auch mit der Frage der Lärmemissionen im Schienenverkehr beschäftigen. Für eine nationale Regelung zur Reduzierung der von Schienenfahrzeugen ausgehenden Lärmemissionen würde es an der erforderlichen Gesetzgebungskompetenz fehlen, wenn die Europäische Union auf diesem Gebiet bereits abschließende Rechtsakte erlassen hätte.

► Umgebungslärm-RL (2002/49/EG)

Mit der Richtlinie über die Bewertung und die Bekämpfung von Umgebungslärm sollte ein hohes Gesundheits- und Umweltschutzniveau als Teil der Gemeinschaftspolitik gewährleistet werden (Kupfer in: Popp et al., September 2016, S. 105, 121 f.). Ausweislich des Erwägungsgrundes 5 der RL 2002/49/EG sind dabei insbesondere Lärmemissionen von Schienenfahrzeugen Regelungsgegenstand der Richtlinie.

Die Umgebungslärm-RL trifft ausweislich ihrer Erwägungsgründe 5 und 7 (Europäisches Parlament und Rat, 2002) keine abschließende Regelung hinsichtlich der Reduzierung von Lärmemissionen im Schienenverkehr. Vielmehr sollen

„die Maßnahmen der Mitgliedstaaten durch Gemeinschaftsmaßnahmen ergänzt werden, durch die sich ein gemeinsames Verständnis in Bezug auf die Lärmproblematik ergibt.“
Vgl. Erwägungsgrund 7 S.1 der RL 2002/49/EG.

Unterstützend heißt es in Erwägungsgrund 5, dass die Richtlinie

*„die Grundlage für die Weiterentwicklung und Ergänzung der bestehenden Gemeinschaftsmaßnahmen in Bezug auf die Lärmemissionen der wichtigsten Lärmquellen — dies sind insbesondere Straßen- und Schienenfahrzeuge (...) — und für die Entwicklung **zusätzlicher** kurz-, mittel- und langfristige angelegter Maßnahmen bilden (soll)“.*

Die Umgebungslärm-RL ist somit nicht als eine abschließende Regelung zu verstehen. Im Gegenteil: Die Umgebungslärm-RL verweist explizit darauf, dass die Gemeinschaftsmaßnahmen lediglich nationale Maßnahmen ergänzen sollen.

► Zentrale Eisenbahnregelungs-Richtlinie (RL 2012/34/EU) (Europäisches Parlament und Rat, 2012)

Die Richtlinie 2012/34/EU (Europäisches Parlament und Rat, 2012)) enthält Vorgaben zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums, aber keine speziellen Vorgaben zum Schutz vor Schienen(verkehrs)lärm. Lediglich Art. 31 Abs. 5 der Richtlinie normiert, dass

die Wegeentgelte geändert werden können, um den Kosten umweltbezogener Auswirkungen aufgrund des Zugbetriebs Rechnung zu tragen. Gemäß Art. 31 Abs. 5 UAbs. 3 der Richtlinie fallen darunter auch Lärmauswirkungen.

Auch bei der RL 2012/34/EU handelt es sich nicht um abschließendes Sekundärrecht hinsichtlich der Lärmreduzierung im Schienenverkehr (Kühling und Seiler, 2016, S. 155 (161)). In Erwägungsgrund 46 der RL 2012/34/EU wird davon gesprochen, dass lärmabhängige Wegeentgelte andere Maßnahmen zur Verringerung des durch Schienenverkehr hervorgerufenen Lärms ergänzen sollen. Die in Erwägungsgrund 46 in der Folge aufgezählten Maßnahmen sind ausdrücklich nicht abschließend („beispielsweise“).

„(46) **Lärmabhängige Wegeentgelte** sollten **andere Maßnahmen zur Verringerung von durch Schienenverkehr hervorgerufenem Lärm ergänzen, beispielsweise** die Annahme technischer Spezifikationen für die Interoperabilität (**TSI**), mit denen Obergrenzen für den von Schienenfahrzeugen hervorgerufenen Lärm festgelegt werden, Ausarbeitung von **Lärmkarten** und **Aktionspläne** zur Verringerung der Lärmbelastung gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm (2) sowie **öffentliche Finanzierungen** auf Unions- und einzelstaatlicher Ebene für die Nachrüstung von Schienenfahrzeugen und für Infrastruktureinrichtungen zur Lärminderung.“

- VO 1304/2014 (TSI Noise) (Europäische Kommission, 2014) i.V.m. RL 2016/797/EU (Europäisches Parlament und Rat, 2016)

Die RL 2016/797/EU über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Europäisches Parlament und Rat, 2016) in Verbindung mit der VO 1304/2014 der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeug – Lärm“ (Europäische Kommission, 2014) verfolgt das Ziel der Reduzierung der von Schienenfahrzeugen ausgehenden Lärmemissionen durch die Aufstellung spezifischer Grenzwerte für „**neues**“ rollendes Material (Güterwagen, Lokomotiven, Triebzüge und Reisezugwagen) (Knauff in: Ruffert, 2020, §6 Rn. 150). Die Vorgaben betreffen die **Zulassung** von Schienenfahrzeugen; (Epiney in: Ludwigs und Dausen, 2021, L Rn. 423)

Nach Art. 3 Abs. 1 der RL 2016/797 müssen das Eisenbahnsystem der Union, die Teilsysteme und die Interoperabilitätskomponenten einschließlich der Schnittstellen den sie betreffenden grundlegenden Anforderungen entsprechen. Die „grundlegenden Anforderungen“ sind in Anhang III der Richtlinie aufgezählt. Hinsichtlich der Lärmemissionen heißt es unter 1.4.4. (Umweltschutz) wie folgt:

„Konzeption und Betrieb des Eisenbahnsystems dürfen nicht zu einer Überschreitung der zulässigen Grenzwerte der vom System ausgehenden Lärmemissionen an folgenden Orten führen:

- *in den in der Nähe einer Eisenbahninfrastruktur gelegenen Gebieten im Sinne des Artikels 3 Nummer 3 der Richtlinie 2012/34/EU und*
- *im Führerstand.“*

Die Gebiete im Sinne des Art. 3 Nr. 3 der RL 2012/34/EU sind in Anhang I derselben RL aufgezählt. Die in 1.4.4. des Anhangs III der RL 2016/797/EU genannten „zulässigen Grenzwerte“ sind in der VO 1304/2014 (TSI Noise) festgelegt.

Die in der TSI Noise festgesetzten Grenzwerte für Lärmemissionen durch Schienenfahrzeuge. (Europäische Kommission, 2014, S. 427-429)

könnten insofern abschließend sein, als es dem nationalen Gesetzgeber verwehrt ist, eigene Regelungen hinsichtlich der Lärmemissionen von Schienenfahrzeugen zu treffen. Ob die TSI Noise i.V.m. der RL 2016/797 abschließend ist, ist durch Auslegung zu ermitteln.

In Erwägungsgrund 6 der TSI Noise heißt es:

*„Mittelfristig sollte eine Analyse im Hinblick auf die **Verringerung der Geräuschemissionen von bestehenden Fahrzeugen** durchgeführt werden, wobei gleichzeitig der Wettbewerbsfähigkeit des Eisenbahnsektors Rechnung zu tragen ist. Dies betrifft vor allem Güterwagen und ist wichtig im Hinblick auf die größere Akzeptanz des Schienengüterverkehrs durch die Bürgerinnen und Bürger.“*

Die von der TSI Noise für Schienenfahrzeuge aufgestellten Grenzwerte gelten in Ansehung des zitierten Erwägungsgrund 6 und des Art. 8 S. 3 TSI Noise für die Neugenehmigung von Schienenfahrzeugen und nehmen dabei die Konstruktion des jeweiligen Schienenfahrzeugs in Bezug. Es handelt sich um eine Produktzulassungsregelung für den Bereich Schiene (*Kupfer*, in: Popp u.a., Lärmschutz in der Verkehrs- und Stadtplanung, 2016, Kap. 3 Rechtliche Grundlagen, S. 105 [114 f.]). Die Grenzwerte der TSI Noise müssen daher bei der Inbetriebnahme von Zügen und Wagons beachtet werden, sie gelten grundsätzlich nicht für Schienenfahrzeuge, die bereits in Betrieb sind.

M. Nachw. Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, Unterabteilung Europa, Lärmschutz gegen Güterwagen auf der Schiene (2016), PE 6 – 3000 – 152/16 S. 6; ebenso *Knauff*, in: Führ(Hrsg.), GK-BImSchG, 2. Aufl. 2019, § 38 BImSchG Rn. 19.

Eine Kollision der TSI Noise mit dem Regelungsvorschlag für § 21 Abs. 6 EBO liegt demnach nicht vor. § 21 Abs. 6 EBO – nach dem hier vorliegenden Regelungsvorschlag (oben, Kapitel 9.3.2) – und die TSI Noise kollidieren inhaltlich bereits deshalb nicht, weil die TSI Noise als Harmonisierungsvorschrift die Anforderungen an die Zulassung von Schienenfahrzeugen im Blick hat, während § 21 Abs. 6 EBO eine Vorschrift der allgemeinen verkehrlichen Lärmsanierung infolge von Abnutzung durch Gebrauch darstellt – insbesondere ohne Beschränkung auf als besonders schutzbedürftig und -würdig qualifizierte Streckenabschnitte. Aber auch materiell, d.h. inhaltlich, würde von dem hier vorgeschlagenen § 21 Abs. 6 EBO keine marktgefährdende inhaltliche Wirkung auf die TSI Noise ausgehen (näher *Kupfer*, in: Popp u.a., Lärmschutz in der Verkehrs- und Stadtplanung, 2016, Kap. 3 Rechtliche Grundlagen, S. 105 [114 f.]). Denn der in § 21 Abs. 6 EBO festgelegte Grenzwert ist gerade nicht strenger als die Grenzwerte der TSI Noise. Vielmehr wählt der Regelungsvorschlag einen Toleranzwert von 2 dB (A) oder mehr über den Grenzwerten der TSI Noise. Auch wird keine nach Unionsrecht einmal zugelassene technische Konstruktion in Frage gestellt. Somit werden die Vorgaben der TSI Noise nicht – insbesondere nicht zum Nachteil ausländischer Eisenbahnverkehrsunternehmen – weiter verschärft.

Schließlich spricht auch die Umgebungslärm-RL dafür, dass die RL 2016/797 i.V.m. der TSI Noise nicht als abschließende Regelung zur Reduzierung von Lärmemissionen durch Schienenfahrzeuge verstanden werden kann. Denn bei einer solchen Annahme würde der von der Umgebungslärm-RL vorgegebene Schutzstandard stark eingeschränkt (vgl. RL 2002/49/EG Erwägungsgrund 1). Die Annahme, der Unionsgesetzgeber wollte mit der RL 2016/797 i.V.m. der TSI Noise weitere Maßnahmen zur Reduzierung von Geräuschemissionen durch

Schienenfahrzeuge unterbinden, würde mit dem Grundsatz der Einheit und Konsistenz des gesamten Unionsrechts kollidieren. Davon ist nicht auszugehen.

Im **Ergebnis** ist festzuhalten: **Die TSI Noise ist nicht abschließend**. Ihre Lärmgrenzwerte, insbesondere für das Vorbeifahrgeräusch, gelten grundsätzlich für die Zulassung neuer Schienenfahrzeuge und nehmen dabei die Konstruktion des jeweiligen Schienenfahrzeugs in Bezug. Es handelt sich um eine Harmonisierungsvorschrift, die Regelungen für die Produktzulassung auf der Schiene enthält. Demgegenüber werden mit dem **hier vorgeschlagenen § 21 Abs. 6 EBO neue Regeln für einen Anwendungsbereich außerhalb der TSI Noise** geschaffen: Lärmsanierung von Fahrzeugen, die infolge von – durch Abnutzung entstandenen – Flachstellen in erheblichem Umfang dazu beitragen, Schienenverkehrslärm zu verursachen.

