

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau aus Messfahrten der Regelinspektion und dem Fahrwegmonitoring mit Regelzügen

Christopher Sandner

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich
2. Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
3. Prof. Dr.-Ing. Werner Stempfhuber

Die Dissertation wurde am 06.10.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 03.03.2022 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.2	Problemstellung und Methodenbeschreibung.....	3
1.3	Struktur der Arbeit.....	5
2	Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau	8
2.1	Darstellung der geplanten Trassierung.....	8
2.1.1	Krümmung.....	9
2.1.2	Grundriss der Gleisachse.....	10
2.1.3	Kilometrierung	12
2.2	Lokalisierung von Gleislagefehlern	13
2.2.1	Verknüpfung von GNSS-Daten mit dem Streckenkilometer	14
2.2.2	Stationierung der Messsysteme über die Abwicklung der Wegstrecke.....	16
2.2.3	Verortung der Messsysteme über den Streckenkilometer der Referenzkrümmung	17
3	Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB	19
3.1	Parameter der Gleislagegeometrie	19
3.1.1	Äußere Gleisgeometrie (absolut)	19
3.1.2	Innere Gleisgeometrie (relativ)	20
3.2	Komponenten und Funktionsweise der Messsysteme	23
3.2.1	Gleislagemessung RAILab (DB Inspektionsmessung)	25
3.2.2	Systemaufbau des DB Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3.....	25
3.3	Beeinflussung der ALB durch die Fahrzeuggeschwindigkeit.....	28
3.4	Von der Achslagerbeschleunigung zum Dreipunktsignal	28
3.4.1	Bandpassgefiltertes Gleislagesignal	29
3.4.2	Dreipunktsignal der Gleislage.....	30
3.5	Beurteilungsmaßstab des Dreipunktsignals	31
3.6	Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen	33
3.6.1	Fourier-Transformation.....	33
3.6.2	Wavelet-Transformation	36
3.6.3	Analyse von Achslagerbeschleunigungen mittels Wavelet-Transformation.....	39
3.6.4	Vergleich von Frequenzinhalten über die Korrelationsfunktion	42
3.6.5	Beurteilung von Übereinstimmungsmerkmalen im Frequenzbereich	43
4	Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn.....	45
4.1	Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn.....	45
4.1.1	Gleislagefehler.....	47
4.1.2	Fehler an Komponenten der Fahrbahn	49
4.1.3	Fahrflächenfehler	53
4.1.4	Zusammenfassung der Fehlerklassen	53
4.2	Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung	55
4.2.1	Einzelfehlerdetektion	56
4.2.2	Visualisierung von Störstellen	56
4.2.3	Beschreibung der Störstellen	60
4.2.4	Bewertung von Übereinstimmungskriterien und Einzelfehlerursachen	63

5	Anwendung der entwickelten Methode	70
5.1	Validierung von Messdaten und Streckenabschnitten	70
5.2	Beurteilung von Einzelfehlern	72
5.2.1	Streckenabschnitt 1; Station 13,100 km bis 15,100 km	72
5.2.2	Streckenabschnitt 2; Station 19,000 km bis 21,000 km	77
5.2.3	Streckenabschnitt 3; Station 32,500 km bis 34,500 km	80
5.2.4	Streckenabschnitt 4; Station 66,500 km bis 68,500 km	81
5.2.5	Zusammenfassung der Einzelfehleranalyse	84
5.3	Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn	85
5.3.1	Frequenzmerkmale an Weichen	85
5.3.2	Frequenzmerkmale von Gleislageveränderungen an Bahnübergängen	91
5.3.3	Beeinflussung der Gleislage durch Schienenfehler im Bereich der Signaltechnik.....	94
5.4	Ergebnis der Signalanalyse	99
6	Zusammenfassung	100
7	Ausblick	103
8	Verzeichnisse	104
8.1	Literaturverzeichnis	104
8.2	Abbildungsverzeichnis	107
8.3	Tabellenverzeichnis	111
8.4	Abkürzungsverzeichnis	112
8.5	Variablenverzeichnis.....	114
9	Anhang	115

Kurzfassung

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts überwachen spezielle Messfahrzeuge die Gleisgeometrie des Eisenbahnoberbaus und sorgen damit für einen sicheren Eisenbahnbetrieb. Durch die regelmäßige Messung der Gleislage wird eine Bewertung von Deformationen am Fahrbahnsystem ermöglicht. Über diese lässt sich die Qualität und Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur beurteilen. Der Ursprung der Gleislagebewertung liegt hier in einem historisch gewachsenen Wandersehnemessverfahren. Das Prinzip dieser Gleislagemessung orientiert sich dabei am Nalenz-Höfer-Verfahren [LICHTBERGER, 2010; RUDOLPH, 1941] und liefert als Ergebnis ein relatives Gleislagesignal, das über drei Kontaktpunkte den Abstand zwischen der Schiene und dem Teilungspunkt der Wandersehne beschreibt. Die heute noch verwendeten Bewertungskriterien und Reaktionsschwellen aus der Richtlinie der Deutschen Bahn [DB821.2001, 2017] wurden für diese Art von Messsignalen entwickelt und weitestgehend verifiziert. Obwohl aktuelle DB Inspektionsfahrzeuge über moderne Inertialplattformen und GNSS verfügen, basiert die Bewertung der Längshöhe und Pfeilhöhe heute immer noch auf dem Dreipunktsignal [NICKLISCH, 2013]. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über Jahre und Jahrzehnte. Demgegenüber steht jedoch der Nachteil, dass mit dem Dreipunktsignal lediglich die relative und wellenlängenabhängig verzerrte Gleisgeometrie bewertet wird. Um die Gleislageabweichungen aber nicht nur auf Basis eines Beurteilungsmaßstabs hinsichtlich der Sicherheit zu bewerten, verwendet das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren Achslagerbeschleunigungen, um die Fehlerursache einer mangelhaften Gleislage zu identifizieren. Durch das 25 kHz abgetastete Achslagerbeschleunigungssignal können neben der Gleislageveränderung auch geometrische Fehler in der Lauffläche der Schiene detektiert und das dynamische Verhalten von Rad und Schiene erfasst werden. Dies ermöglicht eine völlig neue Fehleranalyse im Eisenbahnoberbau. Gemessen werden die Achslagerbeschleunigungen an Regelzügen der DB. Das Fahrwegmonitoring der Deutschen Bahn verfügt über fünf Fahrzeuge, die mit Beschleunigungssensoren an den Achslagern ausgerüstet sind [AUTOMAIN, 2014; SHIFT2RAIL, 2017]. Aus den Beschleunigungen lässt sich das Dreipunktsignal der Längshöhe berechnen und bewerten. Dieser Arbeitsschritt beschreibt den ersten Teil der Einzelfehlercharakterisierung. Mit der Identifizierung von Einzelfehlern werden nur Störstellen bewertet, die eine sicherheitsrelevante Einschränkung am Fahrbahnsystem darstellen und so eine Instandhaltung auslösen. Um jedoch eine wirtschaftliche Maßnahme abzuleiten, muss die Fehlerursache der mangelhaften Gleislage detektiert und behoben werden. Die Fehlerursache kann jedoch allein über das Dreipunktsignal der DB nicht bestimmt werden. Neben dem Dreipunktsignal werden deshalb auch die Frequenzinhalte des Achslagerbeschleunigungssignals ausgewertet. Dafür wird eine Wavelet-Transformation eingesetzt, die eine Zeit-Frequenz-Analyse erlaubt und den zweiten Teil der Charakterisierung darstellt. Der Vorteil einer Wavelet-Transformation liegt in der Auflösung des Frequenzverhaltens über die Örtlichkeit. Mit der Klassifizierung der Frequenzinhalte lassen sich die Fehlerursachen einer mangelhaften Gleisgeometrie darstellen, welche die Charakterisierung von Einzelfehlern im Dreipunktsignal erst ermöglicht [SANDNER, 2019; SANDNER, 2020]. Mit der Identifizierung von Fehlerursachen lässt sich vor allem eine nachhaltigere und effizientere Instandhaltung am Eisenbahnoberbau durchführen, welche die Verfügbarkeit der Fahrbahn deutlich erhöhen wird.

Schlüsselwörter: Achslagerbeschleunigung, Fehlerklassifikation, Gleislage, Wandersehnensignal, Wavelet-Transformation

Abstract

Since the middle of the 20th century, special track recording cars have been measuring the track geometry as a part of regular inspections. This allows the evaluation of track defects and can be used to assess the quality and availability of the railway infrastructure. The origin of this assessment is built on the chord-based measurement technology. This measurement works according to the Nalenz-Höfer method [LICHTBERGER, 2010; RUDOLPH, 1941] and delivers a chord-based track geometry measurement signal. The evaluation criteria and reaction thresholds from DB guideline [DB821.2001, 2017], which are still in use today, have been developed and verified for this type of signals. Nowadays, modern measurement systems use an inertial measurement platform and GNSS to detect track geometry errors. But the evaluation of the relative track geometry from the lateral alignment and longitudinal level continues to be based on reaction thresholds from chord-based measurement signals [NICKLISCH, 2013]. The advantage of comparability over years and decades is offset by the disadvantage that track quality assessment can only be derived from chord-based measurement signals. The real track geometry cannot be displayed by this method. To rate the track geometry defects not only by track quality and their safety, the presented method uses axle box accelerations to assign defects and their specific root causes. By evaluation of the axle box accelerations at a sampling rate of 25 kHz, more significant information about the track condition can be determined. This enables a completely new analysis of track defects. The actual measurement of the axle box accelerations is done by regular in-service trains. In total, the DB has 5 trains which are equipped with axle box sensors [AUTOMAIN, 2014; SHIFT2RAIL, 2017]. By using these sensors, conspicuous track defects in the longitudinal level (chord-based measurement) can be calculated and evaluated. This part of the characterization represents the first component of the method. By determining the individual defects, only errors are considered that represent a safety-relevant restriction in the track and are subject to maintenance. To derive cost efficient measures, the cause of the error must be detected and eliminated. That can not only be done by a chord-based measurement. In addition to the chord-based measurement, the frequency content of the axle box accelerations is analysed. This is done by wavelet-transformation, which allows a time-frequency analysis. The advantage of the wavelet-transformation is related to the resolution of the frequency content and represents the second part of the characterization. With the classification of the frequency range, the track defect can be evaluated [SANDNER, 2019; SANDNER, 2020]. This allows a classification of the error by its frequency content (axle box acceleration) and thus the track defect can be assigned to specific error groups. The identified cause of the error enables a more sustainable and efficient maintenance of the railway infrastructure. This enables a higher availability of the track.

Keywords: axle box acceleration, defect classification, track geometry, chord-based measurement, wavelet-transformation

1 Einleitung

Die Beförderung von Gütern und Personen auf dem Schienenweg hat seit Jahrzehnten einen wesentlichen Anteil an der wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands. Mit rund 24.000 Zugfahrten pro Tag und einer Pünktlichkeit von über 93 Prozent im nationalen Schienenverkehr [DB, 2019] stellt die Deutsche Bahn (DB) eines der zuverlässigsten Transportmittel Europas dar. Diese Kennzahlen beschreiben vor allem eine hohe Qualität und Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur. Mit dem bis heute und zukünftig stetig wachsenden Schienenverkehr wird daher eine effizientere Instandhaltung notwendiger als je zuvor. Dies setzt jedoch eine hohe Datenlage zur Bewertung der Fahrbahn und seiner Komponenten voraus, um Ursachen einer mangelhaften Gleislage frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Aktuell erstreckt sich das deutsche Schienennetz über eine Streckenlänge von mehr als 33.200 km [DB, 2019]. Dieses soll zukünftig durch nationale und europäische Interessen noch intensiver genutzt werden. Im Mittelpunkt steht die Stärkung des Schienengüterverkehrs sowie der Aufbau von Transeuropaverbindungen [BMVI, 2020], welche maßgebend durch die Klimapolitik der Europäischen Union (EU) forciert werden. Allein in der Bundesrepublik sollen mit dem Deutschland-Takt die Fahrgastzahlen bis zum Jahre 2030 verdoppelt werden, was besonders auf Mischverkehrsstrecken die Zeit für notwendige Instandhaltungsmaßnahmen und damit die Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur weiter einschränkt.

Die Inspektion sowie die Instandhaltung des Schienennetzes stellen sehr hohe Ansprüche an den Infrastrukturbetreiber. Die Kenntnis über die tatsächliche Abnutzung und das Verhalten von Komponenten der Fahrbahn nimmt dabei einen besonderen Stellenwert ein. Der Zustand des Gleises wird durch spezielle Messsysteme wie das RAILab (Rollendes-Analyse und Inspektionslabor) geprüft (Kapitel 3.2.1). Die Qualität der Fahrbahn lässt sich über Parameter der inneren Gleisgeometrie (Kapitel 3.1.2) darstellen. Maßgebend für die Bewertung einer Störstelle ist das Dreipunktsignal (DPS), welches sich aus dem geometrischen Verhältnis einer Sehnenmessung bestimmen lässt. Die Pfeilhöhe beschreibt das Ergebnis, welches in lateraler und vertikaler Richtung gemessen wird. Überschreitet diese Pfeilhöhe eine Eingriffsschwelle, die im Regelwerk der DB definiert ist [DB821.2001, 2017], muss eine Instandhaltungsmaßnahme ausgelöst werden. Ein wesentlicher Nachteil des Dreipunktsignals zeigt sich in seiner Bewertung. Durch die begrenzte Wellenlänge erlaubt das Dreipunktsignal nur eine eingeschränkte Beurteilung der Gleislage und die Fehlerursache der Störstelle kann dadurch nicht eindeutig ermittelt werden. Viel mehr können Fehler in der Lauffläche der Schiene oder Einflüsse aus den Fahrbahnkomponenten (z. B. Isolierstoß oder Herzstück einer Weiche) die Ursache einer mangelhaften Gleislage darstellen. Aufgrund dieser Herausforderung lässt sich der hohe Nutzen eines kombinierten Mess- und Auswerteverfahrens ableiten, welches die Interpretation von Fehlerursachen im Eisenbahnoberbau erleichtert. Diese setzt jedoch ein Messsystem voraus, das durch eine hohe Abtastrate auch kurzweilige Fehler in der Schienoberfläche und den Fahrbahnkomponenten erfasst. Während die klassischen geometrischen Messverfahren ausschließlich eine bedingte Ursachenanalyse ermöglichen, erlaubt die Messung von Achslagerbeschleunigungen eine weitergehende Aussage. Über die Achslagerbeschleunigung (ALB), die außer im Bereich der Eigenfrequenzen der Radsätze im Wesentlichen proportional zur Kontaktkraft zwischen Rad und Schiene sind, können Eigenschaften aus der Fahrbahn abgeleitet und mit der Darstellung im Frequenzbereich bestimmten Fehlern im Eisenbahnoberbau zugeordnet werden. Dabei können nicht nur Schienen- oder Gleislagefehler bestimmt, sondern vor allem Fehlerursachen im Spektrum der Fahrbahnkomponenten zugeordnet werden.

1 Einleitung

Gemessen werden die ALB an priorisierten Fahrzeugen des Fernverkehrs, die einem klar definierten Umlaufplan folgen und sich damit deutlich von der Inspektionsmessung (IsM) mit dem RAILab abgrenzen. Das Messen der ALB an Regelzügen wird in der vorliegenden Arbeit auch als DB Fahrwegmonitoring (FwM) bezeichnet. Mit der kontinuierlichen Überwachung der Längshöhe zeigt sich hier der wesentliche Vorteil eines Monitoringsystems auf Regelzügen. Da jedoch beim FwM nicht alle Parameter der inneren Gleisgeometrie erfasst werden, welche für eine Zustandsbewertung des Gleises aber erforderlich sind, kann die DB Regelinspektion des Eisenbahnoberbaus nicht durch das DB Fahrwegmonitoring ersetzt werden. Daher wird das FwM derzeit nur als Instandhaltungsunterstützende Methode betrachtet. Durch die Transformation der vertikalen Achslagerbeschleunigungen in ein Dreipunktsignal der Längshöhe können jedoch annähernd ähnliche Ergebnisse wie bei der herkömmlichen Inspektion erzielt werden. Das Fahrwegmonitoring der DB Netz AG nutzt dafür piezo-elektrische und kapazitive Beschleunigungssensoren an den Achslagern, die in lateraler und vertikaler Richtung messen. Der entscheidende Vorteil dieser Sensorik liegt in der Abdeckung eines großen Messbereichs von 25 kHz sowie der hohen Empfindlichkeit, die eine Bewertung von Gleislagefehlern und darüber hinaus erlaubt. Neben der Gleislage lassen sich Fahrflächenfehler (z. B. Riffeln oder Schlupfwellen) lokalisieren. Außerdem können Materialermüdungen detektiert werden, die sich in Form einer mangelhaften Schienenverbindung (z. B. Isolierstoß) zeigen und sich auf die Gleislage auswirken können. Die frühzeitige Erkennung und Behebung von Störstellen führt damit zu einer deutlich höheren Verfügbarkeit des Fahrsystems, welche für zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen zwingend erforderlich werden. Die Auswertung der ALB erlaubt dabei eine völlig neue Betrachtungsweise von Störstellen im Eisenbahnoberbau, die ein detaillierteres Planen sowie maßnahmenbedingtes Handeln im Sinne einer vorausschauenden Instandhaltung ermöglicht. Mit Charakterisierung von Einzelfehlern wird so ein wesentlicher Beitrag für eine nachhaltige Instandhaltung der Eisenbahninfrastruktur erzielt und die Verfügbarkeit der Fahrbahn damit maßgebend erhöht.

1.1 Stand der Technik

Die Verfügbarkeit einer Bahnstrecke orientiert sich an qualitativen und sicherheitsrelevanten Kenngrößen der inneren Gleisgeometrie (Kapitel 3.1.2). Diese werden anhand von regelmäßig wiederkehrenden Zustandsbewertungen ermittelt. Im Netz der DB erfolgt dies im Zuge der Regelinspektion durch das RAILab-Messsystem. Mit der Inspektionsmessung des RAILab werden Parameter überwacht, die sich maßgebend auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit auswirken. Ein wesentlicher Teil dieser Geometriemessung stellt die Berechnung der Dreipunktsignale zur Bewertung der Längshöhe und Pfeilhöhe dar. Diese lassen sich über ein Sehnenmessverfahren berechnen. Als Grundlage dient das formtreue Gleislagesignal der IsM. An diskreten Punkten wird der Abstand zwischen dem formtreuen Signal und dem Teilungspunkt der Messbasis bestimmt (Kapitel 3.1.2). Das ermittelte Signal wird als Dreipunktsignal definiert. Dieses wird jedoch nicht nur für die Zustandsbewertung der Fahrbahn eingesetzt. Ein weitaus größeres Potenzial des Dreipunktsignals liegt in der Berechnung von lokalen Verschlechterungsraten über die Historie der Messungen. Entsprechend der Bewertungskriterien des Dreipunktsignals, die sich am Regelwerk der DB [DB821.2001, 2017] orientieren, wird eine prognosebasierte Instandhaltung unterstützt, die in Verbindung mit der vorliegenden Arbeit Rückschlüsse auf die Fehlerursache im Eisenbahnoberbau erlaubt. Die Prognose und Auswertung der Historie über das Dreipunktsignal der Längshöhe werden durch die DB Netz AG Abteilung Messtechnik und Rad-Schiene-System (I.NAI 414) durchgeführt.

1.2 Problemstellung und Methodenbeschreibung

Es findet sich einschlägige Literatur, die sich mit der Messung, Auswertung und Interpretation von Achslagerbeschleunigungen [WOLTER, 2014] und der darauf fokussierten Beurteilung von Fahrflächenfehlern auseinandersetzt [BAASCH, 2018]. Hierfür werden gängige Methoden der Signalanalyse eingesetzt, um das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen aufzuzeigen. Anhand einer Wavelet-Transformation [CANTERO, 2015; TOLOYAT, 2003] oder Fourier Transformation [ANGEHRN, 2016; CAPRIOLI, 2007] wird das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen analysiert. In Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit lassen sich die Frequenzinhalte in eine Wellenlänge überführen, die eine Zuordnung der Einzelfehler im Eisenbahnoberbau erlaubt. Das Ziel dieser Verfahren ist das Erkennen von Fahrflächenfehlern [MOLODOVA, 2014; PAPAELIAS, 2012] sowie die Bewertung von Einflüssen aus dem Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten [SANDNER, 2019; SANDNER, 2020] oder dem Wellenlängenbereich der Gleislage [DB821.2001, 2020], aus dem sich eine notwendige Instandhaltung der Fahrbahn ableiten lässt.

Die Messung, Bewertung und Entwicklung von Gleislagefehlern stellt derzeit die Grundlage weiterer Forschungsprojekte dar, die sich mit der frühzeitigen Erkennung von Störstellen im Eisenbahnoberbau auseinandersetzen. Das Projekt der Universität Stuttgart (Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen sowie Geotechnik) und der Technischen Universität München (Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau) beurteilt die Entwicklung des Eisenbahnoberbaus unter der Belastung des Regelbetriebs sowie dessen Auswirkungen auf die Gleislagemessung. Im Fokus dieser Auswertung steht die Analyse von Schlammstellen [LILLIN, 2018; RAPP, 2018]. Durch die Charakterisierung von Einzelfehlern wird hingegen eine kombinierte Bewertung der Fahrbahneigenschaften verfolgt. Diese Methode ermöglicht eine Zuordnung von Fehlerursachen einer mangelhaften Gleislage, welche sich deutlich vom Ansatz anderer Arbeiten abgrenzt.

1.2 Problemstellung und Methodenbeschreibung

Die Erfahrungen des Streckenabschnittsmanagements zeigen, dass Informationen über die aktuelle Verfügbarkeit der Eisenbahninfrastruktur wichtig für die Instandhaltung der Fahrbahn sind. Die Kenntnis über den Zustand des Schotterbetts, die Lage der Schwellen oder die Zustandsbewertung von Isolierstößen ist dabei entscheidend für die Erneuerung der Anlage. Mit dem Ergebnis der IsM wird vor allem eine Beurteilung der Gleislage ermöglicht, jedoch kann diese nur bedingt für die Instandhaltung der Fahrbahn eingesetzt werden. Als problematisch wird die Unkenntnis der Fehlerursache gesehen. Diese lässt sich in der Regel im Frequenzbereich der Messung aufgrund von Fahrbahnkomponenten oder Fahrflächenfehler bestimmen. In den meisten Fällen wird nur der Gleisgeometriefehler behoben und nicht der Mangel am Fahrbahnsystem selbst. Die Kenntnis über die Art des Fehlers ist jedoch entscheidend für eine nachhaltige und fehlerorientierte Instandhaltung der Fahrbahn. Mit der Charakterisierung von Einzelfehlern wird der Ursprung von Gleislageveränderungen und somit der Auslöser für Deformationen am Fahrbahnsystem ermittelt. Die Grundlage dafür liefert das Dreipunktsignal der Längshöhe, das durch den Beurteilungsmaßstab eine Verortung von Störstellen erlaubt. Aufgrund der Signaleigenschaften des Dreipunktsignals, die sich aus der Übertragungsfunktion und dem Trassierungseinfluss ergeben, ist eine Bewertung von Fehlern jedoch nur bedingt möglich und lässt daher keine eindeutige Bestimmung von Merkmalen zu. Aufgrund der Verfügbarkeit von Rohdaten aus dem IsM werden daher die Achslagerbeschleunigungen des DB Fahrwegmonitorings für die Charakterisierung von Einzelfehlern ausgewertet. Das Ziel dieser Signalanalyse ist einerseits das Detektieren von Störstellen im Eisenbahnoberbau und andererseits die Klassifizierung dieser Einzelfehler.

1 Einleitung

Fahrflächen- und Gleislagefehler lassen sich anhand bewährter Messverfahren überwachen. Jedoch wird der Zusammenhang dieser sowie der Einflüsse aus dem Frequenzverhalten der Fahrbahnkomponenten durch die unterschiedlichen Auswerte- und Bewertungsverfahren nicht immer eindeutig überlagert. Die Kombination unterschiedlicher Datengrundlagen führt hier zur fehlerhaften Interpretation der Fehlerursache am Eisenbahnoberbau. Darüber hinaus wird die Zuordnung von Fehlern durch Verortungsungenauigkeiten erschwert. Die Bewertung der Fehlerursache kann daher mit klassischen Verfahren nicht eindeutig durchgeführt werden. Um auf die Fehlerursache einer mangelhaften Gleislage zu schließen, wird der Zusammenhang zwischen dem Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigung und dem Dreipunktsignal der Längshöhe bestimmt. Diese Form der Signalanalyse und Bewertung unterschiedlicher Messgrößen stellt eine neue Art der Gleislagebewertung dar und wird in der vorliegenden Arbeit erstmalig abgebildet.

Der Anspruch an den Begriff Gleislagefehler setzt einen definierten Zustand voraus, der sich in der vorliegenden Arbeit am Beurteilungsmaßstab der DB orientiert (Kapitel 3.5). Ein Gleislagefehler beschreibt daher eine Abweichung, die sich über das Dreipunktsignal bewerten und sich den Eingriffsschwellen der Richtlinie [DB821.2001, 2017] zuordnen lässt. Die Auswertung der Frequenzinhalte stellt jedoch die eigentliche Grundlage zur Bewertung von fehlertypischen Merkmalen dar. Diese lassen sich über eine automatisierte Wavelet-Transformation aus der gemessenen ALB bestimmen. Für die Analyse werden fehlertypische Wavelets ausgewählt und anhand der Skalierung des Wavelets eine Pseudo-Frequenz berechnet. Das Beispiel in der Abb. 1 zeigt das Ergebnis dieser Signalanalyse mittels eines Morlet-Wavelets. In diesem Beispiel wird die Fehlerursache eines detektierten Einzelfehlers im Dreipunktsignal (unten) durch das Frequenzverhalten der Fahrbahn (oben) hervorgehoben. Das Verschneiden von Informationen aus dem Frequenzverhalten und dem Dreipunktsignal wird in der vorliegenden Arbeit als kombinierte Auswertung bezeichnet und zur Charakterisierung von Einzelfehlern eingesetzt. Gleislageveränderungen können durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden. Dabei kann es zu Überlagerungen von Fehlern aus der Schienenoberfläche oder den Einflüssen aus den Fahrbahnkomponenten kommen, die allein über das Dreipunktsignal der Gleislage nicht dargestellt werden können.

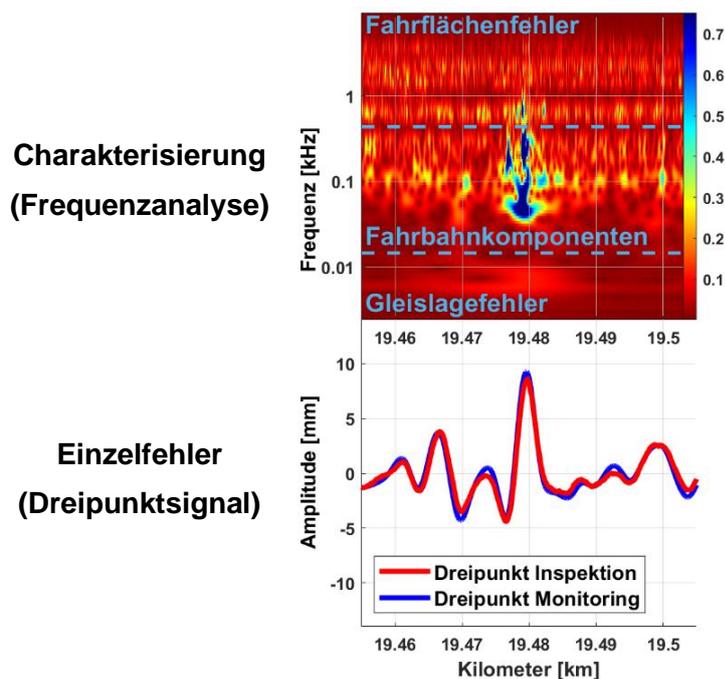


Abb. 1: Ergebnis der kombinierten Gleislagebewertung; Wavelet-Analyse mit Darstellung von Intensitäten der Koeffizienten (oben) und Bewertung der Dreipunktsignale (unten)

Mit dem logarithmisch angeordneten Frequenzband wird der Übereinstimmungsgrad zwischen dem gemessenen Achslagerbeschleunigungssignal und dem Wavelet dargestellt. Die normierten Koeffizienten zeigen hier Werte zwischen 1 und 0. Der Zustand 1 (blau) lässt sich einer vollkommenen Übereinstimmung zuordnen. Der Wert 0 (rot) zeigt hier hingegen keine Ähnlichkeit zwischen dem Achslagerbeschleunigungssignal und dem Wavelet. Mit der Darstellung der Frequenzinhalte wird die Klassifizierung der Einzelfehler deutlich. Diese werden nach Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$), Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) und Fahrfläche ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) unterteilt. Dabei sollten die Frequenzbereiche nicht als absolute Grenze gesehen werden, da sie sich je nach Situation verändern und überschneiden können.

1.3 Struktur der Arbeit

Mit der Inspektionsmessung und dem Fahrwegmonitoring werden unterschiedliche Ansprüche an die Überwachung der Gleislage gestellt. Diese zeigen sich in der Messung unterschiedlicher Parameter und der Häufigkeit einer Messung. Ähnliche Ergebnisse lassen sich hier über die Auswertung des jeweiligen Längshöhensignals erzielen. Als vergleichbar wird hier das Dreipunktsignal bewertet. Es lassen sich qualitative Unterschiede aufzeigen, welche in der Tabelle 1 zusammengefasst werden. Diese ergeben sich aus der unterschiedlichen Gleisabtastung und Verarbeitung der Daten, die das formtreue Gleislagesignal beeinflussen. In der Tabelle wird daher vor allem die unterschiedliche Signalverarbeitung zwischen der DB Inspektionsmessung (Kapitel 3.2.1) und dem DB Fahrwegmonitoring (Kapitel 3.2.2) aufgezeigt, die sich hier ausschließlich auf die Parameter der Lage und Höhe beziehen.

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen Größen und der Signalverarbeitung zwischen der Inspektionsmessung und dem Fahrwegmonitoring

Signalverarbeitung		Inspektionsmessung (ISM)	Fahrwegmonitoring (FwM)
Formtreues Gleislagesignal	Messverfahren	Gleisabtastung Lasermessverfahren	Beschleunigungsmessung Achslager
	Berücksichtigung der Trassierung	ja	nein
Dreipunktsignal	Pfeilhöhe	ja	aktuell nicht möglich
	Längshöhe	ja	ja
Frequenzbereich (Wellenlänge)	Gleislage	ja	ja
	Fahrbahnkomponenten	nein	ja
	Fahrflächenfehler	nein	ja

Mit der Tabelle 1 lässt sich der Informationsgehalt des jeweiligen Messsystems aufzeigen. Daraus ergeben sich Anforderungen, die sich vor allem auf die Signalverarbeitung beziehen und bei der Umsetzung der Einzelfehlercharakterisierung berücksichtigt werden müssen. Die Charakterisierung von Einzelfehlern wird daher in fünf Arbeitspakete gegliedert.

Arbeitspaket 1: Messung, Berechnung und Beurteilung der Dreipunktsignale aus den Achslagerbeschleunigungen des Fahrwegmonitorings sowie die Darstellung der Vergleichbarkeit mit der Inspektionsmessung.

- Über die Parameter der Gleisgeometrie werden die Anforderung an die Messsysteme abgeleitet. Im Kapitel 3.1 werden daher die Unterschiede zwischen der inneren und äußeren Gleisgeometrie erläutert.

1 Einleitung

- Das Fahrwegmonitoring und die Inspektionsmessung betrachten unterschiedliche Messgrößen als Ergebnis der Datenaufnahme. Die unterschiedlichen Messverfahren werden im Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 erläutert.
- Die Berechnung des Dreipunktsignals entsprechend der Inspektionsmessung setzt ein formtreu gemessenes Gleislagesignal voraus. Dieses wird als Ergebnis der Datenaufnahme vorausgesetzt und im Kapitel 3.4 in ein Dreipunktsignal überführt.
- Das Dreipunktsignal ist die Bewertungsgrundlage für die Verortung eines Einzelfehlers der Gleislage. Im Kapitel 3.5 wird der Zusammenhang zwischen der Fehleramplitude, dem Beurteilungsmaßstab und dem Abnutzungsgrad der Eisenbahnanlage nach dem Störgrößen-Reaktionsverfahren aufgezeigt.

Arbeitspaket 2: Berechnung von Trassierungselementen als Grundlage für die Verortung von Gleislageveränderungen.

- Für die Verortung der Messdaten werden GNSS-Koordinaten und Streckenkilometer eingesetzt. Die Verknüpfung dieser beiden Informationen erfolgt über die Trassierungselemente der Gleisachse. Diese wird hier ausschließlich im Grundriss dargestellt. Die wichtigsten Begriffe der Linienführung und Eigenschaften der Trassierung werden im Kapitel 2.1 erläutert.
- Mit der Erkennung von relativen Gleislageveränderungen im Millimeterbereich über das Dreipunktsignal wird eine sehr hohe innere Genauigkeit der Messsysteme erzielt. Die Verortung von Gleislagefehler in der Örtlichkeit erfordert daher eine vergleichbare Genauigkeit. Diese wird mit den im Kapitel 2.2 beschriebenen Methoden erzielt.

Arbeitspaket 3: Untersuchung des Frequenzverhaltens zur Beurteilung von Einzelfehlern in Verbindung mit einer Wavelet-Transformation. Dabei werden die wesentlichen Vor- und Nachteile dieser Methode in Bezug auf die Bewertung des Dreipunkt- und des Achslagerbeschleunigungssignals verdeutlicht.

- Die Anwendung einer Wavelet-Transformation setzt mathematische Grundlagen voraus, die im Kapitel 3.6 erläutert werden. Dabei wird vor allem der Unterschied zur Fourier-Transformation aufgezeigt. Es werden die Eigenschaften dieser beiden Analyseverfahren betrachtet und die Parameter der Wavelet-Transformation erläutert. Für die Charakterisierung von Einzelfehlern mittels einer Wavelet-Transformation müssen die Eigenschaften des Eingangssignals näher analysiert werden. Gegenüber dem Dreipunktsignal wird das Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals direkt aufgelöst und erlaubt neben der Mustererkennung eine Darstellung von Frequenzinhalten.

Arbeitspaket 4: Analyse von Fehlerursachen einer mangelhaften Gleislage über die Verknüpfung von Informationen aus dem Dreipunktsignal und dem Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals.

- Mit der Darstellung von Frequenzinhalten müssen charakteristische Merkmale eines Einzelfehlers festgelegt werden. Im Kapitel 4.1 werden daher typische Fehlerformen einer Störstelle analysiert, die sich über das Frequenzverhalten und dessen Wellenlänge zuordnen lassen.
- Das Ergebnis der Wavelet-Transformation beschreibt nicht grundsätzlich einen Fehler im Eisenbahnoberbau. Erst in Verbindung mit dem Dreipunktsignal wird eine Störstelle

detektiert, charakterisiert und einem Fehlertyp/-ursache zugeordnet. Die im Kapitel 4.2 beschriebene Methode verknüpft die Informationen des Dreipunktsignals mit den analysierten Frequenzinhalten der Achslagerbeschleunigungen und ermöglicht in Kombination mit den Streckendaten eine Visualisierung der örtlichen Eigenschaften. Die Charakterisierung von Einzelfehlern wird hier an ausgewählten Beispielen verdeutlicht.

- Die Beurteilung von Störstellen stellt eine weitere zentrale Anforderung an die Charakterisierung von Einzelfehlern dar. Mit der Analyse im Zeit-Frequenzbereich werden vor allem die Signaleigenschaften der Achslagerbeschleunigungen klassifiziert und das Spektrum einer bestimmten Fehlergruppe zugeordnet. Das im Kapitel 4.2.4 dargestellte Verfahren bildet die Grundlage für die Bewertung der Fehlerursache.

Arbeitspaket 5: Validierung des entwickelten Auswerteverfahrens anhand von Messdaten des Fahrwegmonitorings.

- Im Kapitel 5.1 werden Streckenabschnitte definiert, in denen Einzelfehler über das DB Inspektionssystem lokalisiert wurden. Es werden Verortungsungenauigkeiten dargestellt und spezifische Systembedingungen des DB Fahrwegmonitorings aufgezeigt.
- Die Anwendung der entwickelten Einzelfehlercharakterisierung fordert eine Bewertung der Ergebnisse. Im Kapitel 5.2 werden die festgelegten Streckenabschnitte analysiert und die Fehlerursache der mangelhaften Gleislage aufgezeigt.
- Mit der Auswertung der Messdaten lassen sich über das Frequenzverhalten ähnliche Eigenschaften an den Komponenten der Fahrbahn aufzeigen. Unabhängig von der Gleislage (Einzelfehler) wird im Kapitel 5.3 das Frequenzverhalten von Fahrbahnkomponenten analysiert und es werden ähnliche Fehlerursachen bewertet.

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

Die Stationierung der Messsysteme und damit die Positionierung der Messdaten über den Streckenkilometer einer Bahnstrecke stellt eine wesentliche Anforderung an die Bewertung der Gleislage sowie die Charakterisierung von Einzelfehlern dar. Die Beurteilung der Gleislage setzt demnach die eindeutige Verortung der identifizierten Einzelfehler im Eisenbahnoberbau voraus. Im Folgenden werden Methoden zur Vorortung der Messdaten eingeführt, die auf der Nutzung von Trassierungsdaten beruhen. Zunächst werden die Grundlagen der Trassierung im Kapitel 2.1 erläutert und anschließend daraus im Kapitel 2.2 ein Verortungsverfahren entwickelt.

2.1 Darstellung der geplanten Trassierung

Mit der Trassierung einer Bahnstrecke wird der geometrische Verlauf und geodätische Bezug der Fahrbahnelemente definiert. Dieser orientiert sich an der Abwicklung der jeweiligen Gleisachse. Einen örtlichen Bezug erhält die Trasse durch die Kilometrierungslinie. Diese folgt einer virtuellen Achse entlang der Strecke. Die Abb. 2 zeigt die Verknüpfung der Gleisachse und Kilometrierungslinie mit den Komponenten des Eisenbahnoberbaus.

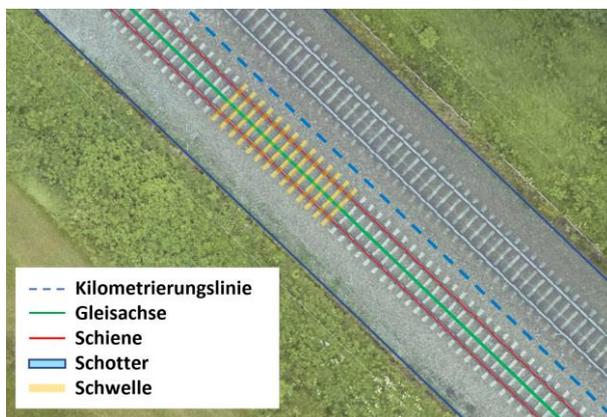


Abb. 2: Luftbild (DB GeoViewer) mit Verknüpfung von Teilen der Oberbaukonstruktion in Verbindung mit den geometrischen und geodätischen Bezugslinien der Fahrbahn

Der Oberbau wird durch die Verbindung von Schiene, Schwelle und Schotter bestimmt. Die Lage sowie Höhe dieser Konstruktion wird hingegen durch die Gleisachse festgelegt, die im Kapitel 2.1.2 näher beschrieben wird. Für die Darstellung dieser Achse muss jedoch eine Bezugsebene

„... aus einem Koordinatensystem und einem Festpunktfeld.“ [Möser, 2012]

definiert werden. Dieses wird als DB-Ref System bezeichnet und bildet die Grundlage für die Planung sowie Durchführung von Baumaßnahmen. Dabei orientiert sich dieses System an einem Gauß-Krüger-Koordinatensystem, das nach DB Richtlinie [DB883.9010, 2020]

„... das geodätische Bezugssystem aller Neuvermessungen und Dokumentation ab dem 01.12.2016.“ [DB883.9010, 2020]

darstellt und damit die Basis für die Abbildung der Trassierung liefert. Durch die Festlegung des Bezugssystems können Veränderungen am Fahrbahnsystem in Lage und Höhe bestimmt und Abweichungen zwischen dem geplanten und dem gemessenen Anlagenzustand bewertet werden. Einen örtlichen Bezug erhält die Bahnstrecke wiederum durch den Streckenkilometer, der im Kapitel 2.1.3 erläutert wird und sich an der Kilometrierungslinie orientiert.

2.1.1 Krümmung

Der Verlauf einer Eisenbahnstrecke wird durch die Lage der ausgefahrenen Gleisgeometrie bestimmt. Für die Darstellung der lateralen Trassierungseigenschaften beschränkt man sich auf den Grundriss der Gleisachse. Der Verlauf dieser wird durch die Radien R der Trasse geprägt. Um die Gleislageveränderungen nicht nur über den Grundriss der Trasse (Hochwert und Rechtswert) abzubilden, werden diese ebenfalls über den Streckenkilometer dargestellt. Eine Möglichkeit liegt in der Vergleichbarkeit von Krümmungsverläufen. Über diese lassen sich Stationswerte der Trasse zuordnen. Die Referenz lässt sich mit der Formel (2.1) berechnen.

$$k = \frac{1}{R} \tag{2.1}$$

Die Trassierung des Gleises und Festlegung von Parametern wird in der DB Richtlinie [DB800.0110] geregelt. Grundlage der Linienführung bilden die geometrischen Formen der Trassierungselemente. Diese werden in lineare Strecken- und Bogenabschnitte unterteilt, die in der Regel durch Übergangsbögen miteinander verbunden werden. Die Krümmung k eines linearen Streckenelementes bzw. einer Geraden lässt sich mit der Formel (2.2) darstellen. Die abgewinkelte Position x beschreibt hier die Station innerhalb des Trassierungselementes.

$$k(x) = 0 \tag{2.2}$$

In Bogenabschnitten folgt die Krümmung der in Formel (2.3) definierten Bedingung.

$$k(x) \neq 0 \text{ (konst.)} \tag{2.3}$$

- $k > 0$ Rechtsbogen
- $k < 0$ Linksbogen

Beim Übergang zwischen den Trassierungselementen kommt es zu Unstetigkeiten im Verlauf der Krümmung. Dieser unvermittelte Krümmungswechsel wird als ein geometrischer Effekt betrachtet, der einen fahrdynamischen Einfluss hat. Diese Auswirkung steht vor allem in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Planung der Trasse wird daher so gewählt, dass sich die Fahrzeugschwingung aus mehreren Unstetigkeiten nicht addiert [MENIUS, 2017]. Im Netz der Deutschen Bahn werden daher die geometrischen Formen einer Klothoide, Übergangsbogen nach Bloss sowie die eines S-förmigen Übergangsbogens eingesetzt [DB883.5000, 2018]. Dabei lassen sich die Krümmungswerte einer Klothoide mithilfe der Formel (2.4) aus der Länge des Trassierungselementes L sowie aus der Anfangskrümmung k_{anf} und der Endkrümmung k_{end} berechnen.

	$k(x) = \frac{k_{end} - k_{anf}}{L}x + k_{anf}$ <p style="text-align: center;">mit $x \in [0; L]$</p>	(2.4)
--	--	-------

Die Eigenschaften eines Blossbogens lassen sich über die Formel (2.5) beschreiben.

	$k(x) = (k_{end} - k_{anf}) \left[3 \left(\frac{x}{L} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right]$ <p style="text-align: center;">mit $x \in [0; L]$</p>	(2.5)
--	--	-------

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

Der Krümmungsverlauf eines S-förmig geschwungenen Übergangsbogens wird durch den Scheitelpunkt des Elements (Mittelpunkt) bestimmt. Es werden zwei Parabeläste berechnet, welche sich vom jeweils angrenzenden Trassierungselement zum Mittelpunkt erstrecken. Die erste Hälfte wird entsprechend der Formel (2.6) bestimmt.

$$k(x) = \frac{2(k_{end} - k_{anf})}{L^2} x^2 \quad (2.6)$$

1. Hälfte

mit $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$

Der zweite Teil wird mithilfe der Formel (2.7) konstruiert.

$$k(x) = (k_{end} - k_{anf}) \frac{2(k_{end} - k_{anf})}{L^2} (L - x)^2 \quad (2.7)$$

2. Hälfte

mit $\frac{L}{2} \leq x \leq L$

Die unterschiedlichen Übergangsformen dienen vor allem der Reduzierung des unvermittelten Krümmungswechsels. Die Eigenschaften dieser Trassierungselemente werden in der Abb. 3 über das jeweils normierte Krümmungsbild verdeutlicht.

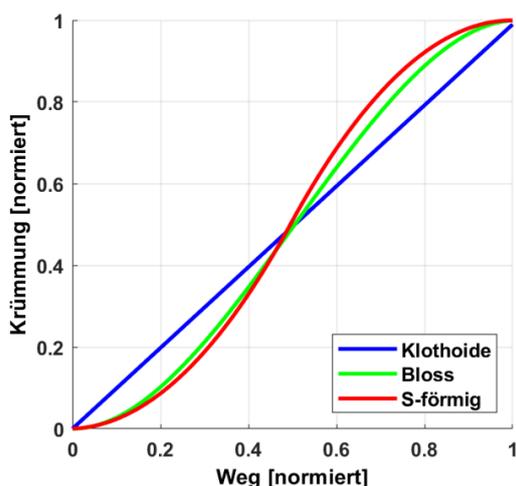


Abb. 3: Normiertes Krümmungsbild einer Klothoide, eines S-förmig geschwungenen Übergangsbogens und eines Blossbogens

Der wesentliche Unterschied zwischen einem S-förmigen Übergangsbogen (rot) und einem Blossbogen (grüne) zeigt sich in der Abwicklung (Weg) der Krümmung. Gegenüber dem linearen Krümmungsverlauf einer Klothoide (blau) werden der S-förmige und Übergangsbogen nach Bloss geschwungen, wobei letzterer einen eher flacheren Verlauf aufzeigt. Geometrisch betrachtet lässt sich der Blossbogen im Verhältnis zur Klothoide über eine kürzere Distanz entwickeln. Dies bringt vor allem konstruktive Vorteile bei der Planung einer Trasse.

2.1.2 Grundriss der Gleisachse

Die Schnittstelle zwischen der Krümmung k und dem Grundriss der Gleislage stellt der Tangentenwinkel τ dar. Unterschiede lassen sich vor allem über die jeweilige Abbildungsform aufzeigen. Die Krümmung wird entsprechend der abgewickelten Wegstrecke von x zugeordnet. Die Darstellung der absoluten Position orientiert sich hingegen an einem lokalen kartesischen Koordinatensystem (DB-Ref), welches die Darstellung metrischer Koordinaten winkeltreu erlaubt. Die Abb. 4 verdeutlicht die geometrischen Unterschiede dieser drei Ebenen.

2.1 Darstellung der geplanten Trassierung

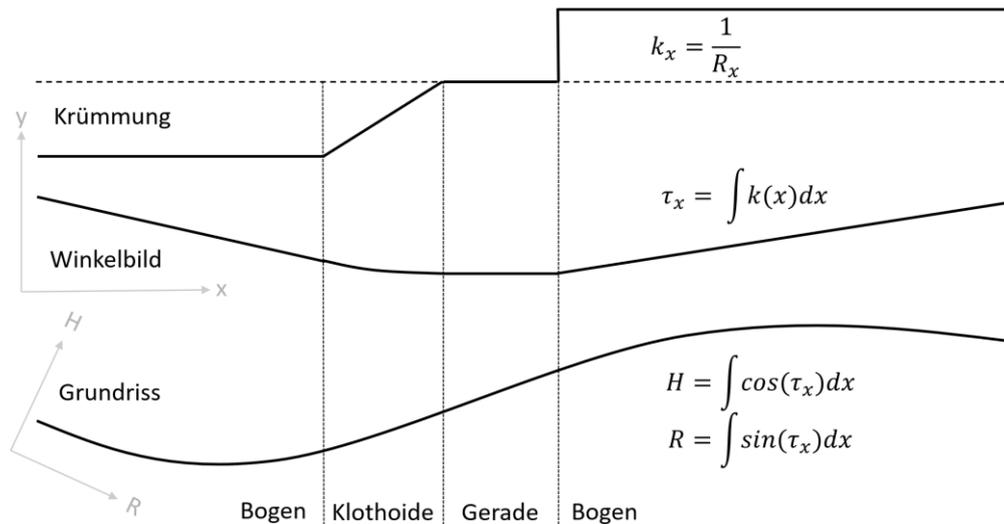


Abb. 4: Trassierung der Gleislage als Krümmung (k), Winkelbild (τ) und Grundriss mit Hochwert (H) und Rechtswert (R)

In der vorliegenden Arbeit dient die Konstruktion der Soll-Gleisachse vor allem der Verortung von Messdaten aus dem FwM. Es wird daher ausschließlich die Lage des Messsystems in Bezug auf die horizontale Abbildung der Strecke betrachtet. Für die Darstellung der Trasse

„... beschränkt man sich auf den Grundriss, also die Normalprojektion der die tatsächliche Gleisachse darstellenden Raumkurve auf die Horizontalebene.“ [LICHTBERGER, 2010]

Als Grundlage für die Berechnung der Lagekoordinaten wird das Krümmungsbild der Strecke genutzt. Über die Abwicklung x lässt sich mit der Formel (2.8) der Tangentenwinkel τ aus der Krümmung k integrieren.

$$\tau(x) = \int_0^x k(x) dx \quad (2.8)$$

Trassierungselemente werden über Achshauptpunkte definiert. Jedes Element verfügt dabei über einen Anfangs- und Endpunkt, denen jeweils ein Hoch- und Rechtswert zugeordnet ist. Verbunden werden diese Punkte über einen Linienzug, welcher sich über die Trassierungsparameter konstruieren lässt. Die Richtung τ einer Geraden an der Position x wird entsprechend der Formel (2.9) dargestellt.

$$\tau(x) = \text{konst.} \quad (2.9)$$

Die Richtungswinkel der Bogenabschnitte lassen sich über die Formel (2.10) berechnen. Diese erhält man durch einfache Multiplikation der Bogenlänge x mit der Krümmung.

	$\tau(x) = xk$		(2.10)
--	----------------	--	--------

Maßgebend für die Berechnung der Richtungswinkel im Bereich der Übergangsbögen ist die Länge L sowie der Anfangs- und Endradius des jeweiligen Elements. Diese werden mittels der Formel (2.1) in die Krümmung k_{anf} und k_{end} überführt. Das Winkelbild einer Klothoide lässt sich anschließend über die Formel (2.11) bestimmen.

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

$$\tau(x) = \frac{k_{end} - k_{anf}}{2L} x^2 + xk \quad (2.11)$$

mit $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$

Die Richtungswinkel eines Blossbogens werden mit der Formel (2.12) berechnet.

$$\tau(x) = (k_{end} - k_{anf}) \times \left[\frac{1}{L^2} x^3 - \frac{1}{2L^3} x^4 \right] \quad (2.12)$$

mit $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$

Der Verlauf des S-förmig geschwungenen Übergangsbogens wird wie bei der Krümmung aus zwei Richtungen entwickelt. Die erste Hälfte lässt sich mit der Formel (2.13) berechnen.

$$\tau(x) = \frac{2k_{end} - k_{anf}}{3L^2} x^3 \quad (2.13)$$

1. Hälfte

mit $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$

Den zweiten Teil des Übergangsbogens erhält man über die Formel (2.14).

$$\tau(x) = (k_{end} - k_{anf})x - \frac{2(k_{end} - k_{anf})}{L^2} (L^2x - Lx^2 + \frac{1}{3}x^3) \quad (2.14)$$

2. Hälfte

mit $\frac{L}{2} \leq x \leq L$

Mit der Integration der Richtungswinkel werden die Koordinaten der Soll-Gleisachse bestimmt. Den Hochwert H_{Geo} erhält man über die Formel (2.15).

$$H_{Geo} = \int_0^L \cos(\tau(x)) dx \quad (2.15)$$

Der Rechtswert R_{Geo} lässt sich über die Formel (2.16) bestimmen.

$$R_{Geo} = \int_0^L \sin(\tau(x)) dx \quad (2.16)$$

Das Ergebnis dieser Integration zeigt den Verlauf der Trasse in der horizontalen Ebene (Grundriss).

2.1.3 Kilometrierung

Im Bereich von bahnspezifischen Anwendungen werden vor allem Kilometerangaben für die Verknüpfung mit der Örtlichkeit eingesetzt. Die Grundlage dafür bildet die Kilometrierungslinie. Diese Achse beschreibt im Allgemeinen den Bezugspunkt zur Eisenbahninfrastruktur und wird als Verständigungsgrundlage aller Fachgewerke gesehen [DB833.1000, 2016]. Sie dient

„...der eindeutigen Ortsangabe, sowie zur Orientierung und Planung von Bau-, Überwachungs-, Erhaltungs- und betrieblichen Maßnahmen.“ [SANDNER, 2012]

2.2 Lokalisierung von Gleislagefehlern

Für die Auswertung der Gleisgeometrie ist die Wahl der richtigen Bezugsebene von Bedeutung. Wie bereits erläutert, müssen Gleisachse und Kilometrierungslinie keine einheitliche Ebene bilden. Der wesentliche Unterschied zeigt sich in der Lagerung der Achsen und der daraus berechneten Positionsinformation (Koordinaten- oder Kilometerangabe). Der Bezug zur Kilometrierungslinie steht dabei in Abhängigkeit zum Ausbau einer Strecke. Demnach ergibt sich ein identischer Verlauf von Gleisachse und Kilometrierungslinie bei eingleisiger Streckenführung. Bei zwei- oder mehrgleisiger Linienführung erfolgt die Kilometrierung über eine Bezugsebene zwischen zwei Gleisachsen.

Der Bezug einer Kilometrierungslinie definiert sich anders als bei der Gleisachse über eine feste Ortsbeschreibung, die sich in der Regel auf eine Betriebsstelle (z. B. Bahnhof) bezieht. Dabei handelt es sich um topografische Knotenpunkte, die in den meisten Fällen auf Weichen- oder Gleisanfänge als auch Streckenwechsel fallen. Der Anfangs- und Endpunkt einer Kilometrierungslinie hat daher meistens einen historischen Hintergrund, der auf dem damaligen zurückgelegten Streckenkilometer beruht. Mit der Anpassung der Streckengeschwindigkeit kommt es in der Regel zu Veränderungen in der Linienführung der Gleisachse. Dabei wird die Länge des Trassierungselements verändert, die zu einem Kilometersprung führt. Diese Information beschreibt eine wesentliche Anforderung an die exakte Verortung der gemessenen Positionsdaten mit der Örtlichkeit. Für die Auswertung der Gleislage muss die abgewinkelte Position aus der DB Inspektionsmessung und dem DB Fahrwegmonitoring auf den Streckenkilometer der Kilometrierungslinie abgebildet werden. Dabei werden Fehl- oder Mehrlängen bestimmt, die als ein Kilometersprung definiert werden und in der Abwicklung der zurückgelegten Wegstrecke berücksichtigt werden müssen. [DB883.1000, 2021]

2.2 Lokalisierung von Gleislagefehlern

Die hohe Genauigkeit der gemessenen inneren Gleisgeometrie erfordert eine ebenso exakte absolute Positionierung der Messsysteme. Das Ergebnis der Gleislagemessung wird dabei ausschließlich über den Streckenkilometer verortet. Dafür werden wie in der Abb. 5 dargestellt, unterschiedliche Systemkomponenten eingesetzt. Das Ziel ist die hochgenaue Verortung der Messdaten aus der Kombination verschiedener Positionsinformationen, welche über einen Zeitstempel miteinander verknüpft sind. Der Positionierungsalgorithmus (4) nutzt dafür die absolut gemessene Koordinate des GNSS-Empfängers (1), den zurückgelegten Weg aus dem Radimpulsgeber (2) sowie die Winkeländerungen (3) aus der Inertialplattform (IMU). Die Ableitung der Winkeländerungen in die Krümmung ermöglicht dabei eine Vergleichbarkeit mit der Referenzkrümmung.

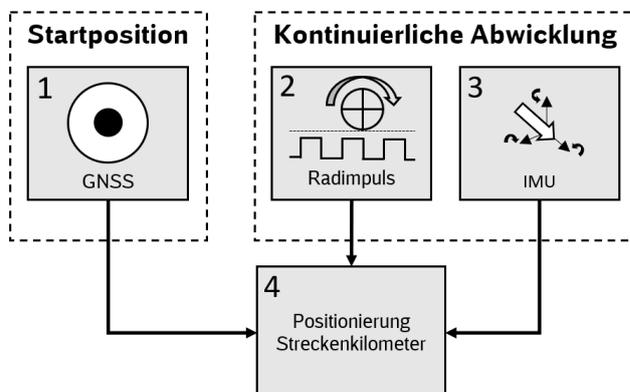


Abb. 5: Positionsbestimmung aus der Kombination von GNSS-Empfänger (1), Radimpulsgeber (2) und IMU (3)

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

Einen absoluten Bezug erhält das Messsystem über die gemessene GNSS-Koordinate. Diese wird ausschließlich für die Lokalisierung der Startposition auf der entsprechenden Gleisachse bzw. Kilometrierungslinie eingesetzt. Die Verarbeitung der GNSS-Informationen basiert auf der im Kapitel 2.2.1 beschriebenen Verortungsmethode. Zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit wird hier der Radimpuls genutzt. Der zurückgelegte Weg über die Abwicklung der Strecke beschreibt die wohl genaueste Methode für die relative Verortung der Messdaten. Über diese wird im Kapitel 2.2.2 der zurückgelegte Weg mit dem Streckenkilometer verknüpft. Die Positionsgenauigkeit aus der Kombination zwischen dem GNSS-Signal und dem Radimpuls zeigt sich über die Vergleichbarkeit mit der Referenzkrümmung. Dabei orientieren sich beide Ansätze an der Koppelortung, die sich aus dem jeweiligen Messwert und den Parametern der Eisenbahninfrastruktur auf Basis der Krümmung ergeben. Über das Kapitel 2.2.3 zeigt sich, dass die kombinierte Verortungsmethode (GNSS, Radimpuls und Referenzkrümmung) eine hochgenaue Positionierung der Gleislagedaten erlaubt.

2.2.1 Verknüpfung von GNSS-Daten mit dem Streckenkilometer

Eine wesentliche Anforderung des Monitoringsystems liegt in der Verknüpfung der ALB mit der Eisenbahninfrastruktur (Gleisachse). Wie bereits im Kapitel 3.2.2 erläutert verfügt das FwM über einen GNSS-Empfänger, über den eine Verortung der Messdaten (Soll-Gleisachse) realisiert (Map Matching) wird. Die GNSS-Information dient dabei ausschließlich der Stationierung bzw. Bestimmung eines Startkilometers. Für die Berechnung der Startposition wird vorausgesetzt, dass die gemessenen GNSS-Koordinaten und die geometrischen Streckenelemente in einem identischen Bezugssystem abgebildet werden. Die Transformation der Koordinaten wird daher nicht weiter erläutert. Mit der gemessenen GNSS-Koordinate wird eine Position bestimmt, die nicht der Gleisachse folgt. Jedoch ermöglicht diese Abweichung eine Genauigkeitsbetrachtung, die laut Hersteller des GNSS-Empfängers im Meterbereich (Tabelle 2) liegt. Für die satellitengestützte Verortung des Messsystems bietet der GNSS-Empfänger neben den bekannten Satellitensystemen GPS, Glonass und Galileo verschiedene Genauigkeits-Modifikationen an.

Tabelle 2: Konfigurationseinstellungen des GNSS-Empfängers der Firma Precise Positioning Management (PPM) am Monitoringsystem des RAILab 3 [PPM, 2020]

Monitoring-system	Satellitensysteme		Genauigkeit der Lage [m]			Abtastung [Hz]
			GNSS	SBAS ¹	DGPS ²	
RAILab 3	GPS	L1 + L2	1,3	0,6	0,4	1 (max. 20)
	Glonass	L1 + L2				
	Galileo	E1 + E5				

Die Differenz zur Soll-Gleisachse wird als absoluter Fehler betrachtet, der über den Horizont verteilt wird. Die Genauigkeit der Messung unterliegt vor allem den Voraussetzungen der GNSS-Positionierung [SANDNER, 2012]. Unter Berücksichtigung dieser können wie in der Abb. 6 dargestellt, die Abweichungen zwischen der Antennenposition (Fahrzeug) und der Soll-Gleisachse berechnet und dem Streckenkilometer zugeordnet werden.

¹ Korrekturdaten-Übertragung mittels geostationärer Satelliten

² Korrekturdaten mittels Funkübertragung

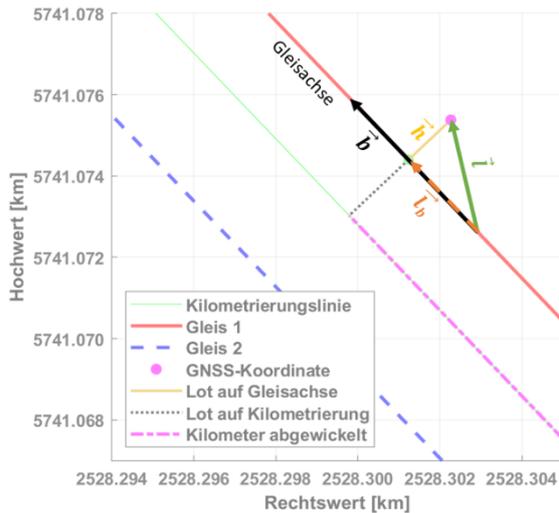


Abb. 6: Verortung des Streckenkilometers im DB-Ref Koordinatensystem über den Bezugspunkt zur Gleisachse und Kilometrierungslinie

Die Grundlage für die Verortung des Streckenkilometers über die GNSS-Koordinate bildet die Konstruktion der Bezugslinien. Diese wurden bereits im Kapitel 2.1 mit der Gleisachse und der Kilometrierungslinie erläutert. Die Abbildung der Achsen erfolgt hier im DB-Ref-System. Mit dieser Darstellung lassen sich die gemessenen GNSS-Koordinaten mittels einer orthogonalen Projektion auf die jeweilige Achse verorten und der Streckenkilometer bestimmen. Ähnlich wie bei der Sehnenmessung im Kapitel 3.1.2 lässt sich der Lotfußpunkt entsprechend dem Beispiel in der Abb. 6 berechnen. Dafür wird der Vektor \vec{l} senkrecht auf den Vektor \vec{b} projiziert. In einer ebenen Abbildung lassen sich so zwei Bedingungen ableiten. Eine Anforderung beschreibt der Vektor \vec{l}_b , der einen Teil des Vektors \vec{b} darstellen muss. Mit dem Skalierungsfaktor x lässt sich so mit Hilfe der Formel (2.17) der Skalierungsvektor berechnen.

$$\vec{l}_b = x\vec{b} \quad (2.17)$$

Ein weiterer Zusammenhang wird durch das senkrechte Lot des Vektors \vec{h} auf den Vektor \vec{b} aufgezeigt. Dieses wird durch das Skalarprodukt bestimmt, welches der in Formel (2.18) dargestellten Bedingung folgt.

$$\vec{h}\vec{b} = 0 \quad (2.18)$$

Durch die Umstellung und Auflösung der in Formel (2.17) und Formel (2.18) beschriebenen Bedingungen, erhält man über die Formel (2.19) den projizierten Lotfußpunkt.

$$\vec{l}_b = \frac{\vec{l}\vec{b}}{|\vec{b}|^2}\vec{b} \quad (2.19)$$

Für die Berechnung des Lotfußpunktes L_p muss der Richtungsvektor \vec{b} sowie der Aufpunkt \vec{b}_0 gegeben sein. Dabei dienen \vec{L}_p und \vec{b}_0 entsprechend der Formel (2.20) als Ortsvektoren.

$$\vec{L}_p = \vec{b}_0 + \frac{(\vec{L}_p - \vec{b}_0)\vec{b}}{|\vec{b}|^2} \quad (2.20)$$

Das Ergebnis der Formel (2.20) beschreibt den Lotfußpunkt des Ortsvektors auf der Gleisachse (Horizontale Ebene). Über diesen lässt sich eine Kilometerangabe zuordnen. Für die exakte Position des Streckenkilometers muss jedoch der berechnete Lotfußpunkt (Gleisachse) auf die Kilometrierungslinie bezogen werden. Das Lot von Gleisachse zur

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

Kilometrierungslinie spielt jedoch lediglich im Bereich von Bögen und Übergangsbögen eine Rolle. Es kommt hier zu unterschiedlichen Längen zwischen den Trassierungselementen auf der Gleisachse und der Kilometrierungslinie. Der Anspruch an die Positionierung des Messsystems liegt dabei auf der Genauigkeit des verorteten GNSS-Streckenkilometers.

2.2.2 Stationierung der Messsysteme über die Abwicklung der Wegstrecke

Im Allgemeinen werden Radimpulsgeber für die Überwachung der Fahrzeuggeschwindigkeit eingesetzt. Durch die Bewegung des Fahrzeugs und Drehung des Rades werden Signale gemessen, welche proportional zur Drehgeschwindigkeit sind. Mit der Auswertung mehrerer aufeinanderfolgender Impulse lässt sich aus der Formel (2.21) die Fahrzeuggeschwindigkeit v berechnen. Dafür werden die Umdrehungsfrequenz u und der Raddurchmesser q betrachtet.

$$v = q\pi u \quad (2.21)$$

Die Fahrzeuggeschwindigkeit beschreibt den zurückgelegten Weg über die Zeit, welcher für die Verortung der relativen Position auf der Gleisachse eingesetzt wird. Der zurückgelegte Weg wird hier durch die Radumdrehungen bestimmt und mit dem Radumfang multipliziert. Die Abwicklung des Kilometers über den zurückgelegten Weg wird dabei unter anderem durch den Verschleiß an den Rädern verfälscht. Dies führt zu einer fehlerhaften Darstellung der Position. Durch die regelmäßige Überprüfung und Anpassung des Raddurchmessers kann dieser Effekt jedoch nahezu eliminiert bzw. im Zuge der Nachverortung, durch eine Maßstabskorrektur an der Wegstrecke, korrigiert werden. Neben dem Raddurchmesser kann es ebenfalls durch das Schlupfen der Räder, z. B. in Bögen, zu einer fehlerhaft abgewickelten Wegstrecke kommen. Dabei erfährt das bogenäußere Rad einen größeren Radius als das bogeninnere. Es kommt zu einer Längendifferenz im Laufweg beider Räder. Diese kann in Abhängigkeit vom Radius durch die Profilform eines Rades ausgeglichen werden, jedoch kann dies

„... in engen Radien (200-400 m) nicht mehr ausreichen, dann beginnt das innere Rad zu schlupfen, weil die Räder über die Achse fest verbunden sind und weil wegen der Bogen Fliehkräfte das Innenrad gegenüber dem Außenrad entlastet wird.“ [LICHTBERGER, 2010]

Mit der Verortung über den Streckenkilometer sind Kilometersprünge zu berücksichtigen. Diese sind ein wesentlicher Bestandteil der Kilometrierungslinie und stellen daher eine hohe qualitative Anforderung an die Verortung des hier behandelten Messsystems. Kilometersprünge werden in einem beliebigen und dem eigentlichen Zweck dienendem Punkt definiert. Sie beschreiben vor allem Unterbrechungen in der Kilometerangabe und entstehen bei Veränderungen am Streckenverlauf. An dieser Station werden Informationen aus dem ankommenden und abgehenden Kilometer verknüpft. Dabei ist laut Richtlinie folgendes zu beachten:

„Entfernungen aus Kilometerangaben dürfen nur unter Berücksichtigung der Kilometriersprünge berechnet werden.“
[DB833.1000, 2016]

Unter Berücksichtigung der Kilometersprünge sowie den Einflüssen aus der Radumdrehung, stellt die Abwicklung des Streckenkilometers die wohl einfachste, aber auch zuverlässigste Methode der Verortung dar.

2.2.3 Verortung der Messsysteme über den Streckenkilometer der Referenzkrümmung

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 aufgezeigt, erlaubt das Krümmungsbild eine Verknüpfung zwischen den Trassierungselementen und dem Kilometer einer Bahnstrecke. Über die geplante Krümmung lassen sich daher die gemessenen bzw. aus den Winkeländerungen abgeleiteten Krümmung vergleichen. Diese Winkeländerungen werden in moderne Messsystemen über Inertialplattformen bestimmt, die neben den Winkeln auch Beschleunigungen in x-, y- und z-Richtung messen. Das Krümmungsbild lassen sich jedoch nur aus den Winkeländerungen um die z-Achse, dem Gier-Winkel berechnen. Aus der Winkeldifferenz φ und der Zeit t lässt sich daher mit Hilfe der Formel (2.22) die Krümmung k bestimmen.

$$k = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.22)$$

Einen örtlichen Bezug erhält die Krümmung durch die Verknüpfung zur Kilometrierung. Mit der Abwicklung des Krümmungssignals werden typische Signalformen der Bahnstrecke erkannt, welche den Trassierungsmerkmalen der Referenzkrümmung zugeordnet werden können. Eine wesentliche Anforderung der IMU bezieht sich dabei auf die Abtastrate und Genauigkeit. Über diese lassen sich die Eigenschaften der Eisenbahnstrecke bewerten. Dafür müssen die gemessenen Winkeländerungen einer absoluten Position zugeführt werden. Die Grundlage dafür bilden die im Kapitel 2.2.1 und im Kapitel 2.2.2 beschriebenen Verortungsmethoden.

Mit dem DB Fahrwegmonitoring und der DB Inspektionsmessung werden unterschiedliche Ziele der Gleislagemessung verfolgt. Diese zeigen sich in der Ausrüstung der Messsysteme. Dabei werden unterschiedliche Anforderungen an die Systemkomponenten und die Qualität der Messung gestellt. Aktuell wird das DB Fahrwegmonitoring nur zur Beurteilung der Längshöhe eingesetzt. Das Ergebnis der DB Inspektionssysteme erlaubt hingegen die Beurteilung der im Kapitel 3.1.2 erläuterten Parameter der inneren Gleisgeometrie. Unterschiede lassen sich ebenfalls in der Genauigkeit der verbauten Inertialplattformen aufzeigen. Die wichtigsten Systemeigenschaften bzw. Unterschiede werden in der Tabelle 3 gegenübergestellt.

Tabelle 3: Anforderung der IMU für die Inspektionsmessung und das Fahrwegmonitoring [MEMSIC, 2011; iMAR, 2014]

IMU	Auflösung [°/s]	Messunsicherheit [°/√hr]	Messbereich [°/s]	Abtastung [Hz]
Inspektion	< 0,001	< 0,0012	± 400	300
Monitoring	< 0,020	< 4,5000	± 200	25

Die in der Tabelle 3 aufgezeigten Systemunterschiede lassen sich anhand der abgeleiteten Krümmungen bewerten. Diese wurde wie bereits erläutert, aus den Winkeländerungen der IMU bestimmt. Über das Beispiel der Abb. 7 lassen sich sehr ähnliche Amplitudenverläufe zwischen der DB Inspektionsmessung (blau) und dem DB Fahrwegmonitoring (grün) aufzeigen. Der jeweils dargestellte Krümmungsverlauf erlaubt darüber hinaus eine Vergleichbarkeit mit der Referenzkrümmung (rot).

Das Krümmungsbild der DB Inspektionsmessung zeigt in der Abb. 7 gegenüber dem DB Fahrwegmonitoring eine deutlich höhere Abtastrate und Auflösung der Messwerte, was sich vor allem in einer höheren Empfindlichkeit und Veränderung der Messdaten über den Streckenkilometer zeigt. Dabei lassen sich den verschiedenen Krümmungsverläufen unterschiedliche

2 Grundlagen zur Verortung von Störstellen im Eisenbahnoberbau

Kilometrierungen zuordnen, die sich aus der Kombination der abgewickelten Wegstrecke und dem Startkilometer entsprechend der gemessenen GNSS-Koordinate zusammensetzt.

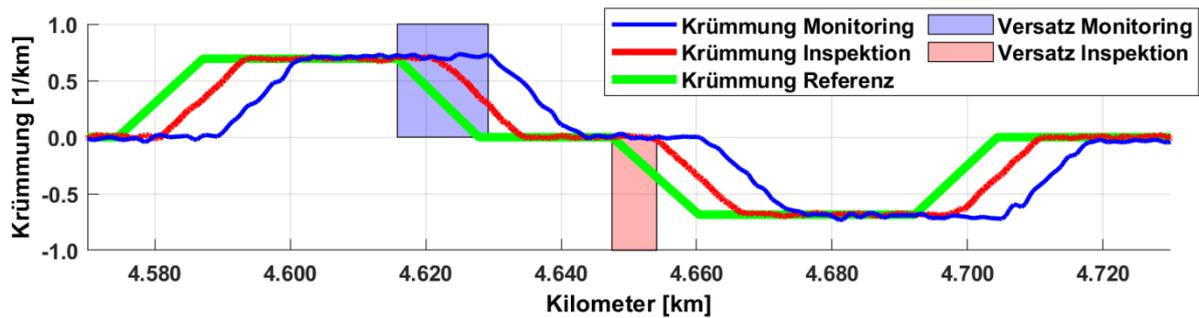


Abb. 7: Verortung der Monitoring- und Inspektionsdaten über die Korrelation mit der Referenzkrümmung.

Mit der Darstellung der Krümmungsbänder lässt sich die hohe Qualität der Gleislagemessung verdeutlichen. Negative Krümmungswerte zeigen einen Linksbogen, positive Werte hingegen einen Rechtsbogen. Das Ergebnis der DB Inspektionsmessung (rot) sowie die des DB Fahrwegmonitoring (blau) zeigt eine detaillierte Darstellung des jeweiligen Krümmungssignals und erlaubt so eine Vergleichbarkeit mit der Referenz (grün). Die gemessene Krümmung wird durch die ausgefahrene Gleislage und den Versatz des Messsystems zur Referenzkrümmung bestimmt. Als Versatz wird die Abweichung aus der Überlagerung der Krümmungswerte zum Referenzsignal definiert, das sich über den Streckenkilometer darstellen lässt. Der Versatz wird mittels einer Kreuzkorrelation berechnet. Diese Differenz lässt sich wie im Kapitel 3.6.4 beschrieben aus den gemessenen Krümmungsbildern der DB Inspektionsmessung sowie dem DB Fahrwegmonitoring bestimmen.

Die Abb. 7 zeigt ein Beispiel für die Korrektur der Krümmungswerte über den abgewickelten Kilometer der Strecke. Zwischen dem DB Fahrwegmonitoring und der Referenzkrümmung wird ein Versatz von 12,8 m berechnet. Als Orientierung für die Visualisierung dieser Differenz wird das Ende des Rechtsbogens am Streckenkilometer 4,616 km bestimmt. Die blau schraffierte Fläche zwischen 0 und 1 entlang der x-Achse (Kilometer) zeigt den Krümmungsversatz. Die Abweichung aus der DB Inspektionsmessung zeigt sich hingegen über die rot eingefärbte Fläche der Krümmungsamplitude zwischen 0 und -1. Diese wird über den Anfang eines Linksbogens auf Höhe des Streckenkilometers 4,648 km hervorgehoben und mit einer Abweichung von 6,4 m entlang der x-Achse dargestellt.

Das Abwicklungsformat beider Messsysteme wird vor allem durch eine fehlerhafte Startposition bestimmt, die sich aus der gemessenen GNSS-Koordinate (Kapitel 2.2.1) ergibt und sich auf die abgewickelte Wegstrecke entlang der x-Achse auswirkt. Eine fehlerhafte Positionierung auf Basis des Abwicklungsmaßstabs, bedingt durch den im Kapitel 2.2.2 erläuterten Verschleiß am Radumfang, wird in beiden Fällen vernachlässigt. Die in der Abb. 7 dargestellte Verortungsmethode und das erzielte Verortungsergebnis erlaubt eine für die Einzelfehlercharakterisierung ausreichend hohe Genauigkeit, um die analysierten Einzelfehler der Örtlichkeit zuzuordnen.

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Die immer schnellere Automatisierung von Messsystemen führt im Bereich Gleislagemessung zu immer neuen Hard- und Softwarelösungen. Im Vordergrund steht die Bestimmung der inneren und äußeren Gleisgeometrie [DB824.8110, 2020]. Über diese lassen sich geometrische Abweichungen zwischen der geplanten und ausgefahrenen Trassierung bestimmen. Dabei werden vor allem Deformationen am Eisenbahnoberbau gemessen, interpretiert und beurteilt. Das Ziel dieser Systeme ist die schnelle und eindeutige Identifizierung von Störstellen, die sich auf die Qualität und Verfügbarkeit der Fahrbahn des Eisenbahnoberbaus auswirken. Im folgenden Kapitel werden daher die Messsysteme zur Aufnahme der inneren Gleisgeometrie, die Signalverarbeitung sowie der Bewertungsprozess der DB dargestellt.

3.1 Parameter der Gleislagegeometrie

Um eine Bewertung der Gleislage vorzunehmen, müssen geodätische und geometrische Parameter einer Eisenbahnstrecke definiert werden. Diese orientieren sich nach den geltenden Anforderungen von Normen und Richtlinien, die durch die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) oder Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) zu überwachen sind. Entsprechend der Entwurfsgeschwindigkeit werden daher Parameter festgelegt, welche die Linienführung der Trasse bestimmen. Laut Regelwerk wird

„... die Auswahl von Parametern der Linienführung unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter, technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte.“
[DB800.0110, 2015]

bewertet, die bei der späteren Bewertung der Gleislagequalität als Referenz verwendet wird. Die festgelegten Parameter der Gleislage werden über die bereits erwähnte äußere (absolute) und innere (relative) Gleisgeometrie beurteilt und nach Richtlinie

„Zur qualitativen geodätischen und geometrischen Bewertung von Gleisen und Weichen...“ [DB883.9010, 2020]

eingesetzt. Dabei orientiert sich das jeweils angewendete Messverfahren an der definierten Aufgabenstellung. Das Ergebnis der relativen Gleislagemessung erlaubt dabei eine höhere Genauigkeit als die der absoluten Messung.

3.1.1 Äußere Gleisgeometrie (absolut)

Die Parameter der „äußeren Geometrie“ werden in der Norm [EN13231, 2013] als absolute Gleislage bezeichnet. Diese Parameter beschreiben eine Raumkurve. Anders als bei der „relativen Geometrie“ wird die Linienführung der Achse über die Koordinaten (x, y, z) definiert. Diese orientieren sich an einem übergeordneten Festpunktfeld, das nach Richtlinie einen

„... Bezug zu Zwangspunkten der Trassierung (z. B. Profillfreiheit) und die Stabilität des Gleises.“ [DB883.9010, 2018]

beschreibt. Als Zwangspunkte werden die geometrischen Hauptpunkte der Trasse bezeichnet. Diese Punkte bilden einen absoluten Bezugspunkt im Raum und beschreiben den Übergang zwischen den verschiedenen Trassierungselementen. Sie dienen der Absteckung sowie der Visualisierung der Gleisachsen. Durch die Konstruktion der jeweiligen Trassierungselemente können die Achshauptpunkte verdichtet und der Trassenverlauf als Koordinate verortet

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

werden. Die Berechnung der Absteckkoordinaten und somit der räumliche Verlauf der Trasse wird im Kapitel 2.1.2 vertieft. Um den Zusammenhang zwischen Ist-Gleislage, Soll-Gleisachse und dem Festpunktfeld darzustellen, wird über die Abb. 8 ein Bezug zwischen allen drei Systemen veranschaulicht. [STRÜBING, 2015]

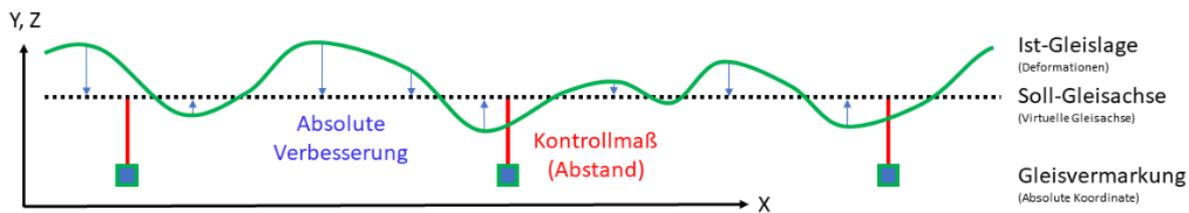


Abb. 8: Beispiel der absoluten Gleislagemessung in einem linearen Trassierungselement für die Gradiente und horizontale Lage

Die Bezugspunkte der absoluten Gleislagemessung sind die Gleisvermarkungspunkte. Die Lage und Höhe der virtuellen Gleisachse wird hier über ein Kontrollmaß bzw. den Abstand zur Gleisvermarkung bestimmt. Entsprechend der Ordinate Y wird in der Abb. 8 der Grundriss der Gleisachse dargestellt, welcher die Lage des Trassierungselements zeigt. Über die Ordinate Z wird hingegen die Gradiente der Trasse abgebildet. Deformationen am Fahrweg werden als Ist-Gleislage definiert, die die ausgefahrene Gleisgeometrie widerspiegelt und in Verbindung mit der geplanten bzw. Soll-Gleislage eine Abweichung darstellt. Über diese Differenz lässt sich die Gleislage bewerten und horizontale Verschiebungen oder vertikale Hebungen im Gleis bestimmen. In der Abb. 8 werden diese als absolute Verbesserungen bezeichnet.

Die Gleisvermarkungspunkte beschreiben ebenfalls die Schnittstelle für das Langsehnenmessverfahren. Wie bei der relativen Gleislage im Kapitel 3.1.2 wird über diese Methode der Normalabstand zwischen Gleisachse und Sehne berechnet. Fehler in der absoluten Gleislage lassen sich auch über die Parameter der inneren Gleisgeometrie erkennen. Diese werden vor allem durch die Längs- und Pfeilhöhe dargestellt und lassen sich wie im Kapitel 3.4 erläutert durch Filterfunktionen aus der absoluten Gleislage berechnen.

3.1.2 Innere Gleisgeometrie (relativ)

Der Begriff „*Innere Gleisgeometrie*“ wird im Regelwerk der Deutschen Bahn verwendet und beschreibt die Eigenschaften der relativen Gleislage. Diese richtet sich im Allgemeinen an die Parameter einer Raumkurve, welche sich ausschließlich auf die Abwicklung der geometrischen Formen der Trassierungselemente entlang dieser Linie beziehen. Es werden Parameter definiert, die den Fahrkomfort und die Sicherheit einer Eisenbahnstrecke bezogen auf die Fahrdynamik zeigt. Als Messgrößen werden laut Norm [EN13231, 2013] die Parameter

„*Spurweite, Richtung (Pfeilhöhe), Längshöhe, Verwindung und gegenseitige Höhenlage*“ [EN13231, 2013]

definiert. Die Längshöhe stellt über die Zeit betrachtet, die sich am schnellsten veränderliche Größe der Gleislage dar. Überwacht wird dieser Parameter durch ein Sehnenmessverfahren, welches sich an der Pfeilhöhenmessung orientiert. Maßgebend für dieses Verfahren sind die drei Kontaktpunkte zur Schiene. Über diese lässt sich der Begriff Dreipunktsignal herleiten. Je nach Messsystem können Gleislageveränderungen optisch oder mechanisch bestimmt werden. Das Prinzip der Messung ist jedoch bei allen Ansätzen vergleichbar. Die Methode ermöglicht vor allem eine Instandsetzung der ausgefahrenen Gleislage, auch ohne die Verwendung absoluter Bezugspunkte. Die entsprechende Auswertemethode geht auf das von Alexander

Nalenz und Max Höfer entwickelte gleichnamige Verfahren zurück [RETSCHER, 1998; RUDOLPH, 1941]. Die Abb. 9 zeigt das Prinzip der Pfeilhöhenmessung am Beispiel eines Kreisbogens.

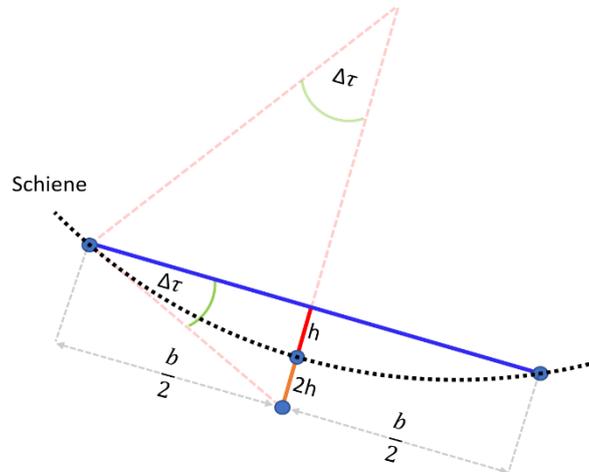


Abb. 9: Prinzip der Pfeilhöhenmessung vgl. [HANKER, 1952]

Die in der Abb. 9 dargestellte Skizze betrachtet den Aufbau einer Sehnenmessung mit gleichem Teilungsverhältnis. Mit der Pfeilhöhenmessung werden in Abhängigkeit zur Bogenlänge die Winkeländerungen bestimmt [HANKER, 1952]. Diese orientieren sich an einer hohen Formtreue benachbarter Punkte und zeigen die Trassierungseigenschaften der Bahnstrecke. Aus der Pfeilhöhe h und dem Teilungsverhältnis der Sehne b lassen sich hier entsprechend der Formel (3.1) die jeweiligen Tangentenwinkel τ berechnen.

$$\Delta\tau = \frac{4h}{b} \quad (3.1)$$

Dieser Winkel muss im Verhältnis zur Soll-Gleislage betrachtet werden. Zeichnerisch lässt sich die Soll-Gleislage über den Krümmungsverlauf darstellen. Mit der Integration der Krümmung wird die Visualisierung der Trasse als Winkelbild ermöglicht. Mit der Aneinanderreihung der Winkel und dem Abtragen von Differenzen zwischen dem Winkelbild und der Entwurfslinie wird die Summenlinie (Abstandsbild) bestimmt. Der Entwurf zeigt hier die

„... theoretisch richtige bzw. eine ideale relative Gleislage...“ [RETSCHER, 1998]

der Trasse. Über die Abweichungen von der Summenlinie zur Auftragslinie lassen sich die Hebe- und Verschiebewerte zur Wiederherstellung der ausgefahrenen Gleislage bestimmen, so dass ein Bogen mit stetiger Krümmung gestopft werden kann. Generell stellt das Winkelbildverfahren nur ein Näherungsverfahren dar. In diesem Punkt betrachtet die Theorie die Strecken aus neuer und alter Gleislage als nahezu identisch. [RETSCHER, 1998]

Mit der kontinuierlichen Verschiebung der Sehne wird das Prinzip der Wandersehnenmessung verfolgt. Das Ergebnis dieser Messung wird bei der DB Netz AG als Dreipunktsignal deklariert. Ursprünglich wurde diese Signalform durch die Gleismesstriebzüge (GMTZ) bestimmt. Einen wesentlichen Einfluss hat das Teilungsverhältnis der Sehne auf das Dreipunktsignal. Durch die Übertragungsfunktion wird hier die Wellenlänge beeinflusst [WOLTER, 2012], welche in dieser Arbeit jedoch nicht näher bewertet wird. Aktuelle Messsysteme setzen daher auf eine unterschiedlich lange Sehnenteilung, die eine günstigere Auflösung der Wellenlänge erlaubt.

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Die Messung der Längshöhe und Pfeilhöhe erfolgt hier über den gleichen Messaufbau, jedoch mit unterschiedlichem Teilungsverhältnis. Die Abb. 10 zeigt die Berechnung der Pfeilhöhe h unter Berücksichtigung unterschiedlich langer Sehnenteile. Die Variablen c und d beziehen sich daher auf das Teilungsverhältnis der Sehne. Als H_n werden wiederum die gegebenen Höhen bezeichnet, die sich aus der abgewickelten Wegstecke des Gleislagesignals der Längshöhe ergeben. Die Höhenunterschiede zwischen H_1 , H_2 und H_3 werden durch die Vektoren \vec{b} und \vec{l} bestimmt, die im Kapitel 2.2.1 ebenfalls für die orthogonal Projektion verwendet werden.

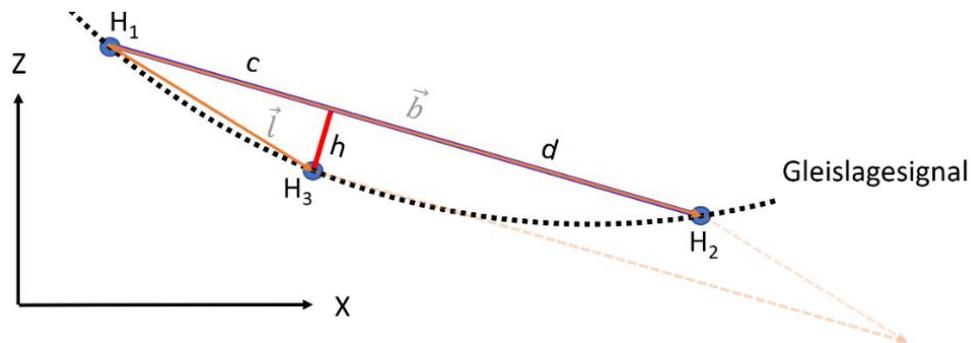


Abb. 10: Darstellung der Pfeilhöhenmessung moderner Wandersehenmessverfahren mit unterschiedlicher Sehnenteilung

Das Dreipunktsignal der Wandersehenmessung lässt sich aus der Flächenformel eines in der ebenen liegenden konvexen Vierecks berechnen, welches hier den Eigenschaften eines Parallelogramms folgt. Bestimmt wird dieses durch die gleich langen und parallel zueinander liegenden Seiten sowie durch die gegenüberliegenden identischen Winkel. Entsprechend dem Vektorprodukt von \vec{b} und \vec{l} lässt sich mit Hilfe der Formel (3.2) der Flächeninhalt A bestimmen.

$$A = |\vec{l}\vec{b}| \quad (3.2)$$

Die Fläche eines Parallelogramms lässt sich ebenfalls aus der Beziehung zwischen Basislinie und Höhe berechnen. In der Abb. 10 wird die Basis durch den Vektor \vec{b} bestimmt, der hier die Sehnenlänge darstellt und in Verbindung mit der Pfeilhöhe h die Geometrie beschreibt. Der Flächeninhalt der Parallelogramms lässt sich daher auch mit Hilfe der Formel (3.3) berechnen.

$$A = |\vec{b}|h \quad (3.3)$$

Mit der Gleichsetzung des Flächeninhaltes von A und Auflösung nach der Höhe h , wird über die Formel (3.4) die Grundlage für die Pfeilhöhenmessung dargestellt.

$$h = \frac{|\vec{l}\vec{b}|}{|\vec{b}|} \quad (3.4)$$

Die Pfeilhöhenberechnung wird durch das Teilungsverhältnis der Sehne von c zu d bestimmt und durch die Länge von \vec{b} begrenzt. Am Teilungspunkt wird die orthogonale Abweichung h , der Abstand zur Schiene, gemessen bzw. berechnet. Unter der Bedingung des Pythagoras lässt sich die Pfeilhöhe entsprechend der Formel (3.5) berechnen.

$$h = \left| \frac{H_2 - (c + d)H_1}{c + d} \right| \text{ mit } b = c + d \quad (3.5)$$

3.2 Komponenten und Funktionsweise der Messsysteme

Mit der Umstellung der Variablen aus dem Teilungsverhältnis von c und d sowie den Höhen von H_1 , H_2 und H_3 erhält man mit Hilfe der Formel (3.6) das Dreipunktsignal D_z der Längshöhe.

$$D_z = h = H_3 - \frac{c}{c+d} H_1 - \frac{d}{c+d} H_2 \quad (3.6)$$

Die Grundlage des Dreipunktsignals der DB bildet das formtreu gemessene Gleislagesignal, welches die ausgefahrene Gleisgeometrie darstellt. Der Unterschied zwischen dem formtreuen und dem Dreipunktsignal wird im Kapitel 3.4 näher erläutert.

3.2 Komponenten und Funktionsweise der Messsysteme

Für die Bewertung von Einzelfehlern und Bestimmung der Fehlerursache einer mangelhaften Gleislage werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Signaltypen ausgewertet. Einerseits wird die Beurteilung von Einzelfehlern nach dem Regelwerk der DB auf Basis des Dreipunktsignals bewertet, das hier eine Vergleichbarkeit zwischen der DB Inspektionsmessung und dem DB Fahrwegmonitoring erlaubt. Andererseits wird die Charakterisierung des Einzelfehlers durch die Frequenzanalyse der gemessenen Achslagerbeschleunigungen erzielt, das in dieser Arbeit erstmalig kombiniert wird. Mit dem DB FwM und der DB IsM werden unterschiedliche Anforderungen an eine Gleislagemessung gestellt. Diese lassen sich über die Komponenten, das Messverfahren und die gemessenen Größen einteilen. In der Abb. 11 werden die wesentlichen Bestandteile des DB Inspektions- und DB Monitoringsystems hervorgehoben.

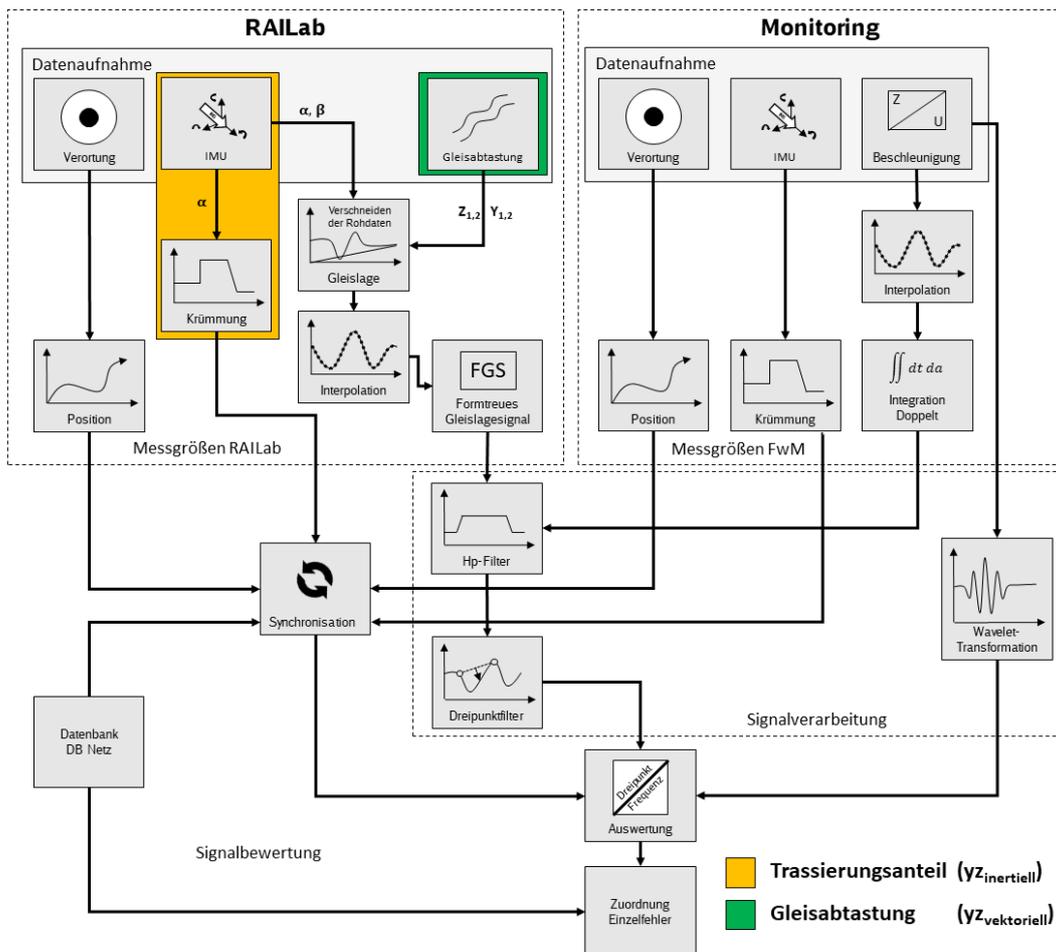


Abb. 11: Vergleich der Mess- und Signalverarbeitungsabläufe der DB Inspektionsmessung („RAILab“) und des DB Fahrwegmonitorings („Monitoring“)

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Mit der Abb. 11 wird die Verknüpfung zwischen den Hardwarekomponenten und der Signalverarbeitung dargestellt. In der Tabelle 4 werden die wesentlichen Bestandteile der Messsysteme in die Bereiche Datenaufnahme, Messgrößen und Signalverarbeitung unterteilt.

Tabelle 4: Beschreibung der in Abb. 11 dargestellten Systemmodule

	Modul	Funktion	Verfahren	Kapitel
Daten- aufnahme	Gleisabtastung	Messung von absoluten Differenzen zwischen Schiene und Messrahmen durch das DB Inspektionssystem	RAILab	3.2.1
	Beschleunigung	Messung von Beschleunigungen an den Achslagern von DB Regel- und DB Inspektionsfahrzeugen	Nur RAILab 3, FwM	3.2.2
	Verortung	Positionsbestimmung aus der Verknüpfung von GNSS-Daten und der Fahrzeuggeschwindigkeit	RAILab, FwM	2.2.1 2.2.2
	IMU	Drehraten- und Beschleunigungsmessung in X-, Y- und Z-Richtung	RAILab, FwM	2.2.3
Messgrößen	Interpolation	Auflösung der Daten in das DB Inspektionsformat	RAILab, FwM	3.2
	Formtreues Gleislagesignal	DB Inspektionssignal der ausgefahrenen Gleislage	RAILab	3.2.1
	Gleislage	Verarbeitung der Gleisabtastung und der Trassierungseinflüsse zu einem Gleislagesignal	RAILab	3.2.1
	Integration Doppelt	Umwandlung der Achslagerbeschleunigungen in den Wegbereich	FwM	3.4
	Krümmung	Ableitung der Winkeldifferenzen in den Krümmungsverlauf der Trasse	RAILab, FwM	2.1.1
	Position	Stationierung durch die Abwicklung der zurückgelegten Wegstrecke und der gemessenen GNSS-Koordinaten	RAILab, FwM	2.2
Signal- verarbeitung	Hochpass-Filter / Bandpass-Filter	Transformation des formtreuen Gleislagesignals in ein bandpassgefiltertes Gleislagesignal	RAILab, FwM	3.4.1
	Dreipunktfiter	Transformation des Bandpass-Signals in ein Dreipunktsignal	RAILab, FwM	3.4.2
	Wavelet-Transformation	Darstellung der Frequenzinhalte aus den Achslagerbeschleunigungen des DB Fahrwegmonitorings	FwM	3.6.3
Signal- bewertung	Datenbank DB Netz	Infrastrukturdaten der DB Netz AG	Einzelfehlermethode	2.1
	Synchronisation	Verknüpfung der Positionsdaten mit der Krümmung	Einzelfehlermethode	2.2
	Auswertung	Verknüpfung und Interpretation der analysierten Daten	Einzelfehlermethode	4.2.2
	Zuordnung Einzelfehler	Charakterisierung der Einzelfehler	Einzelfehlermethode	4.2.3

Mit der Darstellung der Komponenten werden die Unterschiede in Bezug auf die Gleislagemessung deutlich. Die Datenaufnahme der DB Inspektionmessung basiert auf einem optisch-inertialen Lösungsansatz, der im Kapitel 3.2.1 erläutert wird. Das DB Fahrwegmonitoring setzt hingegen auf die Messung von hochfrequent abgetasteten Achslagerbeschleunigungen, welche im Kapitel 3.2.2 beschrieben werden.