2. Grundfreiheiten

Der Regelungsvorschlag des § 21 Abs. 6 EBO verletzt auch keine Europäischen Grundfreiheiten.

Der Regelungsvorschlag könnte in den Anwendungsbereich der Warenverkehrsfreiheit (Art. 34 AEUV) sowie der Dienstleistungsfreiheit (Art. 58 AEUV) eingreifen. Die Grundfreiheiten sind allerdings nur dann Prüfungsmaßstab für eine nationale Regelung, wenn und soweit keine sekundärrechtlichen Regelungen existieren. Ist ein Regelungsbereich auf Unionsebene abschließend harmonisiert worden, ist allein das Sekundärrecht Prüfungsmaßstab (EuGH, Urteil vom 14. Dezember 2004 – C 309/02 – juris Rn. 53; Calliess und Ruffert, 2016, Art. 34 - 36 Rn. 18).

Wie bereits in dem unmittelbar vorstehenden Kapitel herausgearbeitet, trifft das Sekundärrecht hinsichtlich der Beschränkung des Betriebs von bereits zugelassenen Schienenfahrzeugen aus Gründen des Lärmschutzes infolge von Gebrauchsschäden keine abschließende sekundärrechtliche Regelung. Der Regelungsvorschlag ist daher an den Grundfreiheiten zu messen.

► Warenverkehrsfreiheit

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Warenverkehrsfreiheit aus Art. 34 AEUV ist, dass eine „Ware“ von der Maßnahme betroffen ist und dass die in Frage stehende nationale Regelung eine „mengenmäßige Einfuhrbeschränkung“ oder eine „Maßnahme gleicher Wirkung“ darstellt.

Waren sind bewegliche Sachen mit Geldwert, die Gegenstand des Handelsverkehrs sein können (EuGH, Rs. 7/68, Slg. 1968, 633 (642)). Der Regelungsvorschlag trifft keine unmittelbare Regelung für „Waren“. Es handelt sich jedenfalls nicht um eine „Mengenmäßige Einfuhrbeschränkung“ i.S.d. Art. 34 AEUV.

Allerdings könnte die Regelung eine „Maßnahme gleicher Wirkung“ nach Art. 34 AEUV sein. Nach der *Dassonville*-Rechtsprechung des EuGH handelt es sich bei jeder Handelsregelung der Mitgliedsstaaten, die geeignet ist, den innerunionalen Handel unmittelbar oder mittelbar, tatsächlich oder potenziell zu behindern, um eine Maßnahme gleicher Wirkung (EuGH, 8/74, Slg. 1974, 837 – *Dassonville*, Rn. 5). Damit hat der EuGH die Warenverkehrsfreiheit von einem Diskriminierungsverbot zu einem umfassenden Beschränkungsverbot ausgeweitet (Kotzur in: Geiger, Khan und Kotzur, 2017, Art. 34 Rn. 8). Der EuGH hat zudem einen Eingriff in die Warenverkehrsfreiheit auch bei einer Behinderung der Freiheit der Warendurchfuhr angenommen:

„Der Warenverkehr könnte aber nicht vollkommen frei sein, wenn die Mitgliedsstaaten die Durchfuhr der Waren in irgendeiner Weise be- oder verhindern könnten. Deshalb ist als Folge der Zollunion und im gegenseitigen Interesse der Mitgliedsstaaten das Bestehen eines allgemeinen Grundsatzes der Freiheit der Warendurchfuhr innerhalb der Gemeinschaft anzuerkennen.“ (EuGH, Urt. v. 16.3.1983, Rs. 266/81 – *Siot*, Rn. 16)

Nach der Rechtsprechung des EuGH ist der Regelungsvorschlag für § 21 Abs. 6 EBO daher als eine „Maßnahme gleicher Wirkung“ i.S.v. Art. 34 AEUV zu verstehen. Die aus dem Regelungsvorschlag folgende Pflicht zur Einhaltung der Lärmgrenzwerte wird zu finanziellen Mehraufwendungen der Regelungsadressaten führen. Die Behebung der Flachstellen ist mit finanziellen Aufwendungen verbunden. Zudem können durch die kürzeren Wartungsintervalle Kosten in der Logistik entstehen. Der Transport von Waren auf der Schiene in der Bundesrepublik wird jedenfalls mit höheren Ausgaben als bisher verbunden sein.

Allerdings erfährt der durch die *Dassonville*-Rechtsprechung geschaffene weite Anwendungsbereich der „Maßnahme gleicher Wirkung“ eine Einschränkung durch die sog. *Keck*-Rechtsprechung des EuGH. Danach ist eine „Maßnahme gleicher Wirkung“ zu verneinen, wenn es sich bei der nationalen Regelung um eine unterschiedslos anwendbare vertriebsbezogene Maßnahme handelt, die den Absatz inländischer und eingeführter Produkte rechtlich und tatsächlich gleich berührt, und den Marktzugang nicht behindert. (EuGH, Verb. Rs. C-267 u. 268/91, Slg. 1993, I-6097, Rn. 16 f. – *Keck und Mithouard*)

Der Regelungsvorschlag des § 21 Abs. 6 EBO ist unterschiedslos auf in- und ausländische Schienenfahrzeuge anwendbar. Sie berührt demnach – jedenfalls mittelbar durch die steigenden Transportkosten – den Absatz inländischer und eingeführter Produkte rechtlich und tatsächlich in gleicher Weise. Nach der *Keck*-Formel verbleibt die Frage, ob der Regelungsvorschlag geeignet ist, den Marktzugang zu behindern. Dabei kommt es maßgeblich darauf an, inwieweit die Maßnahme konkrete Auswirkungen auf den Marktzugang von Produkten haben kann. (EuGH C 142/05, Slg. 2009, I-4273 Rn. 24 – *Mickelsson und Roos*) Eine Beeinträchtigung des Marktzugangs ist demnach zu bejahen, wenn der Binnenmarkt durch die nationale Maßnahme „segmentiert“ wird. Eine Behinderung des Marktzugangs liegt wiederum nicht vor, wenn lediglich ein Verhalten auf diesem Markt reguliert wird (Kingreen in: Calliess und Ruffert, 2016, Art. 34-36 AEUV Rn. 51).

Der Regelungsvorschlag kann nach diesem Maßstab nur schwerlich als eine Regelung bezeichnet werden, die den Marktzugang für eingeführte Produkte verhindert. Vielmehr handelt es sich um eine Regelung, die alle Marktteilnehmer dazu verpflichtet, zur Reduzierung von Lärmemissionen durch Schienenfahrzeuge beizutragen.

Selbst wenn man entgegen der *Keck*-Rechtsprechung den Regelungsvorschlag als eine „Maßnahme gleicher Wirkung“ gem. Art. 34 AEUV einordnen würde, wäre diese Beeinträchtigung der Warenverkehrsfreiheit gerechtfertigt. Gerechtfertigt sind Eingriffe in die Warenverkehrsfreiheit insbesondere dann, wenn einer der Rechtfertigungsgründe des Art. 36 AEUV vorliegt und der Eingriff verhältnismäßig ist. Der Regelungsvorschlag ist zum Schutz der Gesundheit von Menschen nach Art. 36 S. 1 AEUV gerechtfertigt. Die Schutzgüter Leben und Gesundheit nehmen nach der Rechtsprechung des EuGH den „ersten Rang“ unter den Schutzgütern des Art. 36 AEUV ein (EuGH, Rs. C-421/09, Slg. 2010, I-12869, Rn. 33 – *Humanplasma*). Unbestritten erhöht die gesteigerte Lärmbelastung das Risiko für Gesundheitsschäden.

Im Ergebnis ist festzuhalten: Mit Blick auf die sog. *Keck*-Rechtsprechung des EuGH ist bereits zweifelhaft, ob durch den Regelungsvorschlag überhaupt in die Warenverkehrsfreiheit eingegriffen wird. Doch selbst dann, wenn man eine Beeinträchtigung der

Warenverkehrsfreiheit annehmen wollte, wäre diese jedenfalls aufgrund des mit dem Regelungsvorschlag beabsichtigten und bewirkten Gesundheitsschutzes als Regelungszweck gerechtfertigt.

► Dienstleistungsfreiheit

Dem Regelungsvorschlag steht auch nicht die Dienstleistungsfreiheit gemäß Art. 56 AEUV entgegen. Denn gemäß Art. 58 Abs. 1 AEUV gelten hinsichtlich des freien Dienstleistungsverkehrs auf dem Gebiet des Verkehrs die Bestimmungen des Titels über den Verkehr.

Mit Urt. v. 22.5.1985, Rs. 13/83 – Parlament/Rat, Rn. 62 hat der EuGH entschieden, dass die Dienstleistungsfreiheit auf dem Gebiet des Verkehrs durch die Verwirklichung der gemeinsamen Verkehrspolitik mit Sekundärrechtsakten erreicht werden muss.

Bei dem hier vorgeschlagenen § 21 Abs. 6 EBO handelt es sich um eine Regelung auf dem Gebiet des (Schienen-)Verkehrs. Somit ist die Dienstleistungsfreiheit kein Prüfungsmaßstab für den Regelungsvorschlag.

3. Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit dem Europäischen Güterverkehrskorridor

Durch die Verordnung (EU) Nr. 913/2010 hat der Europäische Normgeber Vorschriften für die Einrichtung und Organisation grenzübergreifender Güterverkehrskorridore für einen wettbewerbsfähigen Schienengüterverkehr festgelegt. Dadurch soll ein einheitliches europäisches Schienennetz für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr geschaffen werden, vgl. Art. 1 Abs. 1 VO 913/2010. Der Regelungsvorschlag für § 21 Abs. 6 EBO ist jedoch auch mit den Vorschriften aus der VO 913/2010 vereinbar.

Nach Auffassung von *Kramer* schützt die VO 913/2010 zu den europäischen Güterverkehrskorridoren nicht den Güterverkehr auf der einzelnen Strecke, sondern lediglich die großräumige Verbindung zwischen zwei Orten (*Kramer*, 2013, S. 18 f.). Dass die Anordnung von Maßnahmen zum Lärmschutz auf der Strecke keinen Bezug zum europäischen Güterverkehrskorridor hat, zeigt zudem Art. 1 Abs. 1 der VO 913/2010:

„In dieser Verordnung werden Vorschriften für die Einrichtung und Organisation grenzübergreifender Güterverkehrskorridore für einen wettbewerbsfähigen Schienengüterverkehr festgelegt mit dem Ziel, ein europäisches Schienennetz für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr zu schaffen. Es werden Vorschriften für die **Auswahl, die Organisation, das Management und die indikative Investitionsplanung von Güterverkehrskorridoren** festgelegt.“

Aus der zitierten Aufzählung, welche Bereiche VO 913/2010 regelt, lässt sich im Umkehrschluss entnehmen, welche Regelungsbereiche von ihr nicht berührt werden. Etwaige Betriebsbeschränkungen innerhalb eines funktionierenden Güterverkehrskorridors fallen daher nicht in den Regelungsbereich der VO 913/2010. Aus Erwägungsgrund 22 der VO 913/2010 ergibt sich zudem, dass kein strikter Vorrang der Güterzüge in dem jeweiligen Güterverkehrskorridor gilt. Vielmehr seien die Erfordernisse aller Verkehrsarten zu berücksichtigen.

Letztlich zeigt der Erwägungsgrund 10 der VO 913/2010 ausdrücklich, dass diese Verordnung der Einführung von Maßnahmen zur Reduzierung von Lärmemissionen durch Schienenfahrzeuge nicht entgegenstehen soll:

„Die Durchführung grenzübergreifender Güterverkehrskorridore zur Bildung eines europäischen Schienennetzes für einen wettbewerbsfähigen Güterverkehr sollte in Einklang mit dem transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-V) und/oder den Korridoren des Europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems (ERTMS) erfolgen. Zu diesem Zweck muss die Entwicklung der Netze koordiniert werden, insbesondere was die Integration der grenzübergreifenden Güterverkehrskorridore in das bestehende TEN-V und die ERTMS-Korridore anbelangt. Zudem sollten auf Unionsebene harmonisierende Regeln für diese Güterverkehrskorridore aufgestellt werden. Vorhaben zur Minderung des von Güterverkehrszügen ausgehenden Lärms sollten gefördert werden“...

Somit ist festzuhalten: Der Regelungsvorschlag zur Bekämpfung des Schienenverkehrslärms infolge von Flachstellen (oben, Kapitel 9.3.2.) steht auch mit dem durch die VO 913/2010 geschaffenen Europäischen Güterverkehrskorridor in Einklang.

c) **Vereinbarkeit § 21 Abs. 6 EBO mit sonstigem Verfassungs- und formellem Gesetzesrecht**

Die Eisenbahn-Bau und Betriebsverordnung steht als Rechtsverordnung im Rang unter formellem Gesetzesrecht und Verfassungsrecht. Daher muss die EBO für ihre Wirksamkeit mit dem höherrangigen Recht vereinbar sein.

1. Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit § 10 Eisenbahnregulierungsgesetz

Der Regelungsvorschlag darf nicht im Widerspruch zu dem in § 10 Eisenbahnregulierungsgesetz (ERegG) normierten diskriminierungsfreien Netzzugangsanspruchs stehen. Nach § 10 Abs. 1 S. 1 ERegG hat jeder Zugangsberechtigte das Recht auf Zugang zu Eisenbahnanlagen für alle Arten von Schienengüterverkehrsdiensten zu angemessenen, nichtdiskriminierenden und transparenten Bedingungen. Dabei vermittelt der diskriminierungsfreie Netzzugangsanspruch nicht bloß einen Anspruch auf erstmaligen Zutritt zur öffentlichen Eisenbahninfrastruktur, sondern entfaltet seine Wirkung auch nach der erfolgten Zulassung während der Nutzung der öffentlichen Eisenbahninfrastruktur (OVG NRW, Urt. v. 07.10.2013 – 13 A 1444/12 –, juris Rn. 57 ff.) (Maas/ter Steeg in: Kühling und Otte, 2020, §10 Rn. 22)

Andernfalls könnte das Zugangsrecht durch beeinträchtigende oder diskriminierende Bedingungen nach Gewährung des Netzzugangs den Schutz des § 10 ERegG entwertet werden (Maas/ter Steeg in: Kühling und Otte, 2020, §10 Rn. 22).

Der Regelungsvorschlag für § 21 Abs. 6 EBO stellt jedoch keine Zugangsbedingung im Sinne des § 10 Abs. 1 ERegG dar. Unter Zugangsbedingungen fallen Umstände und Pflichten auf Seiten des Zugangsberechtigten, an die das Eisenbahninfrastrukturunternehmen die Zugangsgewährung zu der von ihm betriebenen Infrastruktur knüpft (Maas/ter Steeg in: Kühling und Otte, 2020, §10 Rn. 33). Die Einhaltung der Grenzwerte wegen Flachstellen ist keine klassische Zugangsbedingung. Vielmehr regelt sie den späteren Betrieb auf der Strecke. Da es insoweit um die Beschaffenheit der Räder bzw. Radsätze geht, kann auf die bisherige Regelung des § 21 EBO verwiesen werden.

2. Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit der Berufsfreiheit

Der Regelungsvorschlag muss mit dem Grundrecht der Berufsfreiheit aus Art. 12 Abs. 1 GG im Einklang stehen.

Der Schutzbereich der Berufsfreiheit wird weit ausgelegt. Erfasst wird jede auf Dauer angelegte Tätigkeit, die in ideeller wie in materieller Hinsicht der Schaffung und Erhaltung einer Lebensgrundlage dient (BVerfGE 110, 304 (321)). Trotz des Persönlichkeitsbezugs der Berufsfreiheit ist der Begriff des Berufs nicht eng im Sinne einer persönlichen Berufung zu verstehen, sondern weit mit Blick auf jede erwerbswirtschaftliche Tätigkeit (Ruffert in: Epping, Hillgruber und Axer, 2020, Art. 12 Rn. 38). Deshalb umfasst der Schutzbereich der Berufsfreiheit auch juristische Personen des Privatrechts (BVerfGE 50, 290 (363)). Betroffene des Regelungsvorschlages für § 21 Abs. 6 EBO werden die Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie die Wagenhalter sein. Die im Regelungsvorschlag normierte Pflicht zur Instandhaltung berührt die erwerbswirtschaftliche Betätigung von allen potenziellen Normadressaten. Der Schutzbereich der Berufsfreiheit ist damit eröffnet.

Der Regelungsvorschlag müsste in den Schutzbereich der Berufsfreiheit aus Art. 12 Abs. 1 S. 1 GG eingreifen. Nach dem klassischen Eingriffsbegriff des Bundesverfassungsgerichts versteht man unter einem Grundrechtseingriff einen rechtsförmigen Vorgang der unmittelbar und gezielt durch ein vom Staat verfügbares, imperatives Ge- oder Verbot zu einer Verkürzung grundrechtlicher Freiheiten führt (BVerfGE 105, 279 (299 f.)). Mit der Pflicht zur Einhaltung der (erweiterten) Grenzwerte betrifft der Regelungsvorschlag die Wagenhalter und die Eisenbahninfrastrukturunternehmen unmittelbar. Die Regelung besitzt auch die für einen Eingriff in die Berufsfreiheit erforderliche objektiv berufsregelnde Tendenz (Jarass und Pieroth, 2020, Art. 12 Rn. 15).

Der Eingriff in den Schutzbereich der Berufsfreiheit durch den Regelungsvorschlag des § 21 Abs. 6 EBO ist jedoch gerechtfertigt, wenn die Vorschrift sich innerhalb der Schrankenregelung der Berufsfreiheit bewegt. Eingriffe in die Berufsfreiheit unterliegen gem. Art. 12 Abs. 1 S. 2 GG einem einfachen Gesetzesvorbehalt. Entgegen dem Wortlaut betrifft der Gesetzesvorbehalt nicht nur die Berufsausübung, sondern auch die gesamte Berufsfreiheit; (BVerfGE 102, 197 (213)).

Der Regelungsvorschlag des § 21 Abs. 6 EBO muss also die Anforderungen an den Gesetzesvorbehalt der Berufsfreiheit erfüllen. Grundsätzlich können auch untergesetzliche Normen – wie die EBO als Rechtsverordnung – die Berufsfreiheit einschränken. Der parlamentarische Gesetzgeber muss lediglich alle für die Grundrechtsausübung wesentlichen Fragen selbst regeln (BVerfGE 38, 372 (381)). Da es sich bei dem Regelungsvorschlag nicht um einen besonders intensiven Grundrechtseingriff handelt und ähnliche Ordnungsvorschriften bezüglich der Beschaffenheit für Fahrzeuge bereits in einer Verordnung geregelt werden, ist davon auszugehen, dass eine parlamentsgesetzliche Vollregelung verfassungsrechtlich nicht geboten ist. Notwendig aber auch hinreichend ist eine formell-gesetzliche Ermächtigung zum Erlass der untergesetzlichen Norm (Jarass und Pieroth, 2020, Art. 12 Rn. 30).

Ermächtigungsnorm für den Erlass des Regelungsvorschlages soll § 26 Abs. 1 Nr. 1 lit. g AEG sein. Folglich liegt ein wirksames Parlamentsgesetz vor, auf dem die einschränkende Norm beruhen soll.

Ferner muss die einschränkende Norm den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit wahren. Der Regelungsvorschlag muss dafür ein legitimes Ziel verfolgen und zur Erreichung dieses Ziels geeignet, erforderlich und angemessen sein.

Der Regelungsvorschlag verfolgt das Ziel des Gesundheits- und Umweltschutzes. Der Gesundheitsschutz ist in Art. 2 Abs. 2 S. 1 GG verfassungsrechtlich verankert. Neben seiner Funktion als Abwehrrecht folgt aus Art. 2 Abs. 2 S. 1 GG eine staatliche Schutzpflicht (Lang in: Epping, Hillgruber und Axer, 2020, Art. 2 Rn. 74). Die Legislative soll durch die Ausgestaltung des einfachen Rechts den Gesundheitsschutz fördern. Dabei wird dem Staat ein erheblicher Einschätzungs- und Gestaltungsspielraum gewährt. Der Umweltschutz ist als Staatsziel in Art.

20a GG ebenfalls verfassungsrechtlich verbürgt, sodass ein legitimer Zweck für den Regelungsvorschlag zu bejahen ist.

An der Eignung des Regelungsvorschlages zur Verbesserung des Gesundheit- und Umweltschutzes durch die Reduzierung von Lärmemissionen im Schienenverkehr bestehen keine Zweifel. Auch mildere Maßnahmen, die aber ebenso effektiv den Gesundheits- und Umweltschutz durch die Reduzierung von Lärmemissionen infolge von Flachstellen erreichen, sind nicht ersichtlich.

Letztlich muss der Regelungsvorschlag angemessen sein. Das ist dann der Fall, wenn der Eingriff in die Berufsfreiheit nicht außer Verhältnis zu dem mit dem Regelungsvorschlag verfolgten Zweck des Gesundheits- und Umweltschutzes steht.

Innerhalb der Berufsfreiheit wird die Prüfung der Angemessenheit durch die sog. Stufentheorie konkretisiert (BVerfGE 25, 1 (11 f.)). Sie unterscheidet zwischen drei Stufen von Beeinträchtigungen der Berufsfreiheit. Auf der ersten Stufe findet sich die sog. Berufsausübungsbeschränkungen, die die Wahl eines Berufes nicht beeinflussen (Jarass und Piroth, 2020, Art. 12 Rn. 34). Sie sind von relativ geringer Intensität, sodass es für die Wahrung der Verhältnismäßigkeit ausreicht, wenn die Regelung den Betroffenen nicht übermäßig belastet (BVerfGE 83, 1 (19)). Auf der zweiten und dritten Stufe stehen die subjektiven und objektiven Berufswahlbeschränkungen. Berufswahlbeschränkungen sind stets Eingriffe höherer Intensität, sodass eine Rechtfertigung nur zum Schutze überragender Gemeinschaftsgüter beziehungsweise zur Abwehr nachweisbarer oder höchst wahrscheinlicher schwerer Gefahren für ein überragend wichtiges Gemeinschaftsgut möglich ist (Jarass und Piroth, 2020, Art. 12 Rn 46,48). Die Einstufung als Berufswahl- oder Berufsausübungsbeschränkung hängt davon ab, ob die Ausübung eines Berufs oder einer bloßen Berufsmodalität ausgeschlossen wird (Jarass und Piroth, 2020, Art. 12 Rn. 38).

Bei dem Regelungsvorschlag für § 21 Abs. 6 EBO handelt es sich nicht um eine Berufswahlbeschränkung. Die Regelungsadressaten müssen bei der Ausübung ihrer erwerbswirtschaftlichen Tätigkeit lediglich stärker als bisher auf die von ihren Schienenfahrzeugen ausgehenden Lärmemissionen reagieren. Wegen der relativ geringen Eingriffsintensität von Berufsausübungsbeschränkungen ist der Regelungsvorschlag angemessen und damit auch verhältnismäßig. Der Berufsfreiheit der Regelungsadressaten steht der Gesundheitsschutz der von den Lärmemissionen betroffenen Bürger gegenüber. Eine übermäßige Belastung für die Regelungsadressaten ist nicht zu erkennen.