3.2.1 Gleislagemessung RAILab (DB Inspektionsmessung)

Das RAILab Inspektionssystem ermöglicht die Messung aller im Kapitel 3.1.2 aufgeführten Parameter der inneren Gleisgeometrie. Für die Bewertung von Einzelfehlern wird jedoch nur das Dreipunktsignal der Längshöhe betrachtet. Die Grundlage dafür liefert das formtreue gemessene Gleislagesignal, welches hier die ausgefahrene Gleisgeometrie darstellt. Dieses wird durch die Gleisabtastung $y_{\text{vektoriell}}$ mittels eines Lasers und den Trassierungsanteil $y_{\text{inertuell}}$, der sich aus den Winkeländerungen der Inertialmessung zusammensetzt bestimmt. Betrachtet man ausschließlich die Gleisabtastung des Inspektionssystems, wird diese mittels eines optischen Laserschnittverfahrens durchgeführt. Bezugspunkt dieser Messung ist die Position der Messköpfe am Messrahmen des jeweiligen Drehgestells. Gemessen werden die Abstände zwischen der entsprechenden Schiene und dem Messrahmen in vertikaler (z) und lateraler (y) Richtung. Der Messrahmen wird über einen absoluten Bezugspunkt im Fahrzeug definiert, der über einen Vektor mit dem Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems (FKS) verknüpft ist. Über diesen Abstand erhalten alle gemessenen Gleislageveränderungen einen absoluten Bezug zum FKS. Das Fahrzeugkoordinatensystem wird in der [EN14363, 2016] beschrieben. Die x-Achse orientiert sich an der abgewickelten Wegstrecke des Fahrzeugs. Nach unten gerichtet wird die z-Achse und entsprechend der Fahrtrichtung nach rechts die y-Achse verortet. [BIPPUS, 2015]

Das Inertialmesssystem (IMU) liefert den zweiten Teil des formtreuen Gleislagesignals. Über Winkel- und Beschleunigungssensoren werden Rotationen und Translationen entlang der Achsen von x, y und z bestimmt. Über die Winkelveränderungen werden Richtungsabweichungen berechnet, die zum einen für die Ableitung der Krümmung und zum anderen für die Berechnung der Trassierungseinflüsse genutzt werden. Beeinflusst wird die Gleislagemessung im Übergang zweier Trassierungselemente. Da sich der Trassierungseinfluss aus der Gradienten- und der lateralen Richtung unterschiedlich auswirkt, unterliegt die Bestimmung des Trassierungsanteils $y_{\text{inertuell}}$ unterschiedlichen Berechnungsansätzen. Für die Längshöhe wird ein lineares Modell und für die Bewertung der lateralen Richtung ein Polynom 3. Grades eingesetzt. Der Trassierungseinfluss beschreibt eine wesentliche Eigenschaft des formtreuen Signals, das für die Charakterisierung von Einzelfehlern über das Achslagerbeschleunigungssignal des DB Fahrwegmonitorings jedoch nicht weiter berücksichtigt werden muss. [BIPPUS, 2015]

Das Verschneiden von Daten der Trassierung $y_{\text{inertuell}}$ mit dem der Gleisabtastung $y_{\text{vektoriell}}$ führt zum formtreuen Gleislagesignal, das sich am Streckenkilometer orientiert. Maßgebend für die Bewertung der Gleislage ist das diskrete Inspektionsformat des RAILab-Messsystems von 0,16 m. Das historisch gewachsene Format orientiert sich am jeweiligen Inspektionssystem sowie den technischen An- und Herausforderungen seiner Zeit. Dieses Format ist maßgebend für die anschließende Berechnung des Dreipunktsignals. Dafür werden Filterfunktionen eingesetzt, die im Kapitel 3.4 beschrieben werden. [BIPPUS, 2015]

3.2.2 Systemaufbau des DB Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3

Der Vorteil des instandhaltungsunterstützenden FwM zeigt sich über die verbauten Systemkomponenten. Die Abb. 12 verdeutlicht den Systemaufbau des Monitoringsystems am Beispiel des RAILab 3. Gegenüber dem komplexen Inspektionssystem können zwar nicht alle Parameter der Gleislagegeometrie gemessen werden, jedoch ermöglicht das Monitoringsystem eine annähernd ähnliche Bewertung der Längshöhen. Die Klassifizierung der Monitoringdaten erfolgt über eine metrologische Prüfung der Längshöhe. Dabei wird das Dreipunktsignal aus dem FwM mit dem Ergebnis der Inspektionsmessung verglichen. Die Gleisgeometrie kann

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

dabei schon über die 2 kHz Signale der ALB analysiert und die gemessenen 25 kHz Daten für die Frequenzauflösung der Einzelfehler eingesetzt werden.

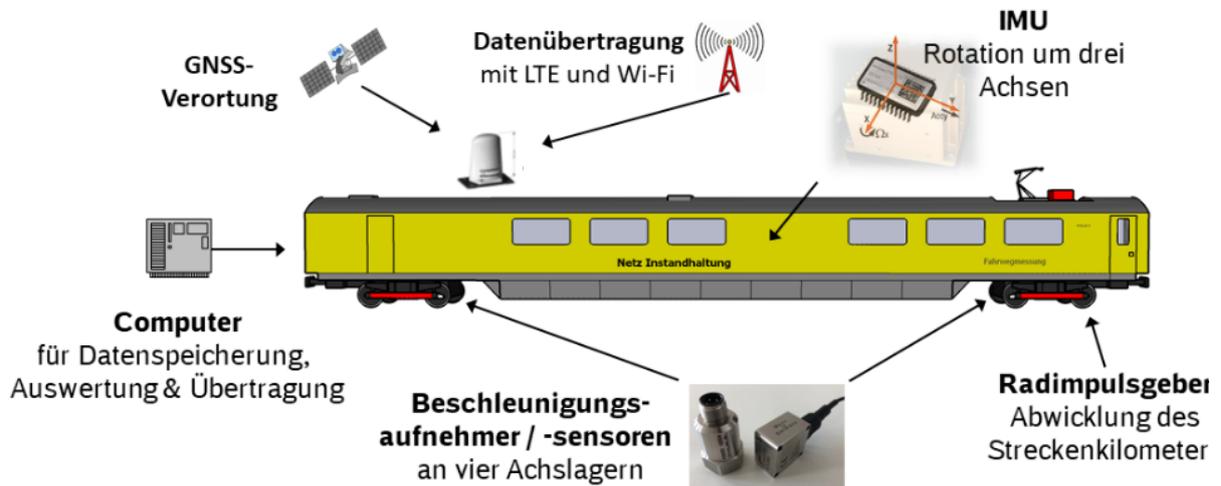


Abb. 12: Systemaufbau des Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3

Neben der Messung der ALB stellt die Lokalisierung von Störstellen sowie die Bewertung der Einzelfehler eine wichtige Anforderung dar. Eine metergenaue Fahrzeugposition ist daher maßgebend für die Verortung von Fehlern an der Fahrbahnkonstruktion. Diese Positionierung basiert im Wesentlichen auf der Genauigkeit eines differentiell korrigierten GNSS-Empfängers (engl.: Global Navigation Satellite System), dem Radimpuls und einer IMU. Die Kombination dieser drei Systemkomponenten wird im Kapitel 2.2 näher betrachtet.

Die Orientierung des Messsystems und somit die Ausrichtung der Sensorik beschreibt eine weitere wesentliche Anforderung an die Auswertung der Monitoringdaten. Die Anordnung der Sensorik am RAILab 3 bezieht sich dabei vor allem auf die zur Fahrzeugmitte ausgerichteten Achsen. Ausschlaggebend für die exakte Zuordnung der gemessenen Einzelwerte ist die Definition der richtigen Bezugsebenen (Achsen). Entsprechend der Fahrzeugstellung kommt es zu zwei möglichen Fahrtrichtungen, die mit der Interpretation der Daten berücksichtigt werden müssen. Über die Abb. 13 werden daher die Bezugspunkte für die jeweiligen Achsen, die Sensorpositionen sowie die gemessenen Beschleunigungen für die Messung der vertikalen bzw. lateralen Richtung dargestellt.

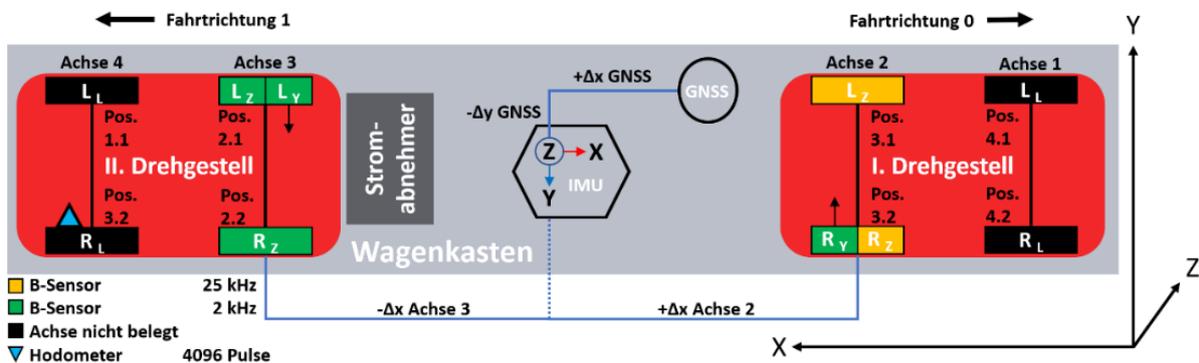


Abb. 13: Bezeichnung von Achsen, Sensorpositionen und Systemkomponenten des Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3 über das Fahrzeugkoordinatensystem

3.2 Komponenten und Funktionsweise der Messsysteme

Mit der Bezeichnung der Achslagerpositionen werden in der Abb. 13 nicht nur die lateral und vertikal ausgerichteten Beschleunigungssensoren im Fahrzeugkoordinatensystem verortet. Die Farbgebung deutet hier vor allem auf die unterschiedlich abgetasteten Beschleunigungen. Grüne Flächen zeigen die mit 2 kHz und gelb markierte Bereiche die mit 25 kHz abgetasteten Positionen. Maßgebend für die Beurteilung dieser Messwerte ist jedoch die exakte Verortung über den Streckenkilometer. Durch die verschiedenen Sensorpositionen innerhalb des Fahrzeugs ergeben sich unterschiedliche Stationen entlang der abgewickelten Wegstrecke. Die letztendliche Fahrzeugposition bezieht sich jedoch immer auf die Lage der IMU im FKS. Auf diese Position wird die im Kapitel 2.2.3 durchgeführte Krümmungsanalyse bezogen und das Messsystem bzw. die Messwerte auf den korrigierten Streckenkilometer verortet. Über die Tabelle 5 wird der Versatz der einzelnen Komponenten zur IMU aufgezeigt.

Tabelle 5: Absoluter Bezug zwischen IMU und Sensorsystemen des Monitoringsystems am RAILab 3

Position	Δx -Achse 2	Δx -Achse 3	Δx -GPS	Δy -GPS
IMU	8,586 m	-8,414 m	2,555 m	0,824 m

Das Monitoringsystem verwendet für die Beschleunigungsmessungen zwei unterschiedliche piezo-elektrische Beschleunigungssensoren. Für die Messung und Bewertung der Gleislage wird eine Abtastrate von 2 kHz als ausreichend betrachtet. Um jedoch kurzweilige Fehler in der Schienenlauffläche zu erfassen, die über alle Geschwindigkeitsbereiche eine ausreichend genaue Auflösung erlauben, werden Sensoren mit einer Abtastung von 25 kHz eingesetzt. Neben dem im Sensor verbauten Hochpassfilter, der den Gleichspannungsanteil aus der Stromversorgung herausfiltert, wird ein angepasster Anti-Aliasing-Filter (TP-Filter) eingesetzt. Herstellerbedingt werden die verwendeten Sensoren standardmäßig nur in den Messbereichen von 50 g oder 500 g geliefert, sodass eine Abwägung zwischen Auflösung und Gefahr der Übersteuerung notwendig ist. Das verwendete Setup des Fahrwegmonitorings wird in der Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Sensoreigenschaften des Monitoringsystems am RAILab 3 für die Messung der Pfeil- und Längshöhe (Stand 19.03.2020)

Sensoren	2 kHz			25 kHz		
	Position	Messbereich	TP-Filter	Position	Messbereich	TP-Filter
Richtung (Y-Profil)	Pos. 2.1	500 G	250 Hz	-	-	-
	Pos. 3.2	500 G	250 Hz			
Längshöhe (Z-Profil)	Pos. 2.1	50 G	250 Hz	Pos. 3.1	500 G	5 kHz
	Pos. 2.2	50 G	250 Hz	Pos. 3.2	500 G	5 kHz

Ausschlaggebend für die Darstellung der Frequenzinhalte ist die bereits erläuterte Abtastrate des Monitoringsystems. Über die Tabelle 7 werden daher die wesentlichen Eigenschaften und Unterschiede beider Messsysteme sowie die damit verbundene Auflösung von Einzelfehlern betrachtet. Dafür wird eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h angenommen. Die Grenzwerte der Tabelle berücksichtigen dabei den real erfassbaren Wellenlängenbereich über das Abtasttheorem von Shannon. Die obere Wellenlänge λ_o des Monitoringsystems wird dabei durch den notwendigen Hardwarehochpassfilter von 0,5 Hz bestimmt. [SANDNER, 2020]

Tabelle 7: Auflösung der Messsysteme für $v = 100$ km/h [SANDNER, 2020]

Messsystem	Wellenlänge untere Grenze λ_u	Wellenlänge obere Grenze λ_o
Inspektion	3 m	50 m
Monitoring	2 kHz Sensor: 0,027 m 25 kHz Sensor: 0,002 m	55 m

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Für die Beurteilung von Fehlerursachen werden ausschließlich die 25 kHz abgetasteten Achslagerbeschleunigungen analysiert. Über dieses Signal wird sowohl das Dreipunktsignal berechnet als auch der Einzelfehler über das Frequenzverhalten der ALB bewertet.

3.3 Beeinflussung der ALB durch die Fahrzeuggeschwindigkeit

Die gemessene Achslagerbeschleunigung muss für die Charakterisierung von Einzelfehlern in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit bewertet werden. Der Einfluss aus der jeweiligen Fahrzeugsituation kann durch die Normierung der ALB vernachlässigt werden. Das normierte Achslagerbeschleunigungssignal a_n lässt sich unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Zielgeschwindigkeit v_m aus den vertikalen Achslagerbeschleunigungen a mit Hilfe der Formel (3.7) berechnen.

$$a_n = a \frac{v_m}{v} \quad (3.7)$$

Die Abb. 14 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und den gemessenen Achslagerbeschleunigungen sowie dem normierten Ergebnis ($v = 100 \text{ km/h}$). Dabei zeigt sich, dass während der Fahrzeugbeschleunigung eine konstante Verstärkung und beim Bremsen eine Schwächung der ALB (grün) erfolgt. In der Abbildung wird dieser Bereich vor allem durch das normierte Achslagerbeschleunigungssignal (blau) hervorgehoben.

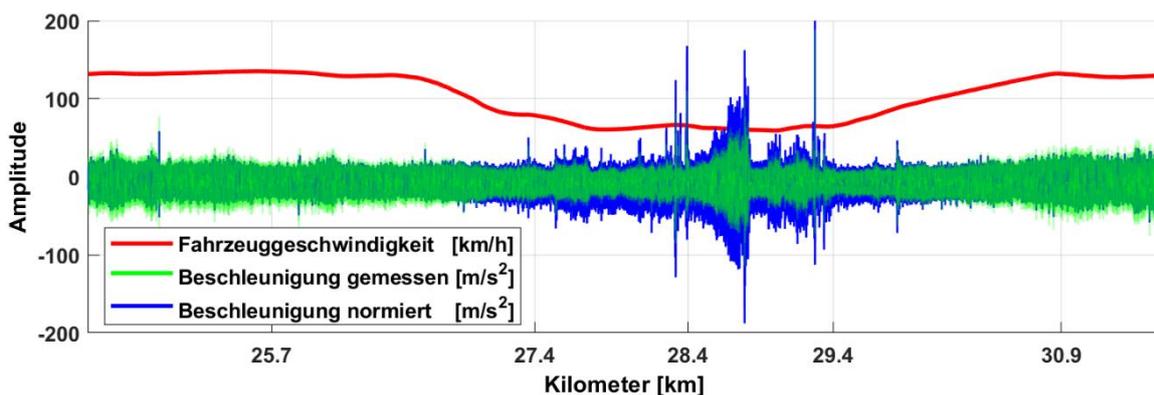


Abb. 14: Darstellung der Achslagerbeschleunigung (grün) in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit (rot) und der normierten Beschleunigung (blau) auf 100 km/h

Das Raster der Abb. 14 zeigt die gemessenen Achslagerbeschleunigungen entsprechend der zurückgelegten Wegstrecke (Streckenkilometer). Das Intervall auf der x-Achse entspricht einer Auflösung von 25×10^5 Messwerten. Dieses steigt oder fällt proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit. Am Beispiel der Abbildung wird dies besonders zwischen dem Kilometer 27,4 km und 29,4 km deutlich. Durch die geringe Geschwindigkeit werden einerseits die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten (Abwicklung) verringert. Zum anderen werden unabhängig von der maximalen Amplitude geringere Achslagerbeschleunigungen gemessen. Dadurch wird die eindeutige Abhängigkeit zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und der ALB hervorgehoben. Die Folge daraus ist, dass je schneller eine Störstelle befahren wird, desto stärker fällt die Anregung der Schiene aus, die sich durch eine erhöhte Achslagerbeschleunigung wahrnehmen lässt.

3.4 Von der Achslagerbeschleunigung zum Dreipunktsignal

Die Grundlagen zur Berechnung des Dreipunktsignals wurden bereits im Kapitel 3.1.2 aufgezeigt. Maßgebend sind hier das Sehnenmessverfahren und das formtreu gemessene

3.4 Von der Achslagerbeschleunigung zum Dreipunktsignal

Gleislagesignal, aus dem das Dreipunktsignal berechnet wird. Anders als bei der DB Inspektionsmessung (Kapitel 3.2.1), wird das formtreue Gleislagesignal des DB Fahrwegmonitorings aus den Achslagerbeschleunigungen bestimmt. Dabei wird in dieser Arbeit ausschließlich die Längshöhe bewertet. Die Achslagerbeschleunigung wird dafür vom Zeitbereich in den Wegbereich übergeben. Durch einfache Integration der vertikalen Achslagerbeschleunigung a über die Zeit t , werden diese in die vertikale Geschwindigkeit v überführt. Die Integration erfolgt entsprechend der Formel (3.8).

$$v(t) = \int a(t)dt \quad (3.8)$$

Die vertikale Geschwindigkeit wird anschließend durch eine erneute Integration in den Wegbereich s aufgelöst. Diesen erhält man mittels der Formel (3.9).

$$s(t) = \int v(t)dt \quad (3.9)$$

Das Ergebnis wird als formtreues Gleislagesignal bezeichnet. Für die Beurteilung der Gleislage muss das Zeitsignal jedoch in den Ortsbereich überführt werden. Maßgebend dafür ist das Ausgabeformat im Intervall von 0,16 m, das der Signalverarbeitung im Inspektionssystem folgt und über den Streckenkilometer aufgelöst wird. Die Auswertung des formtreuen Signals erfolgt im System des DB Fahrwegmonitorings und der DB Inspektionsmessung durch den gleichen Verarbeitungsprozess. Die folgenden Filterfunktionen können daher für beide Messsysteme verwendet werden. Die Berechnung und Darstellung der Signalformen wird über die Matlab-Toolbox „filter“ ermöglicht.

3.4.1 Bandpassgefiltertes Gleislagesignal

Für die Bewertung der Fahrbahneigenschaften muss das formtreue Gleislagesignal (FGS) auf den Wellenlängenbereich der Gleislage reduziert werden. Dieser wird durch eine Wellenlänge von 3 m bis 70 m bestimmt. Wellenlängen oberhalb L_o bzw. unterhalb L_u dieser Schwellen werden im Ergebnis des Bandpass-Signals (BPS) geschwächt, sodass nur die Wellenlänge der Gleislage hervorgehoben wird. Um diese Anforderung der Signalverarbeitung zu erfüllen, wird beim Fahrwegmonitoring ein Bandpass-Filter eingesetzt, der wie in der Abb. 15 dargestellt, das FGS in das BPS überführt.

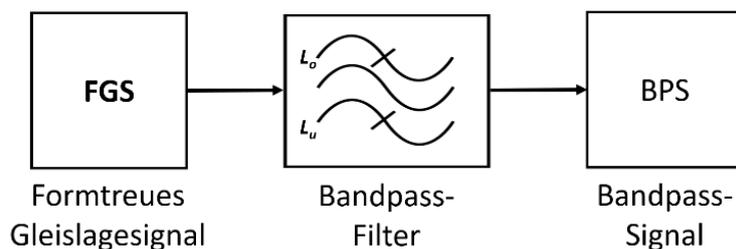


Abb. 15: Signalverarbeitung des formtreuen Gleislagesignals (FGS) zum bandpassgefilterten Gleislagesignal (BPS) aus den Achslagerbeschleunigungen des Fahrwegmonitorings

Am Beispiel der Abb. 16 lässt sich das Ergebnis des bandpassgefilterten FGS aus den ALB des Fahrwegmonitorings darstellen. Die Abbildung zeigt die Unterschiede zwischen dem BPS des DB Monitoringsystems (blau) und dem Hochpass-Signal (HPS) der DB Inspektionsmessung (grün). Der Übereinstimmungsgrad zwischen dem BPS und HPS wird dabei vor allem durch den absoluten Betrag der Differenzen (rot) verdeutlicht.

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

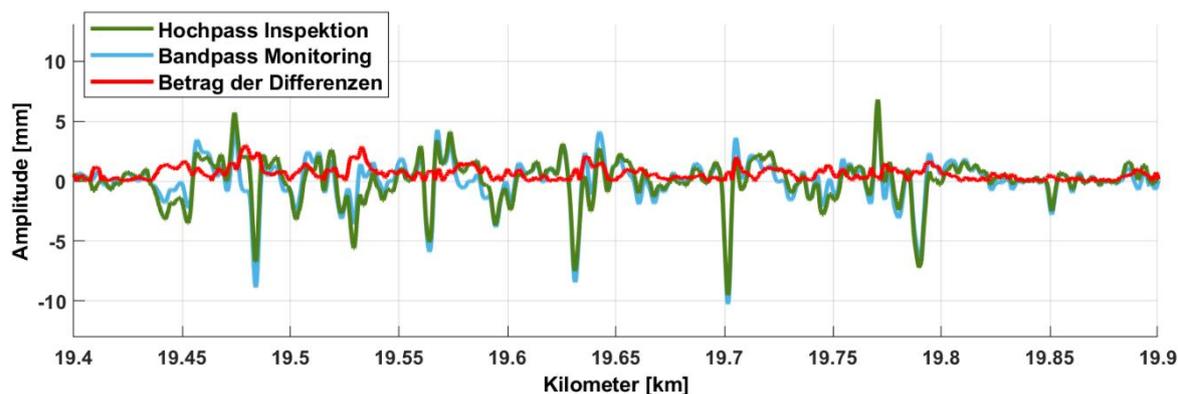


Abb. 16: Betrag der Differenzen (rot) zwischen HPS der Inspektionsmessung (grün) und dem BPS des Fahrwegmonitorings (blau) für ein Beispiel der Längshöhe

Mit dem Ergebnis der Abb. 16 lassen sich die Amplitudenverläufe den örtlichen Eigenschaften der Fahrbahn zuordnen. Dabei werden hohe Übereinstimmungen zwischen den Extremstellen des HPS und des BPS erzielt. Diese Überlagerung lässt sich vor allem über das Ergebnis einer Korrelationsfunktion bestimmen, die im Kapitel 3.6.4 erläutert wird. Im Beispiel der Abb. 16 zeigt sich dabei ein absoluter Versatz von 22,4 m. Dieser bezieht sich ausschließlich auf die unterschiedlich abgewinkelte Position der Messsysteme. Über den Betrag der Differenzen, lässt sich hier außerdem eine Abweichung von 3,0 mm zuordnen. Dieses Ergebnis bestätigt die gute visuelle Überlagerung der Signalformen. Durch die Eigenschaften des HPS sowie des BPS werden alle Anforderungen an den auswertbaren Wellenlängenbereich der Gleislage erfüllt. Jedoch stehen für die Bewertung der Gleisgeometrie die sicherheitsrelevanten Kriterien im Vordergrund, die im Kapitel 3.5 näher beschrieben werden. Dafür muss das BPS in ein DPS überführt werden.

3.4.2 Dreipunktsignal der Gleislage

Die Grundlage für die Berechnung des Dreipunktsignals bildet der Amplitudenverlauf des HPS aus der DB Inspektionsmessung und das BPS aus dem DB Fahrwegmonitoring. Mit dem Einsatz eines digitalen Filters wird die Umrechnung des HPS sowie BPS in das entsprechende DPS der Längs- oder Pfeilhöhe ermöglicht. Anders als bei der herkömmlichen Pfeilhöhenmessung, die sich an einer konstanten Bogenlänge orientiert, wirkt sich die digitale Signalverarbeitung auf das vom DB Inspektionssystem vorgegebene diskrete Intervall von 0,16 m aus. Die Berechnung des DPS wurde bereits im Kapitel 3.1.2 beschrieben. Maßgebend für die Berechnung der Pfeilhöhe ist das bereits erläuterte Teilungsverhältnis der Sehne. Dieses muss durch die Abtastrate des Inspektionssignals teilbar sein. Die Tabelle 8 betrachtet daher für die Inspektion mit dem RAILab-Messsystem und die Überwachung der Gleislage mit dem Fahrwegmonitoring die folgenden Teilungsverhältnisse der Längs- und Pfeilhöhe.

Tabelle 8: Teilungsverhältnisse der Wandersehenmessung für die Regelinspektion der DB Netz AG zur Bestimmung der Gleislagequalität [vgl. DB821.2001, 2020]

Messsystem (Baureihe)	Einsatzzeitraum (Jahre)	Teilungsverhältnis Pfeilhöhe [m]	Teilungsverhältnis Längshöhe [m]
RAILab	1992 - heute	6,08 / 4,00	6,08 / 2,56

In der Abb. 17 zeigt sich das Ergebnis der Dreipunktfilterung aus dem Beispiel der in Abb. 16 dargestellten Signalformen. Mit der Visualisierung der Dreipunktsignale wird vor allem der

3.5 Beurteilungsmaßstab des Dreipunktsignals

Übereinstimmungsgrad zwischen der Inspektionsmessung und dem Fahrwegmonitoring für die Längshöhe bewertet.

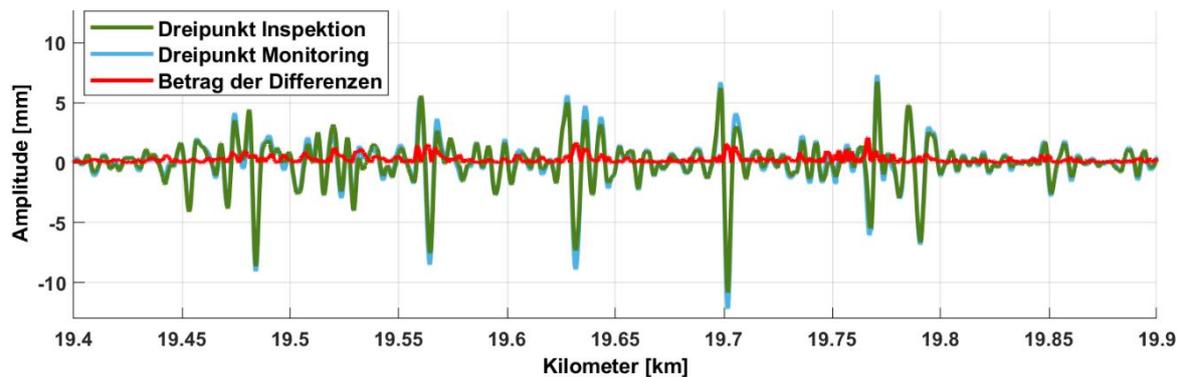


Abb. 17: Betrag der Differenzen (rot) zwischen dem DPS der Inspektionsmessung (grün) und dem DPS des Fahrwegmonitorings (blau) bezogen auf die Längshöhe

Das Ergebnis der Abb. 17 zeigt erneut einen sehr hohen Übereinstimmungsgrad zwischen dem DPS der DB Inspektion (grün) und dem des DB Fahrwegmonitorings (blau). Gegenüber dem im Kapitel 3.4.1 analysierten BPS und HPS wird über das Dreipunktsignal eine geringere maximale Abweichung bestimmt. Diese wird mit 2,1 mm angegeben und lässt sich ebenfalls über den Vergleich der absoluten Differenzen (rot) des jeweiligen Signaltyps aufzeigen. Betrachtet man dieses Ergebnis in Anhängigkeit zu den im Kapitel 3.5 beschriebenen sicherheitsrelevanten Kriterien der inneren Gleisgeometrie, lassen sich diese über Beurteilungsmaßstäbe (Störgrößen-Reaktionsverfahren) bewerten. Generell orientieren sich diese Kriterien an der örtlich zugelassenen Geschwindigkeit (v_{zul}) einer Eisenbahnstrecke. Über die Staffelung der Geschwindigkeiten werden Schwellenwerte definiert, die bei einer Überschreitung zu sicherheitsrelevanten Maßnahmen führen.

Die wesentliche Anforderung an das berechnete DPS aus dem Fahrwegmonitoring und der Inspektionsmessung liegt in der Überlagerung der Extremstellen. Die absoluten Differenzen werden eher als sekundär betrachtet und das Ergebnis der Abb. 17 als ausreichend für die entwickelte Methode zur Charakterisierung von Einzelfehlern bewertet.

3.5 Beurteilungsmaßstab des Dreipunktsignals

Die Bewertung der Gleislage orientiert sich am Beurteilungsmaßstab des Dreipunktsignals. Dieser wird durch das Störgrößen-Reaktionsverfahren (SR-Verfahren) definiert. Die Qualität der Fahrbahn wird durch die Abnutzung der Eisenbahnanlage bestimmt. Gemäß Richtlinie [DB821.1000, 2003] werden daher die SR-Beurteilungsmaßstäbe wie folgt definiert:

- SR_A = Entscheidungswert für Instandhaltung

„ist der Wert, bei dessen Überschreitung eine Beurteilung hinsichtlich der Einplanung einer Instandsetzungsmaßnahme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erforderlich ist.“ [DB821.1000, 2003]

- SR_{100} = Überschreitung setzt einen absehbaren Handlungsbedarf voraus

„ist der Wert, der den technisch/ wirtschaftlichen Abnutzungsvorrat beinhaltet. Bei dessen Überschreitung ist eine Instandsetzung bis zur nächsten Regelinspektion erforderlich.“ [DB821.1000, 2003]

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

- SR_{Lim} = Sofortiger Handlungsbedarf

„ist der Wert, bei dessen Überschreitung eine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit zu erwarten ist. Eine Instandsetzung ist in kürzest möglicher Zeit durchzuführen.“ [DB821.1000, 2003]

Betrachtet man die Abnahme von Neu- oder Umbaumaßnahmen wird eine weitere Prüfgröße verwendet. Dieser Parameter findet sowohl für die Bewertung der inneren Gleisgeometrie als auch für die Festlegung von absoluten Werten der äußeren Gleisgeometrie Anwendung.

- SR_0 = Wert für Neu- und Umbauten [DB824.8110, 2020]

Die SR-Eingriffsschwellen orientieren sich an den beschriebenen Beurteilungsmaßstäben, die sich entsprechend der Abb. 18 interpretieren lassen.

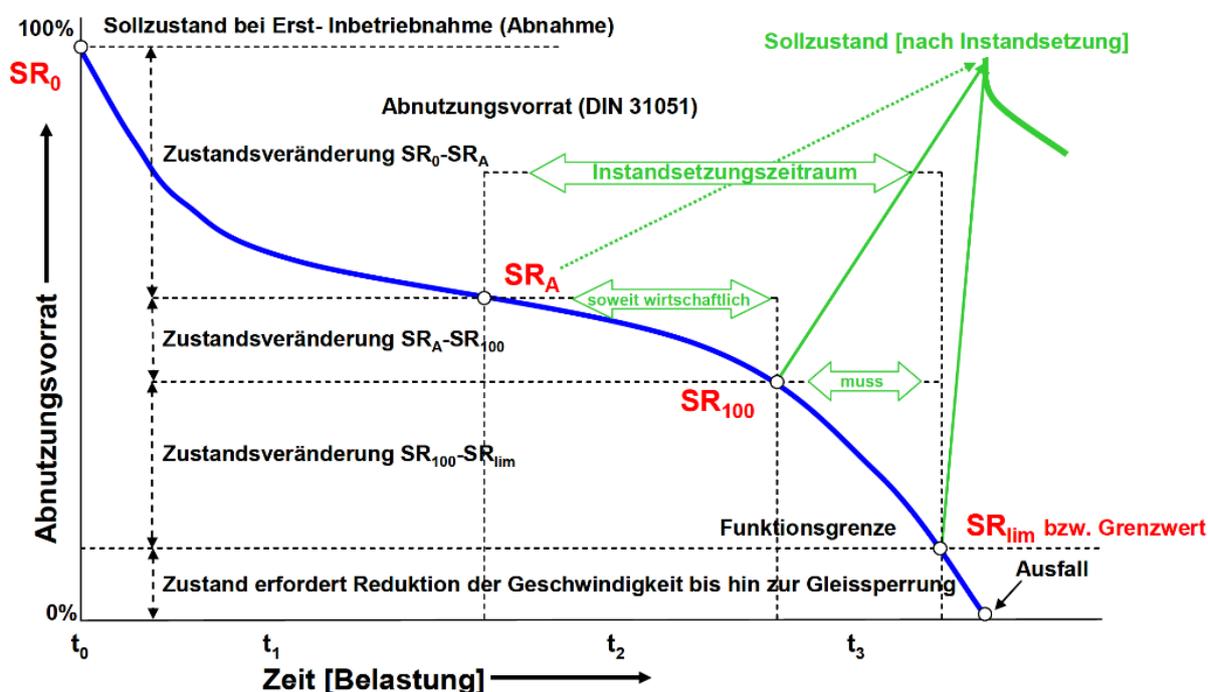


Abb. 18: Zustandsbewertung des Eisenbahnoberbaus in Abhängigkeit zur Veränderung des Abnutzungsvorrats und Eingriffsschwellen des SR-Verfahrens [Ripke, 2010]

Die Abb. 18 zeigt den nach [Ripke, 2010] interpretierten Zustandsverlauf (blaue Kurve) einer Gleislageveränderung durch die Sektoren der SR-Bewertungskriterien. Dabei lässt sich die theoretische Veränderung der Fahrbahn in Abhängigkeit zum zeitlichen Verlauf von t näher betrachten. Dabei erlaubt die zeitliche Entwicklung eine Bewertung der Abnutzung des Eisenbahnoberbaus. Neben der

„...Abnutzung vermindert sich der Abnutzungsvorrat“ [DB821.1000, 2003]

der Anlage, der nach Richtlinie einen Zustand zwischen dem Ist- und Beurteilungswert beschreibt. Das Ziel dieser Beurteilung ist die Bewertung von sicherheitsrelevanten Kriterien der Fahrbahn. Dabei zeigt sich die qualitative Verteilung des Abnutzungsvorrats über die Zeit. Mit zunehmender Verschlechterung wird dabei ein immer geringerer Vorrat betrachtet, der bis zum Ausfall der Eisenbahnanlage führen kann. [DB821.1000, 2003; DB821.2001, 2020]

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

Betrachtet man die regelmäßige Inspektion des Eisenbahnoberbaus, so wird im Zeitraum von t_0 bis t_3 eine Überwachung der Gleislage durchgeführt. Das Ergebnis dieser Inspektion lässt sich theoretisch mit dem Verlauf der Zustandkurve (blau) aus der Abb. 18 vergleichen. Die Inspektion folgt daher einer immer wiederkehrenden Gleislagemessung, die sich am Verzeichnis der örtlich zugelassenen Geschwindigkeit (VzG) der Tabelle 9 orientiert.

Tabelle 9: Inspektionsintervalle der Hauptgleise [vgl. DB821.2001, 2020]

Geschwindigkeitsbereich	$H_g \leq 80 \text{ km/h}$	$80 \text{ km/h} \leq H_g \leq 120 \text{ km/h}$	$120 \text{ km/h} \leq H_g \leq 160 \text{ km/h}$	$160 \text{ km/h} \leq H_g \leq 230 \text{ km/h}$	$H_g \geq 230 \text{ km/h}$
Regelinspektionsintervall	18 Monate	12 Monate	6 Monate	3 Monate	

Die Bewertung des Dreipunktsignals orientiert sich an den Grenzwerten des SR-Verfahrens. Maßgebend für die Beurteilung der gemessenen Gleislage ist die Geschwindigkeit nach dem VzG. Die Abb. 19 zeigt daher die Verknüpfung zwischen den Schwellen des Beurteilungsmaßstabs und der zulässigen Geschwindigkeit.

				Beurteilungsmaßstab														
				SR _A					SR ₁₀₀					SR _{Lim}				
Prüfgröße	Messbasis [m]	Einheit	Auswertung	v ≤ 80	80 ≤ v ≤ 120	120 ≤ v ≤ 160	160 ≤ v ≤ 230	v ≥ 230	v ≤ 80	80 ≤ v ≤ 120	120 ≤ v ≤ 160	160 ≤ v ≤ 230	v ≥ 230	v ≤ 80	80 ≤ v ≤ 120	120 ≤ v ≤ 160	160 ≤ v ≤ 230	v ≥ 230
				Längshöhe	2,6 / 6,0	mm	Null / Spitze	12	10	8	6	5	15	13	11	9	7	21

Abb. 19: Beurteilungsmaßstäbe der Längshöhe für die Anwendung des Störgrößen-Reaktionsverfahrens [vgl. DB821.2001, 2020]

Gemäß der Abb. 19 wird die Amplitude des Dreipunktsignals der Längshöhe in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit bewertet. Die Schwellenwerte nach SR_A, SR₁₀₀ und SR_{Lim} beurteilen hier den Zustand der Anlage bzw. des Gleises. Wird ein Beurteilungsmaßstab überschritten, sind bestimmte Maßnahmen einzuleiten, wie z. B. die Einrichtung einer Langsamfahrstelle (LA) bei SR_{Lim}-Überschreitung oder die Planung einer Instandhaltungsmaßnahme bei SR_A-Überschreitung.

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

Neben dem Dreipunktsignal zur Beurteilung von Einzelfehlern basiert die Charakterisierung von Störstellen auf der Analyse von Frequenzinhalten aus den Achslagerbeschleunigungen des DB Fahrwegmonitorings. Es werden bestimmte Eigenschaften der ALB charakteristischen Fehlern im Eisenbahnoberbau zugeordnet. Um diese zu unterscheiden, werden Frequenzmuster festgelegt, erkannt und beurteilt. Dafür müssen vor allem die Frequenzinhalte der Achslagerbeschleunigungen bestimmt werden. Diese lassen sich durch eine Fourier-Transformation oder Wavelet-Transformation darstellen.

3.6.1 Fourier-Transformation

Mit der Anwendung einer Fourier-Reihe lassen sich vor allem periodische Signale $g(t)$, die einer bestimmten Periodendauer T folgen, durch die Summe aus unendlich vielen harmonischen Signalen mit konstanten Koeffizienten beschreiben. Es wird vorausgesetzt, dass durch die Fourier-Analyse das Eingangssignal über eine Reihe von Sinus- und Cosinus-Funktionen dargestellt werden kann [HEUNECKE, 2013]. Mit der Fensterlänge T wird dabei die zeitliche

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Eingrenzung des Signals $g(t)$ ausgedrückt. Aus dieser lässt sich die Grundfrequenz f_0 bestimmen, die sich entsprechend der Formel (3.10) berechnen lässt.

$$f_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (3.10)$$

Aus der Grundfrequenz f_0 lässt sich wiederum die Kreisfrequenz ω_0 berechnen. Über diese wird die Schrittweite des im Frequenzraum aufgelösten Signals dargestellt, die sich aus der Formel (3.11) berechnen lässt.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (3.11)$$

Bei der Betrachtung einer periodischen Funktion $g(t)$ wird zunächst davon ausgegangen, dass diese in einem vorab definierten Intervall dargestellt werden kann. Dieser Zeitraum entspricht der Periodendauer T . Wird die Funktion nun als Summe der Grundschnwingungen von n in einer Reihe trigonometrischer Funktionen entwickelt, wird diese als eine harmonische Analyse betrachtet, die letztendlich als Fourier-Reihe bezeichnet wird [HEUNECKE, 2013]. Die Formel (3.12) zeigt die Entwicklung dieser Reihe.

$$g(t) = p_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [o_n \cos(n\omega_0 t) + p_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (3.12)$$

Wird die Summation bis zu einer bestimmten Stelle durchgeführt oder nach einer bestimmten Anzahl von Gliedern abgebrochen, erfolgt eine Annäherung durch Approximation eines trigonometrischen Polynoms. Für die Approximation sind die Amplituden der Grundschnwingung aus den Fourier-Koeffizienten zu bilden. Der gerade Anteil p_n entsprechend der Formel (3.13).

$$p_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(n\omega t) dt \quad (3.13)$$

Der ungerade Anteil o_n wird über die Formel (3.14) gebildet.

$$o_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3.14)$$

Die Sinus- und Cosinus-Anteile mit gleichen Frequenzen lassen sich über die Formel (3.15) zusammenfassen.

$$p_n \cos(n\omega t) + o_n \sin(n\omega t) = P_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.15)$$

Die Amplitude P_n berechnet sich entsprechend der Formel (3.16) zu

$$P_n = \sqrt{p_n^2 + o_n^2} \quad (3.16)$$

und die Phase ϕ_n , wird mittels der Formel (3.17) bestimmt.

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{p_n}{o_n}\right) \quad (3.17)$$

Die Konstante p_0 berechnet sich nach Formel (3.18) zu

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

$$p_0 = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt \quad (3.18)$$

und beschreibt das Signal $g(t)$. Mit den berechneten Größen lässt sich die Fourier-Reihe über die Formel (3.19) darstellen.

$$g(t) = \frac{p_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.19)$$

Am Beispiel eines Rechtecksignals wird im Folgenden die Fourier-Reihe approximiert. Mit dem Signalverlauf der Rechteckfunktion lässt sich dieser über einen punktsymmetrischen Verlauf zum Ursprung beschreiben. Daher werden alle Fourier-Koeffizienten der Cosinus-Terme gleich Null gesetzt. Für die Berechnung der Schwingungen werden deshalb ausschließlich die Sinus-Terme genutzt. Diese lassen sich über die Amplitude und den entsprechenden Wellenlängenanteil darstellen. Die Abb. 20 zeigt die Fourier-Koeffizienten einer Rechteckschwingung. Diese werden als Terme (T_n) bezeichnet. Es lässt sich festhalten, dass je mehr Schwingungen verwendet werden, desto genauer wird die Approximation dieser Funktion. [ZACHER, 2014]

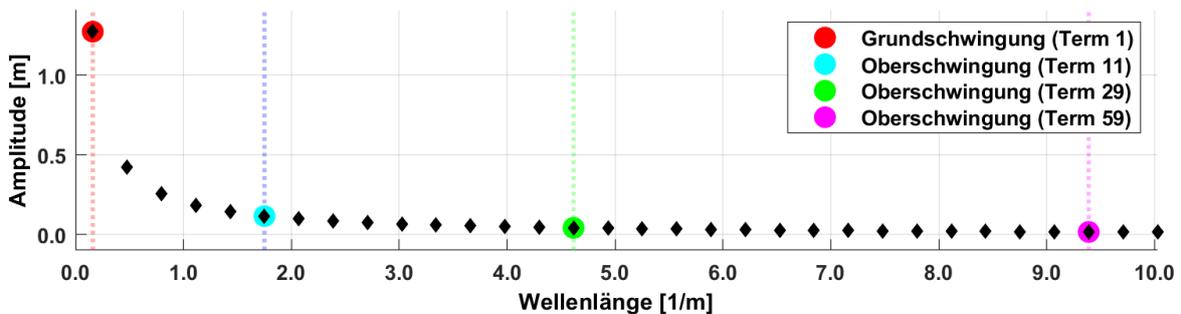


Abb. 20: Fourier-Koeffizienten der Rechteckschwingung

Auf Basis der in Abb. 20 dargestellten Fourier-Koeffizienten wird anschließend die Rechteckfunktion approximiert. Dabei zeigt die Abb. 21 eine Rechteckschwingung, die mit einer Amplitude von 1 und einer Wellenlänge von $\lambda = 2\pi$ dargestellt wird. Das Beispiel beschreibt die Annäherung der Superposition (rot) durch Summierung der einzelnen Sinusschwingungen. Das Ergebnis wird dabei durch die Grundschwingung (grün) sowie durch die Oberschwingung (blau) der Terme T3 und T5 bestimmt.

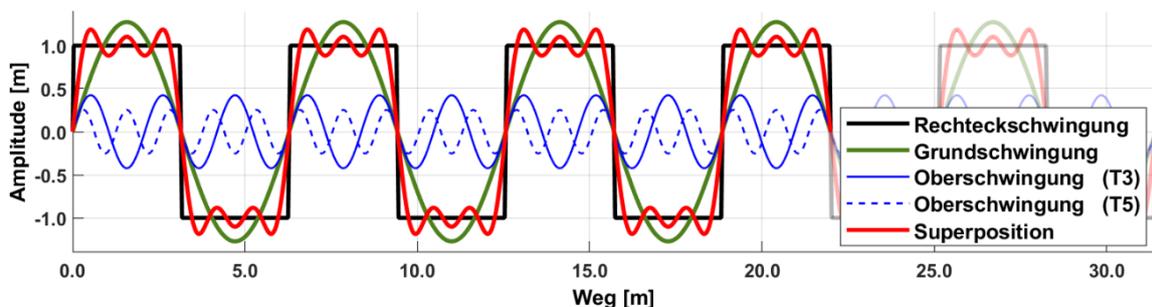


Abb. 21: Rechteckschwingung (schwarz) mit Grundschwingung (grün) und Oberschwingung (blau) sowie deren Summe (rot)

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Mit der Betrachtung einer unendlichen Periodendauer wird schließlich nicht mehr von einer Reihenentwicklung, sondern einer Transformation gesprochen. Mit dem Übergang vom Zeitbereich t in den Frequenzbereich f wird von einer Fourier-Transformation gesprochen. Der Einsatz dieser Transformation wird jedoch nur ermöglicht, sofern das Signal konvergiert. Die Transformation lässt sich über die Formel (3.20) beschreiben.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-\omega t} dt \quad (3.20)$$

Durch die Transformation in den Frequenzbereich gehen die Ortsinformationen verloren. Für die Übertragung auf die Gleislagemessung bedeutet dies, dass eine Störstelle an einem bestimmten Ort im Frequenzraum nicht eindeutig lokalisiert werden kann. Um dies zu umgehen, wird im Kapitel 3.6.2 eine Wavelet-Transformation eingesetzt. Diese ermöglicht die Auflösung von Frequenzinhalten über die einzelnen Stationswerte der Örtlichkeit.

3.6.2 Wavelet-Transformation

Eine weitere Methode zur Beurteilung von Signaleigenschaften zeigt sich in der Anwendung einer Wavelet-Transformation. Die Analyse des Eingangssignals (Achslagerbeschleunigung) beschränkt sich hier auf den Skalierungsparameter eines Wavelets. Ein Wavelet definiert sich über seine ausgeprägte Signalform. Dabei gilt, um so detaillierter das Signalmuster über ein Wavelet beschrieben wird, desto leichter lässt sich ein hoher Übereinstimmungsgrad zwischen einem Wavelet und dem Eingangssignal zuordnen. Betrachtet man ein Zeitsignal, so geht die Wavelet-Transformation über die einfache Mustererkennung hinaus und ermöglicht durch ihre Skalierung und Verschiebung entlang eines Zeitsignals eine noch umfangreichere Analyse der Signaleigenschaften. Mit der Wavelet-Transformation wird vor allem eine lokale Signalanalyse durchgeführt. Durch die Eigenschaften eines Wavelets wird eine Dehnung bzw. Stauchung der Funktionswerte sowie deren Verschiebung entlang der Zeitachse ermöglicht. Dabei lassen sich Informationen über das Frequenzverhalten (Pseudo-Frequenzen) des zu analysierenden Eingangssignals bestimmen. Unter dem Begriff Pseudo-Frequenzen wird der Übereinstimmungsgrad (Wavelet-Koeffizienten) im Verhältnis zum Ausbildungsgrad (Grundfrequenz) des Wavelets betrachtet. Das berechnete Spektrum beschreibt daher nur ein annähernd ähnliches Frequenzverhalten, das vom Wavelet auf das analysierte Signal übertragen wird.

Die Signalanalyse orientiert sich an der Signalform des ursprünglichen Musters, dem „Mutter-Wavelet“. Auf dieser Basis können eine Vielzahl von Wavelets eingesetzt bzw. entsprechend den Anforderungen der Signalanalyse konstruiert werden. Die Abb. 22 zeigt drei geläufige Wavelet-Typen, die durch ihre einfache Signalform einen hohen Wiedererkennungswert von Gleislagefehlern erlauben.