Der Regelungsvorschlag wahrt somit den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit. Der Eingriff in die Berufsfreiheit durch § 21 Abs. 6 EBO ist verfassungsrechtlich gerechtfertigt.

3. Vereinbarkeit des § 21 Abs. 6 EBO mit der Eigentumsfreiheit

Es bestehen zudem keine verfassungsrechtlichen Bedenken bezüglich der Vereinbarkeit des Regelungsvorschlages mit der Eigentumsfreiheit aus Art. 14 Abs. 1 S. 1 GG. Die Abgrenzungformel zwischen der oft miteinander verzahnten Berufs- und Eigentumsfreiheit ist seit langem geklärt: Die Berufsfreiheit aus Art. 12 Abs. 1 GG schützt den Erwerb, die Eigentumsfreiheit aus Art. 14 Abs. 1 GG schützt das Erworben. (BVerfGE 31, 8 (32); BVerfGE 65, 237 (248); BVerfGE 77, 84 (117)).

Für die Verfassungsmäßigkeit des Regelungsvorschlages erübrigt sich eine detaillierte Prüfung der Eigentumsfreiheit. Denn durch die aufgrund des Regelungsvorschlages erforderlichen Maßnahmen wird weniger das bestehende Eigentum an den Schienenfahrzeugen, sondern vielmehr auf künftige Umsatz und Gewinnchancen Einfluss genommen. Der Schutz der

Eigentumsfreiheit aus Art. 14 Abs. 1 GG reicht daher jedenfalls nicht weiter als der Schutz der Berufsfreiheit aus Art. 12 Abs. 1 GG.

10.3.3.3.3 Ergebnis der Rechtmäßigkeitsprüfung

Die vorgeschlagene Regelung des § 21 Abs. 6 EBO verstößt somit nicht gegen höherrangiges Recht. Für ihre Wirksamkeit muss die Vorschrift lediglich in einem ordnungsgemäßen Verfahren erlassen werden (hierzu bereits oben, unter 9.3.3.3.1).

10.3.3.4 Das Eisenbahnbundesamt als zuständige Behörde

Der Regelungsvorschlag (Kapitel 10.3.2) ist rechtmäßig (Kapitel 10.3.3.3). Damit die Regelung in der Praxis auch um- und durchgesetzt werden kann, muss eine zuständige Behörde benannt (Kapitel 9.3.3.4.1) und dieser eine entsprechende Ermächtigungsnorm in die Hand gegeben werden (Kapitel 9.3.3.4.2).

10.3.3.4.1 Behördenzuständigkeit

In In § 2 Abs. 4 Nr. 1 EBO ist geregelt, dass das Eisenbahn-Bundesamt für Anweisungen zur ordnungsgemäßen Erstellung und Unterhaltung der Bahnanlagen und Fahrzeuge sowie zur Durchführung des sicheren Betriebs für die Eisenbahnen des Bundes und für Eisenbahnverkehrsunternehmen mit Sitz im Ausland zuständig ist. Für die nichtbundeseigenen Eisenbahnen ist wiederum die Landesbehörde zuständig, § 2 Abs. 4 Nr. 2 EBO.

Für den Regelungsentwurf des § 21 Abs. 6 EBO bedeutet die Zuständigkeitsverteilung des § 2 Abs. 4 EBO das Folgende: Überschreitet ein Schienenfahrzeug des Bundes oder eines Eisenbahnverkehrsunternehmens mit Sitz im Ausland den einschlägigen Grenzwert nach Maßgabe des Regelungsvorschlages, ist das Eisenbahn-Bundesamt die zuständige Behörde. Für alle weiteren Fahrzeuge sind die in den Ländern zuständigen Behörden verantwortlich. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass elf der sechzehn Bundesländer ihre Zuständigkeit nach § 2 Abs. 4 EBO auf den Bund übertragen haben. (EBA, 2020).

Für die anderen Bundesländer ist dann die jeweilige Landeseisenbahnaufsicht (LEA) zuständig.

10.3.3.4.2 Ermächtigungsgrundlage

Soll das Eisenbahn-Bundesamt beziehungsweise die Landeseisenbahnaufsicht zur Durchsetzung des Regelungsvorschlages tätig werden, ist eine Ermächtigungsgrundlage notwendig. Insofern kommt die allgemeine Gefahrenabwehrklausel aus § 5a Abs. 1 S. 1 i.V.m. S. 2 Nr. 1 u. Abs. 2 AEG in Betracht.

Danach haben die Eisenbahnaufsichtsbehörden insbesondere die Aufgabe, Gefahren abzuwehren, die beim Betrieb der Eisenbahn entstehen, § 5a Abs. 1 S. 2 Nr. 1 AEG. Eine generalklauselartige Ermächtigung für aufsichtsrechtliche Maßnahmen gegenüber dem Regelungsadressaten stellt § 5a Abs. 2 AEG dar. Das eisenbahnspezifische Sicherheitsrecht erscheint daher als geeignet, auch die Vermeidung von Lärm zu regeln und entsprechende Eingriffsbefugnisse der Aufsichtsbehörden bereitzustellen. Denn gesundheitsschädlicher Lärm ist eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit, sodass eine entsprechende Interpretation zumindest möglich erscheint.

Entscheidend für eine Anwendung der allgemeinen Gefahrenabwehrklausel zur Durchsetzung des Regelungsvorschlages durch das Eisenbahnbundesamt ist, dass Lärm eine Gefahr im Sinne dieser Norm ist. Die Frage, ob die allgemeine Gefahrenabwehrklausel eine taugliche Grundlage für ein Einschreiten der Aufsichtsbehörden darstellt, ist in der Rechtsprechung erst in der jüngeren Vergangenheit eindeutig beantwortet worden. Das VG Düsseldorf schreibt dazu in einem Urteil vom 8. Januar 2020:

„Gegen eine Befugnis, in einem solchen Fall einzuschreiten, kann nicht mit Erfolg eingewandt werden, dass § 5a AEG lediglich Maßnahmen zur Bekämpfung eisenbahnspezifischer Gefahren ermöglicht, zu denen Lärmgefahren nicht gehörten (...). Der Gesetzgeber wollte mit § 5a AEG eine allgemeine Befugnisnorm der Eisenbahnaufsichtsbehörden schaffen ... Anweisungen der Eisenbahnaufsicht können also grundsätzlich sämtliche negativen Abweichungen vom gesetzlichen Sollzustand zum Gegenstand haben (...). Die Rechtslage hat sich nach der zitierten Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts insofern geändert, als nunmehr aus § 5a AEG eine hinreichend bestimmte Ermächtigungsgrundlage entnommen werden kann. Diese verweist zwar lediglich auf die in § 5 Abs. 1 AEG genannten Vorschriften. Dort wird auf die Regelungen des AEG und der darauf beruhenden Rechtsverordnungen sowie das Recht der Europäischen Union, soweit es Gegenstände des Gesetzes oder der Verordnung EG NR. 1371/2007 betrifft, sowie auf zwischenstaatliche Vereinbarungen Bezug genommen, soweit sie Gegenstände dieses Gesetzes betreffen. Gleichwohl dürfte eine Interpretation des § 5a AEG weiter möglich sein, die auch die Einhaltung gesetzlicher Lärmschutzvorgaben ermöglicht.“
 VG Düsseldorf, Urt. v. 08.01.2020 – 16 K 5474/18, juris, Rn. 19 f.

In seinem Beschluss vom 28.05.2013 hatte das OVG Nordrhein-Westfalen noch offen gelassen, ob § 5a AEG als Ermächtigungsgrundlage für Lärmschutzansprüche herangezogen werden kann (OVG Nordrhein-Westfalen, Beschl. v. 28.05.2013 – 16 A 434/11 – juris, Rn 19). Das OVG Rheinland-Pfalz hatte demgegenüber recht klar festgestellt:

„Zu den ‚eisenbahnspezifischen‘ Gefahren i.S.v. § 5a Abs. 1 und 2 AEG können auch die durch den Betrieb der Eisenbahn ausgelösten Lärmbeeinträchtigungen gehören.“ (OVG Rheinland-Pfalz, Beschl. v. 23.12.2014 – 8 B 11123/14 – juris, Rn. 11.)

Letztlich kommt es auf den Auslegungstreit mit Blick auf die heutige Rechtslage aber nicht entscheidend an. Spätestens dann, wenn der Gesetzgeber dem vorliegenden Regelungsvorschlag folgen und § 26 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 AEG entsprechend um eine Regelung zum Schutz vor Schienenverkehrslärm infolge von Flachstellen erweitern sollte, wird dadurch auch der Gefahren- und Sicherheitsbegriff des AEG und der EBO entsprechend erweitert. Diese Erweiterung ist insbesondere deshalb zulässig, weil es insoweit keinen „gefestigten“ Gefahrenbegriff des § 5a AEG gibt, der Lärm als Gefahr für die Gesundheit strikt ausschließen würde.

Sollte der Regelungsvorschlag „Gesetz werden“ könnte sich das Eisenbahnbundesamt zur Durchsetzung dieser Regelungen auf §§ 5a Abs. 1 S. 1 i.V.m. S. 2 Nr. 1 u. Abs. 2 AEG als gesetzliche Ermächtigungsgrundlage berufen.

10.3.3.5 Erforderlichkeit der Notifizierung bei der Kommission

Gemäß Art. 1 der Entscheidung Nr. 357/2009/EG muss ein Mitgliedsstaat, der beabsichtigt, auf den Gebieten des Eisenbahn-, des Straßen- oder des Binnenschiffverkehrs Rechts- oder Verwaltungsvorschriften zu erlassen, welche geeignet sind, die Verwirklichung der gemeinsamen Verkehrspolitik wesentlich zu berühren, dies der Kommission rechtzeitig schriftlich mitteilen und gleichzeitig die übrigen Mitgliedsstaaten hiervon unterrichten (Europäisches Parlament und Rat, 2009) (Deutscher Bundestag, 2016).

Auch wenn unklar ist, ob der Regelungsvorschlag tatsächlich geeignet ist, die Verwirklichung der gemeinsamen Verkehrspolitik wesentlich zu berühren, ist von einer positiven Reaktion der Kommission auszugehen. Im Europäischen Recht existieren zwar kaum verbindliche und zusammenhängende Regelungen zum Schutz vor Lärmemissionen im Schienenverkehr. Jedoch

macht die Union an vielen Stellen deutlich, dass der Lärmschutz zur Verwirklichung des Gesundheitsschutzes eine maßgebliche Rolle spielt. Zur Untermauerung ist auf die Ausführungen zur Umgebungslärm-RL sowie zu den lärmabhängigen Wegeentgelten (dazu bereits oben, unter 9.3.3.3.2 b) 1.) zu verweisen.

10.3.4 Ergebnis

Mit § 21 EBO kennt bereits das heute geltende Recht eine Norm, die geeignet ist, eine Regelung zur Begrenzung der von Flachstellen ausgehenden Lärmemissionen im Schienenverkehr ohne Weiteres aufzunehmen. Der hier vorgeschlagene neue Absatz 6 übernimmt die Regelungstechnik, die bereits den Absätzen 1 bis 5 des § 21 EBO zugrunde liegt: Die jeweilige Vorgabe wird als zwingend einzuhaltende technische Anforderung formuliert. Hierdurch gelingt es nicht nur, die Regelungstechnik des § 21 EBO auch für die Zukunft einheitlich auszugestalten. Diese Regelungstechnik vermeidet zugleich auch Verwaltungsaufwand. Müssten die Fahrzeuge etwa in einem bestimmten zeitlichen Turnus einer Überwachungsstelle vorgeführt werden, wäre das mit deutlich größerem Aufwand verbunden. Mit dem jetzt vorliegenden Regelungsentwurf

„Die Räder und Radsätze der Fahrzeuge müssen so beschaffen sein, dass das Vorbeifahrgeräusch die in Nr. 4.2.3. des Anhangs der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 festgelegten Grenzwerte in der jeweils geltenden Fassung nicht infolge von Flachstellen um 2 dB (A) oder mehr überschreitet. Die Messung der Verkehrsgeräusche infolge von Flachstellen erfolgt durch das in Anlage 6a beschriebene akustische Messverfahren.“
§ 21 Abs. 6 EBO im Entwurf

ist es den Wagenhaltern bzw. den Eisenbahnverkehrsunternehmen selbst überlassen, wie sie für die Einhaltung der Vorgabe sorgen wollen. Sie dürfen nur nicht gegen sie verstoßen.