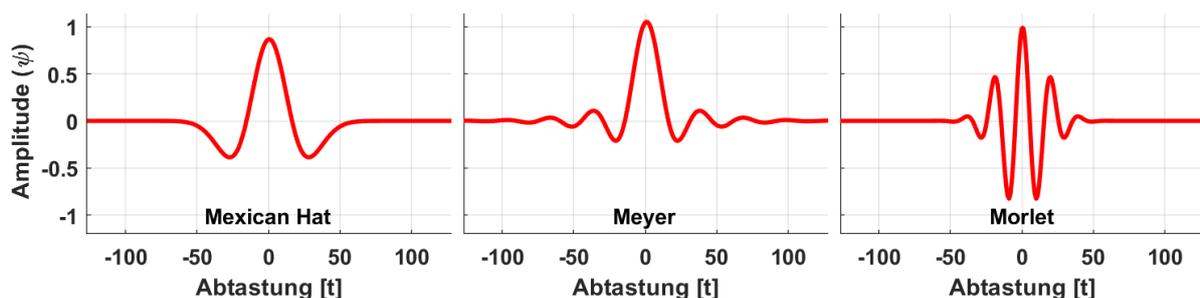


Abb. 22: Wavelets: Mexican Hat (links), Meyer (mitte) und Morlet (rechts)

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

Die Anwendung einer Wavelet-Transformation ähnelt einer Fensterfunktion, die jedoch keiner Verzerrung und Streckung unterworfen ist [HOFFMANN, 1998]. Es werden Skalarprodukte gebildet, die sich aus den Parametern der Verschiebung und Skalierung ergeben und auch als Translation ζ und Dilatation η beschrieben werden. Über diese lassen sich die Eigenschaften der Wavelet-Familie zuordnen. Die Abb. 22 beschreibt den jeweiligen Grundzustand der Wavelet-Familie. Diese Signalform bildet die Basis für eine Zeit-Skalen-Analyse, die eine Vergleichbarkeit zwischen dem Eingangssignal und dem Wavelet ermöglicht und so Rückschlüsse auf die Frequenzinhalte des Signals erlaubt. Um die Anwendung zu realisieren, wird eine Gruppe von Basisfunktionen geschaffen. Dabei wird das Wavelet $\psi(t)$ zeitlich begrenzt und durch eine Grundform $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ beschrieben (quadratisch integrierbar). Es werden die bereits erwähnten Variablen η und ζ eingeführt. Mit η wird der Skalierungsparameter des Wavelets definiert, welcher der Bedingung $\eta \neq 0$ folgt. Dabei beschreibt η die Länge bzw. Größe des Wavelets. Der Parameter $\zeta \in \mathbb{R}$ dient der Verschiebung entlang der Zeitachse und beschreibt die lokalen Eigenschaften der Funktion zum Zeitpunkt $t = \zeta$ der Transformation. [LOUIS, 1998; BÄNI, 2002]

Bei der Anwendung einer Wavelet-Transformation wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Parameter η und ζ eine Kontinuität besitzen. Die Wavelet-Transformation lässt sich daher über die Formel (3.21) beschreiben.

$$C_{\psi}(\eta, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \psi\left(\frac{t - \zeta}{\eta}\right) dt \quad (3.21)$$

Analog der Kreuzkorrelation nehmen die Koeffizienten $C_{\psi}(\eta, \zeta)$ Werte zwischen 0 und 1 an.

$$C_{\psi} = 1 \quad \text{vollkommene Übereinstimmung von } g(t) \text{ mit } \psi$$

$$C_{\psi} = 0 \quad \text{keine Übereinstimmung von } g(t) \text{ und } \psi$$

Vergleicht man die Fourier-Transformation entsprechend der Formel (3.20) mit der Wavelet-Transformation aus der Formel (3.21), kann die Fourier-Analyse als ein Spezialfall der Wavelet-Transformation gesehen werden. Durch die Eingrenzung von ζ wird mittels der Wavelet-Transformation eine zeitliche Verortung der Frequenzinhalte erzielt. Nach [HEUNECKE, 2013] wird so

„... die Grundvoraussetzung für die Identifikation und Analyse zeitlich begrenzter Effekte in Zeitfunktionen...“ [HEUNECKE, 2013]

ermöglicht. Über die Anpassung des Skalierungsparameters η lassen sich verschiedenste zeitliche Strukturen auflösen. In der Regel wird die Ausdehnung des Wavelets vergrößert bzw. verkleinert, um den optimalen Übereinstimmungsgrad zum Eingangssignal zu ermöglichen. Dabei werden Koeffizienten gebildet, die in Abhängigkeit zum Skalierungsparameter definiert werden. Am Beispiel eines „Morlet-Wavelets“ werden diese Eigenschaften näher bestimmt. Mathematisch lässt sich das Morlet-Wavelet über die Formel (3.22) berechnen. Dabei wird die Streckung bzw. Stauchung des Parameters η und die Verschiebung ζ auf der Zeitachse zum Zeitpunkt t dargestellt.

$$\psi(t, \eta, \zeta) = \exp\left(\frac{-\left(\frac{t - \zeta}{\eta}\right)^2}{2}\right) \cos\left(5 \left(\frac{t - \zeta}{\eta}\right)\right) \quad (3.22)$$

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

In der Abb. 23 werden drei unterschiedliche Wavelets der Morlet-Familie dargestellt, die mit unterschiedlichen η -Werten graphisch veranschaulicht werden.

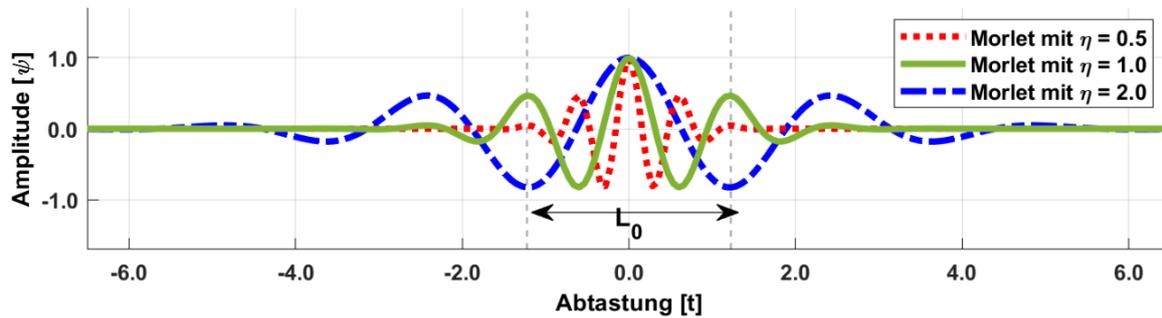


Abb. 23: Abstufungen eines Morlet-Wavelets über den Skalierungsparameter η

Mit dem Grundzustand $\eta = 1 = L_0$ wird die ursprüngliche Signalform des Morlet-Wavelets (grün) dargestellt. Dabei beschreibt L_0 nicht die Wellenlänge des Wavelets, sondern den Abstand zwischen der dritten und fünften Signalspitze der Funktion. Dadurch soll die Ausdehnung des Wavelets verdeutlicht werden. Setzt man den Skalierungsparameter auf $\eta = 0,5$, so halbiert sich die Spannweite des Wavelets (rot). Die Grundfunktion wird in diesem Fall gestaucht. Wird der Parameter $\eta > 1$ gesetzt, kommt es zu einer Ausdehnung der Funktionswerte (blau). Um die Eigenschaften der Morlet-Wavelet-Familie über das Frequenzverhalten zu verdeutlichen, werden die in der Abb. 23 dargestellten Wavelet-Formen mittels einer Fourier-Transformation analysiert. Die Abb. 24 zeigt das Ergebnis dieser Transformation.

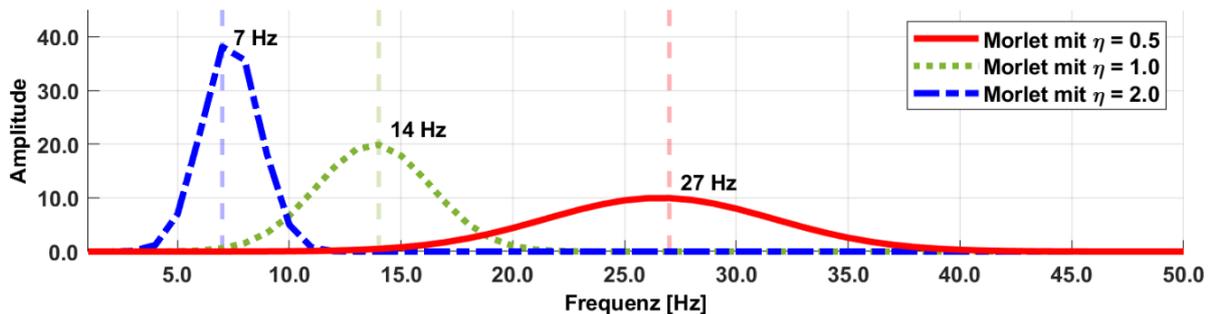


Abb. 24: Beschreibung von Eigenschaften eines Morlet-Wavelets über das Frequenzverhalten in Abhängigkeit zum Skalierungsparameter η

Die in der Abb. 24 dargestellte grüne Linie beschreibt den Grundzustand des Morlet-Wavelets in einem Frequenz-Amplituden-Diagramm. Dabei wird die Grundfrequenz f_0 des Wavelets durch die Periodendauer T bestimmt. Diese wiederum korrespondiert mit der Position der maximalen Amplitude m und lässt sich über die Formel (3.23) berechnen.

$$f_0 = \frac{1}{\left(\frac{T}{m-1}\right)} \quad (3.23)$$

Durch die Erhöhung des Skalierungsparameters von $\eta > 1$ wird der Frequenzbereich des Wavelets beeinflusst. Der Parameter k entspricht dabei der Periodendauer von T . Große η -Werte lassen sich demnach niedrigen Frequenzen und kleinere Werte von η einer hohen Frequenz zuordnen. Varianten des Parameters ζ bewirken die Verschiebung des Wavelets entlang der Zeitachse. Nach der Formel (3.24) entspricht die Frequenz der Änderung der η -Werte.

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

$$\cos\left(\frac{5t}{\eta} - \frac{5\zeta}{\eta}\right) = \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.24)$$
$$\omega = \frac{5}{\eta} = 2\pi f \Rightarrow \frac{5}{2\pi\eta}$$

Mit der Wavelet-Transformation werden alle Signaleigenschaften um den Bereich eines jeden einzelnen Messwerts analysiert. Dieser Übereinstimmungsgrad wird durch die berechneten Wavelet-Koeffizienten ausgedrückt, die sich einer Pseudo-Frequenz zuordnen lassen. Die Auflösung von Frequenzen über den Ort bilden dabei die zentrale Anforderung an die Charakterisierung von Einzelfehlern. Die Anwendung und Funktionsweise der Wavelet-Transformation auf das Achslagerbeschleunigungssignal wird im Folgenden näher erläutert.

3.6.3 Analyse von Achslagerbeschleunigungen mittels Wavelet-Transformation

Das Ziel der Wavelet-Transformation ist die Bestimmung von Übereinstimmungsmerkmalen, die als Koeffizienten den Übereinstimmungsgrad der Signalformen zueinander beschreiben. Für die Anwendung einer Wavelet-Transformation muss das zu analysierende Signal daher einen Bereich aufweisen, dessen Form mit einem Wavelet vergleichbar ist. Dadurch können bestimmte Zeitbereiche aus dem Achslagerbeschleunigungssignal einem gesuchten Muster zugeordnet werden.

Im Bereich der Einzelfehleranalyse wird die Wavelet-Transformation für die Charakterisierung eines Einzelfehlers eingesetzt. Dafür wird das Frequenzverhalten des Fehlers interpretiert und einem Fehlertyp zugeordnet. Betrachtet man die im Kapitel 4.1 dargestellten Beispiele, sollen möglichst viele Fehler durch nur einen bestimmten Wavelet-Typ abgedeckt werden. In der Regel lassen sich Einzelfehler in einem Gleislagesignal nicht nur über eine maximale Amplitude eindeutig bestimmen. Daher liegt eine optimale Signalanalyse in einem Muster mit mehreren Extremstellen. Für die Charakterisierung von Einzelfehlern wird daher das im Kapitel 3.6.2 erwähnte Morlet-Wavelet eingesetzt. Durch seine Wellenform lässt sich das Wavelet einfachen Signaleigenschaften zuordnen und liefert damit eine optimale Voraussetzung für die Detektion von ausgeprägten Signalstrukturen. Bei der Anwendung dieser Signalform geht es nicht um das Auffinden von ursprünglichen Signalstrukturen, sondern um das Erkennen von ähnlich Signalverläufen, die sich dem Wavelet zuordnen lassen.

In der Abb. 25 werden die Übereinstimmungsmerkmale zwischen dem Dreipunktsignal der Längshöhe und dem Morlet-Wavelet bestimmt. Im Vordergrund steht hier die Mustererkennung. Da es sich bei dem Dreipunktsignal um ein reines Gleislagesignal handelt, lassen sich nur die bereits im Kapitel 3.4 erläuterten Wellenlängen bewerten. Die Skalierung des Parameters η wird daher auf eine Skala von $10 < \eta < 110$ begrenzt. Über die Länge des in der Abb. 25 dargestellten Beispiels lässt sich die im Kapitel 3.6.2 erläuterte Verschiebung des Parameters ζ regulieren. Der Datensatz zeigt hier 1700 Messwerte, welche den Vektor von $1 < \zeta < 1700$ definiert. Durch die Eingrenzung von η und ζ wird im Folgenden über vier Schritte die Wavelet-Transformation durchgeführt.

Phase 1: Über die Parameter $\eta = 10$ und $\zeta = 1$ wird das erste Element der Transformation betrachtet. Dabei wird der erste Wert der Koeffizienten-Matrix $\psi(\eta, \zeta)$ berechnet. Das Ergebnis beschreibt den Übereinstimmungsgrad des ersten Wavelet-Elements im Verhältnis zum Gleislagesignal.

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Phase 2: Mit der Anhebung des Parameters $\zeta = \zeta + 1$ wird das Wavelet um den Faktor eins nach rechts verschoben und der Koeffizient für das nächste Element berechnet. Dieser Vorgang wird bis zum letzten Element des Vektors ζ fortgesetzt.

Phase 3: In dieser Phase wird die Ausdehnung des Wavelets um das nächstgrößere Element des Vektors η erhöht. Mit der Änderung des Skalierungsparameters erhält das Morlet-Wavelet eine neue Eigenschaft und wird auf den Anfangspunkt des Vektors ζ zurückgesetzt.

Phase 4: Im letzten Schritt wird der Vorgang aus den Phasen eins bis drei für alle Elemente des Vektors η und ζ durchgeführt, sodass für jede Parameterkombination ein Koeffizient berechnet wurde.

Entsprechend dieser Signalanalyse erhält man eine Koeffizienten-Matrix $C_\psi(\eta, \zeta)$, die den Übereinstimmungsgrad an jeder Position von ζ zur Skalierung η beschreibt. Das Beispiel der Abb. 25 zeigt das Transformationsergebnis, das die Ähnlichkeit zwischen dem Dreipunktsignal und dem Morlet-Wavelet darstellt.

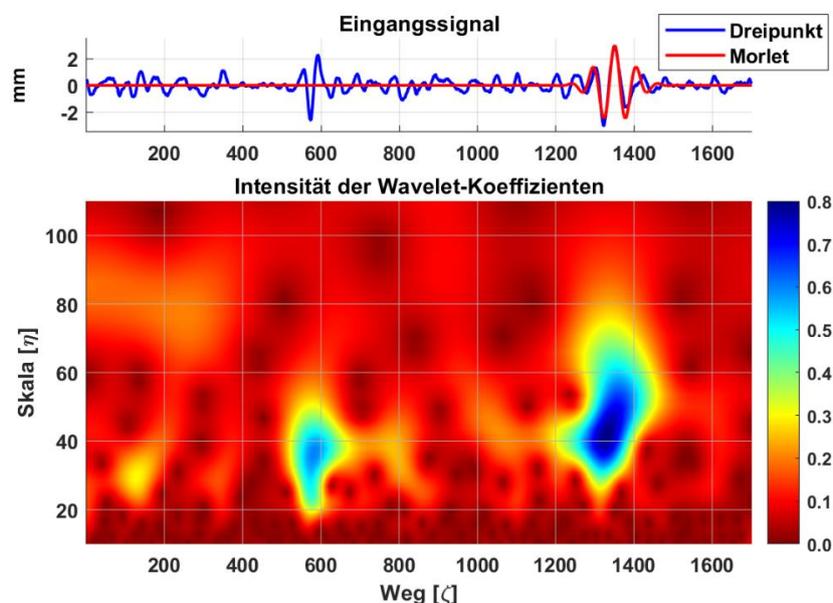


Abb. 25: Dreipunktsignal der Längshöhe (blau) mit parametrisiertem Morlet-Wavelet $\eta = 45$ und $\zeta = 1350$ (rot) als Eingangssignal (oben); Berechnete Wavelet-Koeffizienten mit Auflösung über die Skalierung des Wavelets (unten)

Die Abb. 25 zeigt zwei unterschiedliche Signalinformationen. Im oberen Bildabschnitt werden die Signaleigenschaften des Dreipunktsignals sowie die des definierten Morlet-Wavelet dargestellt. Der untere Teil der Abbildung zeigt hingegen das Ergebnis der Transformation, das den Übereinstimmungsgrad zwischen dem Wavelet und dem Dreipunktsignal beschreibt. Dieser wird ähnlich wie bei einer Kreuzkorrelation durch Koeffizienten ausgedrückt. Entsprechend dem Kapitel 3.6.4 zeigt das Korrelationsergebnis die Ähnlichkeit bzw. Vergleichbarkeit zweier Signalverläufe zueinander. Mit der Wavelet-Transformation wird jedoch nicht nur eine Signala-paarung korreliert, sondern unterschiedliche Ausdehnungsformen des Wavelet in Bezug auf das Eingangssignal bewertet. Die Darstellung der normierten Koeffizienten erfolgt daher in ein Weg-Skalen-Diagramm. Wie bereits im Kapitel 3.6.2 erläutert, werden Koeffizienten mit einem Wert von 1 der absoluten Übereinstimmung zugeordnet. Werte von 0 zeigen wiederum keine Ähnlichkeit zwischen dem Wavelet und dem Eingangssignal.

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

Durch die Ähnlichkeit einer Wavelet-Transformation zur Kreuzkorrelation, welche jedoch in Bezug auf die Skalierung nicht der wahren Wellenlänge entspricht, muss die Skalierung mit der Grundfrequenz des Morlet-Wavelets gleichgesetzt werden. Dabei lassen sich mit Hilfe des Skalierungsparameters η und der Grundfrequenz f_0 die Pseudo-Frequenzen F bestimmen. Diese Pseudo-Frequenzen orientieren sich an den Eigenschaften des Morlet-Wavelets sowie an den Übereinstimmungsmerkmalen und zeigen so ein nachgeahmtes Frequenzverhalten. Dieses lässt sich über die Formel (3.25) berechnen.

$$F = \frac{f_0}{\eta} \quad (3.25)$$

Ein wesentlicher Vorteil der Wavelet-Transformation liegt in der direkten Analyse von Frequenzinhalten. Jedoch erlaubt das Dreipunktsignal aufgrund der im Kapitel 3.4 beschriebenen Signalverarbeitung keine eindeutige Bestimmung von Fehlerursachen im Frequenzbereich. Dementsprechend wird für die Charakterisierung von Einzelfehlern das 25 kHz abgetastete Achslagerbeschleunigungssignal analysiert. Das Beispiel in der Abb. 26 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen den ALB (blau), dem DPS (grün) und dem Morlet-Wavelet (rot).

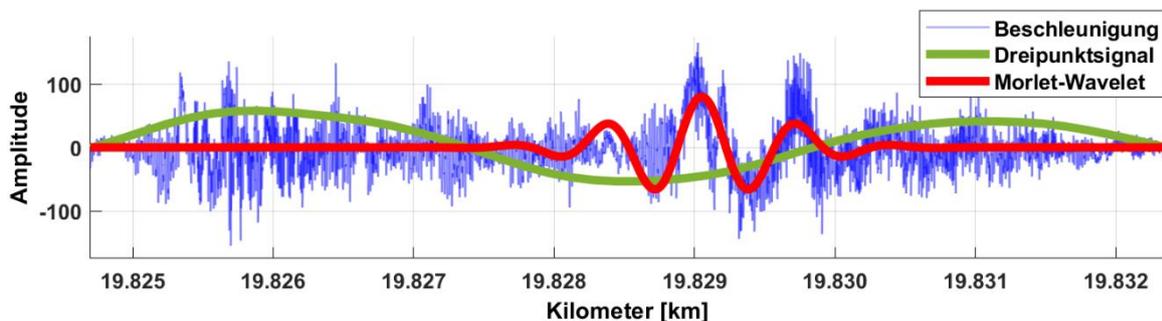


Abb. 26: Signalanalyse des 25 kHz abgetasteten Achslagerbeschleunigungssignals (blau) und dem skalierten Dreipunktsignal (grün) am Beispiel eines Morlet-Wavelets mit ähnlichem Signalverlauf

Im Vordergrund der Abb. 26 steht die Signalanalyse der Achslagerbeschleunigung (blau). Das Beispiel zeigt hier 14.000 Messwerte, die in Kombination mit einem parametrisierten Morlet-Wavelet (rot) von $\eta = 83$ und $\zeta = 11700$ einen vergleichbaren Signalverlauf aufzeigt. Dieser wird am Kilometer 19,829 km verortet. Die hohe Datenrate der 25 kHz abgetasteten Achslagerbeschleunigungen erlaubt dabei eine Beurteilung von Frequenz bzw. Wellenlängen über die des Dreipunktsignals hinaus. Die wesentlichen Unterschiede lassen sich daher über die jeweilige Auflösung der Messwerte verdeutlichen. Anhand des Dreipunktsignals der Abb. 25 werden im Zuge der Wavelet-Transformation höhere Übereinstimmungsmerkmale bestimmt, die in Bezug auf das Achslagerbeschleunigungssignal der Abb. 27 deutlich geringer ausfallen. Mit der Filterung des Dreipunktsignals werden kurzweilige Signalanteile eliminiert, wodurch eine deutlich bessere Übereinstimmung mit dem Wavelet erzielt wird. Dies ermöglicht zwar eine effektivere Mustererkennung, erlaubt jedoch keine eindeutige Charakterisierung der Einzelfehler. In der Abb. 27 werden die besten Übereinstimmungsergebnisse im Bereich der hochaufgelösten Frequenzanteile lokalisieren. Das Ergebnis der WT wird dabei maßgeblich durch die Beziehung zwischen der Abtastrate und der Skalierung des Wavelets bestimmt. Mit der Ausdehnung über mehrere Punkte wird mit zunehmender Skalierung der Übereinstimmungsgrad zwischen der ALB und dem Wavelet immer stärker beeinflusst. Hohe η -Werte lassen sich daher eher einer geringeren Ähnlichkeit zuordnen als kleinere, was sich hauptsächlich in der mangelnden Übereinstimmung bei hohen η -Werten zeigt. Der erläuterte Einfluss lässt sich vor allem über das logarithmisch angeordnete Frequenzband der Abb. 27 verdeutlichen.

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

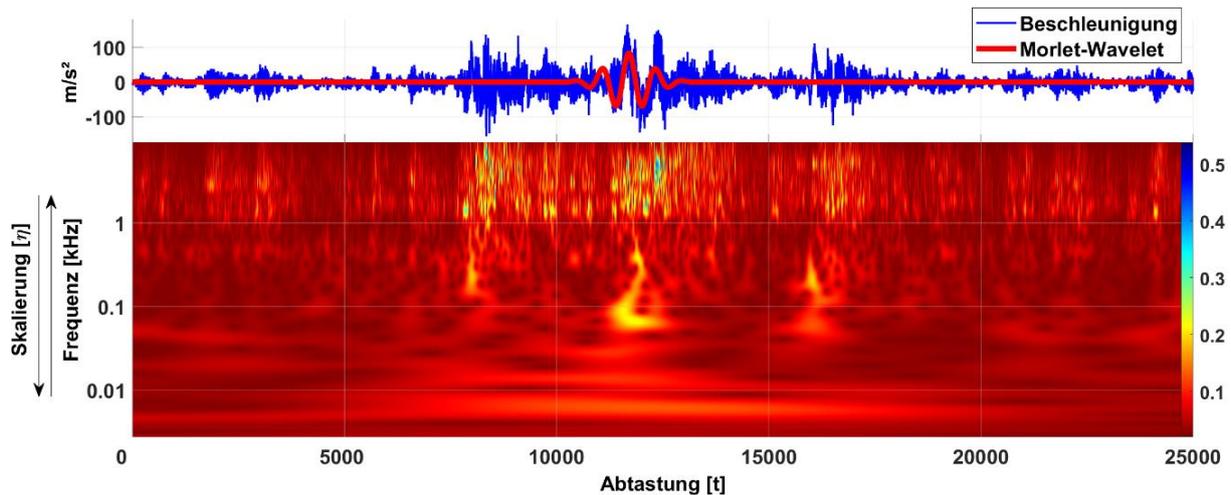


Abb. 27: ALB mit Morlet-Wavelet $\eta = 83$ und $\zeta = 11700$ (oben); Ergebnis der Wavelet-Transformation mit Auflösung der Koeffizienten im Frequenzbereich (unten)

In der Abb. 27 werden die normierten Achslagerbeschleunigungen mittels des Morlet-Wavelet analysiert. Die Auswertung der ALB erfolgt hier ausschließlich im Zeitbereich. Erst mit dem Ergebnis der Transformation werden die Wavelet-Koeffizienten, wie im Kapitel 2.2 erläutert, auf den Streckenkilometer verortet und eine Verknüpfung mit der Örtlichkeit hergestellt.

3.6.4 Vergleich von Frequenzinhalten über die Korrelationsfunktion

Der Nutzen einer Korrelationsfunktion für die Charakterisierung von Einzelfehlern liegt in der Beurteilung der durch die Wavelet-Transformation berechneten Frequenzbänder. Es werden Unterschiede zwischen zwei Frequenzbändern oder zu einem spezifizierten Muster (theoretisches Frequenzverhalten von Gleislagefehlern) bewertet. Über den Korrelationskoeffizienten lässt sich anschließend eine einheitliche und automatisierte Beurteilung von Übereinstimmungsmerkmalen realisieren, die eine Interpretation der Fehlerursache erleichtert. Die Kreuzkorrelationsfunktion wird in vielen Bereichen der Wissenschaft und Industrie für die Beurteilung der zeitlichen bzw. örtlichen Zusammenhänge zweier Messreihen (Merkmale) eingesetzt. Diese werden im Folgenden als x - und y -Werte bezeichnet. Es wird ein Übereinstimmungsverhältnis bestimmt, dass sich über den Mittelwert, die Varianz und die Kovarianz der beiden Signalverläufe berechnen lässt. Das arithmetische Mittel \bar{x} bildet die Basis der Signalanalyse und lässt sich entsprechend der Formel (3.26) aus den Funktionswerten von x_n bestimmen.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad (3.26)$$

Über die Funktionswerte von y_n lässt sich mit der Formel (3.27) der Mittelwert für \bar{y} berechnen.

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \quad (3.27)$$

Die Varianz σ_x wird über die Formel (3.28) berechnet.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \quad (3.28)$$

3.6 Analyse der vertikalen Achslagerbeschleunigungen

Entsprechend der Formel (3.29) erhält man die Varianz σ_y .

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2 \quad (3.29)$$

In der Stochastik beschreibt die Varianz den Grad der Streuung einer zufälligen Größe, die auch als Abweichung vom Erwartungswert bzw. vom Mittelwert betrachtet werden kann. Ein Zusammenhang zwischen x_n und y_n wird über die Kovarianz bestimmt. Diese lässt sich über die Formel (3.30) berechnen.

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y}) \quad (3.30)$$

Durch die Normierung der Kovarianz erhält man den Koeffizienten r der Korrelation. Dieser lässt sich über die Formel (3.31) berechnen. Dafür muss das Produkt aus den Standardabweichungen von σ_x und σ_y gebildet und die Kovarianz durch diese dividiert werden. Als Ergebnis wird ein Wertebereich zwischen -1 und +1 betrachtet.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.31)$$

Über den Korrelationskoeffizienten r wird das lineare Verhältnis zweier Merkmale zueinander ausgedrückt, die zwei mindestens intervallskalierte Eigenschaften besitzen. Der Koeffizient kann dabei einen dimensionslosen Zustand zwischen -1 und +1 annehmen, der den linearen Übereinstimmungsgrad der Merkmale beschreibt. Grenzt dieser an -1 bzw. +1 wird dem Korrelationsergebnis ein hoher linearer negativer bzw. positiver Zusammenhang unterstellt. Wird hingegen ein Koeffizient nahe 0 betrachtet, besteht ein unkorreliertes Verhältnis der Merkmale. Jedoch können auch nicht lineare Zusammenhänge voneinander abhängen. Die Korrelation ist daher kein geeignetes Mittel für die absolute Beurteilung von stochastischen Abhängigkeiten. Der lineare Zusammenhang kann dabei vor allem über das Ergebnis einer Kreuzkorrelation oder Autokorrelation betrachtet werden. Letztere Funktion untersucht die Wiederholung von Mustern innerhalb einer Messreihe. Die Kreuzkorrelation hingegen untersucht verschiedene Datensätze (Merkmale) nach ähnlichen Mustern. [SLOVAK, 2012; KREYSZIG, 1991]

3.6.5 Beurteilung von Übereinstimmungsmerkmalen im Frequenzbereich

Die Bewertung von Gleislagefehlern über das Frequenzverhalten der ALB führt bei gleichen Fahrbahneigenschaften und konstanten Messverhältnissen in der Regel zu einem vergleichbaren Frequenzmuster. Eine Randbedingung bildet bspw. die Fahrzeuggeschwindigkeit. Je nach Fahreigenschaften und den betrieblichen Bedingungen können sehr unterschiedliche Frequenzinhalte über das Achslagerbeschleunigungssignal wahrgenommen werden. Diese variieren je nach Ausdehnung der Störstelle im Gleis (Frequenzbereich der Gleislagefehler), dem Einfluss der Fahrbahnkomponenten (z. B. die Frequenzinhalte am Herzstück, Schienenstoß etc.) und der Anregung aus der Schienenoberfläche (Fahrflächenfehler). Auch die Befahrung der Schiene beeinflusst das Frequenzverhalten. Daher können z. B. am Herzstück einer Weiche allein durch das Kreuzen mit dem direkten oder indirekten Radsatz (Herzstücklücke) oder über den Kontaktpunkt zwischen Schienenoberfläche und der Lauffläche des Rades verschiedene Frequenzinhalte analysiert werden. [LE, 2009]

3 Messung und Bewertung der Gleislage im Netz der DB

Um das Ergebnis der Wavelet-Transformation bewerten zu können, werden die analysierten Frequenzbereiche verschiedenen Fehlerklassen zugeordnet. Diese Kategorien folgen dem im Kapitel 4.1 beschriebenen Eigenschaften des Eisenbahnoberbaus. Das Spektrum von $1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ zeigt überwiegend die unmittelbaren Reaktionen des Fahrzeuges auf die Gleislage. Der Frequenzbereich von $50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ wird hingegen den Eigenschaften der Fahrbahnkomponenten sowie der damit verbundenen Fahrzeug-Fahrweg-Interaktionen zugeordnet. Hier spielen schon die elastischen Eigenschaften und Eigenfrequenzen der Radsätze eine Rolle. Anregungen oberhalb von 400 Hz werden häufig geometrischen Fehlern in der Schiene zugeordnet, die als Fahrflächenfehler Einfluss auf das Achslagerbeschleunigungssignal nehmen. [RIPKE, 1994]

Durch die Parametrisierung des Wavelets wird die Auflösung der Koeffizienten definiert. Für die Interpretation der Ergebnisse ist daher der Informationsgehalt der Wavelet-Koeffizienten zu berücksichtigen. Mit der Erhöhung der η -Werte (Skalierung) steigt die Ausdehnung des Wavelets. Dies führt zu geringen Intensitäten der Koeffizienten (Übereinstimmungsgrad) im niederen Frequenzbereich, die ab einem bestimmten Wert nicht mehr interpretierbar sind. Die Ausdehnung bzw. Skalierung des Morlet-Wavelets wird daher auf $k_{\max} = 130$ begrenzt, die in etwa einer Frequenz von 1 Hz entspricht. Um ähnliche Fehlerursachen zu charakterisieren, wird das Ergebnis der Wavelet-Transformation in fünf unterschiedliche Frequenzbereiche zerlegt. Diese Bereiche orientiert sich an den bereits erläuterten Fehlerklassen und ermöglicht eine detaillierte Beurteilung der verschiedenen Einflussfaktoren.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit beeinflusst das Frequenzverhalten. Die Interpretation als auch die Einteilung von Fehlern stehen daher in Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit. Der Frequenzbereich der Gleislage wird bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h zwischen $1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$ verortet. In diesem Bereich lassen sich die Eigenschaften des Dreipunktsignals mit dem Spektrum der Achslagerbeschleunigungen verknüpfen. Der Übergang zwischen dem Frequenzverhalten der Gleislage und dem der Fahrbahnkomponenten wird zwischen $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ bestimmt. In diesem wird vor allem die Schwellenfahrfrequenz lokalisiert. Die Einflüsse aus den Fahrbahnkomponenten werden durch Frequenzinhalte zwischen $80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ wahrgenommen. In diesem Bereich lassen sich die Eigenschaften der Herzstücke (Weichen) oder mangelhafte Schienenverbindungen (z. B. Isolierstöße) detektieren. Fahrflächenfehler werden hingegen im Frequenzbereich von $0,4 \text{ kHz} < f < 1,0 \text{ kHz}$ (z. B. Schlupfwellen) und $1 \text{ kHz} < f < 9 \text{ kHz}$ (z. B. Riffeln) bewertet.

Um die Ähnlichkeit unterschiedlicher Einzelfehler über das Frequenzverhalten zu bewerten, wird durch die im Kapitel 3.6.4 erläuterte Korrelation eine Vergleichbarkeit erzielt. Dadurch können bekannte Anlagenzustände bzw. das Frequenzverhalten für die Interpretation von Fehlerursachen eingesetzt werden. Die Ähnlichkeit der Frequenzbänder wird entsprechend der Tabelle 10 bewertet und für die Auswertung der Ergebnisse im Kapitel 4 und 5 eingesetzt.

Tabelle 10: Bewertungsmatrix der Übereinstimmungsmerkmale

Übereinstimmungsgrad	Einteilung [%]		Korrelationsergebnis	Definition der Übereinstimmungsmerkmale	Farbgebung
Keiner	0	-	20	schwache bis keine	rot
Gering	20	-	40	kaum Ähnlichkeiten	orange
Mittel	40	-	60	leicht ausgeprägte	gelb
Gut	60	-	80	wesentliche Merkmale	hellgrün
Hoch	80	-	100	alle Parameter widergespiegelt	grün

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Das Messen und Erkennen von Schwachstellen im Eisenbahnoberbau sowie deren Verortung auf den Gleiskilometer stellt derzeit keine neue Herausforderung an das Modell der Gleislagebewertung dar. Jedoch spielt immer mehr das Planen von Maßnahmen und Instandhalten der Fahrbahn eine wichtige Rolle. Daher stellen Informationen über die zeitliche Entwicklung von Einzelfehlern sowie die Kenntnis über die Fehlerursache einer Gleislageveränderung eine zentrale Bedeutung für die Verfügbarkeit der Fahrbahn dar. Die Auswirkungen auf das Fahrbahnssystem beruhen im Allgemeinen auf dem Lasteneintrag einer Strecke. Diese entstehen im Zuge des Eisenbahnbetriebs, der durch die Belastung aus Fahrzeugmasse bzw. Achslasten sowie unterschiedlichen Geschwindigkeiten eine Verformung der Gleislage bewirkt.

4.1 Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn

Die Einordnung der Einzelfehler setzt die Kenntnis von Bezugsgrößen sowie eine Zuordnung bestimmter Eigenschaften voraus. In der Europäischen Norm [EN-13848, 2016] werden daher Mindestanforderungen für Parameter im Eisenbahnoberbau definiert. Diese bilden die Grundlage für die Einordnung und Klassifizierung von Fehlern. Dabei orientiert sich die Bewertung der Längshöhe an den Wellenlängen der Gleislage, die entsprechend der Tabelle 11 in drei Bereiche unterteilt wird.

Tabelle 11: Gruppierung der Wellenlängenbereiche von λ für Fehler der Längshöhe nach EN13848-1:2016 (D) [vgl. DIN-31051, 2012]

Wellenlängenbereich	von	bis	Wellenlänge
D1	3 m	$< \lambda \leq$	25 m
D2	25 m	$< \lambda \leq$	70 m
D3	70 m	$< \lambda \leq$	150 m

In der Europäischen Norm und über die Inspektionsmessung wird der Wellenlängenbereich der Gleislage bewertet. Das Dreipunktsignal der Inspektion orientiert sich hier vor allem am Beurteilungsmaßstab des SR-Verfahrens. Mittels der Wavelet-Transformation wird hingegen das Frequenzverhalten eines Gleislagefehlers bewertet, das über den Wellenlängenbereich der Tabelle 11 hinaus die Einzelfehlercharakterisierung auf Basis des gesamten Spektrums des Eisenbahnoberbaus erlaubt. Da die Frequenzanteile der Achslagerbeschleunigungen mit den Frequenzen der Anregung übereinstimmen, können die analysierten Spektren unterschiedlichen Fehlertypen zugewiesen werden. Jedoch muss der Zusammenhang zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit v , der Anregungsfrequenz f und der Wellenlänge λ des Einzelfehlers beachtet werden. Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann sich dabei von Gleisabschnitt zu Gleisabschnitt als auch in den aufeinanderfolgenden Messfahrten unterscheiden und sich daher maßgebend auf den Amplitudenverlauf der ALB (Kapitel 3.3) auswirken. Dieser Einfluss kann jedoch durch die Normierung auf die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit der analysierten Eisenbahnstrecke nahezu vernachlässigt werden. Die Ausdehnung des Fehlers lässt sich anschließend mit Hilfe der Formel (4.1) berechnen und einheitlich interpretieren.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.1)$$

Mit der Interpretation der Gleislage werden aus der Beziehung zwischen Fahrzeug- und Fahrwegeigenschaften Einzelfehler bestimmt. Diese stehen in Abhängigkeit zur Qualität des Eisenbahnoberbaus. Folglich kann es zu einer negativen Beeinflussung der Gleislage kommen, die sich aus der Überlagerung von unterschiedlichen Fehlern des Eisenbahnoberbaus ergibt.

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Mit der Betrachtung von Wellenlängen über die eines Gleislagefehlers hinaus, wird eine Klassifizierung von Einzelfehlern notwendig. Die Einteilung der Fehlerklassen wurden bereits im Kapitel 3.6.5 erläutert. Die Abb. 28 skizziert die Interpretation der Frequenzinhalte am Aufbau des Eisenbahnoberbaus.

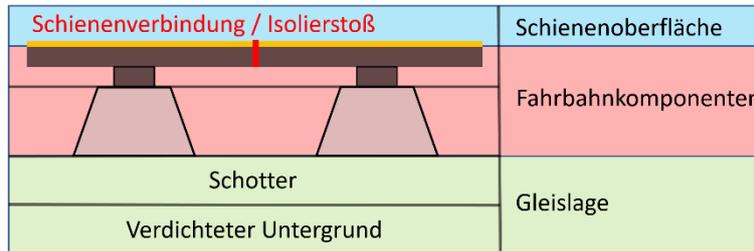


Abb. 28: Interpretation der Frequenzinhalte am Querschnitt des Eisenbahnoberbaus

Die Zuordnung von Fehlern erfolgt über Frequenzschwellen. Diese orientieren sich an den Eigenschaften der Gleislage, der Fahrbahnkomponenten sowie der Schienenoberfläche. Die Abb. 29 zeigt diese Schwellenwerte für eine Geschwindigkeit von 100 km/h. Darüber hinaus wird der auswertbare Wellenlängenbereich des Dreipunktsignals (Längshöhe D_z) im Verhältnis zum Informationsgehalt der Achslagerbeschleunigungen hervorgehoben.

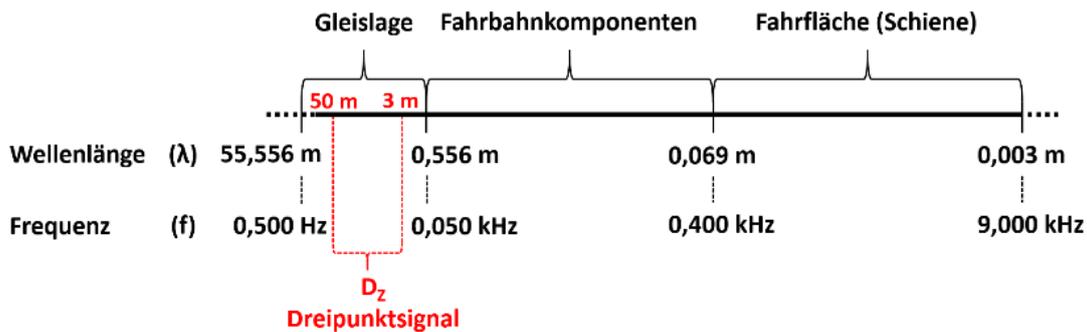


Abb. 29: Darstellung der Fehlerklassen über den Frequenzbereich f sowie der Wellenlänge λ bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h, im Verhältnis zum auswertbaren Wellenlängenbereich des Dreipunktsignals der Längshöhe D_z

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wirkt sich maßgebend auf den Amplitudenverlauf der ALB aus und beeinflusst so das Frequenzverhalten einer Messung. Generell ist zu beachten, dass durch hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten vor allem langwellige Gleislageveränderungen, entsprechend der Tabelle 11, das Fahrverhalten beeinträchtigen. Kurzwellige Ereignisse bestimmen hingegen das dynamische Verhalten bei geringen Geschwindigkeiten. Die Abb. 30 verdeutlicht den Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf das Frequenzverhalten.

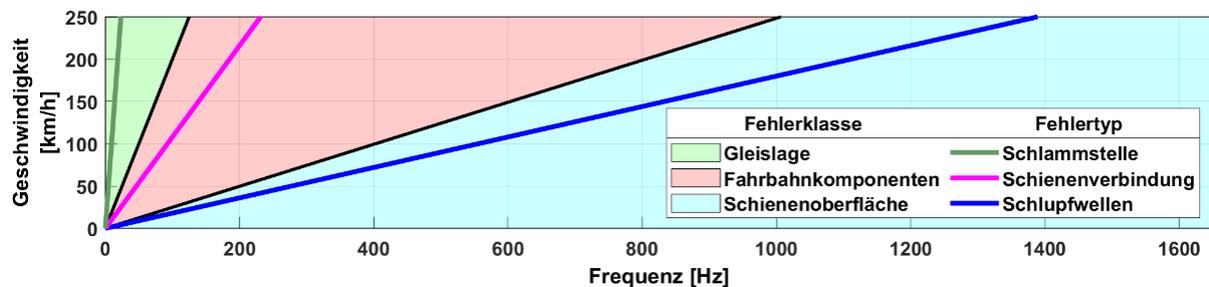


Abb. 30: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Frequenzverhalten von Fehlern im Eisenbahnoberbau mit Beispielen der Gleislage (grün), der Fahrbahnkomponenten (rot) und der Schienenoberfläche (blau)

4.1 Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn

Die Abb. 30 beschreibt neben den drei definierten Fehlerklassen einzelne Fehlertypen des Eisenbahnoberbaus und verdeutlicht so die Möglichkeit einer Unterscheidung von Fehlern im Fahrbahnsystem. Diese werden im Folgenden näher betrachtet und an Beispielen erläutert.

4.1.1 Gleislagefehler

Der Begriff Gleislage umfasst die Veränderung des Gleises in Lage und Höhe. Dabei wird dieser Fehlerklasse, in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit, ein Frequenzverhalten zwischen $1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ zugeordnet. Über die Längshöhe werden vor allem Setzungen im Bereich des Schotteroberbaus betrachtet. Diese können sich punktuell unterscheiden und sind stark abhängig von der Entwicklung von Schwelle zu Schwelle [BAEßLER, 2008]. Eine stabile Gleislage unterliegt vor allem den örtlichen Systemvoraussetzungen. Lokale Unterschiede in der Steifigkeit der anstehenden Böden können dabei zu Gleislagefehlern führen [KIPPER, 2016]. Die Abb. 31 zeigt eine sehr ausgeprägte Form eines Gleislagefehlers, der aufgrund von Steifigkeitsunterschieden des Unterbaus entlang der Fahrbahn hervorgerufen wird. Durch Vibration aus dem Bahnbetrieb oder Baumaßnahmen wie im Beispiel der Abb. 31 dargestellt, kommt es zu Abweichungen von ursprünglichem Querschnitt der Trasse (Soll-Gleislage). Die Abbildung zeigt einen Streckenabschnitt, der im Zuge einer Geschwindigkeitserhöhung neu trassiert wurde. Durch die Anpassung der Radien kommt es zu einer veränderten Linienführung der Strecke. Mit der neuen Gleislage wird dabei ein über Jahrzehnte durch den Eisenbahnverkehr verdichteter Untergrund verlassen. Im Bereich des neu trassierten Gleises kommt es dabei zu Setzungen an der Fahrbahnkonstruktion, die durch langwellige Gleislagefehler einer inhomogenen Setzung zugeordnet werden.



Abb. 31: Gleislageveränderung durch punktuelle Setzungen am Fahrbahnsystem

In der Regel werden Gleislagefehler durch die Eigenschaften der Oberbaukonstruktion oder durch Fehler in der Schienenoberfläche (Fahrflächenfehler) erzeugt. Mit der Überlagerung verschiedener Fehlertypen kann die Fehlerursache nicht eindeutig zugeordnet werden. Daher müssen vor allem über das Frequenzverhalten eines Einzelfehlers die Einflüsse aus der Oberbaukonstruktion und der Schienenoberfläche beurteilt werden.

4.1.1.1 Hohllagen

Eine Ursache für Gleislageveränderung stellen Hohllagen dar. Hohllagen entstehen im Auflagebereich zwischen Schwelle und Bettung und werden durch lokale Setzungen des Untergrunds oder durch Umlagerung von Schotterkörnern hervorgerufen. Im unbelastetem Gleis zeigt sich dies durch eine nicht verdichtete Bettung. Durch die fehlende Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotter kommt es unter der Belastung des Zugverkehrs zur Einsenkung der Schiene und Anregung des Radsatzes. Diese Schwingung kann am Achslager des Fahrzeugs durch erhöhte Beschleunigungswerte festgestellt werden. Durch die starre Verbindung zwischen Schiene und Schwelle (Gleisrost) kann sich die Wellenbewegung aus dem

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Durchbiegen der Schiene auf mehrere Schwellen auswirken. Die Einflussgröße steht dabei in Abhängigkeit zur Bettungssteifigkeit. Mit der dynamischen Bewegung des Gleisrosts kommt es zur Kornumlagerung und durch die kontinuierliche Einwirkung aus dem Zugbetrieb zum Freilegen der Schwelle [LICHTBERGER, 2010]. Die Abb. 32 zeigt eine sehr ausgeprägte Form von Hohllagen, die sich über mehrere Schwellen erstrecken.



Abb. 32: Beispiel für Hohllagen im Schotteroberbau

Entsprechend der jeweiligen Ausdehnung des Gleislagefehlers wird die Schwingung des Radsatzes durch eine unterschiedliche Frequenz angeregt. Mit der Wechselwirkung der Kräfte, von Beschleunigung und Bewegung zwischen Fahrzeug und Fahrweg, kann dies zu einem erhöhten dynamischen Verschleiß an der Fahrbahnkonstruktion führen.

4.1.1.2 Schlammstellen

Eine ausgeprägtere Form der Hohllagen beschreiben Weiße- oder Schlammstellen. Hervorgerufen werden derartige Gleislageveränderungen in der Regel durch eine mangelhafte Entwässerung des Eisenbahnoberbaus. Ein defektes oder nicht vorhandenes Tragschichtsystem kann in Verbindung mit dem anstehenden Oberflächenwasser zur Zersetzung des Planums führen. Durch ein punktuell aufgelöstes Tragschichtsystem kommt es zum sprichwörtlichen Pumpen der Schwelle, welche den verdichteten Schotter auflöst. Dieses führt wiederum zu einer instabilen Lagerung der Bettung und so zu Gleislagefehlern im Eisenbahnoberbau. Über die Abb. 33 werden die optischen Merkmale einer Schlammstelle verdeutlicht.

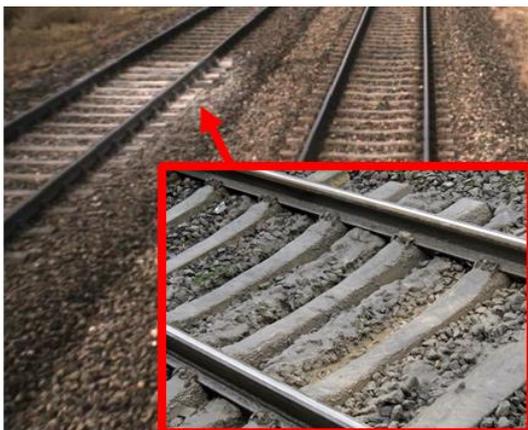


Abb. 33: Beispiel einer Schlammstelle im Gleisbereich (DBVIS)

Gleislageveränderungen werden in der Regel durch die Oberbaudynamik ausgelöst und führen in Verbindung mit witterungsbedingten und physikalischen Einflüssen zu Gleislagefehlern. Dabei entstehen diese Gleislageveränderungen nicht unmittelbar durch das beschädigte Tragschichtsystem. Eher werden durch den Lasteneintrag aus dem Zugverkehr und einem

4.1 Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn

qualitativen Mangel im Eisenbahnoberbau (defekter Schienen- oder Isolierstoß etc.) Schwingungen angeregt, die sich über die Fahrbahnkomponenten auf das Tragschichtsystem auswirken.