Durch die Erweiterung der gesetzlichen Ermächtigungsgrundlage in § 26 AEG zum Erlass der EBO – hier namentlich zur Aufnahme der „Flachstellen-Regelung“ in § 21 EBO – wird zugleich die „bestehende Restunsicherheit“, ob die allgemeine Ermächtigungsgrundlage des § 5a AEG auch zur Abwehr von gesundheitlichen Gefahren dienen kann, die vom Schienenverkehrslärm ausgehen, beseitigt. Ermächtigt der parlamentarische Gesetzgeber die Verwaltung zum Erlass einer Rechtsverordnung, die zum Schutz der Gesundheit vor Schienenverkehrslärm auch eine Regelung zur Begrenzung der Wirkungen von Flachstellen enthält, steht zugleich fest, dass das EBA insoweit auf der Grundlage der Generalklausel des § 5a AEG auch zum Schutz der Gesundheit von Anwohnern tätig werden kann.

10.4 Vorschläge für eine Förderungssystem

Im Folgenden sollen mögliche Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen im Schienenverkehr erarbeitet werden. Um den Prozentsatz der Flachstellen im deutschen Schienenverkehr zu reduzieren, sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze denkbar.

Der erste Ansatz geht über eine Strafzahlung bei Vorhandensein von Flachstellen n. Hier kann als Beispiel die Vorgehensweise der Strafzahlungen für Autohersteller bei Überschreiten des CO₂-Flottenwerts an die EU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020) genannt werden.

Der zweite Ansatz besteht hingegen in einer Anreizgestaltung durch Belohnung. Dies würde bedeuten, dass eine möglichst geringe Anzahl an Flachstellen einen finanziellen Anreiz für die Betreiber / Halter darstellen kann. Für beide Ansätze stellt sich die Frage, ob der Fahrzeughalter oder Fahrzeugbetreiber die finanzielle Buße bzw. Belohnung erhalten soll bzw. welche vor- und Nachteile bei der Verteilung entstehen würden.

10.4.1 Mögliche Verteilung der finanziellen Buße / Belohnung

Zunächst soll diskutiert werden, ob Wagenhalter oder Betreiber bei Buße oder Belohnung adressiert wird. Hier soll als Gedankenexperiment Mieter und Vermieter einer Wohnung dienen. Bei üblichen Abnutzungen ist hier der Vermieter heranzuziehen, bei Schäden, die durch einen nachteiligen Gebrauch entstanden, hingegen der Mieter. Setzt man dies für die Verursachung von Flachstellen an, ist hier schwerlich eine Unterscheidung zu treffen. So entstehen Flachstellen durchaus bei unsachgemäßen Bremsvorgängen. Insbesondere kann es häufiger im Herbst und Winter zu den Witterungsbedingungen nicht angepassten Bremsvorgängen, und somit zur Entstehung von Flachstellen kommen. Hier eine prozentuale Abschätzung zu treffen, ist nahezu nicht möglich. Da letztendlich der Wagenhalter für die Instandhaltung der Fahrzeuge verantwortlich ist, wird deshalb vorgeschlagen, die letztliche finanzielle Adressierung auf die Fahrzeughalter auszurichten. Denkbar wäre jedoch auch, eine Kontrollverpflichtung hinsichtlich akustisch auffälliger Flachstellen bei Fahrzeugübernahme durch die Eisenbahnverkehrsunternehmen einzuführen, um so die Verantwortung nicht allein beim Wagenhalter anzusiedeln.

Der erste Ansatz mit Strafzahlung bei Vorhandensein einer Flachstelle wäre hierbei relativ einfach umsetzbar. Für ein Belohnungssystem, müsste jedoch der Prozentsatz an Flachstellen für die Gesamtheit an Fahrzeugen eines Fahrzeughalters bekannt und kontinuierlich überprüft werden. Hierfür wäre eine unabhängige Einrichtung notwendig. Diese würde basierend auf den an den Monitoring-Stationen detektierten Flachstellen beispielsweise quartalsweise die einzelnen Fahrzeughalter bzgl. ihres Prozentsatzes an Fahrzeugen mit Flachstellen einstufen. Gemäß dieses Prozentsatzes können im Folgenden Sonderzahlungen an die Wagenhalter ausgeschüttet werden. Ähnlich wie in der Förderrichtlinie Lärmsanierung unter 2.2 beschrieben (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018), vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unter Beteiligung der Eisenbahninfrastrukturunternehmen des Bundes (EIU) für lärmsanierungsbedürftige Streckenabschnitte gereiht nach dem Grad der Sanierungsbedürftigkeit aufgelistet werden, könnte auch für Wagenhalter ein Grad der Flachstellenbelastung aufgenommen werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Betrachtung von Lärmkilometern, die ein Fahrzeug mit Flachstelle verursacht. In einem vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) ausgearbeiteten Papier zu Ökofaktoren der Schweiz von 2013 (Frischknecht und Büsser Knöpfel, 2013) wird ein Ökofaktor für Lärm eingeführt, um damit durch Lärm stark gestörte Personen beispielsweise in Bezug auf

Eisenbahnlärm auszuweisen. Die Berechnung des Lärmökofaktors erfolgt durch Anwendung des Ökofaktors pro stark gestörte Person pro zurückgelegte Distanz. Wird dies auf die Situation mit Flachstellen umgesetzt, so wäre die Betrachtung der Laufleistung eines Wagens mit Flachstelle ebenfalls wesentlich.

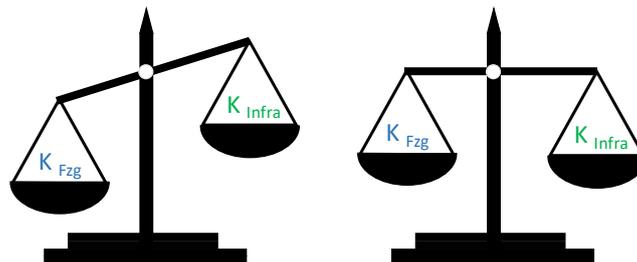
10.4.2 Mögliche Finanzierungen des Anreizsystems

Finanzierung über geringere Beanspruchung der Infrastruktur

Wird der in Kapitel 0 vorgestellte Ansatz zur Ermittlung der Kostenersparnis betrachtet, sind Szenarien denkbar, bei welchen durch eine geringere Anzahl an Überfahrten mit Flachstellen die Infrastruktur geschont wird und es zu einer Reduzierung der sonst nötigen Instandhaltungsmaßnahmen aufgrund von Flachstellen kommen kann. Da die befragten Infrastrukturunternehmen jedoch über keine Daten zu Instandhaltungskosten verursacht durch Überfahrten mit Flachstellen verfügen und auch kein Schädigungsmodell zur Beanspruchung der Infrastruktur durch Überfahrten mit Flachstellen existiert, wäre hier zunächst grundlegende Forschungsarbeit notwendig.

Sollte sich hierbei erweisen, dass der Einfluss wie in Abbildung 65 links dargestellt, zunächst im Ungleichgewicht ist, könnten die reduzierten Kosten für die Instandhaltung der Infrastruktur in die eventuell aufwändigere sofortige Instandhaltung von Flachstellen am Fahrzeug, um so ein Gleichgewicht herzustellen (rechts)

Abbildung 65: Gleichgewicht der Kostenverteilung Infrastruktur und Fahrzeug



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Finanzierung über #Leise Schiene

Entscheidend wäre jedoch die Förderung einer Reduzierung von Flachstellen basierend auf dem Ziel des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur die Zahl der vom Lärm Betroffenen bis 2030 zu halbieren. Vergleichbar zu der Maßnahme der Umrüstung auf lärmgeminderte Bremsen, die vom BMVI bis 2021 mit 152 Mio.€ gefördert wird, ist eine Förderung von einem möglichst hohen Flottenanteil ohne Flachstellen denkbar.

Bei der Umrüstung auf lärmgeminderte Bremsen wurde beispielsweise ebenfalls ein Bonusprogramm für Wagenhalter, die auf lärmmindernde Technik umrüsten, eingeführt. Hierfür wurden 152 Mio € vom Bund im Rahmen der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel bereitgestellt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013). Mit dieser Förderung wurde ein wesentlicher Anreiz für die Wagenhalter geboten, um bis zum Ablauf der Förderungsperiode auf die lärmmindernde Technik umzurüsten.

10.5 Zusammenfassung wichtiger Daten und Fakten zur rechtlichen Bewertung und Vorschlägen für ein Fördersystem

Für eine Berücksichtigung der akustischen Auffälligkeiten von Vorbeifahrten mit Flachstellen im rechtlichen Rahmen wurden zunächst zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt.

Im **ersten Ansatz** wurde die Lästigkeit akustisch auffälliger Flachstellen anhand eines Pegelzuschlags quantifiziert. Hierfür wurde eine Hörversuchsreihe durchgeführt, bei welcher Versuchspersonen die Lästigkeit einer Vorbeifahrt mit Flachstelle durch eine Pegelanpassung einer Vorbeifahrt ohne Flachstelle einstellen konnten. Wurden die jeweiligen Maximalpegel der Vorbeifahrten mit und ohne Flachstelle als Differenz ΔL_{Amax} dargestellt, resultierte ein Zusammenhang zum notwendigen **Pegelzuschlag von 25 % von ΔL_{Amax}** . Auf diese Weise könnten Vorbeifahrten mit Flachstellen mit einem entsprechenden Zuschlag auf den Mittelungspegel L_{eqTp} beaufschlagt werden. Der korrigierte Wert $L_{eqTp, kor}$ wäre im Folgenden mit den geltenden Grenzwerten, beispielsweise mit den für die Inbetriebnahme und die Umrüstung von Wagen geltenden Werten der TSI Noise, vergleichbar.

Der **zweite Ansatz** soll Flachstellen anhand eines **Grenzwerts** bewerten. Hierfür wurden die in Kapitel 7.3.1.1 im Hörversuch bezüglich ihrer Akzeptanz beurteilten Signale weiterführend analysiert. Zunächst wurde für diese Signale der durch die Flachstelle verursachte maximale A-bewertete Pegel ausgewertet. Diese Werte wurden über der von den Versuchspersonen bewerteten Akzeptanz aufgetragen. Eine angenäherte Gerade für den Zusammenhang dieser beiden Größen führt für die hier untersuchten Vorbeifahrten bei einer Akzeptanzgrenze von

- ▶ 50 % zu einem maximal zulässigen A-bewerteten Pegel von 85 dB(A),
- ▶ 30 % zu einem maximal zulässigen A-bewerteten Pegel von 86,5 dB(A).

Um einen Bezug zu den Werten der TSI Noise (in der für neue und umgerüstete Wagen höchstzulässige Mittelungspegel festgelegt sind) herzustellen, wurde der oben resultierende Maximalpegel-Grenzwert über eine Absenkung von 1,5 dB in einen Mittelungspegel-Grenzwert überführt. Somit wäre für eine Akzeptanzgrenze für akustisch auffällige Flachstellen von

- ▶ 50 % ein Mittelungspegel von 83,5 dB(A) bzw.
- ▶ 30 % ein Mittelungspegel von 85 dB(A) einzuhalten.