4.1.1.3 Gleislagefehler im Bereich von Widerlagern an Brücken

Gleislagefehler im Bereich von Brücken werden in der Regel am Brückenanfang und -ende gemessen. Die Schnittstelle zwischen dem Erdkörper (z. B. Damm) und einem Kunstbauwerk (Brücke) bildet dabei das Widerlager. Dieses dient dem Lastabtrag aus dem Überbau der Brücke in vertikaler und horizontaler Richtung. Dabei unterstützt das Widerlager die Stabilität des Erdkörpers durch die Aufnahme der Erddruckkräfte. In der Regel treten Setzungen im Bereich der Hinterfüllung auf, welche am Beispiel der Abb. 34 verdeutlicht werden. Diese wirken sich auf die Längshöhe der Fahrbahn aus. Im lückenlosen Gleis, das bei Brücken mit langen Dehnwegen durch Schienenauszüge unterbrochen wird, kann es im Bereich der Hinterfüllung zu Setzungsmulden infolge von Steifigkeitssprüngen in der Fahrbahn kommen. Im unbelasteten Gleis erlaubt dabei die Biegesteifigkeit der Schiene eine Überbrückung der Setzungsdifferenzen (Hohllagen). Dies betrifft vor allem die ersten Schwellen im Bereich der Hinterfüllung. Durch den Zugbetrieb kommt es in diesem Bereich zur stoßartigen Anregung der Schiene, welche sich je nach Ausprägungsgrad der Hohllagen durch erhöhte vertikale Beschleunigungswerte am Achslager zeigen. [SZCZYRBA, 2013]

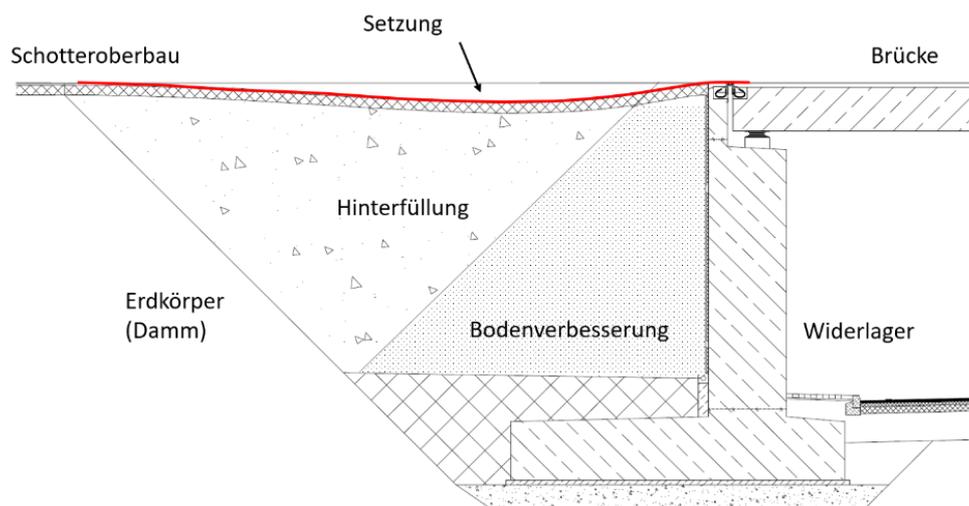


Abb. 34: Ansicht eines Widerlagers zwischen Damm- und Brückenabschnitt mit Setzungsmulde im Bereich der Hinterfüllung

Durch die Setzung der Fahrbahn kommt es vor allem zur Ausbildung einer Rampe, die mit zunehmender Verschlechterung in regelmäßigen Abständen gestopft werden muss und einen erhöhten Instandhaltungsaufwand erfordert.

4.1.2 Fehler an Komponenten der Fahrbahn

Mit dem Zugbetrieb werden kontinuierlich Verkehrslasten in den Bahnkörper übertragen. Die Anregung von Fahrbahnkomponenten (z. B. Schienenbruch, Schienenstoß, Weichenherzstück etc.) erfolgt über den Lasteintrag des Fahrzeugs. Die Lasten aus der Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung werden über die Schiene auf den gesamten Eisenbahnoberbau abgetragen. Je nach Oberbauart (Schiementyp, Zwischenlage, Schwellen, Untergrundsteifigkeit etc.) erleidet die Schiene daher eine Durchbiegung unter dem Radsatz, die über mechanische Modelle

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

wie z. B. durch die Finite-Elemente-Methode oder nach Zimmermann [ZIMMERMANN, 1941] berechnet werden kann. Im Folgenden werden die häufigsten Fehlerursachen aus dem Einfluss der Oberbaukonstruktion betrachtet.

4.1.2.1 Schienenverbindungen

Mit dem Kontakt von Rad auf Schiene wirken auf diese vertikale und laterale Kräfte. Im direkten Kontaktpunkt führt dies zu einer starken dynamischen Beanspruchung, welche sich durch die Einsenkung der Schiene zeigt. Im Bereich von Schienenverbindungen kommt es vor allem zu einer erhöhten Anregung in der vertikalen Richtung. Die Abb. 35 beschreibt zwei Beispiele von Schienenverbindungen. Die linke Abbildung zeigt einen Schienenschweißstoß. Dieser ist im durchgehend geschweißten Gleis zu finden, das als lückenloses Gleis definiert wird. Bei unsachgemäßer Ausführung (Schweiß- bzw. Schleifarbeiten) wird die Fahrfläche der Schiene uneben hergestellt und das Rad erfährt dort eine impulsförmige Anregung. Diese variieren entsprechend der qualitativen Ausführung. Durch das Schleifen können optisch keine wesentlichen Unebenheiten auf der Fahrfläche der Schiene wahrgenommen werden. Jedoch erlaubt die Messung der vertikalen Achslagerbeschleunigungen eine Zuordnung der Anregung. Je nach Qualität können unterschiedliche Eigenschaften dieser Verbindung im Frequenzbereich der Schienenoberfläche und der Fahrbahnkomponenten hervorgehoben werden. Diese Eigenschaften lassen sich ebenfalls dem im rechten Bild der Abb. 35 dargestellten Isolierstoß (ISO) zuordnen. Isolierstöße werden verbaut, um eine Trennung zwischen den Gleisfreimeldeabschnitten zu erzielen. Dabei werden die Gleisstromkreise zweier benachbarter Streckenabschnitte voneinander getrennt. Wie in der Abb. 35 rechts werden dafür Laschen aus Stahl und einer Zwischenlage aus nichtleitenden Materialien (z. B. Kunststoff) verbaut. [SLOVAK, 2012]



Abb. 35: Beispiel für Schienenverbindungen mit Ausführung als Schienenschweißstoß (Links) und Isolierstoß (Rechts)

Durch die Lasche werden beide Schienenenden fixiert und zu einem starren Verbund zusammengefügt. Dieser wird durch die Radlast beansprucht. Dabei wird die Konstruktion nicht nur durch die Biegung der beiden Schienenenden belastet. Vor allem kommt es durch die Unebenheit in der Fahrfläche zur stoßartigen Anregung des Rades, welche über die vertikalen Achslagerbeschleunigungen gemessen werden.

4.1.2.2 Schienenbrüche

In der Regel definiert sich ein Schienenbruch über eine ungewollte Trennung des Schienenstranges in zwei oder mehr Teile [EBA, 2021]. Die Abb. 36 beschreibt einen solchen Schienenbruch, der sich im Bereich einer Schienenschweißnaht zeigt. Mit der Trennung der Schiene

4.1 Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn

wird diese an den jeweils freierwährenden Schienenenden durch die Radlast deutlich stärker beansprucht. Mit der Befahrung einer Bruchstelle kommt es daher vor allem zu einer erhöhten Anregung der Schienenschwingung. Diese wird verursacht durch den Steifigkeitsverlust im Bereich der Bruchstelle. Für die Überwindung der Höhendifferenz, von einem auf das andere Schienenende, wird das Rad vertikal nach oben beschleunigt. Dies führt zu einer Schwingung, die sich durch große Amplituden im Achslagerbeschleunigungssignal bemerkbar macht. Die Amplitudenstärke wird dabei maßgebend durch die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Umso höher die Aufprallgeschwindigkeit, desto höher fällt die Beschleunigung des Rades aus. [SLOVAK, 2012]



Abb. 36: Beispiel eines Schienenbruchs im Bereich einer Schienenschweißung

Ebenso nimmt die Lage der Bruchstelle zwischen zwei Schwellen (Schwellenfach) einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Schiene. Liegt die Bruchstelle auf der Schwelle, wird die Schiene durch diese gehalten und das Durchbiegen reduziert. Befindet sich der Bruch hingegen im Schwellenfach wie in der Abb. 36 dargestellt, wird durch unterschiedlich lange Schienenenden das Einsinken der Schiene deutlich verstärkt. Dies führt zu einem unterschiedlichen Frequenzverhalten. [SLOVAK, 2012]

4.1.2.3 Weichenüberfahrt

Im Bereich von Weichen wird die Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung besonders stark beansprucht. Vor allem im Herzstück- und Zungenbereich wird eine erhöhte Anregung zwischen Rad und Schiene verortet. Entsprechend der Fahrtrichtung von rechts nach links wird über die Abb. 37 erst der Zungenbereich einer Weiche betrachtet. In diesem Punkt einer Weiche wird die Fahrt ins Zweig- oder Stammgleis bestimmt, wodurch das Rad die erste Kraftspitze erfährt. Für die Reduzierung der Fahrzeugauslenkung wird die Zungenspitze an die Fahrkante der entsprechenden Backenschiene gedrückt. Auf das Rad wirken dabei hauptsächlich horizontale Kräfte, welche letztendlich die Fahrtrichtung des Fahrzeugs definieren.

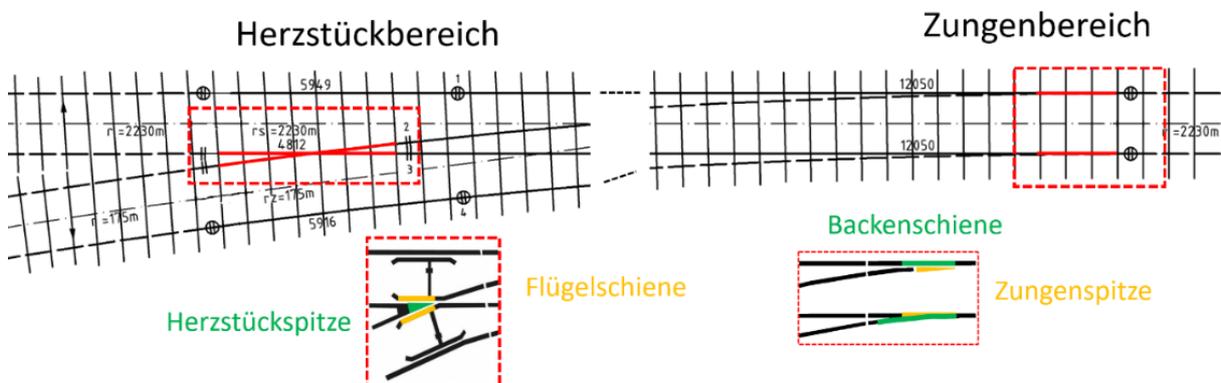


Abb. 37: Überlaufbereiche (rot) mit hoher Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung einer Weiche mit Herzstück (Links) und Zungenbereich (Rechts)

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Mit der Kreuzung des Herzstücks erfährt das Fahrzeug eine weitere Anregung. Diese bezieht sich im Wesentlichen auf die vertikale Ausrichtung des Rades. Je nach Fahrtrichtung übergibt oder übernimmt die Flügelschiene die Führung des zum Herzstück gerichteten Rades von der Herzstückspitze. Dabei wird die Radlast von beiden Komponenten so lange getragen, bis eine Seite ausreichend tragfähig ist. Durch die Höhendifferenz zwischen Herzstückspitze und der 8 mm unter Schienenoberkante liegenden Flügelschiene wird die Übergabe des Rades erleichtert. Jedoch führt die Herzstücklücke dennoch zu einem Stoß, der sich über die Achslagerbeschleunigung wahrnehmen lässt. Die Lagerung der Weiche wird außerdem durch die unterschiedliche Steifigkeit der Bettung bestimmt. Diese wird bedingt durch die spezielle Schwellenteilung im Weichenbereich sowie durch die unterschiedlichen Längen der Schwellen. Durch die stoßartige Anregung des Rades in der Weiche werden daher höhere Schwingfrequenzen des Rades betrachtet. [SLOVAK, 2012]

4.1.2.4 Holzschwellen- und Betonschwellengleis

Mit dem Eisenbahnbetrieb werden die Verkehrslasten erst in die Schiene und anschließend über die Stützpunkte (Schwellen) in den Schotteroberbau übertragen. Die Schwelle beschreibt daher eine Verbindung zweier Fahrbahnkomponenten, die es erlaubt, die Radsatzlasten aus der Schiene über eine größere Fläche in den Schotter zu verteilen. Mit der Abb. 38 wird die Einbindung und Lagerung der Schwelle innerhalb des Eisenbahnoberbaus am Beispiel eines Beton- und Holzschwellengleises nach der DB Richtlinie [DB820.2010, 2018] schematisch dargestellt. Dabei werden nicht nur verschiedene Materialeigenschaften zugeordnet. Es lassen sich ebenfalls unterschiedliche Höhen im Aufbau der Schwellen wahrnehmen. Verbaut werden die Schwellen wiederum quer zur Gleisachse bzw. den Schienensträngen. Durch die Lagerung der Schwelle im Schotterbett, erhält diese eine Lagestabilität, welche die Kräfte aus der Schiene in den Schotter abträgt. Je nach Eigenschaft der Fahrbahn werden die Signalformen der Achslagerbeschleunigungen von unterschiedlichen Oberbautypen betrachtet. Mit dem Schwellenabstand und der Materialeigenschaft einer Schwelle ergeben sich so unterschiedliche Steifigkeiten im Gleis. Dabei zeigt die Abb. 38 nicht nur einen schematischen Aufbau des Oberbaus, sondern ebenfalls den Längsschnitt aus dem Übergang von einem Beton- auf ein Holzschwellengleis. Je nach Oberbautyp kommt es durch die Radsatzlasten zur Anregung des Gleisrosts, der sich je nach Ausführung als Schwingung der Schiene über das Rad am Achslager messen lässt.

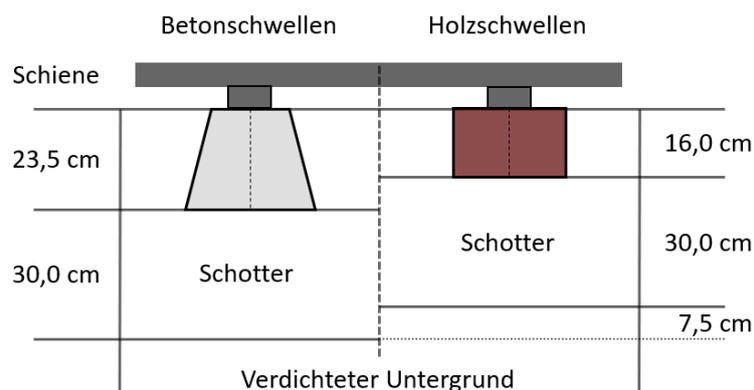


Abb. 38: Schematischer Aufbau der Fahrbahn mit Betonschwelle (Links) und Holzschwelle (Rechts) nach DB Richtlinie [DB820.2010, 2018]

In der Regel werden Betonschwellen verbaut. Durch das hohe Gewicht erlaubt dieser Typ eine gute Lagestabilität, was sich in einer guten Gleislage der lateralen Richtung zeigt. Die

4.1 Betrachtung von Fehlerklassen der Fahrbahn

Eigenschaften von Holzschwellen hingenen basieren auf einem guten elastischen Verhalten bei Beanspruchung sowie dem geringen Gewicht. Holzschwellen werden daher unter anderem auf Brückenkonstruktionen verbaut. Der Vorteil liegt vor allem in ihrem geringeren Gewicht und dem Querschnitt gegenüber einem Betonschwellengleis. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften zwischen Beton- und Holzschwelle ergeben sich verschiedene Anregungen der Fahrbahn, die sich über das Frequenzverhalten zuordnen lassen.

4.1.3 Fahrflächenfehler

Unter dem Begriff Schienenfehler werden Deformationen an der Lauffläche (Längsprofil) oder dem Querprofil einer Schiene bezeichnet. Laut DB Richtlinie sind Schienenfehler

„... Materialveränderungen, -schwächungen oder -trennungen, welche die Schiene bis zum Ausfall schädigen können.“ [DB821.2007, 2019]

Die Eigenschaften der Fahrflächenfehler werden über den Schienenfehlerkatalog nach der UIC klassifiziert. Im Sinne der Charakterisierung von Einzelfehlern werden Fahrflächenfehler als kurzweiliger Mangel von wenigen Zentimetern Länge gesehen, der eine hochfrequente Anregung des Rades verursacht. Aus der dynamischen Beanspruchung zwischen Rad und Schiene kommt es bedingt durch die Anregung zum Verschleiß an der Schienenoberfläche. Dies zeigt sich beispielsweise bei Riffeln auf der Fahrfläche der Schiene. Riffeln lassen sich in geraden Streckenabschnitten in Form von Wellenbergen und -tälern auf der Schienenoberfläche detektieren. Ähnliche Eigenschaften zeigen Schlupfwellen, die in Bögen mit engen Radien an der bogeninneren Schiene gemessen werden. Die Abb. 39 zeigt ein Beispiel für Schlupfwellen.



Abb. 39: Ausbildung von Schlupfwellen auf der Schienenoberfläche

Beide Fehlertypen haben Auswirkungen auf den Fahrkomfort, die Lebensdauer der Schiene und auf die Gleislage. Werden Riffeln und Schlupfwellen nicht beseitigt, entstehen zwangsläufig Gleislagefehler in der Längshöhe, die sich bspw. an hohl liegenden Schwellen zeigen.

4.1.4 Zusammenfassung der Fehlerklassen

Die aufgeführten Beispiele eines mangelhaften Eisenbahnoberbaus lassen sich vor allem über das analysierte Frequenzverhalten des Fehlers (Wellenlänge) bestimmen. Dieses wird entsprechend der Tabelle 12 den Eigenschaften der Gleislage, den Fahrbahnkomponenten oder der Fahrflächenfehler zugeordnet. Die Eingrenzung des Fehlertyps basiert hier auf den Eigenschaften der Fahrbahn und seiner Materialien sowie auf den Erkenntnissen der Fehleranalyse.

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Tabelle 12: Zuordnung von Wellenlängen und Frequenzen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h zur Eingrenzung der Einzelfehler an den erläuterten Beispielen der Gleislage, Fahrbahnkomponenten und Schienenoberfläche

Fehlergruppe	Fehlertyp	Wellenlänge [m]		Frequenzbereich [Hz]		Akustische bzw. Visuelle Eigenschaften des Fehlers
		Von	bis	Von	bis	
Gleislagefehler	Steifigkeitsunterschiede im Unterbau	1,00	25,00	1,1	27,8	Setzungen an der Fahrbahnkonstruktion
	Hohllagen*	1,00	3,00	9,3	27,8	Keine Kontaktfläche zwischen Schotter und Schwelle
	Mangel am Tragschichtsystem z. B. durch Schlammstellen*	1,20	7,00	4,0	23,1	Schotter mit Feinteilen aus den unteren Schichten und Ansammlungen von Wasser
	Widerlagerüberfahrten*	1,50	3,00	9,3	18,5	Hohllagen im Bereich der Hinterfüllung von Widerlagern
Fehler an Fahrbahnkomponenten	Schienenbruch	0,15	0,30	92,6	185,2	Bruchstelle im Schienenstrang
	Schienenverbindung	0,25	0,35	79,4	111,1	Schweißnaht oder Lasse seitlich am Schienenstrang
	Schwellenfach	0,55	0,65	42,7	50,5	Schwellenabstand
	Weichenüberfahrten (Herzstück)	0,16	0,87	31,9	173,6	Dumpfes Schlaggeräusch bei der Überfahrt
	Weichenüberfahrten (Zunge)	0,30	0,40	69,4	92,6	Erhöhter wahrnehmbarer Verschleiß an der Weichenzunge
Fahrflächenfehler	Riffeln	0,01	0,10	277,8	2777,8	Hell-glänzende Berge, dunkle Wellentäler
	Schlupfwellen	0,03	0,30	92,6	925,9	Wellenberg glatt, Wellentäler rau, hell und breit

* Die Wellenlänge variiert entsprechend der Ausdehnung des Fehlers (Störstelle).

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

Die Tabelle 12 zeigt, dass sich Wellenlänge bzw. Frequenzbereich bestimmter Fehlerformen überschneiden. Die eindeutige Zuordnung von Fehlern über nur ein Merkmal bzw. Frequenzinhalt erweist sich daher als schwierig. Jedoch werden Einzelfehler der Gleislage vor allem durch verschiedene Schwingungen aus dem Eisenbahnoberbau angeregt. Das Muster eines Fehlers (Fehlertyp) lässt sich daher eindeutig über die unterschiedlichen dominierenden Spektren des Frequenzbandes eines Einzelfehlers darstellen.

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

Durch die hohe Auflösung der ALB kann der tatsächliche Zustand des Fahrweges und seiner Komponenten bestimmt werden. In diesem Punkt erfüllt das FwM alle Anforderungen in Bezug auf die Auswertung gemäß Richtlinie [DB821.2001, 2020]. Dies erlaubt neben der herkömmlichen Gleislagebewertung mittels eines Dreipunktsignals eine vollkommen neue Beurteilung von Einzelfehlern der Längshöhe. Wie die Abb. 40 zeigt, liegt eine Herausforderung in der Verknüpfung von Informationen aus dem DPS (Beurteilungsmaßstab) und dem analysierten Frequenzverhalten der ALB. Durch die bereits erläuterten Eigenschaften des Dreipunktsignals (Kapitel 3.4.2) lassen sich keine eindeutigen Fehlermerkmale darstellen. Über das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen können hingegen Fehler charakterisiert, jedoch keine sicherheitsrelevanten Kriterien (Beurteilungsmaßstäbe) bestimmt werden. Die Kombination dieser beiden Signaltypen sowie deren Verknüpfung mit der Streckeninformation beschreibt daher die wohl wichtigste Anforderung der Einzelfehlercharakterisierung.

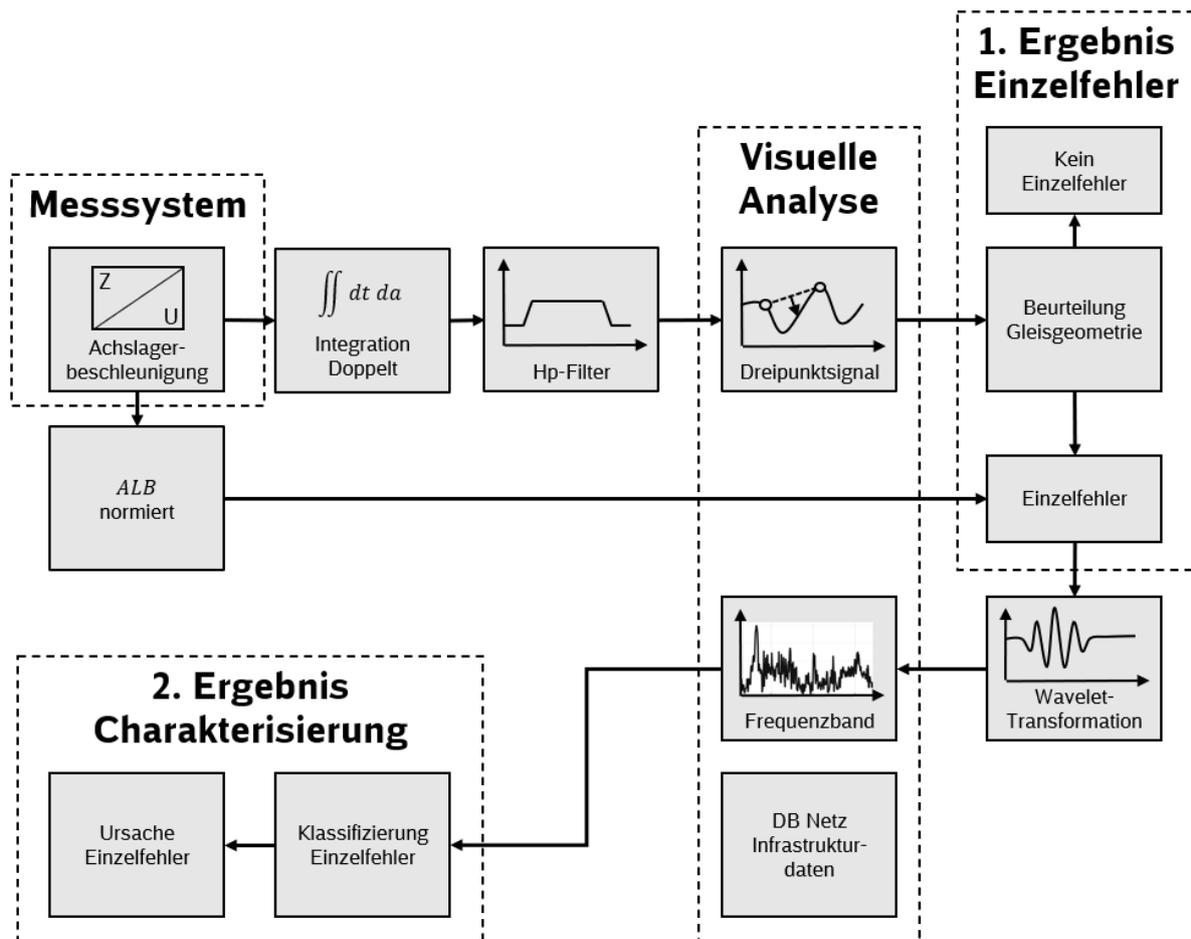


Abb. 40: Prozess der Einzelfehlercharakterisierung mit Beurteilung (1. Ergebnis) und Bestimmung der charakteristischen Fehlerursache (2. Ergebnis) einer Störstelle

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

4.2.1 Einzelfehlerdetektion

Die frühzeitige Detektion von Störstellen (Einzelfehlern) stellt eine wesentliche Anforderung an die Verfügbarkeit der Fahrbahn dar. Für die Charakterisierung von Einzelfehlern müssen diese vor allem lokalisiert werden. Dafür wird das im Kapitel 3.5 erläuterte SR-Verfahren eingesetzt. Entsprechend dem Dreipunktsignal lässt sich die Gleislageveränderung beurteilen. Dieser Teil der Signalanalyse liefert das erste Ergebnis der Einzelfehlercharakterisierung. Maßgebend ist hier der Einfluss des Fehlers auf sicherheitsrelevante Kriterien, welche die Qualität der Fahrbahn bestimmen. Einzelfehler der Längshöhe D_z werden dabei ab einem Schwellenwert von $D_z > SR_A$ hervorgehoben.

Das Beispiel der Abb. 41 zeigt eine solche Grenzwertüberschreitung (19,480 km). Dabei orientiert sich der Schwellenwert an der örtlich zugelassenen Streckengeschwindigkeit, die hier mit $v = 140$ km/h angegeben wird. Entsprechend der definierten Richtwerte (Abb. 19) lässt sich in der Abb. 41 daher ein Einzelfehler ab einem Schwellenwert von 8 mm zuordnen. Dieser entspricht dem SR_A -Wert (gelb). Mit der Einordnung der Streckengeschwindigkeit zwischen 120 km/h $< v < 160$ km/h werden außerdem zwei weitere Grenzwerte festgelegt. Einerseits der SR_{100} -Wert (braun), der einer Schwelle von 11 mm folgt und andererseits der SR_{Lim} -Wert (rot), dem eine Grenze von 14 mm zugeordnet wird. Beurteilt wird hier die maximale Amplitude des Dreipunktsignals von Null nach Spitze.

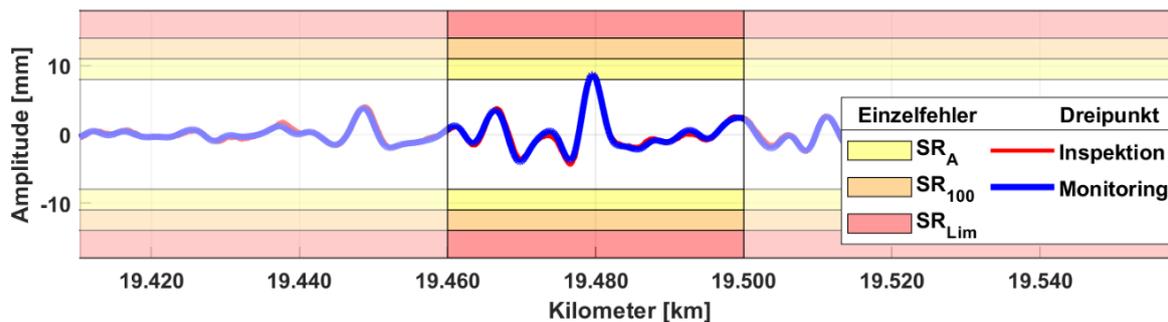


Abb. 41: Einzelfehlerdetektion über das Dreipunktsignal der Längshöhe D_z mit Reaktionsschwellen nach dem SR-Verfahren für eine Streckengeschwindigkeit von 120 km/h $< v < 160$ km/h

Die Gleislagebewertung des DB Fahrwegmonitorings orientiert sich an den Voraussetzungen und Maßstäben, die auch für die Interpretation der Inspektionsergebnisse eingesetzt werden. Für die Verifizierung des Dreipunktsignals aus dem FwM wird daher die letzte DB Inspektionsmessung des Streckenabschnitts als Referenz genutzt. Mit der Überlagerung der Dreipunktsignale (Abb. 41) zeigt sich hier die sehr hohe Vergleichbarkeit der Messergebnisse, die eine Beurteilung der Gleislagequalität (Längshöhe) von zwei unabhängigen Messsystemen erlaubt.

4.2.2 Visualisierung von Störstellen

Mit der Verortung des Einzelfehlers über den Streckenkilometer wird die Frequenzanalyse der ALB auf einen bestimmten Bereich der Bahnstrecke fokussiert. Durch die Eingrenzung der Störstelle wird vor allem die zeitintensive Auswertung der Frequenzinhalte beeinflusst. Die Auflösung der Spektren erfolgt hier über die im Kapitel 3.6 erläuterte Wavelet-Transformation. Entsprechend der jeweiligen Ausdehnung des Einzelfehlers erhöht oder reduziert sich der zu analysierende Signalabschnitt (Messwerte) und damit die benötigte Rechenzeit der Wavelet-Transformation. Am Beispiel der Tabelle 13 wird diese im Verhältnis zum Ausdehnungsgrad der Störstelle und der analysierten Einzelwerte betrachtet.

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

Tabelle 13: Auflösung der Rechenzeit einer Wavelet-Transformation nach Ausdehnung der Störstelle und Messwerten

Ausdehnung [m]	Messwerte [Tsd.]	Zeit [s]
150	101.000	4
300	198.000	9
600	398.000	21

Mit der Tabelle 13 zeigt sich, dass der optimale Einsatz einer Wavelet-Transformation in der Analyse punktueller Störstellen liegt. Neben der steigenden Bearbeitungszeit wird ebenfalls die Visualisierung der Ergebnisse mit zunehmender Ausdehnung der Gleislageveränderung deutlich eingeschränkt. Die Auswertung der Einzelfehler wird daher auf ein Fenster von 150 m begrenzt, das entsprechend der Fahrzeuggeschwindigkeit in den Messwerten variiert. Anhand der berechneten Koeffizienten lässt sich anschließend die Ähnlichkeit (Kapitel 3.6.2) zwischen dem jeweiligen Signalabschnitt des Achslagerbeschleunigungssignals und dem Wavelet ausdrücken. Durch die Normierung der Wavelet-Koeffizienten werden diese in der Abb. 42 als Werte zwischen 0 (blau) und 1 (rot) dargestellt. Dominierende Frequenzinhalte deuten hier auf einen hohen Übereinstimmungsgrad, der in Abhängigkeit zur Skalierung der η -Werte steht.

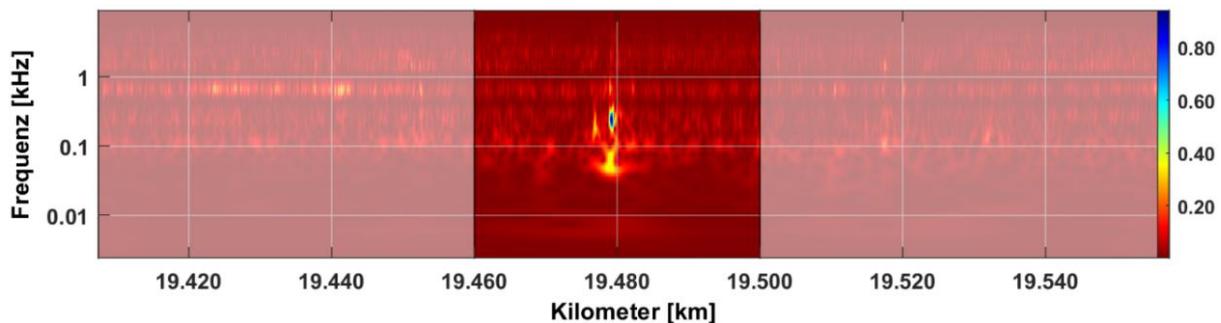


Abb. 42: Ergebnis der Wavelet-Transformation (Morlet-Wavelet) auf Basis der normierten Achslagerbeschleunigungen bei $v = 100$ km/h

In Anlehnung an den im Kapitel 3.6.3 interpretierten Übereinstimmungsgrad (Koeffizienten), reduziert sich dieser mit zunehmendem η -Wert. In der Regel werden eindeutige Übereinstimmungsmerkmale im Bereich der hochfrequenten Anteile lokalisiert. Eine geringe Ähnlichkeit wird hingegen im niederfrequenten Bereich beobachtet. In diesem werden jedoch die Einzelfehler der Gleislage eingeordnet. Um die Gemeinsamkeiten zwischen dem DPS und dem Frequenzverhalten der ALB abzubilden, werden die Wavelet-Koeffizienten daher über einen klar definierten Grenzwert visualisiert. Die Abb. 43 betrachtet demnach eine absolute Übereinstimmung zwischen dem Wavelet (Morlet) und der ALB ab einem Koeffizienten von $C_\psi = 0,5$.

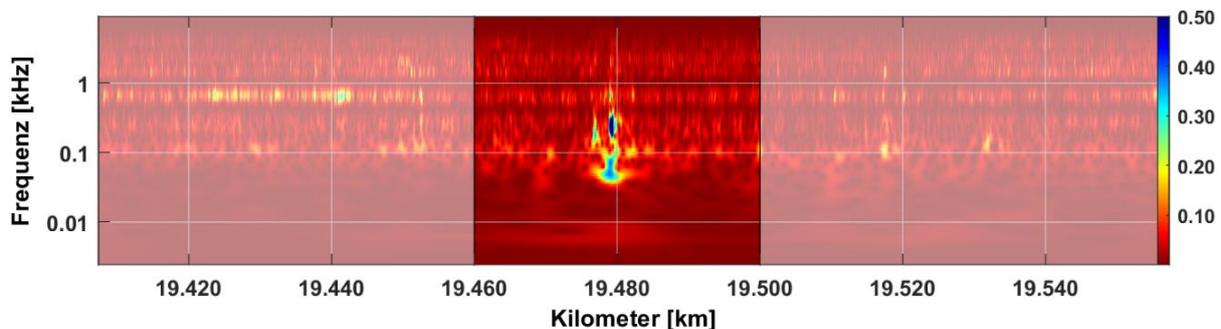


Abb. 43: Ergebnis der Wavelet-Transformation mit einem Grenzwert von $C_\psi < 0,5$

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Durch die Reduzierung der Koeffizienten werden Spektren hervorgehoben, welche über die Darstellung der normierten Koeffizienten (Fahrzeuggeschwindigkeit) nur sehr schwach wahrgenommen werden. Dabei dient die Eingrenzung der Wavelet-Koeffizienten ausschließlich der Interpretation der visualisierten Daten. Um das Frequenzverhalten des DPS ($\lambda_u = 3$ m) über den der ALB ($f < 9$ Hz) zu verdeutlichen, wird in der Abb. 44 ein Schwellenwert von $C_\psi = 0,25$ angewendet.

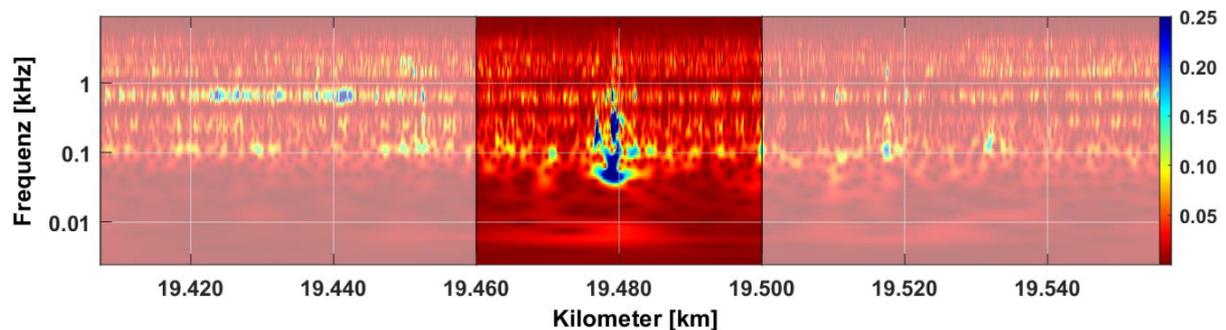


Abb. 44: Ergebnis der Wavelet-Transformation mit einem Grenzwert von $C_\psi = 0,25$

Mit der Begrenzung der absoluten Übereinstimmung wird in Abb. 44 vor allem der Kontrast reguliert. Dadurch werden Koeffizienten mit einem geringen Übereinstimmungsgrad deutlich intensiver dargestellt. Dies lässt sich besonders über den Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$) wahrnehmen, welcher in der Abb. 44 deutlich stärker hervorgehoben wird als über die Koeffizienten der Abb. 42. Neben der Gleislage lassen sich ebenfalls deutlich intensivere Frequenzinhalte im Bereich der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler beobachten, welche die Zuordnung und Interpretation des Einzelfehlers erleichtern.

Durch die Kombination des Ergebnisses aus der Abb. 44 (Frequenzband) und der Abb. 41 (Dreipunktsignal), wird das typische Fehlerbild eines mangelhaften Herzstücks einer Weiche aufgezeigt. Anhand der analysierten Eigenschaften lassen sich zwar typische Frequenzen zuordnen jedoch erlauben diese noch keine eindeutige Zuweisung bzw. Verknüpfung mit der Eisenbahninfrastruktur. Als Infrastrukturmerkmale dienen die folgenden Elemente:

- Trassierung
 - Krümmung
 - Gradienten
- Bauliche Anlagen
 - Bahnübergänge
 - Brücken
 - Weichen
 - Signale
- Inspektions- und Monitoringdaten
 - Fahrzeuggeschwindigkeit
 - Spurweite

Die Abb. 45 zeigt die visuelle Verknüpfung von Informationen, welche zur Charakterisierung von Einzelfehlern eingesetzt wird. In der oberen Abbildung wird das Ergebnis der im Kapitel 3.6.3 erläuterten Wavelet-Transformation dargestellt. Die Interpretation der Koeffizienten erfolgt über ein logarithmisch angeordnetes Frequenzband. Hohe Frequenzinhalte werden hier schwächer und geringere Anteile detaillierter aufgelöst. Im Vordergrund steht die Darstellung des Frequenzverhaltens, das entsprechend der Formel (4.1) Rückschlüsse auf das Spektrum

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

des Einzelfehlers zulässt. Für die Identifizierung der Einzelfehler wird in der mittleren Abbildung das Dreipunktsignal des Fahrwegmonitorings (blau) und der Inspektionsmessung (rot) visualisiert. Die Darstellung des DPS erlaubt hier einerseits die Einzelfehlerbewertung und andererseits die Vergleichbarkeit zwischen dem FwM und der IsM. Um wiederum die analysierten Einzelfehler den örtlichen Eigenschaften der Eisenbahninfrastruktur zuzuordnen, werden im unteren Bildabschnitt die Anlagen-, Trassierungs- und Fahrzeugdaten (Streckeninformation) dargestellt.

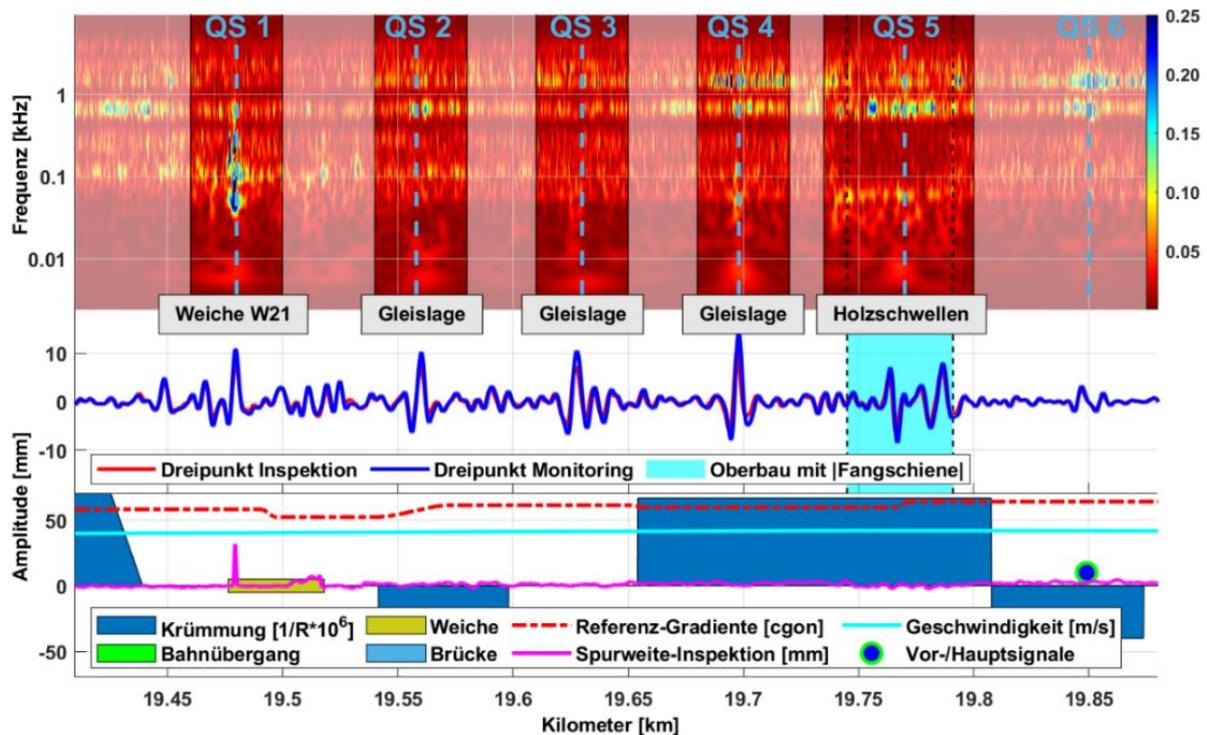


Abb. 45: Kombinierte Auswertung mit Frequenzband (Oben), Dreipunktsignal (Mitte) und Streckeninformation (Unten) bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h

Über das Beispiel der Abb. 45 werden fünf Einzelfehler lokalisiert. Über diese lassen sich verschiedene Fahrbahnkomponenten und eine unterschiedliche Anlagenqualität wahrnehmen. Der wesentliche Vorteil einer kombinierten Auswertemethode zeigt sich hingegen an einem nicht signifikanten Streckenabschnitt (QS6). Entsprechend dem Dreipunktsignal lässt sich am QS6 (19,850 km) kein Einzelfehler verorten, jedoch wird die Entwicklung einer mangelhaften Gleislage durch Fahrflächenfehler aufgezeigt. Die Eigenschaften des Abschnitts werden hier durch den Zugbetrieb auf Höhe des Hauptsignals (Abb. 45 Streckeninformation) geprägt. Es kommt zum Halten von Zugfahrten, die durch das Bremsen und Anfahren die Lauffläche der Schiene stärker beanspruchen. Entsprechend dem Frequenzverhalten werden hochfrequente Anteile hervorgehoben, die einem dominierenden Spektrum von 680 Hz und 1,4 kHz folgen. Da es sich um einen sehr kleinen Wellenlängenbereich handelt, kann es bedingt durch die Art des Fahrflächenfehlers (Kapitel 4.1.3) zu einer veränderten Überlaufgeometrie zwischen dem Rad und der Schiene kommen. Die Anregung der Schienenoberfläche führt hier wiederum zur Beeinflussung der Gleislage. Die Unebenheiten auf der Schiene lassen sich dabei durch lokale Erhöhungen im Achslagerbeschleunigungssignal darstellen. Die Auswirkung auf die Gleislage zeigen sich hingegen über die erhöhten Signalspitzen im DPS. Das Beispiel der Abb. 45 verdeutlicht in diesem Zusammenhang den hohen Nutzen der kombinierten Auswertemethode, welche über die Einzelfehlercharakterisierung hinaus eine vollkommen neue Gleislagebewertung und Prognose der Fahrbahnqualität erlaubt.

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

4.2.3 Beschreibung der Störstellen

Mit der Reduzierung der Koeffizienten kann in der Abb. 45 der unmittelbare Zusammenhang zwischen dem Dreipunktsignal und dem Frequenzbereich $f < 9$ Hz dargestellt werden. Dabei werden fünf Bereiche mit signifikanten Wavelet-Koeffizienten und deutlichen Signalspitzen über das Dreipunktsignal hervorgehoben. Entgegen dem visualisierten Frequenzverhalten aus der Abb. 44 werden für die Beurteilung der Einzelfehlerursache ausschließlich die absoluten Übereinstimmungskoeffizienten der Abb. 42 betrachtet. Dafür wird im unmittelbaren Einflussbereich des Gleislagefehlers ein Mittelwert über eine Länge von 5 m gebildet. Die Abb. 46 zeigt das gemittelte Frequenzverhalten der fünf Störstellen.

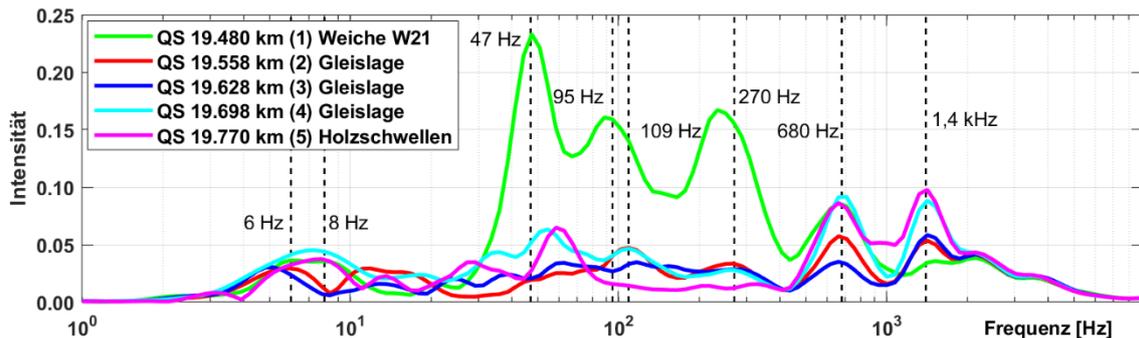


Abb. 46: Auflösung der in Abb. 45 betrachteten Störstellen über das arithmetische Mittel der Wavelet-Koeffizienten mit einer Ausdehnung von 5 m Länge

Die Mittelwertbildung beeinflusst vor allem den Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie den der Fahrflächenfehler ($400 < f < 9000 \text{ Hz}$). Das Spektrum der kurzwelligen Fehler wird dabei eher gedämpft und ein durchschnittliches Frequenzverhalten der Störstelle hervorgehoben. Die Frequenzinhalte der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ kHz}$) werden hingegen durch langwellige Anteile bestimmt, welche die Mittelwertbildung jedoch kaum beeinflussen. Betrachtet man den örtlichen Ausdehnungsgrad der Frequenzanalyse, wird dieser durch die Lage über sechs Schwellen (4,80 m) bestimmt. Die Abb. 47 zeigt hier das gemittelte Frequenzverhalten bei einem unterschiedlichen Ausdehnungsgrad am Beispiel des Herzstückbereichs der Weiche W21.