Auf Basis dieses Beispiels wurde im Folgenden eine rechtliche Bewertung der Umsetzung eines akustischen Flachstellenkriteriums von den W2K-Rechtsanwälten erarbeitet. Hierfür wurde zunächst ein Vorschlag zur Änderung der aktuellen Rechtslage im Rahmen des Verfassungsrechts und des Unionrechts unterbreitet. Insgesamt resultiert, dass sich die vorgeschlagenen Änderungen sehr gut in die neuere Rechtsentwicklung einfügen: so wendet sich von einem primär auf die Verhinderung von Unfällen ausgerichteten Gefahrenabwehrrecht der Blick hin zu einem umfassenderen Gefahrenabwehrrecht in Bezug auf Schienenverkehrslärm.

Des Weiteren wurden verschiedene Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen diskutiert. Hierbei wurden die Möglichkeiten einer Strafzahlung bei Vorhandensein einer Flachstelle oder ein Anreizsystem durch Belohnung betrachtet.

11 Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ – Umsetzung und Handreichung

Im nun folgenden Abschnitt sollen zusammenfassend die einzelnen erarbeiteten Bereiche dieses Forschungsvorhabens in einen Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ einfließen. Hierbei wird zur möglichen Vertiefung jeweils auf die einzelnen Kapitel dieses Berichts Bezug genommen.

Der aus dieser Arbeit resultierende Vorschlag beruht auf einem dreistufigen Konzept. Abbildung 66 skizziert den generellen Ablauf für das „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ schematisch.

In einer **ersten Stufe** (Abbildung 66 oben) steht hierbei die **Detektion akustisch auffälliger Flachstellen** bei Vorbeifahrt im laufenden Betrieb. Für das hier vorgeschlagene Detektionsverfahren ist eine Messung an der Messstrecke mit Erfassung des Luftschalldruckpegels im Abstand von 7,5 m und des Beschleunigungspegels an der Schiene nötig. Die Details zu Spezifikation und einer möglichen Automatisierung der Messung sind in Kapitel 8 erläutert. Das Verfahren zur Detektion von Flachstellen beruht schließlich auf einer logischen Verknüpfung dieser Maxima dieser Schalldruck- und Beschleunigungspegel. Die Details zum Detektionsverfahren sind in Kapitel 7.2 zusammengefasst. Darauf basierend wird also bei einer Vorbeifahrt entschieden, ob grundsätzlich eine Flachstelle vorliegt. Bei einer gleichzeitigen Erfassung von Wagen- bzw. Achsposition könnte so zukünftig eine wagen- oder achsgenaue Detektion erfolgen. Der dargestellte Vorschlag beruht auf der hier zugrunde liegenden Datenmenge. Bei einer größeren Datenmenge können Anpassungen hinsichtlich des Detektionsalgorithmus erforderlich werden. Hierfür ist eine Automatisierung des Detektionsalgorithmus wie in Kapitel 8 beschrieben umzusetzen. Die Trefferquote der automatisierten Umsetzung sollte im Folgenden mit einer größeren Datenmenge überprüft werden.

Wird also in Stufe 1 eine Flachstelle detektiert, kann in einer **zweiten Stufe** (Abbildung 66 mittig) eine **Bewertung** erfolgen, ob die Flachstelle als akustisch auffällig einzustufen ist. Hierfür wurde in Kapitel 10.2 des Forschungsvorhabens ein Grenzwert für den Maximalpegel der Flachstelle vorgeschlagen, ab welchem dieser als kritisch zu bewerten ist. Da das Verfahren zur Detektion an die Abnahmemessung von neuen und umgerüsteten Fahrzeugen nach TSI Noise angelehnt werden soll, wurde der Grenzwert für akustisch auffällige Flachstellen zudem als Mittelungspegel der Wagenvorbeifahrt auf einem den Prüfbedingungen der TSI Noise entsprechenden Gleis beschrieben.

Die Bewertung, ob eine Flachstelle als kritisch einzuordnen ist, erfolgt über die Höhe eines Grenzwerts für akustisch relevante Flachstellen. Die Festlegung dieses Grenzwerts erfolgte in der vorliegenden Arbeit abhängig von dem Prozentsatz der Akzeptanz der akustisch auffälligen Flachstellen bei Probanden. Je nach der Höhe dieser Akzeptanz, kann der Grenzwert für akustisch auffällige Flachstellen unterschiedlich hoch gewählt werden. So resultiert für eine Akzeptanzgrenze von 50 % ein maximal zulässiger A-bewerteter Pegel von 85 dB(A) bzw. für eine Akzeptanzgrenze von 30 % ein maximal zulässiger A-bewerteter Pegel von 86,5 dB(A). Als Mittelungspegel formuliert, bedeutet dies für die 50 %-Akzeptanzgrenze ein einzuhaltender Wert von 83,5 dB(A), bzw. für die 30 %-Akzeptanzgrenze ein einzuhaltender Wert von 85 dB(A) für akustisch auffällige Flachstellen.

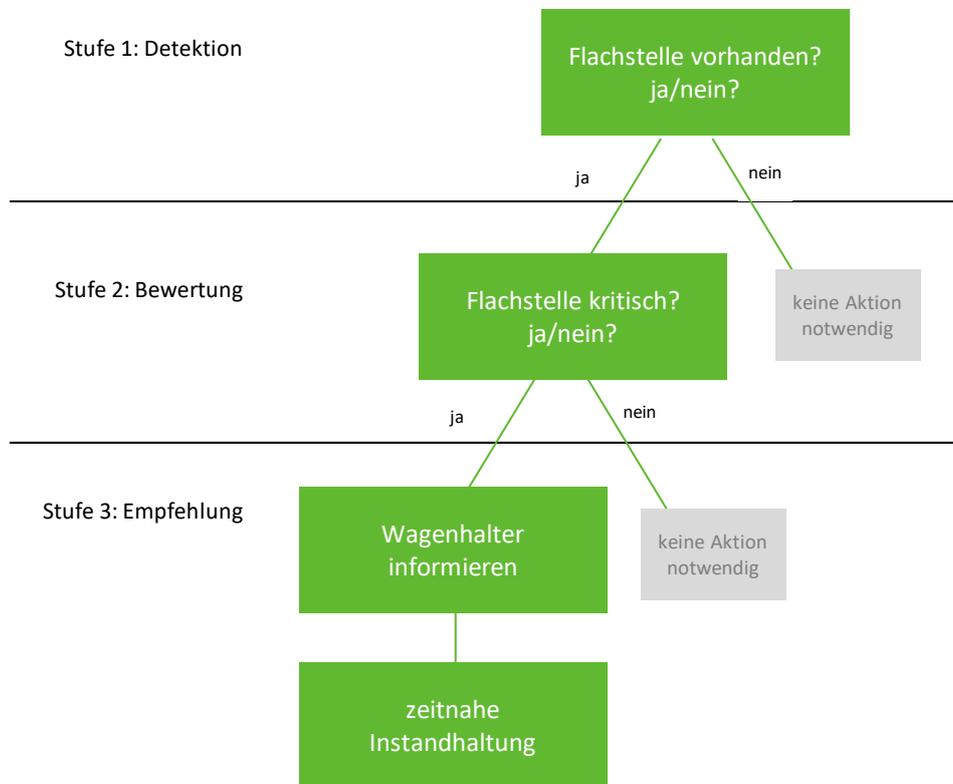
Die tatsächliche Festlegung des Grenzwerts ist somit eine Entscheidung darüber, welcher Prozentsatz an akustisch inakzeptablen Flachstellen als zulässig erachtet wird. Diese

Entscheidung sollte nach Ansicht der Forschungsnehmer auf der politischen Ebene getroffen werden.

Bei Überschreiten des Grenzwerts, findet sich dann in der **dritten Stufe** (Abbildung 66 unten) die **Empfehlung** zur notwendigen Vorgehensweise hinsichtlich der **Instandhaltung**. Die Möglichkeiten einer diesbezüglichen betrieblichen Umsetzbarkeit wurden in 9.4 des Berichts skizziert. Hierbei wäre das vorgestellte Szenario „Monitoring an der Infrastruktur“ sofort umsetzbar.

Abbildung 66 skizziert den vorgeschlagenen dreistufigen Ablauf des „Akustischen Instandhaltungskriteriums für Flachstellen“ mit den jeweiligen Entscheidungsprozessen.

Abbildung 66: Vorschlag für ein „Akustischen Instandhaltungskriterium für Flachstellen“



Quelle: eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

12 Quellenverzeichnis

16. BIMSCHV, 1990. *Verkehrslärmschutzverordnung Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*.

ACRAMOS, 2021. *acramos® Funktionen* [online]. 23. November 2021 [Zugriff am: 23. November 2021]. Verfügbar unter: <http://acramos.at/funktionen.php>

ACROMOS®, 2015. Das Messsystem acramos Produktinformation [Zugriff am: 6. Juni 2019]. Verfügbar unter: <http://www.psia.at/files/acramos.pdf>

ALLIANZ PRO SCHIENE, 2020. *Digitale Automatische Kupplung - Güterverkehr mit Zukunft* [online] [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/digitale-automatische-kupplung/>

ARGOS®. *Wayside train monitoring, Weigh in motion (WIM), Wheel Impact load detection (WILD), out-of-roundness(OOR), running behavior measurement (RBM)* [online] [Zugriff am: 13. Mai 2019]. Verfügbar unter: www.argos-systems.eu;

ARNOCZKY, P.M., 1994. Flachstellenortung Qua Vadis? [online]. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, **22**(3-4), 129-152. ISSN 1587-3811. Verfügbar unter: <https://pp.bme.hu/tr/article/view/6628>

AVV, 1. Januar 2019. *Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen* [online] [Zugriff am: 6. Juni 2019]. Verfügbar unter: <https://gcubureau.org/contract2019>

BMVI, 2020. *Die Schiene wird leiser! Ziel des BMVI bis 2030: Um die Hälfte weniger Lärmbetroffene!* [online]. 14. Dezember 2020 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/virtuelle-pk-leise-schiene.html>

BRIZUELA, J., A. IBAÑEZ, P. NEVADO und C. FRITSCH, 2010. Railway wheels flat detector using Doppler effect [online]. *Physics Procedia*, **3**(1), 811-817. ISSN 1875-3892. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.phpro.2010.01.104

BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2018. Forschungsprojekt "Flachstellenerkennung mit Telematik" [online] [Zugriff am: 19. November 2021]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46109&Load=true>

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT, 2020. *Das System der CO2-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge* [online].

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2013. *Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zur Förderung von Maßnahmen der Lärminderung an Bestandsgüterwagen im Rahmen der Einführung eines lärmabhängigen Trassenpreissystems auf Schienenwegen der Eisenbahninfrastrukturunternehmen des Bundes (Förderrichtlinie laTPS vom 17.10.2013)*.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2018. *Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes*.

CALLIESS und M. RUFFERT, 2016. *EUV/AEUV. Das Verfassungsrecht der Europäischen Union mit Europäischer Grundrechtecharta : Kommentar*. 5. Auflage. München: C.H. Beck. ISBN 978-3-406-68602-3.

DERNBACH, G., A. LYKARTSIS, L. SIEVERS und S. WEINZIERL, 2020. *Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques* [online] [Zugriff am: 19. November 2021]. Verfügbar unter: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/11102/4/dernbach_etal_2020.pdf

DEUTSCHER BUNDESTAG, 2016. *Lärmschutz gegen Güterwagen auf der Schiene Vereinbarkeit von Betriebsbeschränkungen mit dem Unionsrecht* [online]. PE 6 - 3000 - 152/16 [Zugriff am: 5. Oktober 2021]. Verfügbar unter: Aufrufbar unter:

<https://www.bundestag.de/resource/blob/490516/ebf87ea0ea9cb0da390c9c2adcb1ddfe/PE-6-152-16-pdf-data.pdf>

DIN 38452-1:2020-03 - ENTWURF, 2020. Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen_ - Teil_1: Emissionen; Text Deutsch und Englisch.