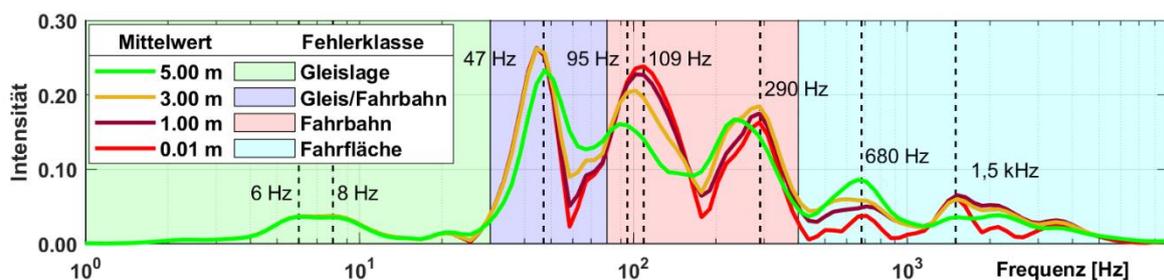


Abb. 47: Arithmetische Mittel für das Frequenzverhalten der Weiche W21 mit der Auflösung von 5,00 m (grün), 3,00m (braun), 1,00 m (lila) und 0,01 m (rot)

Mit der Darstellung der Mittelwerte (Abb. 47) wird deutlich, dass sich die größten Frequenzunterschiede am Herzstück (Weiche) über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten verorten lässt. Dabei werden neben den verschiedenen Frequenzinhalten ebenfalls unterschiedliche Signalspitzen wahrgenommen. Die größten Abweichungen werden hier um das Spektrum von 50 Hz (0,56 m), 100 Hz (0,28 m) und 250 Hz (0,11 m) aufgezeigt. Entsprechend dem Mittelwert wird ein durchschnittliches Frequenzverhalten fokussiert, das eine ausreichend genaue Darstellung der dominierenden Spektren erlaubt. Die Interpretation der Ergebnisse muss hier

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

jedoch in Abhängigkeit zur Intensität (Kapitel 3.6.3) und Fehlerklasse (Kapitel 3.6.5) bewertet werden. Ein signifikanter Fehler im Spektrum der Fahrbahnkomponenten muss sich daher deutlich von dem eines Fahrflächenfehlers abheben. Im Folgenden wird daher das Frequenzverhalten der fünf lokalisierten Einzelfehler analysiert und der Zusammenhang zwischen der Gleislage, den Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler dargestellt. Die Interpretation der Einzelfehlerursache (Abb. 46) erfolgt hier entsprechend der im Kapitel 4.1 erläuterten Eigenschaften, welche bereits in der Tabelle 12 klassifiziert wurden.

4.2.3.1 Gleislagefehler im Herzstückbereich von Weichen

Der QS 19,480 km in der Abb. 45 zeigt das Frequenzverhalten um das Herzstück der Weiche W21. Im Bereich der Fahrbahn unterliegt das Herzstück der wohl höchsten Beanspruchung aus der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg. In der Abb. 46 wird die Beeinflussung der Frequenzinhalte aus der direkten Befahrung des Herzstücks (gemessene ALB über dem Herzstück) dargestellt. Dabei wird die Weiche stumpf befahren (von der Flügelschiene zur Herzstückspitze). Generell soll, wie bereits im Kapitel 4.1.2.3 beschrieben, ein möglichst fließender Übergang zwischen beiden Schienenenden am Herzstück erfolgen. Mit der Übergabe des Rades aus stumpfer oder spitzer Befahrung wird jedoch eine stoßartige Anregung der Schiene verursacht. Diese variieren entsprechend der Qualität des Herzstücks, welche durch den kontinuierlichen Bahnbetrieb (Verschleiß) beeinflusst wird.

Durch das Kreuzen der Herzstücklücke werden am direkt (Herzstück) und indirekt (Fahrschiene) betroffenen Achslager unterschiedliche Frequenzinhalte beobachtet. Je nach Ausprägung des Fehlers (Qualität des Herzstücks) und Anregung der Schiene, kann sich die Schwingung aufgrund der starren Achse auf das indirekte Achslager übertragen. Das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie das im Übergang zur Gleislage ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) hebt sich dabei an der Weiche W21 (grün) deutlich von allen analysierten Frequenzbändern der Abb. 46 ab. Über das Frequenzband der Weiche W21 lassen sich wiederum drei dominierende Signalspitzen zwischen $45 \text{ Hz} < f < 270 \text{ Hz}$ hervorheben, welche den Eigenschaften des Eisenbahnoberbaus zugeordnet (Tabelle 12) werden.

Unterschiedliche Frequenzinhalte lassen sich vor allem im Bereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) verorten. Über alle Frequenzbänder der Abb. 46 wird ein Spektrum von 680 Hz (0,04 m) beobachtet. Außerdem lässt sich eine dominierende Frequenz bei 1,4 kHz (0,02 m) verorten, welche sich jedoch nicht in Verbindung mit der Weiche W21 wahrnehmen lässt. Durch die Ausprägung der Fahrflächenfehler bzw. dem Einfluss aus den Fahrbahnkomponenten kommt es hier zur stoßartigen Anregung der Schiene, welche in Schwingung versetzt wird. Es entsteht eine Wellenbewegung, die sich auf die Schwellen und den Schotter überträgt und so die im Kapitel 4.1.1.1 beschriebenen Hohllagen verursacht. Diese führen zu Gleislagefehlern, welche sich deutlich über das Dreipunktsignal wahrnehmen lassen.

4.2.3.2 Beeinflussung der Gleislage durch mangelhafte Schienenverbindungen

Die lokalisierten Einzelfehler zwischen dem Kilometer 19,540 km und 19,720 km (Abb. 45) werden den Eigenschaften von gelaschten Schienenverbindungen zugeordnet. Diese lassen sich einerseits über das logarithmisch angeordnete Frequenzband und andererseits über die Signalspitzen des Dreipunktsignals zuordnen. Über das Spektrum der Gleislage bis hin zu dem der Fahrbahnkomponenten lassen sich jedoch nur sehr schwache Übereinstimmungsmerkmale zwischen dem QS2 bis QS4 wahrnehmen. Die deutlichsten Signalüberlagerungen werden hingegen im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler beobachtet.

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Mit der Befahrung der Schienenenden kommt es wie im Herzstückbereich einer Weiche zur stoßartigen Anregung der Schiene, die sich als Schwingung auf die Schwellen und den Schotter auswirkt. Je nach Qualität der Schienenverbindung werden mehr oder weniger stark ausgeprägte Frequenzinhalte über das Achslagerbeschleunigungssignal analysiert. Dabei kommt es zur Überlagerung von Fehlern aus dem Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten sowie dem der Fahrfläche. Durch die Wellenbewegung der Schiene und dem Abtragen der Last aus der Fahrbahn in den Unterbau können mehrere Stützpunkte (Schwellen) betroffen sein. Diese bestimmen den Ausdehnungsgrad des Gleislagefehlers. Die auffälligste Schienenverbindung der Abb. 45 wird am QS4 (cyan) verortet. Über diesen lässt sich die größte Fehleramplitude im Dreipunktsignal sowie die höchste Intensität der Wavelet-Koeffizienten darstellen. Die Beeinflussung der Gleislage zeigt sich hier über das Spektrum von 7 Hz (3,97 m). Außerdem wird eine sehr ähnliche Intensität um die 36 Hz (0,77 m) erkannt.

Die absolute Lage der Schiene wird durch die Position der Schwellen bestimmt. Diese werden in einem definierten Schwellenabstand (Schwellenfach) verlegt. Das Schienenende wiederum wird wie im Kapitel 4.1.2.1 erläutert, durch Schienenverbindungen verknüpft. Durch die veränderte Geometrie der Schiene kommt es hier zu einer abweichenden Anregung dieser. Je nach Lage der Schienenverbindung innerhalb des Schwellenfachs wirkt sich diese Position auf die Schwingung der Schienenenden aus, welche eindeutig den Eigenschaften der Fahrbahnkomponenten zugeordnet wird. Die stärksten Frequenzinhalte lassen sich hier bei 109 Hz (0,25 m) und 270 Hz (0,10 m) beobachten, die entsprechend der Tabelle 12 der mangelhaften Gleislage zugeordnet werden.

Darüber hinaus prägt die Überlaufgeometrie der Schienenoberfläche das Frequenzverhalten der Fahrflächenfehler. Die größten Signalspitzen der Abb. 46 werden oberhalb von $f > 400$ Hz bestimmt. Als dominierend wird eine Frequenz um die 0,7 kHz (0,04 m) und 1,4 kHz (0,02 m) bewertet. Mit der stoßartigen Anregung der Schiene durch Fehler in der Lauffläche sowie aus dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten kommt es hier zu einer mangelhaften Gleislage.

Um die Fehlerursache der analysierten Querschnitte (QS2 bis QS4) näher zu betrachten, wird das Verhalten des Schotteroberbaus vor und nach einem Stopfgang bewertet. Die Nachhaltigkeit der Instandhaltungsmaßnahme (04.07.2018) zeigt sich hier vor allem über das in der Abb. 48 dargestellte Dreipunktsignal. Mit der Abbildung lässt sich eine verbesserte Gleislage nach der Inspektion von 17.04.2018 (grün) und der darauffolgenden Messung am 15.10.2018 (blau) beobachten. Die Auswirkung der angenommenen Fehlerursache wird dabei über die Historie des Einzelfehlers an der Station 19,698 km betrachtet.

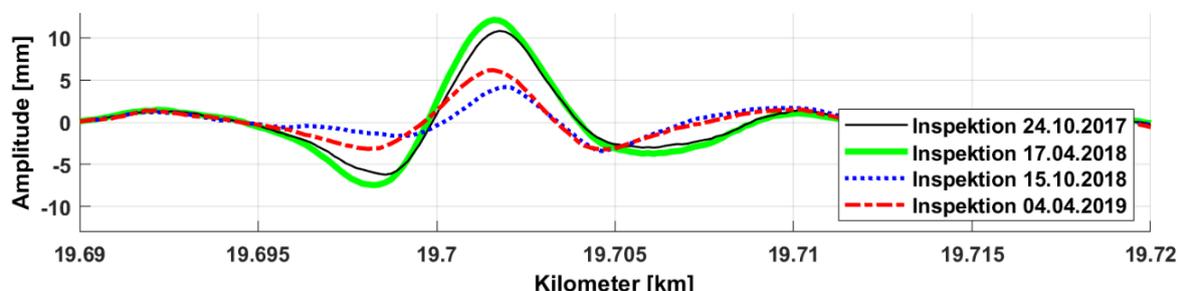


Abb. 48: Entwicklung der Gleislage über die Historie der Dreipunktsignale am Streckenkilometer 19,698 km

Über die Historie der Messfahrten zeigt sich die stetige Veränderung der Gleislage am Kilometer 19,698 km (Abb. 48). Die Ursache dieser Gleislageveränderung wird in Verbindung mit

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

einem mangelhaften Tragschichtsystem und der Qualität der Schienenverbindung gesehen. Durch die Anregung aus der Überlaufgeometrie zeigt sich in der Abb. 45 und Abb. 46 der unmittelbare Einfluss aus den Fahrbahnkomponenten und Fahrflächenfehlern auf die Bettung (Gleisschotter). Dadurch wird ein Verschleiß am Fahrbahnsystem verursacht, welcher über den zeitlichen Verlauf und einer nicht nachhaltigen Instandhaltung des Eisenbahnoberbaus das Tragschichtsystem beschädigt. Diese Situation wird zusätzlich durch die Ableitung des anfallenden Oberflächenwassers beeinflusst. Mit der defekten Planumsschutzschicht kommt es in der Regel zur erhöhten Instandhaltung, welche sich negativ auf die gesamte Stabilität des Schotteroberbaus auswirkt. Durch das Stopfen der Gleislage kann daher zwar eine kurzfristige Verbesserung erzielt, jedoch keine langfristige und wirtschaftliche Maßnahme an diesem Streckenabschnitt umgesetzt werden. Das Ergebnis der Abb. 48 verdeutlicht diese Herausforderung und zeigt ebenfalls den hohen Nutzen des Dreipunktsignals für die Bewertung von Setzungen, das sich aus dem Frequenzverhalten der ALB nicht bestimmen lässt.

4.2.3.3 Gleislageveränderung aufgrund wechselnder Oberbaukonstruktionen

Am Streckenabschnitt 19,767 km wird die Trasse durch eine Straßenüberführung (SÜ 19,767 km) gekreuzt. In diesem Bereich wechselt der Fahrbahntyp von einem Beton-schwellengleis auf ein Holzschwellengleis. Außerdem wird die Gleiskonstruktion zwischen dem Streckenkilometer 19,745 km und 19,791 km durch eine Fangschiene (Führungsschiene) verstärkt. Fangschiene dienen im Falle einer Entgleisung der sicheren Führung des entgleisten Rades über ein parallel zur Fahrschiene verbauten Metallprofils, das fest mit den Schwellen verbunden ist. Durch die Fangschiene verändert sich die Steifigkeit des Oberbaus, was sich im direkten Übergang zum Regelquerschnitt zeigt (Abb. 45). Über das Dreipunktsignal werden zwei Einzelfehler verortet. Einerseits am Ende der Fangschiene und andererseits auf Höhe der Station 19,770 km. Diese Störstelle (19,770 km) wird ebenfalls einer gelaschten Schienenverbindung zugeordnet.

Betrachtet man das Ergebnis der Abb. 45 lassen sich im Bereich der Fangschiene (cyan) nur sehr schwache Frequenzinhalte zwischen $80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ (Fahrbahnkomponenten) darstellen. Deutlich höhere Anteile werden oberhalb als auch unterhalb dieser Grenzen erkannt. Das Frequenzverhalten zeigt hier die Steifigkeit der Gleiskonstruktion, die sich über den QS5 (magenta) der Abb. 46 noch deutlicher wahrnehmen lässt. Über den Bereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) zeigt hier ein vergleichbarer Amplitudenverlauf zum QS4 (cyan). Dieses wird durch das Spektrum von 8 Hz (3,47 m) bestimmt. Darüber hinaus werden auffällige Frequenzinhalte bei 14 Hz (1,98 m) und 28 Hz (0,99 m) betrachtet, welche das Spektrum der Gleislage prägen. Unterschiede lassen sich hingegen im Übergangsbereich zu den Fahrbahnkomponenten ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) beobachten. Über diesen wird eine dominierende Frequenz von 60 Hz (0,46 m) hervorgehoben. Die größten Signalspitzen werden jedoch im Bereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) lokalisiert und bei 680 Hz (0,04 m) sowie 1,4 kHz (0,02 m) verortet. Durch die sehr geringe Intensität der Fahrbahnkomponenten gegenüber den deutlich stärkeren Fahrflächenfehlern kommt es hier ausschließlich über die Lauffläche der Schiene zu einer stoßartigen Anregung der Schiene, welche diese in Schwingung versetzt und wie im Kapitel 4.1.1.1 beschrieben, die Hohllagen im Gleis verursacht.

4.2.4 Bewertung von Übereinstimmungskriterien und Einzelfehlerursachen

Mit der kombinierten Auswertung zeigt sich die hohe Detailtiefe der Monitoringdaten. Dabei wird nicht nur die Entwicklung und Bewertung der Gleislage betrachtet, sondern viel mehr die detaillierte Beurteilung der Fahrbahnqualität und seiner Komponenten. Der hohe Nutzen der

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

ALB zeigt sich besonders in Verbindung mit der Anwendung einer Wavelet-Transformation. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass das Dreipunktsignal aufgrund der auswertbaren Wellenlänge eine gute Lösung für die Bewertung der Gleislage darstellt. Jedoch gehen durch die Signalverarbeitung wesentliche Informationen über einzelne Komponenten des Eisenbahnoberbaus verloren. Eine mögliche Erkennung der Fehlerursache erweist sich anhand des DPS daher als schwierig. Dem zufolge können Fehler an Komponenten wie einer Weiche oder der Gleislage nicht eindeutig getrennt werden. In Verbindung mit dem Ergebnis einer Wavelet-Transformation können hingegen dem Amplitudenverlauf des DPS konkrete Frequenzinhalte zugeordnet werden. Dies erlaubt die Einteilung von Fehlerklassen, die eine Charakterisierung von Einzelfehlern ermöglicht.

In der Abb. 45 werden über kurze Distanz mehrere aufeinander folgende Einzelfehler (DPS) erkannt. Um eine effektive Charakterisierung von Fehlern zu ermöglichen, muss daher eine zuverlässige und einheitliche Bewertung der Frequenzinhalte erzielt werden. Ein bewährtes Verfahren für die Vergleichbarkeit zweier Signalverläufe stellt das Ergebnis einer Korrelationsfunktion (Kapitel 3.6.4) dar. Am Beispiel der Abb. 49 wird das Frequenzverhalten von vier Herzstücken einer Weichenstraße bewertet. Dafür wird an jedem Herzstück ein gemitteltetes Frequenzverhalten von 5 m analysiert.

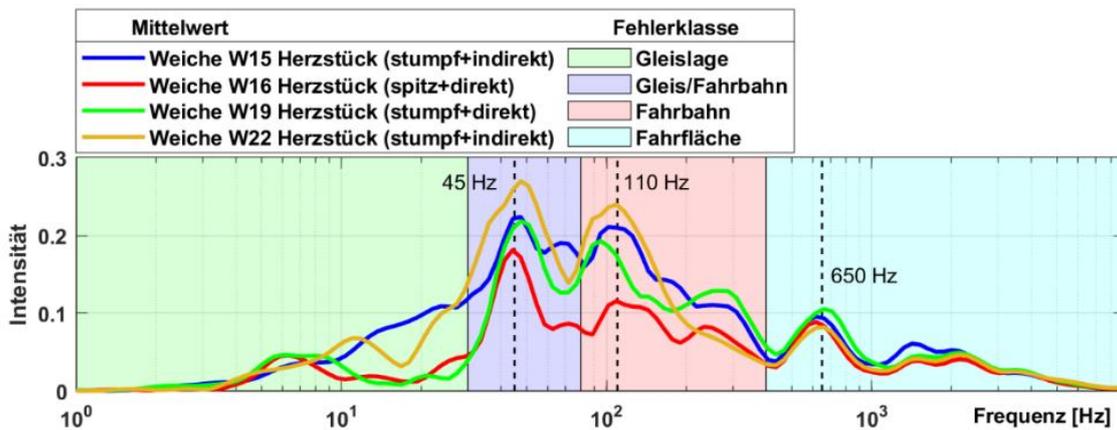


Abb. 49: Frequenzverhalten im Herzstückbereich von Weichen mit einer Auflösung der Wavelet-Koeffizienten über einen Mittelwert von 5 m Länge bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h

Betrachtet man die Gleislagequalität an allen vier Herzstücken (Abb. 49), wird an jeder Weiche eine Störstelle verortet. Dabei werden unterschiedlich ausgeprägte Hohllagen erkannt. Mit der Auflösung der reduzierten Spektren (Signalblöcke) lassen sich die Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zwischen den Anlagen hervorheben. Entsprechend der Abb. 50 zeigt sich die hohe Ähnlichkeit der in Abb. 49 dargestellten Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$). Dabei werden leicht unterschiedliche Signalspitzen (Extremstellen) beobachtet.

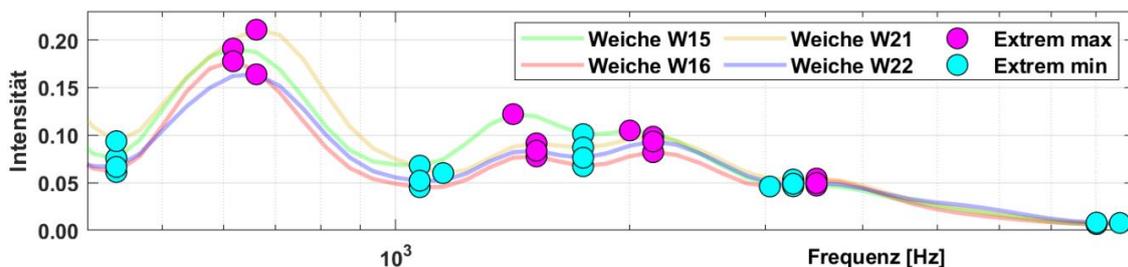


Abb. 50: Frequenzverhalten der Fahrflächenfehler ($0,4 \text{ kHz} < f < 9,0 \text{ kHz}$)

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

Die folgende Datenanalyse bezieht sich ausschließlich auf das Frequenzverhalten verschiedener Störstellen zueinander. Der Grund dafür liegt hier in der Verfügbarkeit eines optimierten Frequenzmusters. Daher werden nur ähnliche Einzelfehlerbereiche miteinander korreliert. Die Berechnung der absoluten Übereinstimmung erfolgt über die im Kapitel 3.6.4 beschriebene Korrelationsfunktion. Für die Interpretation bzw. Vergleichbarkeit der Fehlerursache werden die charakterisierten Einzelfehler entsprechend der im Kapitel 3.6.5 eingeführten Übereinstimmungskriterien bewertet. Die Tabelle 14 zeigt das Korrelationsergebnis über die einzelnen Fehlerklassen sowie das arithmetische Mittel der Übereinstimmungsmerkmale.

Tabelle 14: Bewertung von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstück von Weichen

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	W15 i	W16d	56,7	76,3	86,5	99,6	94,8	82,8
2	W15 i	W19d	27,5	90,5	79,1	95,4	95,9	77,6
3	W15 i	W22 i	90,1	53,1	96,2	99,2	95,5	86,8
4	W16d	W19d	85,0	86,1	61,4	92,9	98,7	84,8
5	W16d	W22 i	68,7	85,1	81,4	97,9	99,1	86,4
6	W19d	W22 i	44,2	78,3	77,9	98,2	99,1	79,6

Das Ergebnis der Tabelle 14 bestätigt das bereits in der Abb. 49 visualisierte Übereinstimmungsverhältnis. Als signifikant wird ein Übereinstimmungskoeffizient von über 60 % (grün) betrachtet. Das nahezu identische Frequenzverhalten lässt hier auf eine sehr ähnliche Fehlerursache schließen. Der im Durchschnitt höchste Übereinstimmungsgrad wird im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) erzielt. Entsprechend der Abb. 50 lässt sich über alle Frequenzbänder ein dominierendes Spektrum von 650 Hz hervorheben. Dieses wird mit Hilfe der Formel (4.1) einer Wellenlänge von 0,04 m zugeordnet. Im Rückblick auf die im Kapitel 4.1.3 erläuterten Fehlerformen werden hier Riffeln bzw. Schlupfwellen verortet. Aufgrund der geringen Intensität (Wavelet-Koeffizienten) wird diese Fehlerform jedoch nicht als unmittelbare Fehlerursache der Gleislage bewertet.

Für die Interpretation der Störstelle werden zwei unterschiedliche Übereinstimmungsergebnisse kombiniert. Einerseits das berechnete Korrelationsergebnis der Tabelle 14 (Ähnlichkeit der Frequenzbänder) und andererseits die Übereinstimmungskoeffizienten aus der Wavelet-Transformation (Übereinstimmungsgrad zwischen Wavelet und ALB). Die Verknüpfung dieser beiden Informationen führt zur Bewertung der Fehlerursache einer mangelhaften Gleislage. Betrachtet man erneut die Signalverläufe der Abb. 49 werden die stärksten Signalspitzen im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie im Übergangsbereich ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zur Gleislage wahrgenommen. Jedoch werden in diesem Spektrum ($30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie über das der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) nur sehr geringe Übereinstimmungsmerkmale berechnet. Das Ergebnis deutet hier vor allem auf eine unterschiedliche Anregung der Schiene hin. Im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten lassen sich daher je nach Befahrung der Weichen zwei oder drei dominierende Spektren (Wellenlänge) von 45 Hz (0,62 m), 70 Hz (0,40 m) und 110 Hz (0,25 m) verorten. Durch das Kreuzen der Weichen wird die ALB direkt (Herzstück) oder indirekt (Fahrschiene) gemessen, was neben dem Anlagenzustand (Herzstückqualität) zu unterschiedlichen Übereinstimmungsmerkmalen führt. Die Qualität des Herzstücks lässt sich daher vor allem über die stoßartige Anregung der Schiene bestimmen. Diese wird durch den Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten aufgelöst. Eine hohe Intensität deutet hier auf eine sehr starke Anregung der Schiene, welche auf eine schlechte Überlaufgeometrie zwischen Herzstückspitze und Flügelschiene (bzw. umgekehrt) verweist und den Gleislagefehler verursacht. Die Gleislage wiederum wird durch die

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

Ausdehnung der Störstelle im Schotterbett beurteilt, die sich mit dem Dreipunktsignal sowie über das Spektrum der Gleislage darstellen lässt. In der Abb. 49 werden die dominierenden Frequenzinhalte der Gleislage zwischen 6 Hz (4,63 m) und 12 Hz (2,31 m) wahrgenommen.

4.2.4.1 Ergebnis der Frequenzbandkombination 1

Entsprechend dem arithmetischen Mittel von 82,8 % lässt sich anhand der Frequenzbandkombination 1 (Tabelle 14) ein sehr ähnlicher Signalverlauf vermuten. Jedoch wird das hohe Übereinstimmungsergebnis durch das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) beeinträchtigt. Das erzielte Ergebnis deutet einerseits auf eine vergleichbare Fehlerursache im Spektrum der Fahrflächenfehler oder Fahrbahnkomponenten und zeigt andererseits eine unterschiedlich ausgeprägte Gleislagequalität. Die Ähnlichkeit dieser beiden Signalverläufe lässt sich über die Frequenzinhalte der Abb. 51 verdeutlichen.

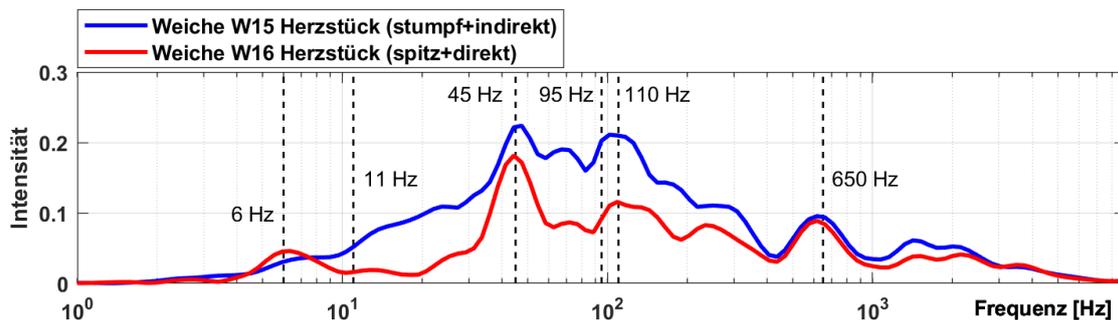


Abb. 51: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W16 (rot)

Entsprechend der Tabelle 14 wird der Übereinstimmungsgrad der Gleislage mit 56,6 % beurteilt. Der Amplitudenverlauf an der Weiche W15 (blau) zeigt dabei einen nahezu konstanten Anstieg über das gesamte Spektrum der Gleislage. Die Weiche W16 (rot) zeigt hingegen nur ein dominierendes Frequenzverhalten (Wellenlänge) von 6 Hz (4,63 m), welches das Übereinstimmungsverhältnis dieser Signalpaarung prägt. Generell werden an der Weiche W16 eher geringere Intensitäten beobachtet, die hier auf eine ruckärmere Anregung aus dem Herzstückbereich der Weiche schließen lässt. Außerdem lassen sich deutliche Unterschiede über den Anstieg zur ersten dominierenden Frequenz von 45 Hz (Schwellenfachfrequenz) aufzeigen. Das Frequenzverhalten der Weiche W15 wird hier durch eine konstante Steigung bis zur ersten maximalen Amplitude (45 Hz) hervorgehoben. Über das Spektrum der Weiche W16 wird hingegen ein deutlich steilerer Anstieg wahrgenommen, der das Frequenzverhalten zwischen $30 \text{ Hz} < f < 45 \text{ Hz}$ bestimmt. Darüber hinaus werden neben der Schwellenfachfrequenz (45 Hz = 0,61 m) zwei weitere dominierende Frequenzen (Wellenlänge) von 70 Hz (0,40 m) und 110 Hz (0,28 m) lokalisiert. Diese werden den Eigenschaften der Fahrbahnkomponenten zugeordnet, welche hier die Fehlerursache der mangelhaften Gleislage darstellen.

4.2.4.2 Ergebnis der Frequenzbandkombination 2

Der geringste Übereinstimmungsgrad der Tabelle 14 wird an der Frequenzbandkombination 2 berechnet. Entsprechend dem Gesamtergebnis wird über alle analysierten Fehlerklassen eine Ähnlichkeit von 77,6 % bestimmt. Wie bereits im Ergebnis der ersten Signalpaarung, werden erneut die größten Signalunterschiede über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) verortet. Die Ähnlichkeit der Amplitudenverläufe wird hier mit einer Übereinstimmung von 27,5 % bewertet. Eine deutlich bessere Überlagerung wird ab einer Frequenz von $f > 30 \text{ Hz}$ beobachtet. Entsprechend der Abb. 52 lassen sich an der Weiche W15 (blau) drei und an der Weiche W19 (grün) zwei Signalspitzen lokalisieren. Dabei werden ausschließlich über das

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

Spektrum von 47 Hz (Schwellenfachfrequenz) identische Extremstellen hervorgehoben, die eine Übereinstimmung von 90,5 % aufweisen.

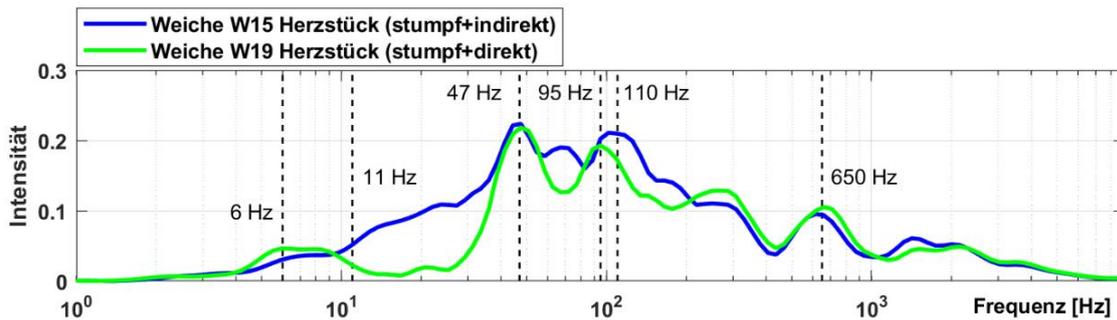


Abb. 52: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W19 (grün)

Neben dem schwachen Übereinstimmungsgrad der Gleislage zeigt sich auch eine geringe Abweichung über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$). Über die Intensität der Signalspitzen lässt sich eine weitere an der Weiche W15 (blau) verorten, die an der Weiche W19 (grün) auf einen Tiefpunkt bei 70 Hz fällt. Ebenso werden verschiedene Frequenzen bei 95 Hz (Weiche W19) und 110 Hz (Weiche 15) beobachtet, die das Spektrum der Fahrbahnkomponenten bestimmen. Über das Frequenzverhalten der Weiche W15 (47 Hz) lässt sich dabei eine nahezu doppelte Schwellenfachfrequenz (95 Hz) zuordnen, die hier als zweite harmonische Schwingung interpretiert wird.

4.2.4.3 Ergebnis der Frequenzbandkombination 3

Entsprechend dem Ergebnis der Tabelle 14 lässt sich über die Frequenzbandkombination 3 die beste Signalpaarung wahrnehmen. Diese wird mit einem Übereinstimmungsverhältnis von 86,8 % hervorgehoben. Das sehr gute Ergebnis wird hier vor allem durch die identische Befahrungssituation geprägt. Die Weichen werden jeweils stumpf und im Bereich des Herzstücks mit dem indirekten Radsatz befahren. Dies führt in der Abb. 53 zu einem ähnlichen Frequenzverhalten zwischen der Weiche W15 (blau) und Weiche W22 (braun), dass das Ergebnis der Tabelle 14 bestätigt.

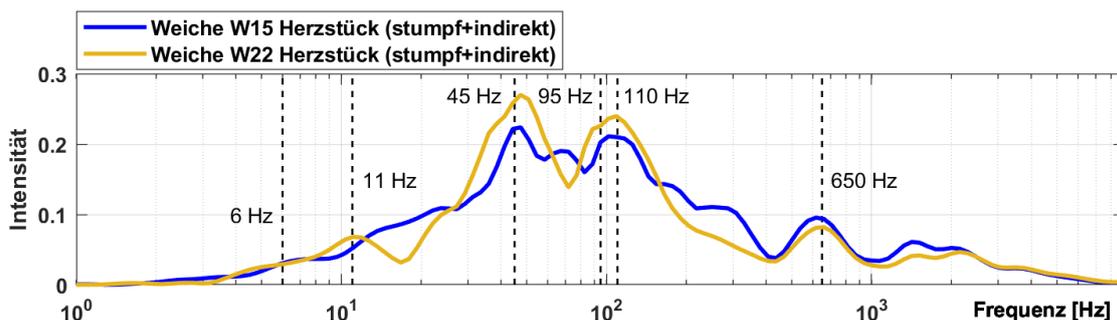


Abb. 53: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W22 (braun)

Die Analyse der Frequenzinhalte zeigt, dass sich die größten Abweichungen im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen den Fahrbahnkomponenten und der Gleislage verorten lassen. Dieses Frequenzverhalten wird mit 53,1 % bewertet und zeigt hier nur einen durchschnittlichen Übereinstimmungsgrad. Über beide Frequenzbänder lassen sich Spektren von 45 Hz wahrnehmen, die der Schwellenfachfrequenz zugeordnet werden und unterschiedliche Intensitäten aufweisen. Außerdem werden um das Spektrum von 70 Hz (0,40 m) verschiedene Extrempunkte lokalisiert. Die Weiche W15 zeigt hier einen Tiefpunkt, wo hingegen an der Weiche

4 Bewertung von Einzelfehlern an Komponenten der Fahrbahn

W22 ein Hochpunkt verortet wird. Ein sehr ähnlicher Signalverlauf wird ab einer Frequenz von $f > 80$ Hz aufgezeigt. Im Bereich der Fahrbahnkomponenten lässt sich dabei ein identisches Spektrum zwischen 95 Hz (0,29 m) und 110 Hz (0,25 m) beobachten. Die Intensität der Koeffizienten deutet hier auf einen erhöhten Verschleiß bzw. eine mangelhafte Qualität am Herzstück, die zur Gleislageveränderung führen. Die Ausprägung der Gleislage wird hier wiederum durch das Ergebnis von 90,1 % bestimmt, welches einen nahezu identischen Fehler in der äußeren Gleisgeometrie beschreibt.

4.2.4.4 Ergebnis der Frequenzbandkombination 4

Mit der Korrelation der Frequenzinhalte aus der Weiche W16 und Weiche W19 werden über alle Fehlerklassen der Tabelle 14 signifikante Übereinstimmungen erzielt. Der Frequenzbandkombination 4 wird hier ein sehr hoher Übereinstimmungsgrad von 84,8 % zugeordnet, der sich ebenfalls mit der Darstellung der Frequenzbänder (Abb. 54) darstellen lässt.

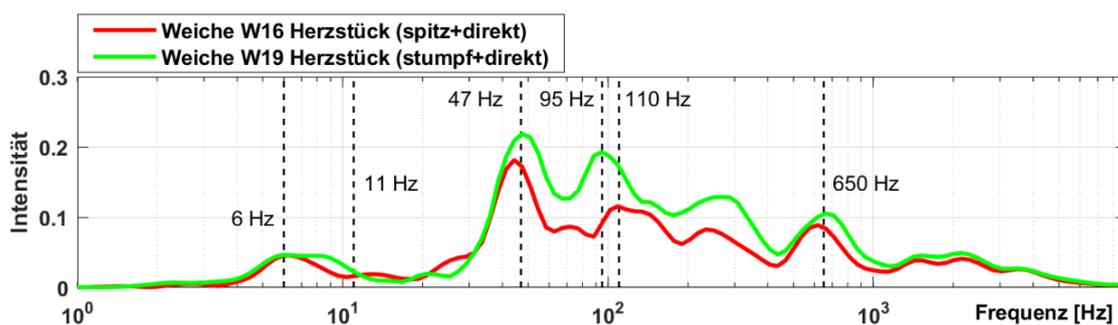


Abb. 54: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W16 (rot) und W19 (grün)

Die geringste Ähnlichkeit wird im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) verortet und mit einem Wert von 61,4 % beurteilt. Dennoch zeigt sich hier eine signifikante Übereinstimmung, die eine nahezu identische Fehlerursache darstellt. Der hohe Übereinstimmungsgrad wird aus der jeweils direkten Messung des Herzstücks bestimmt. Die Weiche W16 (rot) wird spitz und die Weiche W19 (grün) stumpf befahren. Über das Frequenzverhalten ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den der Fahrbahnkomponenten lassen sich sehr ähnliche Signalspitzen bei 45 Hz (Weiche W16) und 47 Hz (Weiche W19) lokalisieren, die einen identischen Anstieg der Frequenzkurven zeigen. Unterschiede lassen sich hingegen in der Anzahl der dominierenden Spektren zwischen $45 \text{ Hz} < f < 110 \text{ Hz}$ wahrnehmen. An der Weiche W16 werden drei und an der Weiche W19 zwei Signalspitzen lokalisiert. Dabei lassen sich über das Spektrum von 70 Hz (0,40 m) leicht unterschiedliche Extremstellen beobachten sowie ein unterschiedliches Frequenzverhalten bei 95 Hz (Weiche W19) und 110 Hz (Weiche W16) aufzeigen. In Verbindung mit den Eigenschaften der Schwellenfrequenz (46 Hz), wird auf Basis der dominierenden Frequenzinhalte bzw. Intensitäten der Wavelet-Koeffizienten, die Fehlerursache der Störstelle im Frequenzbereich von $30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ verortet und der Herzstückqualität zugeordnet.

4.2.4.5 Ergebnis der Frequenzbandkombination 5

Der zweithöchste Übereinstimmungsgrad (Tabelle 14) lässt sich über die Signalpaarung der Frequenzbandkombination 5 wahrnehmen. Die Vergleichbarkeit beider Frequenzinhalte wird hier durch einen Mittelwert von 86,4 % (Tabelle 14) bestimmt. In Verbindung mit der Abb. 55 lässt sich diesem Ergebnis eine sehr ähnliche Fehlerursache und Gleislagequalität aufzeigen. Deutliche Unterschiede werden jedoch über die Intensitäten der Koeffizienten beobachtet. Diese werden durch die Befahrungssituation und Messung der Achslagerbeschleunigungen

4.2 Beschreibung der Methodik zur Einzelfehlercharakterisierung

geprägt. Über das Spektrum der Weiche W16 (rot) lässt sich eine deutlich geringere Intensität wahrnehmen als gegenüber der Weiche W22 (braun), die auf eine ruckärmere Anregung der Schiene deutet.

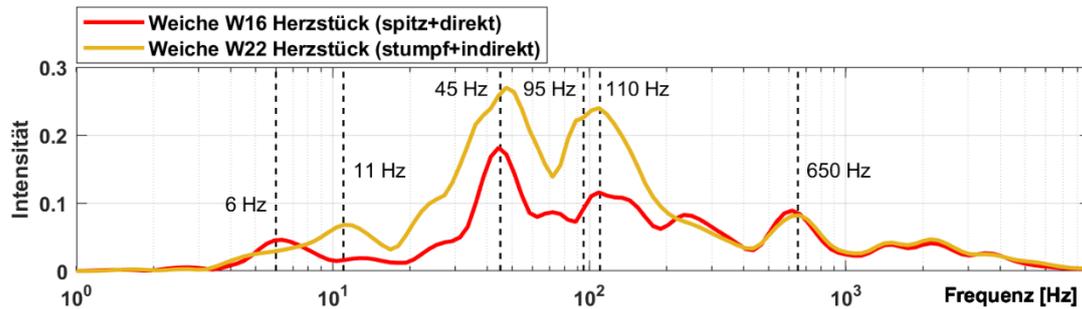


Abb. 55: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W16 (rot) und W22 (braun)

Die geringste Ähnlichkeit dieser Signalpaarung wird im Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lokalisiert. Jedoch zeigt sich hier eine signifikante Übereinstimmung von 68,7 % (Tabelle 14), die auf eine vergleichbare Störstelle deutet. An der Weiche W16 lässt sich in diesem Zusammenhang ein Spektrum von 6 Hz (4,63 m) und an der Weiche W22 eine Signalspitze von 11 Hz (2,53 m) hervorheben, die das Frequenzverhalten dieser Fehlerklasse bestimmen. Geprägt wird das Übereinstimmungsergebnis jedoch durch die Schwellenfachfrequenz (45 Hz) und dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$). Bei 70 Hz (0,40 Hz) zeigt sich hier ein unterschiedlicher Signalverlauf, der wiederum ähnliche Frequenzinhalte bei 45 Hz (0,62 m) und 100 Hz (0,28 m) aufweist und die bereits erläuterte Fehlerursache darstellt.

4.2.4.6 Ergebnis der Frequenzbandkombination 6

Die Frequenzbandkombination 6 (Tabelle 14) zeigt ebenfalls einen hohen Übereinstimmungsgrad. Dieser wird mit einer Ähnlichkeit von 79,6 % bewertet. Das Übereinstimmungsergebnis der Tabelle 14 lässt sich über die Signalverläufe der Abb. 56 veranschaulichen.

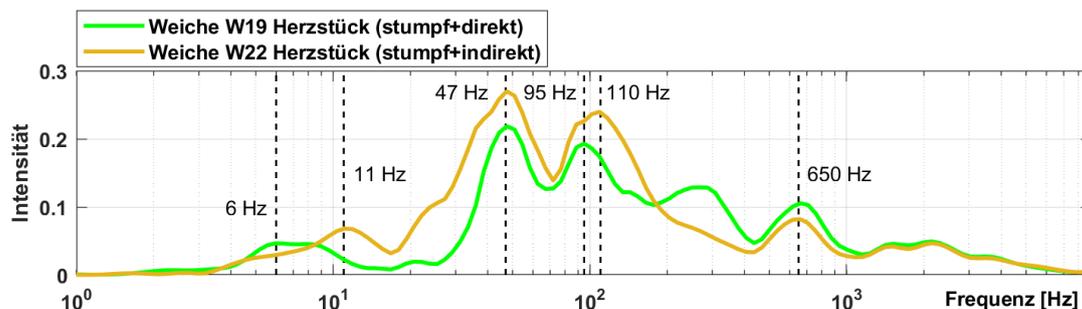


Abb. 56: Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W19 (grün) und W22 (braun)

Die geringste Übereinstimmung der in Abb. 56 dargestellten Frequenzinhalte wird über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lokalisiert und in der Tabelle 14 mit einer Vergleichbarkeit von 44,2 % bewertet. An der Weiche W19 (grün) lassen sich hier Frequenzen zwischen $6 \text{ Hz} < f < 8 \text{ Hz}$ aufzeigen. Über das der Weiche W22 (braun) wird hingegen eine erhöhte Amplitude von 11 Hz (2,53 m) hervorgehoben. Es lassen sich verschiedene Intensitäten beobachten, die auf eine unterschiedliche Ausdehnung und Qualität im Schotterbett deuten. Geprägt wird der Amplitudenverlauf jedoch durch die Schwellenfachfrequenz (47 Hz) und das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$). Über diese lassen sich identische Frequenzinhalte wahrnehmen, die auf eine Fehlerursache am Herzstück deuten.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Mit der im Kapitel 4.2 beschriebenen Methode werden hauptsächlich Einzelfehler im Bereich von Weichen (Herzstücke) charakterisiert. Jedoch ermöglicht die vorgestellte Signalanalyse eine Beurteilung von Fehlerursachen über das gesamte Spektrum des Eisenbahnoberbaus und seiner Komponenten. Im Folgenden wird daher die Anwendung im Regelbetrieb dargestellt. Dafür werden Strecken analysiert, welche mit dem DB Monitoringsystem der Güterzuglokomotive BR189 gemessen wurden. Der Vorteil dieses Systems liegt in der täglichen Befahrung von gleichen Relationen (Strecken), die eine kontinuierliche Überwachung bestimmter Streckenabschnitte ermöglicht. Das RAILab-Messsystem unterliegt hingegen den Vorgaben der DB Regelinspektion und erlaubt daher nur eine Beurteilung von Störstellen entsprechend dem DB Inspektionsintervall (Tabelle 9). Neben der Häufigkeit einer Messung unterscheiden sich beide Systeme in der Durchführung der Messung. Mit der DB Inspektionsmessung wird eine Überwachung der Gleislage entsprechend einem klar definierten Prozess nach Richtlinie [DB821.2001, 2020] durchgeführt. Das DB Fahrwegmonitoring folgt hingegen den Anforderungen aus dem Regelbetrieb. Daher muss für die Interpretation der Achslagerbeschleunigungen, die auf Basis der Güterzuglokomotive gemessen wurden, der Einfluss aus der Anhängelast und der Ladung des Zuges berücksichtigt werden. Diese Eigenschaften können das Ergebnis der Messung beeinflussen, was sich vor allem beim Bremsen oder Beschleunigen des Fahrzeugs zeigt. Um ähnliche Voraussetzungen für die Analyse der Achslagerbeschleunigungen zu schaffen, werden ausschließlich Leerfahrten der Güterzuglokomotive BR189 ausgewertet.

5.1 Validierung von Messdaten und Streckenabschnitten

Einzelfehler im Eisenbahnoberbau beschreiben einen unerwünschten Mangel am Fahrbahnsystem, der im Streckennetz der DB nur in einem geringen Umfang detektiert wird. Daher müssen Streckenabschnitte festgelegt werden, in denen Störstellen erkannt werden. Gemäß der Tabelle 15 werden vier Bereiche analysiert, in denen Gleislageveränderungen (Längshöhe) durch die Inspektionsmessung (16.02.2019) und zeitnah durch das Fahrwegmonitoring (17.02.2019) gemessen wurden. In Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit lassen sich über das Dreipunktsignal Störstellen verorten. Mit der Überschreitung des SR_A -Wertes (Kapitel 3.5) kommt es zum Einzelfehler. Entsprechend der zulässigen Streckengeschwindigkeit ($120 \text{ km/h} < v < 160 \text{ km/h}$) erlaubt der SR_A -Wert im betroffenen Streckenabschnitt eine Abweichung von 8 mm (Abb. 19) zwischen Null und Spitze (DPS).

Tabelle 15: Eingrenzung der Streckenabschnitte nach Einzelfehlern und Verfügbarkeit der Monitoringdaten

Datum	Streckenabschnitte Gleis 1 [km]			
17.02.2019	13,1 - 15,1	19,0 - 21,0	32,5 - 34,5	66,5 - 68,5

Die Einteilung der analysierten Streckenabschnitte (Tabelle 15) orientiert sich einerseits an den gemessenen Einzelfehlern der Regelinspektion. Andererseits müssen diese ebenfalls über das FwM erkannt und als auswertbare Signalblöcke identifiziert werden. Als ein Block wird eine Messung ohne Unterbrechung definiert, der ein kontinuierlich abgetastetes Intervall von 1 Hz aufzeigt. Kommt es bspw. zu einer betriebsbedingten Unterbrechung der Zugfahrt, führt dies zu Lücken im Datensatz des Fahrwegmonitorings.

Über das FwM werden ausschließlich Daten gespeichert, welche bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $v > 5 \text{ km/h}$ gemessen werden. Daher können durch das Datenformat des Fahrwegmonitorings nur bestimmte Zeitfenster analysiert werden. Entsprechend der Abb. 57 werden

5.1 Validierung von Messdaten und Streckenabschnitten

die Einzelfehlerbereiche (rot) und die Datenlücken (cyan) über den Trassierungsverlauf der Gleisachse (Krümmung) dargestellt. Durch die Vergleichbarkeit zwischen der gemessenen und Referenzkrümmung lässt sich entsprechend dem jeweiligen Krümmungsmuster der Streckenkilometer zuordnen (Kapitel 2.2.3). Die Abb. 57 zeigt unabhängig vom gewählten Offset die hohe Ähnlichkeit zwischen dem Krümmungsbild der Inspektionsmessung (rot) und dem Fahrwegmonitoring (blau) gegenüber der Referenzkrümmung (grün).

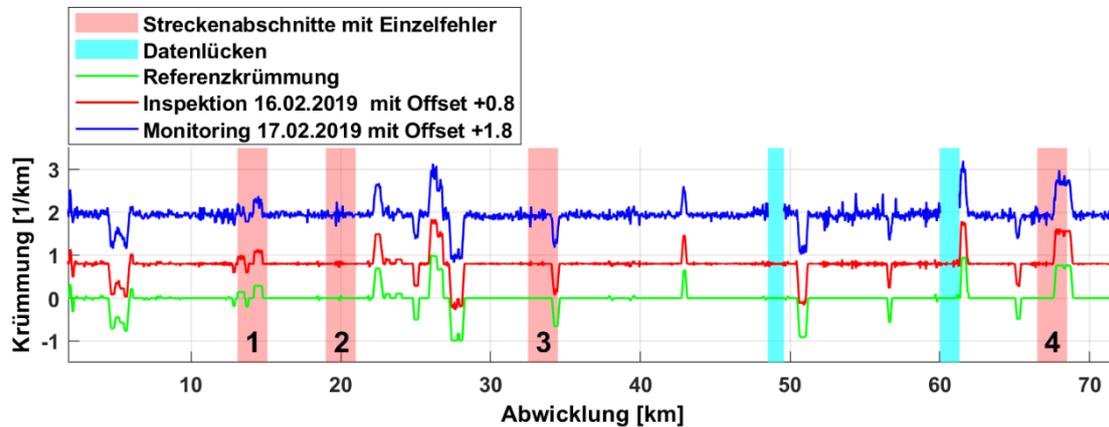


Abb. 57: Verortung von RAILab (rot) und BR189 (blau) über den Streckenkilometer der Referenzkrümmung (grün)

Die Verortung der Messdaten stellt eine hohe Anforderung an das Fahrwegmonitoring. Die Genauigkeit orientiert sich daher an der im Kapitel 3.2.1 beschriebenen Auflösung des Inspektionsformates. Das Krümmungsbild der Abb. 57 zeigt deutliche Übereinstimmungsmerkmale zwischen der Ist- und Referenzkrümmung. Bogenabschnitte lassen sich dabei über negative (Linksbogen) oder positive (Rechtsbogen) Krümmungswerte zuordnen. Die Soll-Krümmung (Referenz) beschreibt das Trassierungsmuster der Bahnstrecke, über das die Messsysteme verortet werden. Dies ermöglicht die Beurteilung der Positionsgenauigkeit und die Ausrichtung der Messdaten über den Streckenkilometer der Referenz. Die Tabelle 16 zeigt die Abweichungen zwischen der Referenz und dem FwM. Dieser lässt sich entsprechend der im Kapitel 3.6.4 beschriebenen Korrelationsfunktion berechnen.

Tabelle 16: Abweichungen aus der Ist- und Referenzkrümmung

Datum	Versatz des Fahrwegmonitorings zur Referenz [m]				
	13,1 - 15,1	19,0 - 21,0	32,5 - 34,5	66,5 - 68,5	Durchschnitt
17.02.2019	21,3	22,9	23,8	21,4	22,4

Anhand der berechneten Abweichungen lassen sich die gemessenen Achslagerbeschleunigungen des FwM dem exakten Streckenkilometer zuordnen. Dies erlaubt die Vergleichbarkeit des Dreipunktsignals mit dem Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals (Kapitel 4.2). Das Ergebnis der Tabelle 16 zeigt dabei eine kontinuierliche Verschlechterung der Position (Abweichung) zwischen dem ersten und dritten Streckenabschnitt. Dieser Einfluss lässt sich der ungenauen Information über den Raddurchmesser (Radimpuls) zuordnen. Bestätigt wird diese Theorie durch die Position im vierten Streckenabschnitt. Dieser zeigt einen geringeren Versatz zur Referenz, der durch die neue Stationierung des Messsystems nach der Datenlücke zwischen dem Streckenkilometer 60,025 km - 61,310 km (Abb. 57) entsteht. Das Beispiel der Tabelle 16 verdeutlicht, dass die im Kapitel 2.2 beschriebenen Einflüsse und Anforderungen an die Genauigkeit von Radimpuls und GNSS-Position eine für die Nachverortung ausreichende Positionsinformation liefern und für die Charakterisierung von Einzelfehlern eingesetzt werden können.

5.2 Beurteilung von Einzelfehlern

Die im Kapitel 5.1 fokussierten Streckenabschnitte basieren auf der Identifizierung von Fehlern im Eisenbahnoberbau. Dabei wird in jedem Streckenabschnitt der Tabelle 16 mindestens ein Gleislagefehler verortet, der sich über den Amplitudenverlauf des Dreipunktsignals bewerten lässt. Im Folgenden wird das Frequenzverhalten der Störstellen analysiert. Dafür wird eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von 90 km/h und ein gemittelttes Frequenzverhalten ausgewertet. Die Interpretation der Einzelfehler erfolgt entsprechend der im Kapitel 4.2 erläuterten Frequenzbandanalyse. Dafür wird das linke und rechte Achslagerbeschleunigungssignal der Längshöhe charakterisiert und das Frequenzverhalten der ALB zu einer Referenz (grün) beurteilt. Diese Referenz zeigt das Spektrum einer unauffälligen Störstelle, die in unmittelbarer Nähe zum Einzelfehler verortet wird. Die Interpretation der ALB basiert hier auf dem Zustand der Anlage zum Zeitpunkt der Gleislagemessung. Durch den Verschleiß sowie die Instandhaltung der Bahnstrecke verändert sich dieser von Messung zu Messung.

5.2.1 Streckenabschnitt 1; Station 13,100 km bis 15,100 km

Im Gleisabschnitt 1 lässt sich zwischen dem Streckenkilometer 13,100 km und 15,100 km der Oberbautyp W54-1667-B70-60 lokalisieren. Entsprechend der Bezeichnung wird die Art der Schienenbefestigung (W54), die Schwellenanzahl (1667 Schwellen auf einem Kilometer), der Schwellentyp (B70) und der Schwellenabstand (60 cm) beschrieben. Abweichungen werden in der Regel im Bereich von Weichen sowie auf Eisenbahnbrücken (EÜ) wahrgenommen.

5.2.1.1 Gleislagefehler EÜ 13,266 (13,255 km)

Die Bezeichnung bzw. Kilometerangabe einer Brückenkonstruktion bezieht sich in der Regel auf den Mittelpunkt der Anlage. Die Gleislageveränderung an der 27 m langen EÜ 13,266 wird demnach auf Höhe des ersten Widerlagers (13,255 km) in aufsteigender Kilometrierung gemessen. Im Umfeld des Widerlagers lässt sich eine Fehleramplitude von 10,3 mm (DPS der Abb. 81 und Abb. 82) lokalisieren. Diese stellt eine Grenzwertüberschreitung dar. Eine weitere Beeinflussung der Gleislage wird durch die Trassierungseigenschaften der Strecke (Rechtsbogen) bestimmt. Mit der Bogenfahrt muss das Ergebnis der Frequenzanalyse in Verbindung mit der Außen- und Innenbogenschiene bewertet werden. Über das Fahrzeugkoordinatensystem wird daher die linke Schiene im Außenbogen und die rechte Schiene im Innenbogen verortet. Die Abb. 58 zeigt das entsprechende Frequenzverhalten der Störstelle.

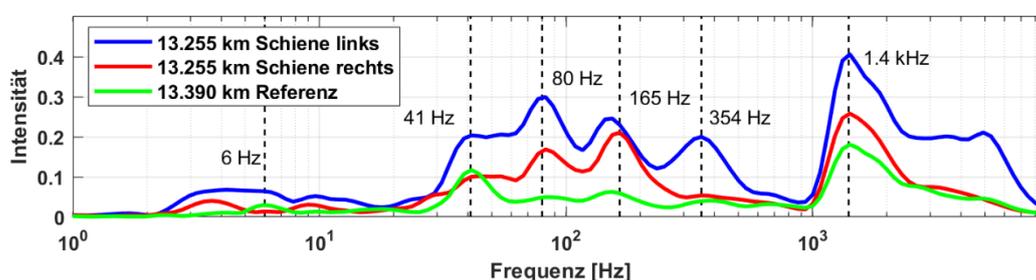


Abb. 58: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,255 km (Schienenverbindung)

Fokussiert man in der Abb. 58 das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$), werden deutlich intensivere Wavelet-Koeffizienten an der linken (blau) als an der rechten (rot) Schiene wahrgenommen. Als dominierende Frequenzinhalte der linken Schiene werden Spektren zwischen $2 \text{ Hz} < f < 19 \text{ Hz}$ betrachtet. An der rechten Schiene lassen sich hingegen punktuelle

Signalspitzen bei 4 Hz (6,25 m) und 9 Hz (2,78 m) hervorheben. Die Gleislagequalität des DPS (Abb. 81 und Abb. 82) als auch das Frequenzverhalten der Abb. 58 deuten hier vor allem auf eine unterschiedlich ausgeprägte Störstelle zwischen linker und rechter Schiene, die im Rückblick auf das Kapitel 4.1.1.1 hohlliegenden Schwellen zugeordnet wird.

Im Überlappungsbereich ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten lässt sich ein Spektrum von 41 Hz wahrnehmen. Dieses wird der Schwellenfachfrequenz zugeordnet. Entsprechend der Fahrzeuggeschwindigkeit von 90 km/h wird dieses mit Hilfe der Formel (4.1) in die Wellenlänge von 0,61 m überführt, welches hier den Schwellenabstand zeigt.

Über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) werden Signalspitzen um die 80 Hz (0,31 m) und 165 Hz (0,15 m) hervorgehoben, die entsprechend dem Kapitel 4.1.2.1 auf eine mangelhafte Schienenverbindung deuten. Dabei lässt sich über die Wellenlänge die Lage des Fehlers innerhalb des Schwellenfachs bestimmen.

Darüber hinaus werden deutliche Frequenzinhalte von 354 Hz (0,07 m) beobachtet, welche den im Kapitel 4.1.3 erläuterten Schlupfwellen oder Riffeln zugeordnet werden. Dabei lassen sich zwischen beiden Schienen verschiedene Intensitäten (Signalspitzen) aufzeigen, welche auf einen unterschiedlichen Verschleiß an der Schienenoberfläche deuten.

5.2.1.2 Gleislagefehler Weiche 24W3

Die Gleislageveränderungen am Kilometer 13,310 km und 13,340 km werden an der Weiche 24W3 verortet. Die Innenbogenweiche vom Typ IBW-60-300-1:9 (Innenbogenweiche-Schienentyp-Weichenradius-Neigungsverhältnis) wird hier spitz befahren und durch die Fahrt im Stammgleis das Herzstück mit dem rechten Radsatz gekreuzt. Mit der Bogenfahrt wird die gemessene ALB am linken Achslager dem Außenbogen und die am rechten dem Innenbogen zugeordnet. Die mangelhafte Gleislagequalität der Weiche 24W3 lässt sich im Bereich der Zwischenschiene sowie am Weichenende detektieren. Der gemessene Einzelfehler an der Zwischenschiene wird mit einer Amplitudenstärke von 8,8 mm (Dreipunktsignal der Abb. 81 und Abb. 82) bewertet. Die Abb. 59 zeigt das Frequenzverhalten der Störstelle.

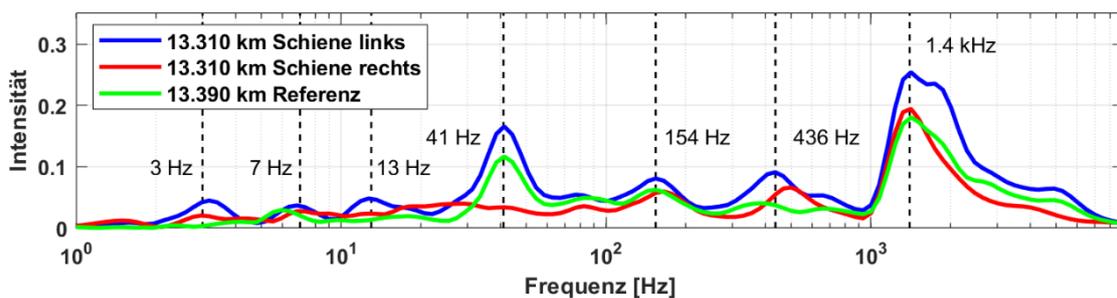


Abb. 59: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,310 km (Zwischenschiene Weiche)

Über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lassen sich entsprechend der Abb. 59 an der linken Schiene (blau) drei dominierende Frequenzinhalte aufzeigen. Diese werden bei 3 Hz (8,33 m), 7 Hz (3,57 m) und 13 Hz (1,92 m) beobachtet. Ähnliche Signalspitzen lassen sich an der rechten Schiene (rot) um das Spektrum von 3 Hz sowie 7 Hz wahrnehmen. Durch das annähernd identische Frequenzverhalten wird an der Zwischenschiene eine vergleichbare Gleislagequalität dargestellt, die wie im Kapitel 4.1.1.1 beschrieben, Hohllagen zugeordnet werden.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Mit der visuellen Analyse der Frequenzinhalte zwischen $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ zeigt sich, dass das Spektrum der linken Schiene sowie das der Referenzschiene (grün) durch die Schwellenfrequenz von 41 Hz (0,61 m) bestimmt wird. Dieses Spektrum kann jedoch über das Frequenzverhalten der rechten Schiene nicht eindeutig identifiziert werden.

Im Bereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) werden über alle Frequenzbänder Spektren von 154 Hz (0,16 m) wahrgenommen. Entsprechend der Tabelle 12 (Kapitel 4.1.4) lässt sich diesem Frequenzverhalten eine mangelhafte Schienenverbindung zuordnen, welche jedoch hier aufgrund der geringen Intensität nicht als unmittelbare Fehlerursache der mangelhaften Gleislage gesehen wird.

Darüber hinaus werden über alle Frequenzbänder der Abb. 59 Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) hervorgehoben. Diese werden zwischen $400 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ und in einem dominierenden Frequenzbereich um die 1,4 kHz verortet. Gegenüber dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten werden deutlich intensivere Frequenzinhalte beobachtet, welche die Gleislage der Weiche beeinflussen. Im Rückblick auf das Frequenzverhalten von Fehlern in der Schienenoberfläche werden die im Kapitel 4.1.3 erläuterten Schlupfwellen und Riffeln als Ursache des Einzelfehlers bestimmt.

Die Störstelle am Weichenende (24W3) wird durch die unterschiedliche Oberbaukonstruktion bestimmt. Am Streckenkilometer 13,340 km wechselt der Fahrbahntyp von einem Holzschwellengleis (Weiche) auf ein Betonschwellengleis (Freie Strecke). Der Übergang wird hier durch eine Amplitudenstärke von 8,6 mm (Dreipunktsignal der Abb. 81 und Abb. 82) hervorgehoben. Das Frequenzverhalten des Einzelfehlers wird in der Abb. 60 dargestellt.

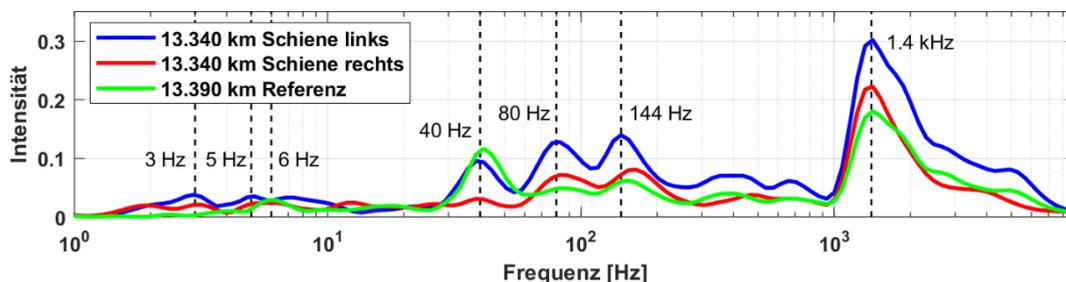


Abb. 60: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,340 km (Weichenende)

Mit dem Ergebnis der Abb. 60 lassen sich über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) an der linken (blau) und rechten (rot) Schiene annähernd ähnliche Frequenzinhalte aufzeigen. Diese werden bei 3 Hz (8,33 m) und 5 Hz (5,00 m) wahrgenommen sowie an der linken Schiene bei 7 Hz (3,57 m). Über das Spektrum der Referenzschiene (grün) lassen sich Frequenzen von 6 Hz (4,17 m) hervorheben.

Eine deutlich höhere Intensität wird bei 40 Hz (6,25 m) beobachtet, die sich am stärksten über die Referenzschiene und linke Schiene darstellen lässt. Der Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) wird wiederum durch das Spektrum (Wellenlänge) von 80 Hz (0,31 m) und 144 Hz (0,17 m) dominiert. Dieses deutet auf eine mangelhafte Schienenverbindung entsprechend den im Kapitel 4.1.2.1 erläuterten Fehlerformen hin.

Ebenso lassen sich über alle Frequenzbänder kurzwellige Fehler in der Schienenoberfläche ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) detektieren. Diese werden um eine Frequenz von 1,4 kHz (0,02 m) lokalisiert, welche sich ebenfalls auf die Eigenschaften der Fahrbahnkomponenten auswirken und die mangelhafte Gleislagequalität zusätzlich beeinflussen.

5.2.1.3 Gleislagefehler Weiche 24W6

Im Bereich der Weiche 24W6 lässt sich eine weitere Störstelle lokalisieren. Die Außenbogenweiche (ABW) der Bauart ABW 60-760.1:14 wird hier spitz befahren und der Herzstückbereich mit dem linken Achslager direkt gekreuzt. Entsprechend dem Dreipunktsignal (Abb. 81 und Abb. 82) werden die Gleislageveränderungen am Herzstück und der Zwischenschiene verortet. Mit einer Amplitudenstärke von 9,4 mm (Dreipunkt) zeigt der Einzelfehler im Bereich der Zwischenschiene eine Schwellenwertüberschreitung von 1,4 mm zum SR_A -Wert (Kapitel 3.5). Die Abb. 61 zeigt hier das Frequenzverhalten des Einzelfehlers.

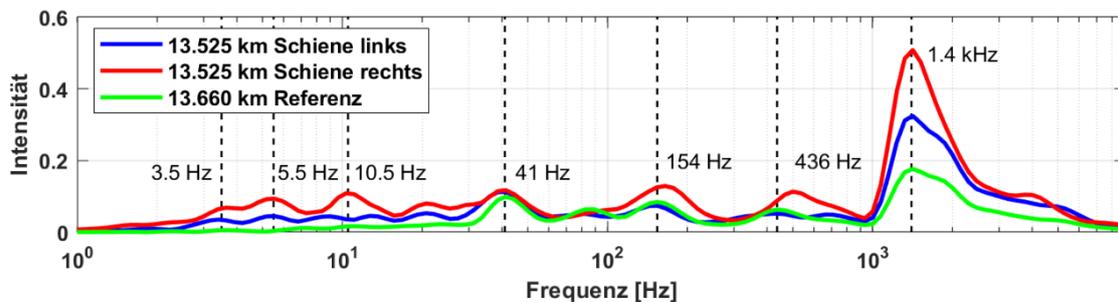


Abb. 61: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,525 km (Zwischenschiene Weiche)

Die Visualisierung der Spektren (Abb. 61) zeigt, dass sich vor allem über die ALB der rechten Schiene (rot) deutlich intensivere Wavelet-Koeffizienten darstellen lassen als an der linken (blau) und der Referenzschiene (grün) wahrgenommen werden. Dieses Verhalten wird in Verbindung mit dem befahrenen Gleisbogen verortet. Über das Frequenzband der linken und rechten Schiene lassen sich dennoch sehr ähnliche Frequenzinhalte der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$), mit jedoch unterschiedlichen Intensitäten, aufzeigen. Diese werden bei 3,5 Hz (7,14 m), 5,5 Hz (4,55 m) und 20 Hz (1,25 m) bestimmt. Ein Unterschied wird hingegen um das Spektrum von 10,5 Hz (2,38 m) sichtbar. Über dieses lässt sich an der rechten Schiene ein Hochpunkt und an der linken Schiene ein Tiefpunkt lokalisieren. Aus dem Frequenzverhalten werden hier die Eigenschaften der mangelhaften Gleislage hervorgehoben, die auf hohl liegende Schwellen deuten.

Im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten wird über alle dargestellten Frequenzbänder die Schwellenfrequenz von 41 Hz (0,61 m) wahrgenommen. Im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) lässt sich wiederum eine dominierende Frequenz von 154 Hz (0,16 m) hervorheben, die sich ebenfalls über alle Frequenzbänder der Abb. 61 aufzeigen lässt. Diese wird den Eigenschaften einer Schienenverbindung zugeordnet, die jedoch aufgrund der schwachen Intensität gegenüber den Fahrflächenfehlern nicht als signifikante Fehlerursache des Gleislagefehlers bewertet wird.

Über das Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) werden unterschiedliche Signalspitzen zwischen $436 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ dargestellt. Darüber hinaus lässt sich ebenfalls ein dominierendes Spektrum von 1,4 kHz über alle Frequenzbänder beobachten. Dieses lässt sich bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 90 km/h in eine Wellenlänge von 0,02 m auflösen. Entsprechend der im Kapitel 4.1.3 erläuterten Fahrflächenfehler wird dieser Fehlertyp Riffeln zugeordnet, welche die Gleislageveränderung anregen.

Im Herzstückbereich der Weiche 24W6 werden die größten Signalspitzen wahrgenommen und zeigen mit einer Amplitudenstärke von 13,4 mm (Dreipunktsignal) eine Grenzwertüberschreitung nach dem SR_{100} -Wert (Kapitel 3.5). Dieses Ergebnis lässt sich ausschließlich über das

5 Anwendung der entwickelten Methode

DPS der linken Schiene (Abb. 81) beobachten, welches der direkten Überfahrt im Herzstückbereich unterliegt. Die Abb. 62 zeigt das Frequenzverhalten aus der direkten (linke Schiene) und indirekten (rechte Schiene) Befahrung des Herzstückbereichs.

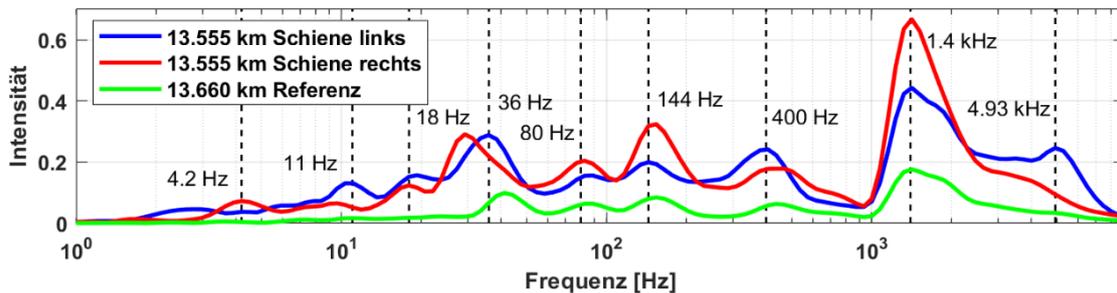


Abb. 62: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,555 km (Herzstück Weiche)

Im Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) werden die größten Abweichungen (Abb. 62) zwischen der linken (blau) und rechten (rot) Schiene beobachtet. Das Frequenzverhalten der rechten Schiene wird hier durch Frequenzinhalte von 4,2 Hz (5,95 m), 18 Hz (1,39 m) und 29 Hz (0,86 m) bestimmt. An der linken Schiene werden hingegen Frequenzen um die 11 Hz (2,27 m) und 18 Hz hervorgehoben. Dabei lässt sich über die Signalspitze von 18 Hz eine sehr ähnliche Intensität aufzeigen. Das Frequenzverhalten der Gleislage deutet hier auf Hohllagen, die einen unterschiedlichen Ausprägungsgrad zwischen linker und rechter Schiene zeigen.

Ähnliche Frequenzinhalte zwischen linker und rechter Schiene lassen sich über das Spektrum von 80 Hz (0,31 m) und 144 Hz (0,17 m) wahrnehmen. Dabei werden über die rechte Außenbogenschiene deutlich intensivere Übereinstimmungskoeffizienten beobachtet. Entsprechend den im Kapitel 4.1.2 erläuterten Fahrbahnkomponenten wird dieses der Überlaufgeometrie zwischen der Flügelschiene und der Herzstückspitze zugeordnet. Die Anregung der Schiene führt dabei zur Gleislageveränderung (Hohllagen) im Herzstückbereich.

Die stärksten Signalspitzen werden wiederum im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) erkannt. Es wird ein Spektrum von 1,4 kHz (0,02 m) hervorgehoben, das entsprechend der Tabelle 12 auf die Eigenschaften von Riffeln deutet. Außerdem werden Frequenzinhalte zwischen $400 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ verortet, welche auf Schlupfwellen deuten und sich ebenfalls negativ auf die Gleislage der Weiche auswirken.

5.2.1.4 Gleislagefehler 14,800 km (freie Strecke)

Eine weitere Störstelle wird am Kilometer 14,800 km verortet. Der Einzelfehler lässt sich hier am Ende eines Gleisbogens lokalisieren und durch eine Amplitudenstärke von 12,3 mm (DPS der Abb. 87 und Abb. 88) hervorheben. Die Abb. 63 zeigt das Frequenzverhalten.

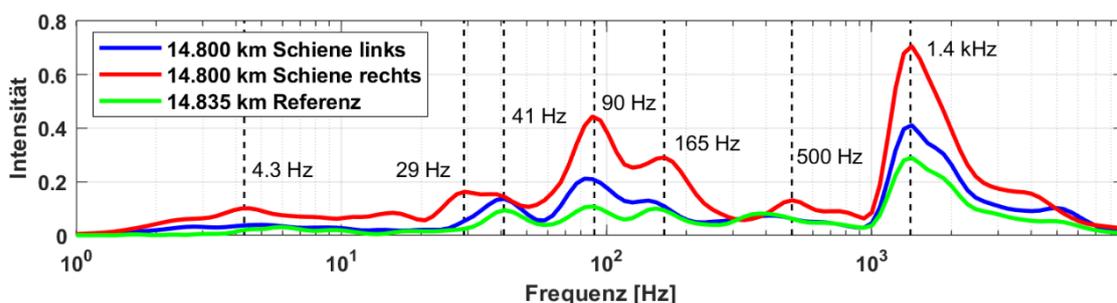


Abb. 63: Frequenzverhalten Streckenkilometer 14,800 km (Schienenverbindung)

Über das Frequenzband der Abb. 63 lassen sich an der rechten Schiene (rot) erneut deutlich intensivere Wavelet-Koeffizienten darstellen. Diese werden dem Fahrverhalten im Übergang zwischen einem Bogen auf eine Gerade zugeordnet. Entsprechend dem Krümmungsbild der Inspektionsmessung wird eine deutlich ausgefahrene Gleislage (Gegenbogen) verortet, die hier das Spektrum des Einzelfehlers bestimmt. Dabei werden über den Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) keine wesentlichen Frequenzunterschiede wahrgenommen, was sich ebenfalls in einer ähnlichen Amplitude des Dreipunktsignals (Abb. 87 und Abb. 88) zeigt. Als dominierend wird hier ein Spektrum von 4,3 Hz (5,81 m) wahrgenommen, welches der rechten Schiene zugeordnet wird.

Vergleichbare Frequenzinhalte werden im Bereich der Schwellenfachfrequenz (41 Hz) sowie um das Spektrum von 90 Hz (0,28 m) und 165 Hz (0,15 m) verortet, welche sich ebenfalls über die Referenz, jedoch in einer geringeren Intensität wahrnehmen lassen. Durch das deutlich dominierende Frequenzverhalten der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) wird hier das Spektrum einer mangelhaften Schienenverbindung (Tabelle 12) erkannt, welches den Gleislagefehler verursacht.

Außerdem führen die Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) zur Anregung der Störstelle. Diese werden bei einer Frequenz von 500 Hz (Schlupfwellen) und 1,4 kHz (Riffeln) lokalisiert. Die Fehlerursache dieser Störstelle wird daher nicht nur durch den Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten bestimmt, sondern auch durch den Einfluss aus der Schienenoberfläche.

5.2.2 Streckenabschnitt 2; Station 19,000 km bis 21,000 km

Im zweiten Gleisabschnitt werden über das DPS der Längshöhe drei Einzelfehler erkannt. Diese lassen sich an unterschiedlichen Brückenkonstruktionen und einem Signalstandort lokalisieren. Die Gleislage des Abschnitts wird hier durch den Oberbautyp W54-1667-B70-60 bestimmt, der im Bereich der Brücken punktuell auf eine Holzschwellenkonstruktion wechselt.

5.2.2.1 Gleislagefehler EÜ 19,778 km (Widerlager)

Die Gleislageveränderung am Kilometer 19,780 km wird durch lokale Setzungen im Umfeld des zweiten Widerlagers der EÜ 19,778 km hervorgerufen. Wie bereits im Kapitel 4.1.1.3 beschrieben, kommt es zu Setzungsmulden, die sich auf die Steifigkeit der Fahrbahn auswirken. Die Auflösung des Gleisschotters führt dabei zu Hohllagen, welche die Störstelle verursacht. Die schlechte Gleislage kann hier durch die Instandhaltung der Fahrbahn (Rampe) zwischen Brücke und Damm zwar kurzfristig behoben werden, jedoch hängt die Stabilität der Bettung maßgebend von der Qualität des Tragschichtsystems ab. Die Nachhaltigkeit einer Instandhaltung lässt sich hier entsprechend der Amplitude von 13,6 mm (DPS der Abb. 89 und Abb. 90) bewerten und über das Frequenzverhalten der Abb. 64 die Fehlerursache bestimmen.

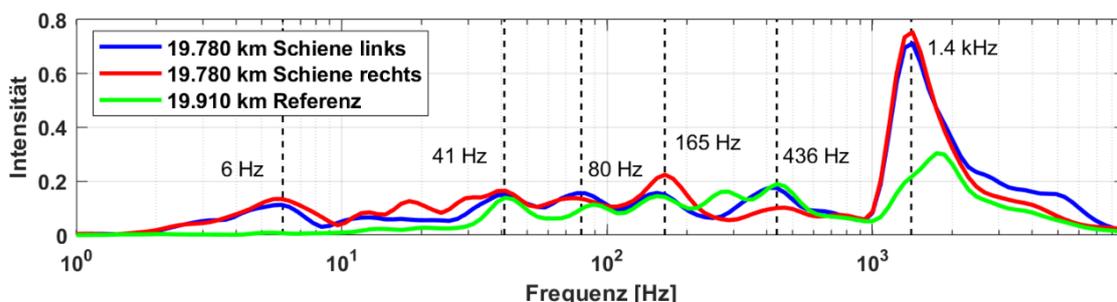


Abb. 64: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 19,780 km (EÜ 19,778 km)

5 Anwendung der entwickelten Methode

Wie die Unterteilung der Fehlerklassen (Kapitel 3.6.5) ist die Staffelung der im Kapitel 3.6.3 beschriebenen Wavelet-Koeffizienten zu interpretieren. In der Abb. 64 wird dies besonders über das Frequenzverhalten der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) und der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) hervorgehoben sowie durch den Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen diesen beiden Fehlerklassen. Dabei lassen sich über die Abb. 64 annähernd ähnliche Wavelet-Koeffizienten (Intensitäten) wahrnehmen. Die Frequenzanalyse und damit die Interpretation der Gleislage unterliegt jedoch der Skalierung des Wavelets, das mit steigendem η -Wert zu geringeren Koeffizienten führt. Über das Spektrum der Gleislage sollten daher deutlich geringere Intensitäten wahrgenommen werden als gegenüber dem der Fahrbahnkomponenten. Die Abbildung zeigt jedoch sehr ähnliche Intensitäten, die auf eine Fehlerursache im Spektrum der Gleislage deuten. Daher wird dem Spektrum der Gleislage, das eine dominierende Frequenz von 6 Hz (4,17 m) mit einer Intensität von 0,13 zeigt, eine deutlich höhere Aufmerksamkeit in Bezug auf die Fehlerursache zugeordnet als gegenüber den dominierenden Frequenzinhalten der Fahrbahnkomponenten.

Im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten wird bei 41 Hz (0,61 m) die Schwellenfachfrequenz dargestellt. Diese lässt sich über alle Frequenzbänder der Abb. 64 wahrnehmen. Außerdem werden leicht ausgeprägte Spektren von 80 Hz (0,31 m) und 165 Hz (0,15 m) hervorgehoben, die hier das Frequenzverhalten der Fahrbahnkomponenten bestimmen. Durch die sehr schwachen Signalspitzen wird die Anregung der mangelhaften Gleislage jedoch nicht im Spektrum der Fahrbahnkomponenten verortet.

Die stärksten Frequenzinhalte (Abb. 64) werden im Bereich der Fahrflächenfehler erkannt. Diese lassen sich bei 436 Hz (0,06 m) und 1,4 kHz (0,02 m) lokalisieren und entsprechend der Tabelle 12 Fehlern in der Schienenoberfläche zuordnen. Über die deutlich erhöhten Signalspitzen oberhalb von $f > 1000 \text{ Hz}$ zeigt sich die Anregungsfrequenz der Schiene, welche dadurch in Schwingung versetzt wird und das Setzungsverhalten am Widerlager beeinflusst.

5.2.2.2 Gleislagefehler EÜ 19,954 km (Widerlager)

Der Gleislagefehler an der EÜ 19,954 km wird im Bereich des zweiten Widerlagers (19,960 km) verortet. Die Örtlichkeit des Fehlers wird hier vor allem durch die Trassierung des Gleises bestimmt. Diese wechselt im Bereich der Brücke von einem Links- in einen Rechtsbogen (Streckeninformationen der Abb. 91 und Abb. 92). Die Qualität der Gleislage wird hier mit einer Fehleramplitude von 8,2 mm bewertet, die über das Frequenzverhalten der Abb. 65 näher charakterisiert wird.

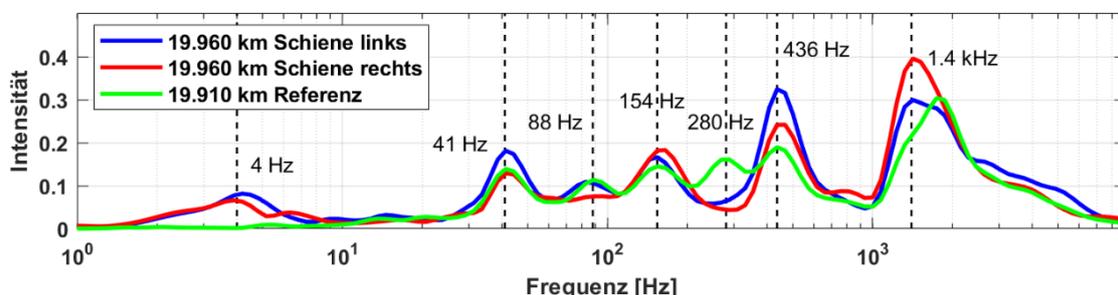


Abb. 65: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 19,960 km (EÜ 19,954 km)

Das Spektrum (Abb. 65) der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) wird im Bereich des Widerlagers durch eine Frequenz von 4 Hz (6,25 m) bestimmt. Diese lässt sich über die linke sowie rechte Schiene wahrnehmen. Dabei zeigt das Spektrum der Gleislage ein sehr ähnliches Verhalten

wie das des Einzelfehlers am Kilometer 19,780 km (Kapitel 5.2.2.1). Dieser wird durch das Setzungsverhalten im Bereich des Widerlagers verursacht und führt zur mangelhaften Gleislage.

Eine deutlich höhere Intensität (Abb. 65) wird im Bereich der Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) erkannt, die sich über alle Frequenzbänder wahrnehmen lässt. Außerdem werden über alle Signalverläufe ähnliche Frequenzinhalte von 88 Hz (0,28 m) und 154 Hz (0,16 m) beobachtet, welche dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten (80 Hz < f < 400 Hz) zugeordnet werden. Dabei wird die Schwellenfachfrequenz als Grundschwingung (45 Hz) und die dominierenden Spektren der Fahrbahnkomponenten hier als erste (88 Hz) und zweite (154 Hz) harmonische Schwingung interpretiert.

Die stärksten Signalspitzen der Abb. 65 lassen sich im Spektrum der Fahrflächenfehler (400 Hz < f < 9000 Hz) erkennen. Diese werden durch Frequenzen von 436 Hz (0,06 m) und 1,4 kHz (0,02 m) hervorgehoben. Die Anregung der kurzwelligen Fehler (Schienenoberfläche) führt zu hohen Intensitäten, die hier als Fehlerursache der mangelhaften Gleislage verortet werden. Durch die Auflösung der Frequenzinhalte in den Wellenlängenbereich lassen sich diese in Verbindung mit der Tabelle 12 Schlupfwellen und Riffeln zuordnen. Mit der Überfahrt des Zuges kommt es zur Anregung der Schiene, welche dadurch in Schwingung versetzt wird. Das Pumpen der Schiene führt zum Schotterfließen und somit zum Freilegen der Schwellen (Hohllagen). Die Ursache der mangelhaften Gleislage (EÜ 19,954 km) wird daher den Eigenschaften der Schienenoberfläche zugeordnet. Die Auswirkung der Fahrflächenfehler auf die Gleisgeometrie zeigt sich wiederum über das Dreipunktsignal, wodurch sich die Qualität der Gleislage bewerten lässt.

5.2.2.3 Gleislagefehler Hauptsignal 2416

Der Einzelfehler am Streckenkilometer 20,115 km wird am Hauptsignal 2416 verortet. Für die Interpretation des Fehlers spielt die betriebliche Nutzung des Signals eine wesentliche Rolle. Dieses dient dem Gleiswechselbetrieb (GWB) und so der Signalisierung von Zugfahrten aus der entgegengerichteten Fahrtrichtung. Durch das Halten und Anfahren der Züge kommt es hier vor allem zu einem erhöhten Verschleiß auf der Schienenoberfläche, der sich je nach Anlagenzustand auf die Gleislagequalität auswirkt. Über das Dreipunktsignal (Abb. 91 und Abb. 92) lässt sich der Örtlichkeit eine Fehleramplitude von 8,2 mm zuordnen, die sich über das Frequenzverhalten der Abb. 66 näher spezifizieren lässt.

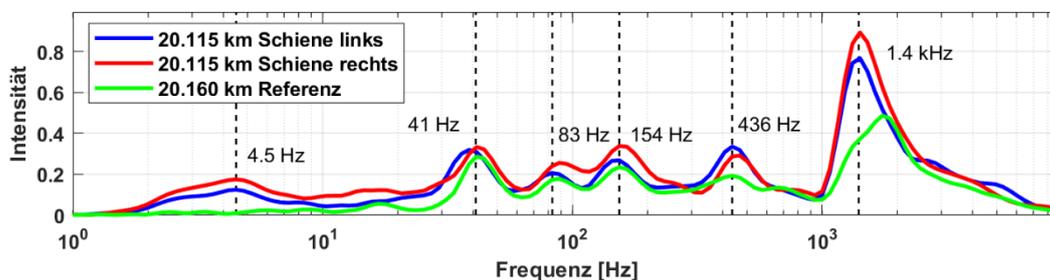


Abb. 66: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 20,115 km (Hauptsignal 2416)

Über das Spektrum (Abb. 66) der Gleislage (1 Hz < f < 30 Hz) lässt sich ein sehr ähnlicher Amplitudenverlauf zwischen der linken (blau) und der rechten (rot) Schiene bestimmen. Dieser hebt sich deutlich von dem der Referenzschiene (grün) ab. Die maximale Amplitude (Abb. 66) der linken und rechten Schiene wird über das Spektrum von 4,5 Hz (5,56 m) hervorgehoben. Dabei lassen sich der Örtlichkeit hohlliegende Schwellen zuordnen.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Entsprechend der Frequenzinhalte ($30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) lassen sich in der Abb. 66 identische Signalspitzen bei 41 Hz (0,61 m), 83 Hz (0,30 m) und 154 Hz (0,16 m) hervorheben. Die Schwellenfachfrequenz (45 Hz) wird dabei als Grundschiwingung interpretiert. Dieser folgen zwei Unterschwingungen, die bei 83 Hz und 154 Hz lokalisiert werden.

Vor allem wird die Gleislage (20,115 km) durch die Fahrflächenfehler beeinflusst, welche über die Frequenzinhalte von 436 Hz (0,06 m) und 1,4 kHz (0,02 m) hervorgehoben werden. Diese Spektren werden Schlupfwellen (436 Hz) und Riffeln (1,4 kHz) zugeordnet (Tabelle 12), die hier auf Grund der erhöhten Intensität als Ursache der mangelhaften Gleislage interpretiert werden.

5.2.3 Streckenabschnitt 3; Station 32,500 km bis 34,500 km

Die Bewertung der Gleislage im 3. Abschnitt zeigt ausschließlich am Kilometer 32,715 km eine auffällige Störstelle. Dies wird in Verbindung mit dem Bahnübergang 32,722 km verortet. Der Einzelfehler lässt sich einerseits durch die unterschiedlichen Steifigkeiten zwischen dem Regelquerschnitt der Fahrbahn und der Ausführung des Bahnübergangs (BÜ) beurteilen. Andererseits werden hier Achszählpunkte lokalisiert, die sich auf das Frequenzverhalten der Schiene auswirken. Je nach Qualität der Anlage führt dies zum Einzelfehler, der sich am BÜ 32,722 mit einer Amplitude von 9,1 mm (Dreipunktsignal der Abb. 91 und Abb. 92) bewerten lässt. Die Abb. 67 zeigt das Frequenzverhalten des Einzelfehlers.

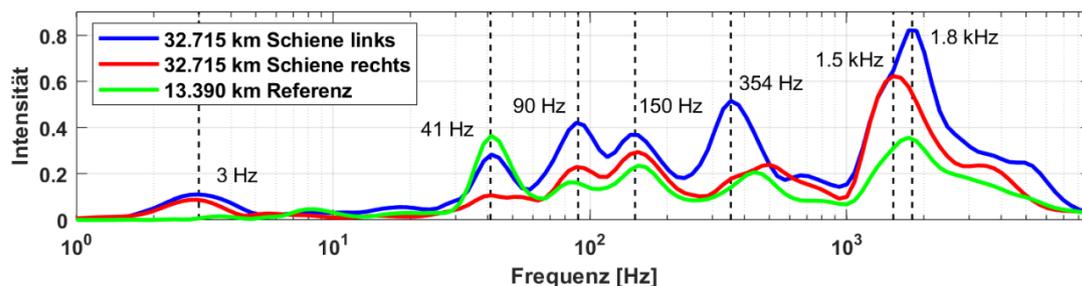


Abb. 67: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 32,715 km (BÜ 32,722 km)

Im Frequenzbereich (Abb. 67) der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) zeigt sich die erste Signalspitze um das Spektrum von 3 Hz (8,33 m). Gegenüber der Referenzschiene (grün) lässt sich über das Frequenzband der linken (blau) als auch rechten (rot) Schiene eine nahezu identische Amplitudenstärke aufzeigen, die hier auf eine schlechte Gleisgeometrie deutet.

Ähnliche Frequenzinhalte lassen sich über die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) wahrnehmen. Jedoch variiert die Intensität zwischen der linken, rechten und Referenzschiene (Abb. 67). Die Amplitude der Referenz zeigt hier die größten Übereinstimmungsmerkmale aus der Wavelet-Transformation des ALB. Die drei anschließenden Signalspitzen werden im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) eingruppiert. Dabei lassen sich Spektren um die 90 Hz (0,28 m), 150 Hz (0,17 m) und 354 Hz (0,07 m) hervorheben. Die dominierenden Frequenzinhalte der Referenzschiene werden hier als harmonische Schwingung interpretiert und die der Störstelle einer mangelhaften Schienenverbindung zugeordnet.

Dominierende Frequenzinhalte (Abb. 67) lassen sich ebenfalls über das Spektrum der Fahrflächenfehler ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) aufzeigen. In der Abbildung werden diese zwischen $1,5 \text{ kHz} < f < 1,8 \text{ kHz}$ lokalisiert und der Überlaufgeometrie im Bereich der Schienenverbindung zugeordnet. Die Gleislagequalität am BÜ wird demnach durch zwei Systeme beeinflusst, die sich aus der Anregung der Fahrbahnkomponenten und Fahrflächenfehler ergibt.

5.2.4 Streckenabschnitt 4; Station 66,500 km bis 68,500 km

Im letzten Streckenabschnitt werden drei Einzelfehler detektiert. Diese werden im Bereich einer Stahlbrückenkonstruktion, auf der freien Strecke sowie an einem Bahnübergang verortet.

5.2.4.1 Gleislagefehler EÜ 67,095 km

Im Bereich der EÜ 67,095 km lassen sich zwei Einzelfehler verorten. Die erste Störstelle wird am Kilometer 67,130 km erkannt und dem Widerlagerbereich zugeordnet. Über das DPS wird hier eine Fehleramplitude von 13,7 mm (Abb. 97 und Abb. 98) hervorgehoben, die eine Schwellenwertüberschreitung nach dem SR-Wert zeigt. Das Frequenzverhalten der Gleislageweränderung wird in der Abb. 68 verdeutlicht.

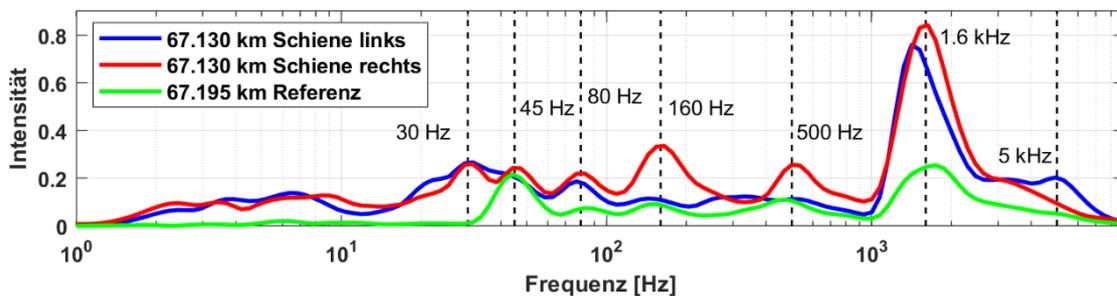


Abb. 68: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 67,130 km (EÜ 67,095 km)

In der Abb. 68 lassen sich über das Spektrum der linken (blau) und rechten (rot) Schiene sehr ähnliche Signalverläufe aufzeigen, die den Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) prägen. Dabei lassen sich nahezu identische Intensitäten zwischen $1 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ wahrnehmen, die auf einen langwelligen Gleisgeometriefehler deuten und das Setzungsverhalten am Widerlager der Eisenbahnüberführung zeigen. Als dominierend wird hier außerdem eine Frequenz von 30 Hz (0,83 m) bewertet, welche dem direkten Übergang zwischen EÜ und Dammbereich zugeordnet wird.

Im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) zwischen dem Spektrum der Gleislage und dem der Fahrbahnkomponenten sowie diesem selbst, lassen sich drei weitere Signalspitzen beobachten. Diese werden bei einer Frequenz von 45 Hz (0,56 m), 80 Hz (0,31 m) und 160 Hz (0,16 m) lokalisiert. Das Spektrum von 160 Hz wird dabei ausschließlich über das Frequenzverhalten der rechten Schiene hervorgehoben. Aufgrund der Intensität lässt sich hier ein Mangel in der Schienenverbindung aufzeigen, der das Spektrum der Fahrbahnkomponenten dominiert.

Unterschiedliche Signalspitzen lassen sich ebenfalls im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) darstellen. Differenzen werden vor allem zwischen der Störstelle und der Referenz um eine Frequenz von 500 Hz (0,05 m) und 5 kHz (0,01 m) beobachtet. Durch die deutlich erhöhten Intensitäten wird die Ursache des Einzelfehlers in der Anregung der Schiene verortet. Im Zuge der Befahrung kommt es durch die Unebenheiten auf der Schienenoberfläche zu einer Wellenbewegung der Gleiskonstruktion, die das Setzungsverhalten am Widerlager bestimmt und so zu einer veränderten Gleisgeometrie im Bereich der EÜ führt.

Der zweite Einzelfehler wird am Kilometer 67,145 km einem mangelhaften ISO zugeordnet. Dabei lässt sich über die Abb. 69 ein vollkommen anderes Frequenzverhalten im Bereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) wahrnehmen als gegenüber dem Setzungsverhalten am Kilometer 67,130 km aufgezeigt wird.

5 Anwendung der entwickelten Methode

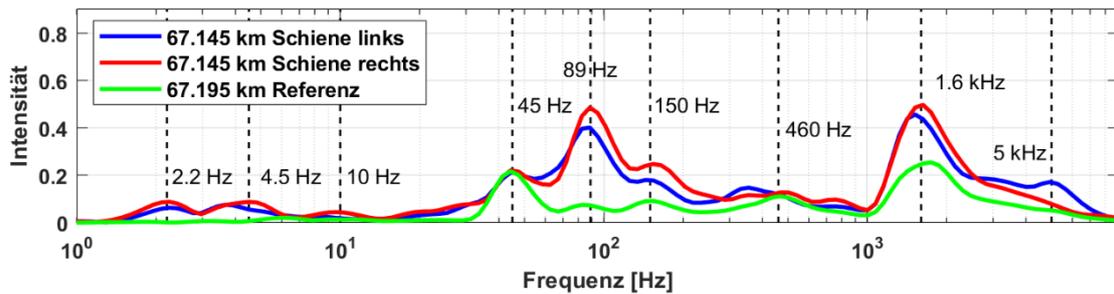


Abb. 69: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 67,145 km (freie Strecke) ISO

Gegenüber der Abb. 68 lassen sich in der Abb. 69 punktuelle Signalspitzen wahrnehmen, die das Frequenzverhalten der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) bestimmen. Entgegen der Referenzschiene zeigt das Spektrum der linken (blau) sowie rechten (rot) Schiene die Eigenschaften einer mangelhaften Gleislage. Die Auswirkungen der Gleislageveränderung werden zwischen $2 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ dargestellt. Dabei lassen sich ähnliche Frequenzinhalte und Intensitäten um die 2 Hz (12,50 m), 4 Hz (6,25 m) und 10 Hz (2,50 m) verorten.

Das Frequenzverhalten der Referenzschiene zeigt ein dominierendes Spektrum von 45 Hz (0,56 m), das sich ebenfalls über die linke und rechte Schiene wahrnehmen lässt und der Schwellenfachfrequenz zugeordnet wird. Das Spektrum der Referenzschiene wird hier als Grundschwingung interpretiert und die schwachen Frequenzinhalte bei 89 Hz (0,28 m) und 150 Hz (17 m) als Unterschwingungen gedeutet. Durch das gemittelte Frequenzverhalten lässt sich hier zwar keine eindeutige Doppelung der Frequenzinhalte darstellen, jedoch zeigt die Abb. 69 den Zusammenhang zwischen der Grundschwingung und den harmonischen Schwingungen der Referenzschiene. Ein deutlich anderes Frequenzverhalten lässt sich über das Frequenzband der linken und rechten Schiene im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) wahrnehmen. Hier werden die stärksten Signalspitzen bei einer Frequenz von 89 Hz bestimmt. Dieses Frequenzverhalten zeigt die Anregung der beiden Schienenenden und verdeutlicht die veränderte Geometrie der Schiene. Aufgrund der geringen Intensität im Spektrum der Gleislage und der Fahrflächenfehler wird die Fehlerursache der Gleislageveränderung im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten verortet.

Über das Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) zeigt sich ein dominierendes Frequenzverhalten von 1,6 kHz (0,02 m). Dieses wird über alle Frequenzbänder der Abb. 69 wahrgenommen. Ähnliche Intensitäten werden zwischen rechter und linker Schiene erkannt, die sich deutlich von der Referenzschiene abheben und auf Fehler in der Schienenoberfläche deuten. Die kurzwelligen Fehler (1,6 kHz) lassen sich hier der Überlaufgeometrie am Isolierstoß (Kapitel 4.1.2.1) zuordnen. Es kommt zum Verschleiß an den Zwischenlagen, die einerseits zu Unebenheiten auf der Lauffläche der Schiene führen und andererseits die Schwingung der Schienenenden anregt. Die Intensität der Fahrflächenfehler aus der Abb. 68 zeigt dabei eine vergleichbare Amplitudenstärke wie die der Fahrbahnkomponenten (89 Hz). Entsprechend der im Kapitel 3.6.3 interpretierten Wavelet-Koeffizienten und der damit einhergehenden Intensität, wird die Anregung der Gleislage durch die Systemeigenschaften der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler bestimmt. Diese wiederum führen zur Anregung der Schiene und letztendlich zur Bildung von Hohllagen (Kapitel 4.1.1.1).