DIN CEN/TR 16891:2017-03, 2017. Bahnanwendungen - Akustik - Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen; Deutsche Fassung CEN/TR 16891:2016.

DIN EN 15313:2016-09, 2016. Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzinstandhaltung; Deutsche Fassung EN 15313:2016.

EBA, 2020. *Landeseisenbahnaufsicht* [online]. Verfügbar unter:

https://www.eba.bund.de/DE/DasEBA/LEA/lea_node.html;jsessionid=8AD596DFFC8945BC8E9026516AF8B26B.live21301#doc1528532bodyText1

EISENBAHN-BUNDESAMT, 2021. Die Umsetzung des Schienenlärmschutzgesetzes [online] [Zugriff am: 12. Oktober 2021]. Verfügbar unter:

https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Vortraege/FET_2020/2020-09_29_Die_Umsetzung_des_Schienenlaermschutzgesetzes.pdf?__blob=publicationFile&v=1

EISENBRAND, E., 2011. Hot box detection in European railway networks [online]. *Railway Technical Review Special DVV Media Group GmbH*, 16-25 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter:

<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/409081/?clearlastClickedFisEntries=true>

EPPING, V., C. HILLGRUBER und P. AXER, Hg., 2020. *Grundgesetz. Kommentar*. 3. Aufl. München: Beck.

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2014. *Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU* [online]. Verfügbar unter: Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014R1304>

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2002. *Richtlinie 2002/49/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm* [online]. Verfügbar unter: Aufrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32002L0049>

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2009. *Entscheidung Nr. 357/2009/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. April 2009 über ein Verfahren zur vorherigen Prüfung und Beratung künftiger Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten auf dem Gebiet des Verkehrs* [online]. Verfügbar unter: Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32009D0357>

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2012. *Richtlinie 2012/34/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. November 2012 zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraumes* [online]. Verfügbar unter: Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32012L0034>

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2016. *Richtlinie (EU) 2016/797 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union* [online]. Verfügbar unter: Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32016L0797>

FRISCHKNECHT, R. und S. BÜSSER KNÖPFEL, 2013. *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit* [online]. *Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*.

GEIGER, R., D.-E. KHAN und M. KOTZUR, 2017. *EUV, AEUV. Vertrag über die Europäische Union, Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union : Kommentar*. 6., überarbeitete Auflage. München: C.H. Beck. ISBN 9783406674808.

HAGENLOCHER, S., P. PROF. DR. WITTENBRINK, C. LEUCHTMANN, B. GALONSKE, T. DR. KEHRMANN, M. PROF. DR.-ING. HECHT, M. LEISTE, S. DISCHER, R. PROF. DR.-ING KÖNIG, T. POLLEHN, M. RUF, S. PROF. DR.-ING WITTE,

- S. DR. GEHRKE, R. HESS, K. RÖCKEMANN und A. STEINMETZ, 2020. „Erstellung eines Konzeptes für die EU-weite Migration eines Digitalen Automatischen Kupplungssystems (DAK) für den Schienengüterverkehr“ [online]. 29. Juni 2020 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/schlussbericht-dak-studie.html>
- HERMES, G., D. SELLNER und M. FEHLING, Hg., 2014. *Beck'scher AEG-Kommentar. Allgemeines Eisenbahngesetz*. 2. Aufl. München: Beck. ISBN 9783406639975.
- INNOTEC SYSTEMS GMBH, 2021a. *LASCA - INNOTec Systems GmbH - INNOTec Systems GmbH* [online]. 23. November 2021 [Zugriff am: 23. November 2021]. Verfügbar unter: <http://www.innotec-systems.de/index.php/produkte/lasca.html#vorteile>
- INNOTEC SYSTEMS GMBH, 2021b. *Moni - INNOTec Systems GmbH - INNOTec Systems GmbH* [online]. 23. November 2021 [Zugriff am: 23. November 2021]. Verfügbar unter: <http://www.innotec-systems.de/index.php/moni.html#datenlieferung>
- ISERT, N., S. LUTZENBERGER, H. BRAMMER, C. JÖCKLE und M. SERBEST, 2021. *Lärm-Monitoring Jahresbericht 2020* [online] [Zugriff am: 14. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.laerm-monitoring.de/pdf/L%C3%A4rm-Monitoring%20Jahresbericht%202020.pdf>
- JARASS, H.D. und B. PIEROTH, 2020. *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Kommentar*. 16. Auflage. München: C.H. Beck.
- JONASSON, H.G. und S. STOREHEIER, 2001. *Nord 2000. New Nordic prediction method for rail traffic noise*.
- KRAMER, U., 2013. *Die Zulässigkeit von Geschwindigkeits- und Durchfahrtbeschränkungen für laute Güterzüge im Mittleren Rheintal aus der Warte des deutschen und europäischen Rechts. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz* [online] [Zugriff am: 5. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://mulewf.rlp.de/uploads/media/Gutachten_Laerm_Mittelrheintal_Endfassung.pdf
- KRATOCHWILLE, R., 2004. *Zum Nutzen schaltbarer Schlingerdämpfer in Trassierungselementen mit veränderlicher Gleiskrümmung* [online]. Dissertation. Hannover [Zugriff am: 14. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/975163000/34>
- KÜHLING, J. und K. OTTE, 2020. *AEG. Allgemeines Eisenbahngesetz*. München: Beck C H. Grauer Kommentar. ISBN 3406713246.
- KÜHLING, J. und M. SEILER, 2016. Möglichkeiten und Grenzen von Betriebsbeschränkungen als Mittel der Lärmreduktion [online]. *Deutsches Verwaltungsblatt*, **131**(3). ISSN 0012-1363. Verfügbar unter: doi:10.1515/dvbl-2016-0305
- LUDWIGS, M. und M.A. DAUSES, Hg., 2021. *Handbuch des EU-Wirtschaftsrechts* [online]. Stand: Februar 2021 (52. Ergänzungslieferung). München: C.H. Beck. Beck-online Bücher. ISBN 9783406441004. Verfügbar unter: https://beck-online.beck.de/?vpath=bibdata/komm/DausesHdbEUWiR_52/cont/DausesHdbEUWiR.htm
- MAICZ, D., 2021. *HBK-Argos - out of roundness* [online]. *Empowering innovation and quality in test and measurement*.
- MALY, T., M. JAKSCH und G. DINHOBL, 2016. Schallemissionen von Laufflächendefekten [online]. *Eisenbahntechnische Rundschau*. Eisenbahntechnische Rundschau [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=22972>
- MÖHLER, U., D. SCHRECKENBERG, M. MÜLLER, M. LIEPERT, V. SKOWRONEK, C. BELKE und S. BENZ, 2018a. *Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht* [online] [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://umwelt.hessen.de/umwelt-natur/luft-laerm-licht/laermschutz/eisenbahnverkehrslaerm>

- MÖHLER, U., D. SCHRECKENBERG, U. MÜLLER, M. LIEPERT, V. SKOWRONEK, C. BELKE und S. BENZ, 2018b. Maximalpegelkriterien für die Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht [online]. *Lärmbekämpfung Bd. 13 Nr. 1 - Januar*. Lärmbekämpfung Bd. 13 Nr. 1 - Januar [Zugriff am: 23. November 2021]. Verfügbar unter: https://environmentalnoise.zeusgmbh.de/pdfs/Moehler_2018_Maximalpegel%20Schiene.pdf
- MÜLLER, U., E.-M. ELMENHORST, H. MAASS, V. ROLNY, S. PENNIG, J. QUEHL und M. BASNER. Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS - Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten; Teilvorhaben DLR: Metaanalyse und Feldstudie. Abschlussbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf>
- MÜLLER-BBM RAIL TECHNOLOGIES GMBH, 2021a. *Wheel Monitoring System (WMS)* [online]. 17. Februar 2021 [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.muellerbbm-rail.de/produkte/wheel-monitoring-system/>
- MÜLLER-BBM RAIL TECHNOLOGIES GMBH, 2021b. Wheel Monitoring System für Vollbahn, Straßenbahn und U-Bahn [online] [Zugriff am: 15. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.muellerbbm-rail.de/fileadmin/user_upload/rail-technologies/Broschueren/MBBM_WMS-DE-02.pdf
- POPP, C., W. BARTOLOMAEUS, F. BERKA, J. CLAUSSEN-SEGGELE, J. GERLACH, E. HEINRICHS, M. KRÜGER, D. KUPFER, J. ORTSCHIED, O. RIEK und G. RODEHACK, September 2016. *Lärmschutz in der Verkehrs- und Stadtplanung. Handbuch Vorsorge Sanierung Ausführung*. Bonn: Kirschbaum Verlag. ISBN 3781219518.
- RUFFERT, M., Hg., 2020. *Europäisches sektorales Wirtschaftsrecht*. 2. Auflage. Enzyklopädie Europarecht. Band 5. ISBN 9783848758937.
- SCHRÖBEL, A., 2011. Wayside train monitoring systems - an overview [online]. *Signal + Draht DVV Media Group GmbH*, 35-40 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/409080/>
- STATISTA, 2021. *DB AG - Kosten der ICE-Züge | Statista* [online]. 15. Oktober 2021 [Zugriff am: 15. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256324/umfrage/kosten-der-ice-zuege-der-db-ag/>
- THOMPSON, D., 2009. *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control* [online]. s.l.: Elsevier professional. ISBN 978-0-08-045147-3. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10305588>
- VANDENHOUTEN, R. und M. DEUTZER, 2005. Detektion von Flachstellen an Radreifen auf der Basis von Schallmessungen am Schienenkörper [online]. *Wissenschaftliche Beiträge 2005*, **10**, 63-69. ISSN 0949-8214. Verfügbar unter: doi:10.15771/0949-8214_2005_1_12
- VPI, 2021. *Trailer zur Digitalen Automatischen Kupplung (DAK)* [online]. 3. Mai 2021 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=Rxo648wHPXs>
- ZWICKER, E. und H. FASTL, 1999. *Psychoacoustics. Facts and Models*. Second Updated Edition. Berlin: Springer. Springer Series in Information Sciences. 22. ISBN 3-540-65063-6.

A.1 Auswahl der Signale für die Hörversuche

Tabelle 35: Übersicht aller Signale mit dem nach Müller-BBM Rail Technologies gemessenen Flachstellenindikator

Signalbezeichnung	gemessener Flachstellenindikator (Wheel Monitoring System von MBBM)	beurteilt in
W3426_200202_145241+1.h5	5	HV1
W3426_200201_203955+1.h5	5	HV1
W3426_200201_094711+1.h5	5	HV1 und HV2
W3426_200201_114859+1.h5	6	HV1
W3426_200201_063502+1.h5	6	HV1
W3426_200201_093903+1.h5	6	HV1 und HV2
W3426_200129_145637+1.h5	7	HV1
W3426_200203_180917+1.h5	7	HV1
W3426_200129_125825+1.h5	7	HV1 und HV2
W3426_200131_180628+1.h5	8	HV1
W3426_200201_133508+1.h5	8	HV1
W3426_200131_184325+1.h5	9	HV1
W3426_200130_173455+1.h5	9	HV1
W3426_200121_152213+1.h5	9	HV1 und HV2
W3426_200201_204559+1.h5	10	HV1
W3426_200129_175304+1.h5	10	HV1
W3426_200131_120938+1.h5	11	HV1
W3426_200129_143506+1.h5	11	HV1
W3426_200131_120938+1.h5	11	HV1 und HV2
W3426_200203_151849+1.h5	12	HV1
W3426_200203_113518+1.h5	12	HV1
W3426_200203_124455+1.h5	13	HV1
W3426_200131_094011+1.h5	13	HV1
W3426_200130_200357+1.h5	14	HV1
W3426_200131_071800+1.h5	14	HV1
W3426_200202_024213+1.h5	15	HV1
W3426_200201_163511+1.h5	15	HV1
W3426_200129_120916+1.h5	16	HV1
W3426_200202_193532+1.h5	16	HV1
W3426_200201_211346+1.h5	17	HV1
W3426_200131_133931+1.h5	17	HV1

Signalbezeichnung	gemessener Flachstellenindikator (Wheel Monitoring System von MBBM)	beurteilt in
W3426_200202_231939+1.h5	18	HV1
W3426_200130_220813+1.h5	19	HV1
W3426_200130_101632+1.h5	20	HV1
W3426_200202_045805+1.h5	22	HV1
W3426_200201_164000+1.h5	22	HV1
W3426_200202_045805+1.h5	22	HV1 und HV2
W3426_200202_071222+1.h5	23	HV1
W3426_200130_010040+1.h5	27	HV1
W3426_200131_153735+1.h5	28	V1
W3426_200131_024522+1.h5	30	HV1
W3426_200131_005254+1.h5	31	HV1
W3426_200119_012917+1.h5	33	HV1 und HV2
W3426_200114_051857+1.h5	36	HV1 und HV2
W3426_200131_174400+1.h5	44	HV1
W3426_200129_102847+1.h5	46	HV1
W3426_200118_111506+1.h5	46	HV1 und HV2
W3426_200114_234310+1.h5	48	HV1 und HV2
W3426_200129_004806+1.h5	56	HV1
W3426_200121_191322+1.h5	56	HV1 und HV2
W3426_200201_025504+1.h5	61	HV1
W3426_200128_110328+1.h5	61	HV1 und HV2
W3426_200130_182307+1.h5	64	HV1
W3426_200131_195007+1.h5	70	HV1
W3426_200201_050220+1.h5	71	HV1 und HV2
W3426_200129_235127+1.h5	79	HV1 und HV2
W3426_200203_184038+1.h5	121	HV1
W3426_200118_230225+1.h5	139	HV1 und HV2
W3426_200131_134614+1.h5	196	HV1

A.2 Fragebogen zu Flachstellen im Schienenverkehr für die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)

Fragebogen zu Flachstellen im Schienenverkehr

Allgemeiner Teil

1. Für welche Art von Schienenfahrzeugen ist Ihr Unternehmen als Halter im Wesentlichen verantwortlich?

Triebwagen im Güterverkehr

Triebwagen im Personenverkehr

Güterwagen

Personenwagen

Sonstige: _____

2. Welche Rolle nehmen Sie bzw. Ihr Unternehmen bei der Instandhaltung dieser Fahrzeuge ein?

die für die Instandhaltung zuständige Stelle (ECM)

Instandhaltung in eigenen Werkstätten

Sonstige: _____

3. Wie hoch ist jeweils die durchschnittliche Lebensdauer der oben genannten Fahrzeuge?

Fahrzeug	Lebensdauer
Triebwagen Güterverkehr	
Triebwagen Personenverkehr	
Güterwagen	
Personenwagen	
Sonstige:	

Flachstellenbezogene Instandhaltung

4. Welche der an den oben genannten Fahrzeugen regelmäßig durchgeführten Instandhaltungen, umfassen ein Prüfen und Beheben von Flachstellen an den Radsätzen und in welchen Intervallen (Lauf-km) werden diese durchgeführt?

Fahrzeug	Prüfung von Flachstellen / Intervalle (Lauf-km)
Triebwagen Güterverkehr	
Triebwagen Personenverkehr	
Güterwagen	
Personenwagen	
Sonstige:	

5. Durch welche konkreten Instandhaltungsmaßnahmen werden Flachstellen behoben?

6. Inwiefern werden die Radsätze auch außerhalb von den in Frage 5 genannten Instandhaltungen, das heißt im laufenden Betrieb auf Flachstellen geprüft?

Im "Fehlerkatalog ergänzt mit den Fehlerklassen für das Qualitätsmanagement" (Anhang 1 der Anlage 9) des **Allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV)** werden die maximal zulässigen Ausprägungen einer Flachstelle (Code 1.3.3) definiert. Anhand dieses geometrischen Kriteriums ist zu entscheiden, inwiefern eine Instandhaltung des Radsatzes für eine Weiterfahrt erforderlich ist.

7. Sofern Sie nicht ausschließlich für Güterwagen verantwortlich sind, auf welche Vorgaben beziehen Sie sich bei der Instandhaltung von Flachstellen?

- Wir beziehen uns ausschließlich auf die Vorgaben des AVV
 Die Instandhaltung unserer Fahrzeuge hinsichtlich Flachstellen erfolgt nach den folgenden Vorgaben:

Bitte beziehen Sie sich bei Beantwortung der folgenden Fragen auf das von Ihnen verwendete Kriterium zur Instandhaltung von Flachstellen.

8. Wie viele Flachstellen werden durchschnittlich je Wartungsintervall am Fahrzeug ermittelt, die entsprechend dieses Kriteriums als kritisch einzustufen sind und eine Instandhaltung erfordern?

Fahrzeug	Flachstellen je Wartungsintervall
Triebwagen Güterverkehr	
Triebwagen Personenverkehr	
Güterwagen	
Personenwagen	
Sonstige:	

9. Werden generell auch Flachstellen dokumentiert, die entsprechend dieses Kriteriums nicht als kritisch einzustufen sind? Wenn ja, wie viele dieser Flachstellen werden durchschnittlich je Wartungsintervall am Fahrzeug ermittelt?

Fahrzeug	Flachstellen je Wartungsintervall
Triebwagen Güterverkehr	
Triebwagen Personenverkehr	
Güterwagen	
Personenwagen	
Sonstige:	

Abschätzung von Folgeschäden

10. Welche Folgeschäden am Fahrzeug resultieren aus einer Weiterfahrt mit einer Flachstelle, die aufgrund des oben genannten geometrischen Kriteriums nicht als kritisch einzustufen ist?

11. Wie häufig ist eine Instandhaltung der Fahrzeuge aufgrund dieser Folgeschäden erforderlich?

12. Inwiefern wird aufgrund dieser Folgeschäden vom oben genannten geometrischen Kriterium abgewichen?

Kostenabschätzung

Die Life-Cycle-Costs (LCC) setzen sich üblicherweise aus Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten zusammen.

13. Können Sie die LCC Ihrer in Frage 1 genannten Fahrzeuge abschätzen? Wenn nein, können Sie die jeweiligen Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten abschätzen?

Triebwagen im Güterverkehr	
LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	
Triebwagen im Personenverkehr	
LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	
Güterwagen	
LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	
Personenwagen	
LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	

Sonstige:	
LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	

14. Wie groß ist der Anteil an diesen Betriebskosten bzw. den LCC, der allgemein durch Instandhaltungsmaßnahmen verursacht wird?

% der Betriebskosten
 % der LCC

15. Wie groß ist der Anteil an diesen Instandhaltungskosten, der durch die Instandhaltung je Radsatz verursacht wird?

% der gesamten Instandhaltungskosten
 % der Betriebskosten
 % der LCC

16. Wie groß ist der Anteil an diesen Radsatz-Instandhaltungskosten, der durch Instandhaltungsmaßnahmen von Flachstellen verursacht wird?

% der Instandhaltungskosten der Radsätze
 % der Betriebskosten
 % der LCC

17. Wie groß ist der Anteil an den Instandhaltungskosten (Frage 15), der durch die oben genannten Folgeschäden (Frage 11) verursacht wird?

% der gesamten Instandhaltungskosten
 % der Betriebskosten
 % der LCC

Abschließender Teil

18. Im Hinblick auf die verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von Flachstellen an Schienenfahrzeugen ein?

- sehr relevant
- relevant
- etwas relevant
- gar nicht relevant

19. Inwiefern halten Sie das oben genannten geometrische Kriterium aus dem AVV als geeignet?

20. Wie bewerten Sie grundsätzlich eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen basierend auf Messungen an Monitoringstationen im laufenden Betrieb?

21. Weitere Kommentare / Hinweise zur Thematik

A.3 Fragebogen zu Flachstellen im Schienenverkehr für die Infrastrukturunternehmen

Allgemeiner Teil

1. Welche Betriebslänge umfasst das durch Ihr Unternehmen verwaltete Streckennetz?

2. Welche Rolle nehmen Sie bzw. Ihr Unternehmen bei der Instandhaltung des Streckennetzes ein?

die für die Instandhaltung zuständige Stelle

Selbständige Instandhaltung

Sonstige: _____

Flachstellenbezogene Instandhaltung

3. Welche Folgeschäden an der Infrastruktur können durch Überfahrten mit Radformfehlern ausgelöst werden?

4. Welche Instandhaltungsmaßnahmen sind regelmäßig an Ihrem Streckennetz erforderlich, um diese Folgeschäden zu beheben? In welchen regelmäßigen Zeitintervallen sind diese Instandhaltungen erforderlich?

5. Inwiefern wird das Streckennetz auch außerhalb der oben genannten regelmäßigen Wartungsintervalle auf Schädigungen, die durch Überfahrten mit Radformfehlern entstanden sein könnten, geprüft?

6. Wie häufig ist eine zusätzliche Instandhaltung außerhalb der regelmäßigen Intervalle erforderlich?

Kostenabschätzung

Die Life-Circle-Costs (LCC) setzen sich üblicherweise aus Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten zusammen.

7. Wie werden die Life-Circle-Costs (LCC) von Schienenwegen grundsätzlich berechnet und können Sie diese abschätzen? Wenn nein, können Sie die jeweiligen Anschaffungs-, Betriebs- oder Entsorgungskosten abschätzen?

LCC	
Anschaffungskosten	
Betriebskosten	
Entsorgungskosten	

8. Wie groß ist der Anteil an diesen Betriebskosten bzw. den LCC, der allgemein durch Instandhaltungsmaßnahmen verursacht wird?

% der Betriebskosten
 % der LCC

9. Wie groß ist der Anteil an diesen Instandhaltungskosten, der durch die Instandhaltung von den oben genannten Folgeschäden (Frage 3) verursacht wird?

% der gesamten Instandhaltungskosten
 % der Betriebskosten
 % der LCC

Abschließender Teil

10. Im Hinblick auf die an der Infrastruktur verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von Radformfehlern insgesamt an Schienenfahrzeugen ein?

sehr relevant
 relevant
 etwas relevant
 gar nicht relevant

11. Im Hinblick auf die an der Infrastruktur verursachten Kosten, als wie relevant stufen Sie die Bedeutung von Flachstellen an Schienenfahrzeugen ein?

sehr relevant
 relevant
 etwas relevant
 gar nicht relevant

Ab welcher Ausprägung ein Laufflächenfehler an den Radsätzen eines Zuges instand zu halten ist, wird in Abhängigkeit von z.B. Radgröße und Fehlertyp im allgemeinen Vertrag zur Verwendung von Güterwagen (AVV) geregelt. Diese Regelungen ermöglichen Zügen eine Weiterfahrt ohne Instandhaltung von detektierten Flachstellen, sofern diese abhängig von der Radgröße eine Größe von 35 mm, 40 mm bzw. 60 mm nicht überschreiten.

12. Inwiefern halten Sie dieses Kriterium hinsichtlich der Folgen für die Infrastruktur als geeignet?

13. Wie bewerten Sie grundsätzlich eine flexible, intervallunabhängige Instandhaltung von Flachstellen, um die Anzahl von Überfahrten mit Radformfehlern zu minimieren und dadurch das Infrastrukturnetz zu schonen?