5.2.4.2 Gleislagefehler 68,155 km (freie Strecke)

Am Streckenkilometer 68,155 km wird ein weiterer Einzelfehler mit einer Amplitudenstärke von 8,4 mm (DPS der Abb. 101 und Abb. 102) hervorgehoben. Diese Störstelle wird durch eine

Setzung im Bereich einer Kabelquerung (68,157 km) sowie durch die Trassierung (Rechtsbogen) bestimmt. Die Abb. 70 zeigt das Frequenzverhalten der Gleislageveränderung.

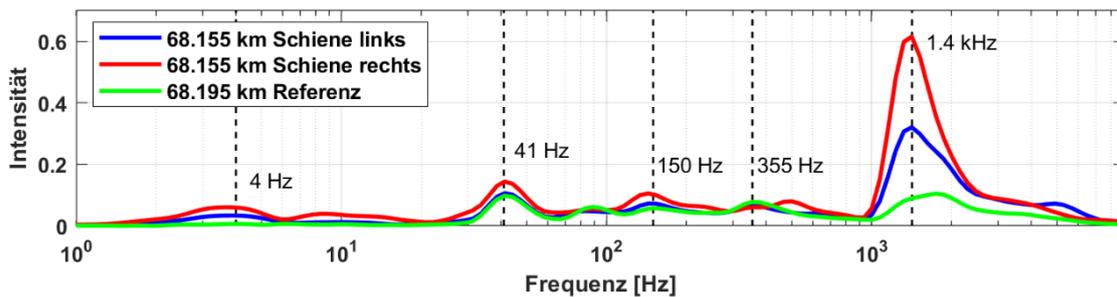


Abb. 70: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 68,155 km (Kabelquerung)

In der Abb. 70 lassen sich über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) bis hin zu dem der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) nur sehr schwache Intensitäten beobachten. Das der Gleislage wird vor allem durch Frequenzinhalte von 4 Hz (6,25 m) bestimmt. Dabei werden ähnliche Signalspitzen zwischen linker (blau) und rechter (rot) Schiene aufgezeigt, die die Ausdehnung der Störstelle am Kilometer 68,155 km zeigt.

Als dominierend wird die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) bewertet. Über diese wird die jeweils stärkste Intensität in der Abb. 70 zwischen $30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ bestimmt. Außerdem lassen sich schwache Frequenzinhalte von 90 Hz (0,28 m), 150 Hz (0,17 m) und 355 Hz (0,07 m) erkennen, welche aufgrund der geringen Intensität nicht als Fehlerursache der mangelhaften Gleislage interpretiert werden.

Im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) lassen sich unterschiedlich starke Signalspitzen bei 1,4 kHz (0,02 m) zwischen linker und rechter Schiene verorten, die sich ebenfalls deutlich von der Referenzschiene abheben. Durch die erhöhten Amplituden lässt sich die Anregung der Schiene darstellen, die sich auf die konstruktive Ausführung der Kabelquerung auswirkt und zur Setzung im Gleis führt.

5.2.4.3 Gleislagefehler BÜ 68,320 km (Bahnübergang)

Die Störstelle im Bereich des BÜ 68,320 km wird durch die Trassierung (Rechtsbogen) des Streckenabschnittes bestimmt. Die Auswirkung der Gleislageveränderung wird hier über den gesamten Bahnübergang verortet. Entsprechend dem Dreipunktsignal der Abb. 101 und der Abb. 102 lässt sich eine Grenzwertüberschreitung feststellen, die mit einer Amplitude von 10,7 mm dem SR_A -Wert zugeordnet wird. Die Abb. 71 zeigt das Frequenzverhalten am BÜ 68,320 km, das hier auf eine mangelhafte Schienenverbindung deutet.

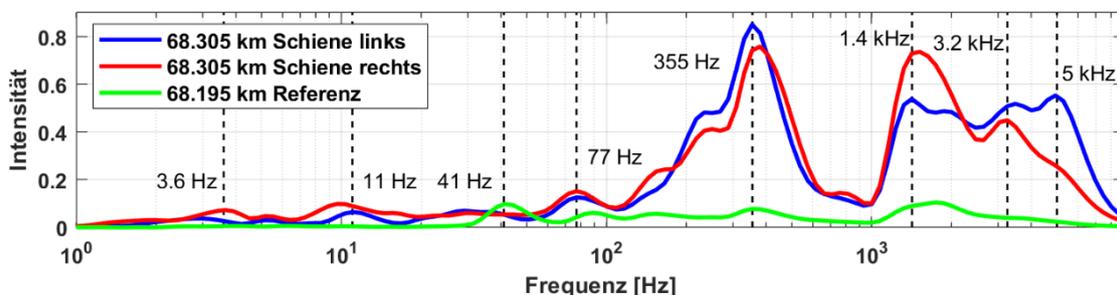


Abb. 71: Frequenzverhalten am Streckenkilometer 68,305 km (BÜ 68,320 km)

5 Anwendung der entwickelten Methode

In der Abb. 71 lassen sich über das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) nur sehr geringe Intensitäten darstellen. Als dominierende Anteile der rechten Schiene (rot) werden Spektren von 3,6 Hz (6,94 m) und 10 Hz (2,50 m) hervorgehoben. An der linken Schiene (blau) lassen sich hingegen Signalspitzen von 11 Hz (2,27 m) und 30 Hz (0,83 m) wahrnehmen. Dabei zeigt sich über das Spektrum von 30 Hz eine vergleichbare Intensität zur rechten Schiene.

Im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten lässt sich die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) verorten. Diese wird ausschließlich über das Frequenzverhalten der Referenzschiene (grün) erkannt. Das Frequenzband der rechten sowie linken Schiene zeigt hingegen eine vergleichbare Intensität um das Spektrum von 77 Hz (0,33 m). Die stärksten Frequenzen werden jedoch im Bereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sichtbar. Dieses wird durch dominierende Frequenzinhalte von 355 Hz (0,07 m) geprägt. Dabei lassen sich über die linke und rechte Schiene ähnliche Amplituden bis zu einer Frequenz von $f < 1 \text{ kHz}$ aufzeigen, die sich gegenüber der Referenzschiene (grün) deutlich abheben.

Dem Spektrum $f > 1 \text{ kHz}$ (Fahrflächenfehler) lassen sich vergleichbare Intensitäten zuordnen, die sich jedoch in den einzelnen Signalspitzen unterscheiden. Über die linke Schiene werden dabei deutlich stärkere Intensitäten um die 1,4 kHz (0,02 m) wahrgenommen. An der rechten Schiene werden hingegen Frequenzinhalte um die 5 kHz (0,01 m) stärker hervorgehoben. Die deutlich dominierenden Frequenzen von $f > 100 \text{ Hz}$ zeigen hier das Spektrum der Anregungsfrequenz, das sich aus den Systemeigenschaften der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler ergibt und den Einzelfehler in der Gleisgeometrie verursacht.

5.2.5 Zusammenfassung der Einzelfehleranalyse

Anhand der im Kapitel 5.1 analysierten Streckenabschnitte lassen sich über alle detektierten Einzelfehler erhöhte Frequenzinhalte von Fahrflächenfehlern ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) aufzeigen. Dabei wird deutlich, dass die Fahrflächenfehler je nach Mangel an der Schienenoberfläche variieren und sich der Zustand der Schiene über unterschiedliche Frequenzinhalte und Intensitäten darstellen lässt. Diese dominieren in der Regel über den Frequenzbereich von $1,4 \text{ kHz} < f < 1,8 \text{ kHz}$, der sich entsprechend einer Fahrzeuggeschwindigkeit (90 km/h) in eine Wellenlänge zwischen 14 mm (1,8 kHz) und 18 mm (1,4 kHz) auflösen lässt. Dabei deuten hohe Intensitäten auf eine Anregung der Schiene durch Riffeln, welche sich entsprechend der Tabelle 12 zuordnen lassen.

Ebenfalls wird über nahezu alle analysierten Frequenzbänder (Kapitel 5.2.1 bis 5.2.4) die Schwellenfachfrequenz detektiert. Diese lässt sich in der Regel zwischen $41 \text{ Hz} < f < 45 \text{ Hz}$ verorten ($v = 90 \text{ km/h}$) und einer Wellenlänge von 0,61 m (41 Hz) bis 0,56 m (45 Hz) zuordnen. Über die Schwellenfachfrequenz lassen sich auch Unterschwingungen lokalisieren. Diese folgen der doppelten Frequenz, die sich jedoch entsprechend der gemittelten Frequenzinhalte nicht immer eindeutig darstellen lassen. Dieses Verhalten lässt sich vor allem über das Spektrum der Referenzschiene (Regeloberbau) wahrnehmen. Geometrische Veränderungen an der Schiene werden dem Frequenzverhalten der Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) zugeordnet. Diese werden vor allem im Bereich von Herzstücken (Weiche) oder Schienenverbindungen (z. B. Isolierstöße) lokalisiert. Mit der Anregung der Schiene durch einen Isolierstoß werden über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten deutlich stärkere Intensitäten wahrgenommen als gegenüber der Schwellenfachfrequenz. Aus dem Frequenzverhalten von 80 Hz (90 km/h) lässt sich demnach eine Wellenlänge von 0,31 m berechnen, welche einerseits die Schwingfrequenz der Schienenenden zeigt und andererseits eine Verortung der

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Schienenverbindung innerhalb des Schwellenfachs (0,60 m) erlaubt. Darüber hinaus muss das Frequenzband am Isolierstoß eine hochfrequente Anregung aufweisen, die der Zwischenlage zugeordnet wird. Die Interpretation eines mangelhaften Isolierstoßes wird daher über die Systemeigenschaften der Fahrbahnkomponenten sowie der Fahrflächenfehler bestimmt, die sich auf die Gleislage auswirkt.

Mit der Anregung der Schiene durch Fehler aus der Schienenoberfläche und den Fahrbahnkomponenten kommt es zu Einzelfehlern in der Gleisgeometrie. Diese lassen sich vor allem über das Dreipunktsignal bewerten. Die Signalverarbeitung des DPS lässt jedoch nur eine Bewertung der Gleislage ($\lambda > 3,00$ m) zu. Diese lassen sich ebenfalls über das Frequenzverhalten der ALB darstellen. Demnach können Frequenzinhalte mit $f < 8$ Hz (3,00 m) über beide Signalformen wahrgenommen werden. Die Intensität des Gleislagefehlers (Frequenzbereich) ist dabei abhängig vom berechneten Übereinstimmungsgrad der Wavelet-Transformation. Im Frequenzbereich der Gleislage fällt dieser jedoch in der Regel eher gering aus. Daher können geringe Wavelet-Koeffizienten auch zu hohen Amplituden im Dreipunktsignal der Gleislage führen.

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Die Einzelfehlercharakterisierung erfolgt ausschließlich für Streckenabschnitte, in denen eine Überschreitung der Schwellenwerte nach dem SR-Verfahren (Kapitel 3.5) in Verbindung mit dem Dreipunktsignal analysiert wurden. Jedoch lassen sich auch Streckenabschnitte ohne erkennbaren Einzelfehler über das Frequenzverhalten des ALB einem bestimmten Anlagentyp zuordnen. Im Folgenden werden daher die im Kapitel 5.1 beschriebenen Streckenabschnitte nach ähnlichen Fahrbahneigenschaften unterteilt und das Frequenzverhalten des jeweiligen Anlagentyps analysiert.

5.3.1 Frequenzmerkmale an Weichen

Das Frequenzverhalten einer Weiche wurde bereits am Beispiel einer Weichenstraße (Kapitel 4.2.4) erläutert. Dabei wurden Spektren hervorgehoben, die sich dem Anlagenzustand und der jeweiligen Befahrungssituation zuordnen lassen. Um die wesentlichen Frequenzmerkmale näher zu bestimmen und die Gemeinsamkeit zu den bereits analysierten Weichenspektren aufzuzeigen, werden im Folgenden weitere Anlagen bewertet. Über die im Kapitel 5.1 befahrenen Streckenabschnitte lassen sich acht Weichen verorten. Diese werden der Bauart Einfach (WE), Innenbogen- (IBW) und Außenbogenweiche (ABW) zugeordnet. Entsprechend dem Weichentyp werden die geometrischen Eigenschaften (Länge, Radius etc.) bestimmt, welche sich auf die Befahrung sowie die Interpretation der Ergebnisse auswirken. In der Tabelle 17 werden daher die wichtigsten Merkmale der analysierten Weichen zusammengefasst.

Tabelle 17: Konstruktionsmerkmale der analysierten Weichen

QS	Anlage	Kilometer	Störstelle	Weichentyp	Befahrung	Herzstück
1.	24W2	13,231 km	nein	ABW 60-500-1:12	stumpf	links
2.	24W3	13,298 km	nein	IBW 60-300-1:9	spitz	rechts
3.	24W6	13,508 km	ja	ABW 60-760-1:14	spitz	links
4.	24W21	14,497 km	nein	ABW 60-760-1:14	stumpf	links
5.	24W22	14,597 km	nein	IBW 60-500-1:12	stumpf	rechts
6.	24W23	14,603 km	nein	ABW 60-500-1:12	spitz	links
7.	24W216	19,647 km	nein	EW 60-760-1:14	spitz	links
8.	24W215	19,855 km	nein	EW 60-300-1:9	stumpf	links

5 Anwendung der entwickelten Methode

Die Analyse der Weichenspektren bezieht sich auf den jeweiligen Herzstückbereich der Weiche. Dabei wird ein gemittelttes Frequenzverhalten (Wavelet-Koeffizienten) über eine Länge von 5 m bewertet. Entsprechend der Befahrungssituation werden die Weichen nach spitzer oder stumpfer Überfahrt unterteilt und das Frequenzverhalten aus der direkten (Achslager Herzstück) oder indirekten (Achslager Fahrschiene) Messung beurteilt.

5.3.1.1 Weichenbefahrung stumpf

Die Abb. 72 zeigt das Frequenzverhalten des am linken Achslager gemessenen Beschleunigungssignals. Dabei lassen sich drei Herzstücke direkt und ein Herzstück aus der indirekten Messung bewerten.

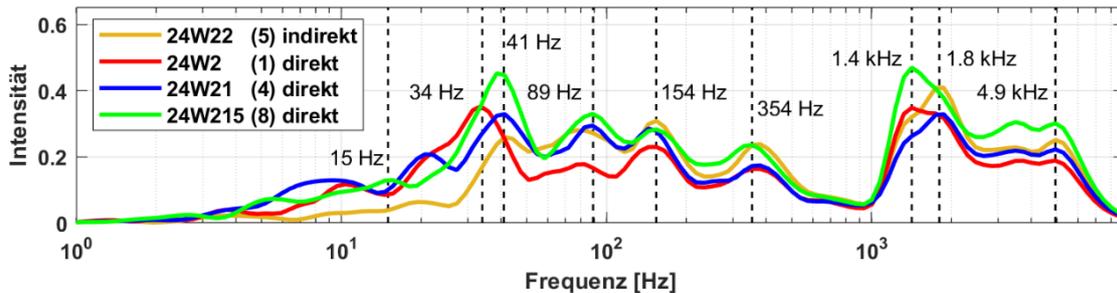


Abb. 72: Frequenzverhalten am linken Achslager bei stumpfer Befahrung des Herzstücks (Weiche)

In der Abb. 72 lassen sich die größten Frequenzunterschiede im Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) verorten. Die schwächsten Signalspitzen werden hier im Zusammenhang mit dem indirekt betroffenen Achslager der Weiche 24W22 (braun) wahrgenommen. Deutlich stärker ausgeprägte Frequenzinhalte werden an den direkt betroffenen Achslagern bestimmt. Die Weiche 24W2 (rot) zeigt hier Signalspitzen bei 3,5 Hz (7,14 m) und 10 Hz (2,50 m). An der Weiche 24W21 (blau) werden außerdem Spektren bei 9 Hz (2,78 m) und 20 Hz (1,25 m) hervorgehoben. Die Weiche 24W215 (grün) zeigt wiederum Anteile bei 5 Hz (5,00 m) und 15 Hz (1,67 m). Über die dominierenden Frequenzen lassen sich hier unterschiedlich ausgeprägte Gleislageveränderungen aufzeigen, die jedoch entsprechend der Tabelle 17 keinem Einzelfehler im Dreipunktsignal zugeordnet werden können.

Ein sehr ausgeprägtes Frequenzverhalten wird um das Spektrum von 41 Hz (0,61 m) dargestellt, welches der Schwellenfachfrequenz zugeordnet wird. Abweichungen lassen sich hier ausschließlich über das Spektrum der Weiche 24W2 lokalisieren, das eine dominierende Frequenz von 34 Hz (0,74 m) zeigt. Im Bereich der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) lassen sich hingegen sehr ähnliche Signalspitzen erkennen, die jedoch in ihrer Intensität variieren. Diese werden bei 89 Hz (0,28 m), 154 Hz (0,16 m) und 354 Hz (0,07 m) hervorgehoben.

Im Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) werden dominierende Frequenzen bei 1,4 kHz (0,02 m) und 1,8 kHz (0,01 m) wahrgenommen, die hier eine ähnliche Intensität wie die Schwellenfachfrequenz aufweisen. Dabei lässt sich der Weiche 24W22 und 24W21 ein Spektrum von 1,8 kHz und der Weiche 24W2 sowie 24W215 ein identisches Frequenzverhalten bei 1,4 kHz zuordnen. Ebenfalls wird ein vergleichbares Frequenzverhalten zwischen $2,5 \text{ kHz} < f < 5,0 \text{ kHz}$ dargestellt, das auf Riffeln in der Schienenoberfläche (Tabelle 12) deutet. Das visuell wahrgenommene Frequenzverhalten der Abb. 72 wird dabei durch den jeweils berechneten Übereinstimmungsgrad der Tabelle 18 bestätigt.

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Tabelle 18: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 72 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	W22	W2	93,5	62,3	88,0	99,7	95,7	87,8
2	W22	W21	88,3	14,1	91,1	99,3	99,0	78,4
3	W22	W215	90,8	1,0	88,4	99,8	93,9	74,8
4	W2	W21	89,4	51,3	75,9	99,4	93,0	81,8
5	W2	W215	93,8	66,8	62,7	99,8	93,5	84,1
6	W21	W215	88,5	97,6	94,5	99,4	93,8	94,8

Das Ergebnis der Tabelle 18 zeigt über alle analysierten Frequenzbandkombinationen außer an der 2 und 3 sehr gute Übereinstimmungsergebnisse. Unterschiede werden ausschließlich im Überlappungsbereich ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten lokalisiert. Diese lassen sich ebenfalls über die Abb. 72 wahrnehmen. Die Frequenzbandkombination 6 zeigt in diesem Zusammenhang den höchsten Übereinstimmungsgrad der Tabelle 18, welcher sich deutlich auf das Gesamtergebnis von 94,8 % auswirkt. Sehr hohe Übereinstimmungen werden vor allem im Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) sowie im Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) verortet. Der hohe Übereinstimmungsgrad lässt dabei vor allem auf einen sehr ähnlichen Anlagenzustand schließen.

Das Frequenzverhalten am rechten Achslager zeigt ebenfalls sehr ähnliche Frequenzinhalte im Bereich der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler. Dabei werden anhand der Abb. 73 deutlich intensivere Frequenzinhalte auf der Seite des Herzstücks (direkt) dargestellt als über das Achslagerbeschleunigungssignal an der Fahrschiene (indirekt) wahrgenommen werden.

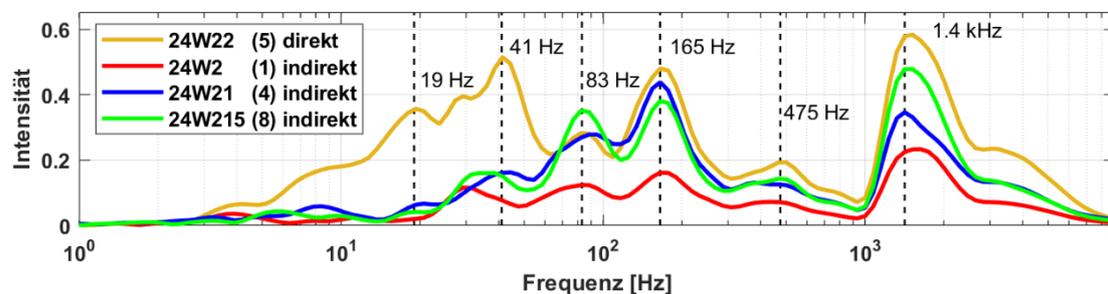


Abb. 73: Frequenzverhalten am rechten Achslager bei stumpfer Befahrung des Herzstücks (Weiche)

Die größten Abweichungen zwischen indirekter und direkter Befahrung des Herzstücks lassen sich wie an der linken Schiene im Frequenzbereich von $3 \text{ Hz} < f < 60 \text{ Hz}$ wahrnehmen. Dabei wird ein identisches Signalverhalten zwischen der Abb. 72 und Abb. 73 beobachtet, dass der direkten und indirekten Messung des Herzstücks zugeordnet wird. Demnach lassen sich über das Frequenzverhalten der Weiche 24W22 (braun) die stärksten Signalspitzen darstellen. Diese wird im Frequenzbereich der Gleislage bei 19 Hz (1,32 m) hervorgehoben, die an der Weiche 24W21 (blau) sowie 24W215 (grün) nur sehr schwach und an der Weiche 24W2 (rot) gar nicht wahrgenommen wird. Außerdem zeigt sich bei 4 Hz (6,25 m) eine Signalspitze, die sich mit der Weiche 24W2 und 24W22 überlagert. Darüber hinaus wird an der 24W21 ein Spektrum von 10 Hz (2,50 m) und an der Weiche 24W215 eine Frequenz von 6 Hz (4,17 m) verortet. Durch die dominierenden Frequenzen und verschiedenen Intensitäten lässt sich eine unterschiedliche Gleisgeometrie darstellen, die sich jedoch nicht mit dem DPS bewerten lässt.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Im Spektrum zwischen $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ wird die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz verortet, welche sich über die Weiche 24W22 deutlich stärker wahrnehmen lässt als über das Spektrum der Weiche 24W21 und 24W215. Die geringste Intensität wird hier über die Weiche 24W2 dargestellt und bei 30 Hz (0,83 m) hervorgehoben. Dabei wird ebenfalls ein vergleichbares Spektrum an der Weiche 24W215 bestimmt. Annähernd ähnliche Signalspitzen werden hingegen bei einer Frequenz von 83 Hz (0,30 m) und 165 Hz (0,15 m) beobachtet, die den Fahrbahnkomponenten zugeordnet werden und je nach Anlagenqualität der Weiche auf eine ruckärmere Überfahrt im Herzstückbereich deuten.

Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) lassen sich über das Spektrum von 475 Hz (0,05 m) und 1,4 kHz (0,02 m) wahrnehmen. Diese werden den Eigenschaften von Schlupfwellen und Riffeln zugeordnet (Tabelle 12). Die Beurteilung der absoluten Übereinstimmung und damit die Vergleichbarkeit von Fehlern zeigt sich hingegen über das Ergebnis der Tabelle 19.

Tabelle 19: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 73 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	W22	W2	61,2	43,7	95,2	98,4	99,3	79,6
2	W22	W21	84,9	55,2	95,8	98,4	99,4	86,7
3	W22	W215	73,0	38,1	85,2	99,7	98,9	79,0
4	W2	W21	70,5	47,4	95,6	99,7	98,5	82,3
5	W2	W215	85,1	78,5	95,0	99,1	99,5	91,5
6	W21	W215	85,9	83,8	92,7	98,9	99,1	92,1

Mit dem Ergebnis der Tabelle 19 werden erneut die größten Unterschiede im Frequenzbereich zwischen $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ dargestellt. Dabei werden über die Frequenzbandkombination 2 und 3 deutlich höhere Übereinstimmungsmerkmale am rechten als am linken Achslager wahrgenommen. Wie in der Tabelle 18 lässt sich auch in der Tabelle 19 das höchste Übereinstimmungsergebnis in Verbindung mit der Frequenzbandkombination 6 verorten, welches hier ebenfalls auf einen sehr ähnlichen Anlagenzustand zwischen den einzelnen Weichen deutet.

5.3.1.2 Weichenbefahrung spitz

Wie bei der stumpfen Überfahrt lassen sich deutliche Frequenzmerkmale einer Weiche durch die spitze Befahrung wahrnehmen. Es werden erneut vier Weichenformen analysiert, die sich entsprechend der Tabelle 17 geometrisch einordnen lassen. Die Abb. 74 zeigt das Frequenzverhalten der am linken Achslager gemessenen Beschleunigungen. Dabei werden drei Herzstücke direkt und ein Herzstück indirekt gekreuzt.

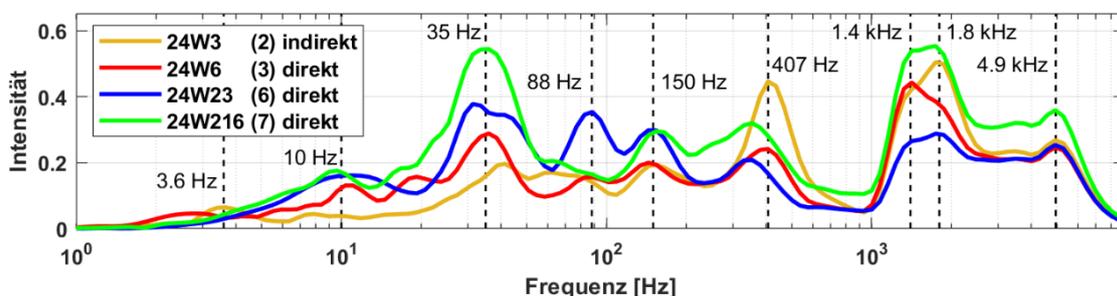


Abb. 74: Frequenzverhalten am linken Achslager bei spitzer Befahrung des Herzstücks (Weiche)

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Die größten Signalunterschiede werden generell zwischen dem indirekt und dem jeweils direkt befahrenen Herzstücken wahrgenommen. Im Bereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lässt sich dies über die analysierte Achslagerbeschleunigungen darstellen. Am Achslager mit dem direkten Kontakt zum Herzstück werden deutlich stärkere Wavelet-Koeffizienten bestimmt, die sich bei 10 Hz (2,50 m) und 12 Hz (2,08 m) verorten lassen. Am indirekten Achslager der Weiche 24W3 (braun) wird hingegen eine Frequenz von 3,6 Hz (6,94 m) hervorgehoben, welche hier eine ähnliche Intensität wie die der Weiche 24W6 (rot) bei 3 Hz (8,33 m) zeigt. In Verbindung mit dem Dreipunktsignal lassen sich an diesen beiden Weichen Einzelfehler erkennen, die bereits im Kapitel 5.2.1.2 und Kapitel 5.2.1.3 erläutert wurden.

Im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten wird am indirekten Achslager der Weiche 24W3 die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) dargestellt. In Verbindung mit den direkt gemessenen Achslagerbeschleunigungen werden wiederum Spektren von 31 Hz (0,81 m) und 35 Hz (0,71 m) lokalisiert, die hier vor allem auf einen unterschiedlichen Anlagenzustand deuten. Dieser zeigt sich hauptsächlich über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$), welches durch die Signalspitzen von 88 Hz (0,28 m) und 150 Hz (0,17 m) bestimmt wird.

Annähernd ähnliche Signaleigenschaften werden im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) hervorgehoben, die sich bei 407 Hz (0,06 m), 1,4 kHz (0,02 m), 1,8 kHz (0,01 m) sowie 4,9 kHz (0,01 m) zeigen. In Verbindung mit der Tabelle 12 lassen sich diese Schlupfwellen und Riffeln auf der Schienenoberfläche zuordnen. Um jedoch eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Frequenzbändern der Abb. 74 aufzuzeigen, wird in der Tabelle 20 der korrelierte Übereinstimmungsgrad dargestellt.

Tabelle 20: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 74 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	W3	W6	76,0	10,8	88,7	99,5	96,1	74,2
2	W3	W23	76,8	1,6	10,8	94,7	91,2	55,0
3	W3	W216	83,8	11,0	70,2	98,6	98,3	72,4
4	W6	W23	89,7	89,8	19,4	97,2	89,0	77,0
5	W6	W216	93,5	96,3	64,2	99,7	98,4	90,4
6	W23	W216	95,1	86,7	40,7	98,6	94,5	83,1

Mit dem Ergebnis der Tabelle 20 lassen sich die geringsten Übereinstimmungsmerkmale im Frequenzbereich zwischen $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ verorten. Entsprechend der Abb. 74 werden hier auch die stärksten Signalunterschiede wahrgenommen. Diese werden vor allem in Verbindung mit dem Spektrum der indirekt gemessenen Weiche 24W3 dargestellt. Die geringste Ähnlichkeit wird zwischen der Weiche 24W3 und Weiche 24W23 bestimmt. Das Korrelationsergebnis zeigt eine Vergleichbarkeit von 1,6 %, das sich auf das Gesamtergebnis dieser Signalpaarung auswirkt und mit 55,0 % bewertet wird. Außerdem lässt sich nur eine sehr schwache Ähnlichkeit über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) aufzeigen. Dieses wird in Verbindung mit der Weiche 24W23 hervorgehoben. Durch die unterschiedlichen Spektren der Fahrbahnkomponenten lassen sich verschiedene Anlagenzustände darstellen, die sich je nach Frequenzverhalten und Intensität auf die Gleislage auswirken und zu Fehlern in der Gleisgeometrie führen. Signifikante Gemeinsamkeiten werden vor allem im Spektrum der Gleislage und der Fahrflächenfehler dargestellt, die auf eine sehr ähnlich ausgeprägte Störstelle im Gleis und Eigenschaft der Schienenoberfläche deuten.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Die Abb. 75 zeigt das Frequenzverhalten der am rechten Achslager gemessenen Beschleunigungen bei spitzer Befahrung. Dabei lassen sich sehr ähnliche Frequenzinhalte wie bei der stumpfen Befahrung aufzeigen.

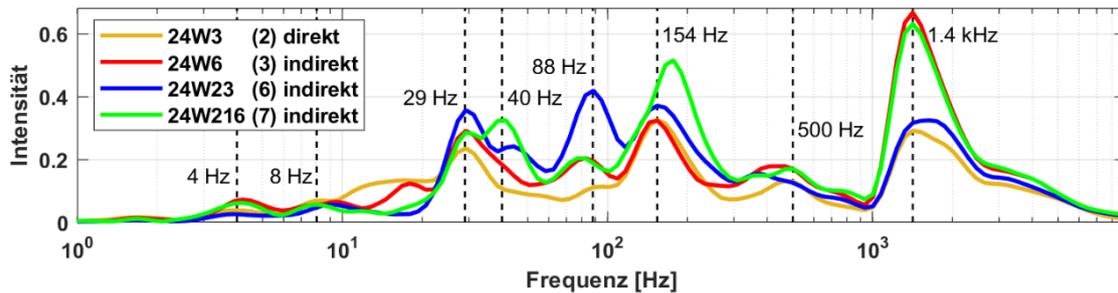


Abb. 75: Frequenzverhalten am rechten Achslager bei spitzer Befahrung des Herzstücks (Weiche)

In der Abb. 75 wird das Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) durch Frequenzen von 4 Hz (6,25 m) und 8 Hz (3,13 m) bestimmt. Diese werden an allen Weichen anhand verschiedener Intensitäten hervorgehoben. Außerdem lassen sich Signalspitzen bei 18 Hz (1,39 m) verorten, die sich nur an der Weiche 24W3 (braun) und der Weiche 24W6 (rot) durch unterschiedlich ausgeprägte Signalformen zeigen. Darüber hinaus werden an allen Frequenzbändern Extremstellen bei 29 Hz (0,86 m) lokalisiert. Entsprechend der analysierten Spektren und der jeweils erfassten Intensität lässt sich die Qualität der Gleisgeometrie beurteilen, die sich jedoch nur an der Weiche 24W3 und Weiche 24W6 als Einzelfehler im DPS wahrnehmen lässt. Für die Interpretation der Gleislage spielt vor allem der Zeitpunkt der Messung als auch die vorab durchgeführte Instandhaltung eine wesentliche Rolle, um die Fehlerursache der mangelhaften Gleisgeometrie zu bestimmen.

Unterschiedliche Amplitudenverläufe lassen sich auch im Spektrum von $30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$ verorten. Die Schwellenfachfrequenz von 40 Hz (0,63 m) wird dabei nur im Spektrum der Weiche 24W216 bestimmt. Vergleichbare Inhalte werden vor allem ab einer Frequenz von $f > 80 \text{ Hz}$ dargestellt. Im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) lassen sich diese bei 88 Hz (0,16 m) und um die 154 Hz (0,16 m) verorten.

Im Frequenzbereich von $f > 400 \text{ Hz}$ werden sehr identische Signaleigenschaften aufgezeigt. Ähnliche Amplituden lassen sich hier über eine Frequenz von 500 Hz (0,05 m) wahrnehmen. Unterschiedliche Intensitäten werden hingegen über das dominierende Spektrum von 1,4 kHz (0,02 m) hervorgehoben. Als vergleichbar werden die Signalspitzen der Weiche 24W6 und der Weiche 24W216 interpretiert. Ebenso wird eine sehr ähnliche Signalstärke zwischen der Weiche 24W3 und der Weiche 24W23 wahrgenommen. Das Ergebnis der Tabelle 21 zeigt den korrelierten Übereinstimmungsgrad der Frequenzbänder.

Tabelle 21: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 75 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	W3	W6	90,7	87,0	90,5	97,3	96,6	92,4
2	W3	W23	79,3	59,5	57,8	94,5	99,5	78,1
3	W3	W216	80,3	56,4	90,5	99,3	97,1	84,7
4	W6	W23	91,7	80,0	79,6	99,3	94,3	87,2
5	W6	W216	95,2	60,1	71,1	97,1	100,0	84,7
6	W23	W216	97,6	48,2	48,1	94,4	94,9	76,6

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Entsprechend der visuellen Interpretation der Abb. 75 lassen sich die geringsten Korrelationskoeffizienten der Tabelle 21 im Frequenzbereich zwischen $30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ aufzeigen. Gegenüber dem rechten Achslager werden hier deutlich höhere Übereinstimmungen erzielt, was sich vor allem in einem signifikanten Mittelwert der Frequenzbandkombinationen zeigt. Die geringste Ähnlichkeit wird in Verbindung mit der Frequenzbandkombination 6 verortet, die mit einem Übereinstimmungsergebnis von 76,6 % bewertet wird und dennoch einen signifikanten Übereinstimmungsgrad darstellt. Bestimmt wird dieses Ergebnis jedoch durch die Übereinstimmungsmerkmale im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie denen im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zur Gleislage, die nur eine Vergleichbarkeit von um die 50,0 % zeigen. Der höchste Übereinstimmungsgrad wird an der Frequenzbandkombination 1 lokalisiert. Diese Signalpaarung zeigt die bereits im Kapitel 5.2.1.2 und Kapitel 5.2.1.3 analysierten Einzelfehler, welche in der Tabelle 21 eine Ähnlichkeit von 92,4 % aufweisen und damit eine vergleichbare Störstelle darstellen.

Die Bewertung von Weichen zeigt, dass sehr unterschiedliche Anlagenzustände analysiert werden können, die auf verschiedene Fehlerursachen deuten. Jedoch lassen sich auch sehr ähnliche Eigenschaften im Bereich der Herzstücke verorten, was eine qualitative Bewertung der Anlagen erlaubt. Unterschiede könnten hier vor allem in Verbindung mit der direkten und indirekten Messung von Achslagerbeschleunigungen am Herzstück aufgezeigt werden. Ebenso lassen sich keine Gemeinsamkeiten zwischen der stumpfen und spitzen Befahrung einer Weiche aufzeigen. Letztendlich zeigt sich jedoch über das visuelle Ergebnis und dem korrelierten Übereinstimmungsgrad, dass die Einschätzung von Fehlerursachen am Herzstück über das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen eine zuverlässige Charakterisierung von Einzelfehlern ermöglicht.

5.3.2 Frequenzmerkmale von Gleislageveränderungen an Bahnübergängen

Die im Kapitel 5.2 analysierten Streckenabschnitte zeigen, dass sich Einzelfehler ebenfalls im Umfeld eines Bahnübergangs (BÜ) verorten lassen. Diese Anlage stellt eine höhengleiche Kreuzung zwischen Straße und Gleis dar, an dem sich der Regelquerschnitt des Eisenbahnoberbaus verändert. Die Fahrbahn des Eisenbahnoberbaus wird dabei nicht nur durch die straßenseitige Ausführung des BÜ beeinträchtigt. Vielmehr können hier auch geometrische Veränderungen an oder auf der Schiene einen negativen Einfluss auf die Gleislage haben. Beeinflusst wird das Schienenprofil bspw. durch Achszählpunkte. Diese dienen der Gleisfreimeldung und können wie im Kapitel 4.1.2.1 erläutert als Isolierstoß ausgeführt sein. Die Tabelle 22 zeigt die wesentlichen Konstruktionsmerkmale der analysierten Bahnübergänge.

Tabelle 22: Trassierungs- und Fahrbahnmerkmale der analysierten Bahnübergänge

QS	Anlage	Störstelle	Trassierung	Isolierstoß
1.	BÜ 32,045 km	nein	Gerade	32,051 km
2.	BÜ 32,722 km	ja	Gerade	32,730 km
3.	BÜ 33,480 km	nein	Gerade	33,486 km
4.	BÜ 34,350 km	nein	Linksbogen	34,355 km
5.	BÜ 68,320 km	ja	Rechtsbogen	68,329 km

Gleislageveränderungen an Bahnübergängen können z. B. durch defekte Isolierstöße verursacht werden. Diese lassen sich eindeutig der Örtlichkeit und dem Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals zuordnen. Die analysierten Querschnitte zeigen daher den unmittelbaren Einflussbereich der Achszählpunkte und der jeweiligen Straßenausführung. Mit der Abb. 76 werden die am linken Achslager analysierten Frequenzinhalte dargestellt.

5 Anwendung der entwickelten Methode

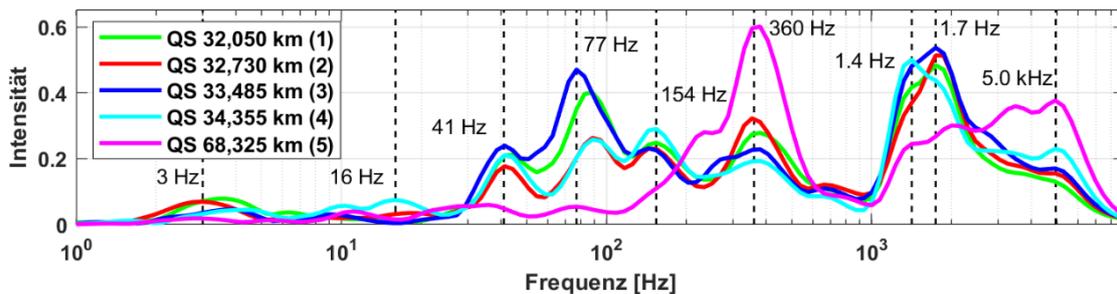


Abb. 76: Frequenzverhalten am linken Achslager (Bahnübergänge)

Mit der Darstellung der Frequenzinhalte zeigt sich, dass vor allem über den QS5 (magenta) ein abweichendes Frequenzverhalten wahrgenommen wird. Dabei kann diesem Spektrum eine Störstelle mit Einzelfehler zugeordnet werden, die bereits im Kapitel 5.2.4.3 bewertet wurde. Obwohl über den Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) nur sehr schwache Intensitäten dargestellt werden, lassen sich deutliche Signalspitzen bei 3 Hz (8,33 m) und 11 Hz (2,27 m) hervorheben.

Unterschiedlich starke Intensitäten werden vor allem im Frequenzbereich zwischen $30 \text{ Hz} < f < 600 \text{ Hz}$ beobachtet. Jedoch lassen sich hier sehr ähnliche Spektren zwischen dem QS1 (grün), QS2 (rot), QS3 (blau) sowie dem QS4 (cyan) lokalisieren. Diese werden bei 41 Hz (0,61 m), 77 Hz (0,32 m) und 154 Hz (0,16 m) hervorgehoben. Am QS5 (magenta) werden hingegen nur geringere Übereinstimmungsmerkmale aufgezeigt, die sich auf eine Frequenz von $f < 180 \text{ Hz}$ beziehen. Im Bereich zwischen $180 \text{ Hz} < f < 600 \text{ Hz}$ wechselt die Intensität. Die stärksten Signalspitzen werden hier am QS5 (68,325 km) verortet. Überlagerungen lassen sich dabei zwischen allen Frequenzbändern um die 360 Hz (0,07 m) darstellen.

Ein ähnliches Frequenzverhalten zeigt sich über das Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$). Identische Signalspitzen lassen sich hier am QS1, QS2 und QS3 wahrnehmen, die einer Frequenz von 1,7 kHz (0,01 m) folgen. Der QS4 zeigt hingegen ein dominierendes Spektrum von 1,4 kHz (0,02 m), welches sich leicht vom QS1 bis zum QS3 abhebt. Deutliche Abweichungen werden erneut nur über das Spektrum des QS5 beobachtet. Hier werden die geringsten Intensitäten bei 1,4 kHz und 1,7 kHz dargestellt. Die dominierenden Frequenzinhalte werden hier bei 3,5 kHz und 5,0 kHz verortet. Die visuelle Analyse der Frequenzbänder wird dabei durch das Korrelationsergebnis der Tabelle 23 noch deutlicher spezifiziert.

Tabelle 23: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Bahnübergängen der in Abb. 76 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	32,050	32,730	76,6	83,4	70,7	95,0	98,7	84,9
2	32,050	33,485	86,3	93,7	92,8	96,3	99,5	93,7
3	32,050	34,355	13,4	63,8	64,6	98,8	94,8	67,1
4	32,050	68,325	10,2	9,1	29,0	98,9	33,5	34,3
5	32,730	33,485	68,6	66,1	54,2	99,5	98,5	77,4
6	32,730	34,355	27,9	93,5	45,7	96,0	91,0	70,8
7	32,730	68,325	29,1	21,1	33,7	97,2	40,5	44,3
8	33,485	34,355	26,9	38,5	52,9	98,0	95,4	62,3
9	33,485	68,325	34,8	12,9	38,3	97,2	38,5	44,3
10	34,355	68,325	49,1	9,5	54,8	97,1	44,6	51,0

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Wie in der Abb. 76 zeigen sich in der Tabelle 23 die geringsten Übereinstimmungsmerkmale in Verbindung mit dem QS5. Entsprechend der Signalanalyse wird der Einfluss aus dem QS5 in den Frequenzbandkombinationen 4, 7, 9 und 10 lokalisiert. Das Ergebnis der Frequenzbandanalyse zeigt hier den jeweils schwächsten Mittelwert. Bestimmt wird das Ergebnis durch das Spektrum von $1 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ sowie durch das Frequenzverhalten zwischen $1000 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$. Über dieses werden nur sehr geringe Ähnlichkeiten aufgezeigt. Das beste Übereinstimmungsergebnis wird hier in Verbindung mit der Frequenzbandkombination 1 und 2 erzielt. Die Signala Paarung 2 zeigt den bereits im Kapitel 5.2.3 charakterisierten (BÜ 32,722 km) Einzelfehler. An diesem wird ein mangelhafter Isolierstoß verortet, der sich im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten des QS2 zeigt. Sehr ähnliche Signaleigenschaften können ebenfalls zwischen dem QS1, QS2 und QS3 aufgezeigt werden, die hier auf eine identische Fehlerursache und Ausprägung der Gleislage deuten.

Das dominierende Frequenzverhalten am QS5 lässt sich ebenfalls sehr deutlich über das Spektrum der am rechten Achslager analysierten Frequenzbänder wahrnehmen. Die Abb. 77 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung.

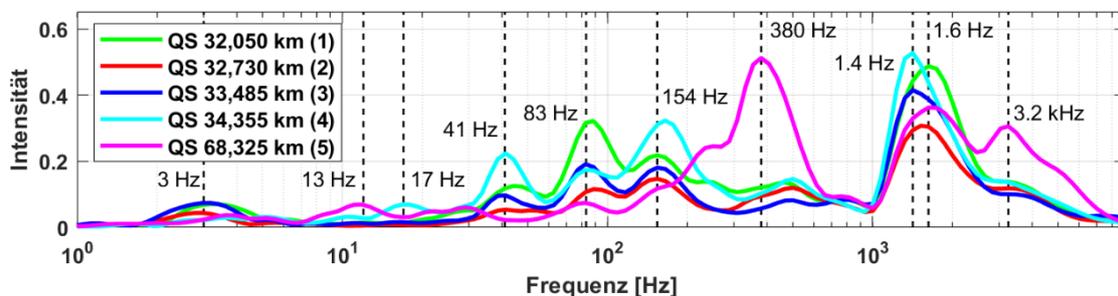


Abb. 77: Frequenzverhalten am rechten Achslager (Bahnübergänge)

Über die in der Abb. 77 dargestellten Frequenzbänder lassen sich im Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) auffällige Signalkurven bei 3 Hz (8,33 m), 13 Hz (1,92 m) und 17 Hz (1,47 m) hervorheben. Ähnliche Intensitäten werden jedoch nur über das Spektrum von 3 Hz verortet. In Verbindung mit dem Dreipunktsignal lassen sich hier über den QS2 (rot) und den QS5 (magenta) Einzelfehler zuordnen.

Identische Frequenzanteile werden ebenfalls zwischen $30 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ lokalisiert, die jedoch in ihrer Intensität variieren. Einerseits wird hier die Schwellenfachfrequenz bei 41 Hz (0,61 m) dargestellt und andererseits Signalspitzen im Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) hervorgehoben, die sich bei 83 Hz (0,30 m) und 154 Hz (0,16 m) verorten lassen. Ein unterschiedliches Signalverhalten wird hingegen über das Frequenzband des QS5 wahrgenommen, das sich vor allem bei 380 Hz (0,07 m) von den anderen Frequenzbändern abhebt. Aufgrund der erhöhten Amplituden im Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten lässt sich die Fehlerursache der mangelhaften Gleislage einer defekten Schienenverbindung bzw. dem im Kapitel 5.2.4.3 analysierten Isolierstoß zuordnen.

Im Frequenzbereich der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) werden erneut die stärksten Frequenzinhalte zwischen 1,4 kHz (0,02 m) und 1,6 kHz (0,01 m) mit jedoch unterschiedlichen Intensitäten lokalisiert. Unterschiede werden erneut am QS5 wahrgenommen, der neben dem Spektrum von 1,6 kHz ein dominierendes Frequenzverhalten bei 3,2 kHz (0,01 m) aufzeigt. Die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Frequenzbändern der Abb. 77 wird hier durch das Korrelationsergebnis der Tabelle 24 bestimmt.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Tabelle 24: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Bahnübergängen der in Abb. 77 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	32,050	32,730	78,4	94,5	64,0	88,6	98,9	84,9
2	32,050	33,485	84,8	94,9	86,7	11,3	98,1	75,2
3	32,050	34,355	24,1	28,3	38,5	88,2	94,6	54,7
4	32,050	68,325	17,4	51,2	72,0	92,9	82,2	63,1
5	32,730	33,485	95,3	92,9	88,0	2,3	97,7	75,2
6	32,730	34,355	7,6	40,5	79,3	99,7	96,0	64,6
7	32,730	68,325	17,0	28,1	50,8	76,6	86,5	51,8
8	33,485	34,355	2,7	48,2	77,9	1,1	98,6	45,7
9	33,485	68,325	9,2	46,0	75,7	19,5	75,2	45,1
10	34,355	68,325	66,1	36,1	57,2	75,6	74,6	61,9

Gegenüber der Signalanalyse am linken Achslager zeigen sich am rechten eher geringere Übereinstimmungsmerkmale. Diese werden vor allem im Bereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) sowie im Spektrum der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 1000 \text{ Hz}$) verortet. Entsprechend der Tabelle 24 wird der höchste Übereinstimmungsgrad in Verbindung mit der Frequenzbandkombination 1, 2 und 5 aufgezeigt. Anhand dieser Signalpaarungen wird eine Vergleichbarkeit zwischen dem QS1, QS2 und dem QS3 bestimmt. Dabei lassen sich über den Frequenzbereich der Gleislage teilweise sehr ähnliche Übereinstimmungsergebnisse erzielen, die hier auf eine identische Gleisgeometrie deuten. Die Frequenzbandkombination 1 zeigt in diesem Zusammenhang die größte Ähnlichkeit zwischen dem QS1 und dem QS2, die mit einer Signifikanz von 84,9 % bewertet wird. Deutliche Unterschiede werden hingegen im Spektrum der Fahrflächenfehler dargestellt, die sich ausschließlich auf den Frequenzbereich von $400 \text{ Hz} < f < 1000 \text{ Hz}$ beziehen. Ein sehr schwaches Übereinstimmungsverhältnis wird hier in Verbindung mit den Frequenzbandkombinationen 2, 5, 8 und 9 aufgezeigt.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse aus der Abb. 76 mit denen der Abb. 77 lassen sich über das Spektrum der analysierten Bahnübergänge (linken und rechten ALB) deutliche Frequenzmerkmale erkennen. Eindeutige Überlagerungen werden vor allem in Verbindung mit der Schwellenfachfrequenz aufgezeigt, die in der Regel über das Spektrum von 41 Hz dargestellt wird. Ein ebenfalls sehr ausgeprägtes Übereinstimmungsverhältnis lässt sich an den Isolierstößen der Bahnübergänge wahrnehmen. Diese variieren zwischen $77 \text{ Hz} < f < 85 \text{ Hz}$ und werden hier einer Wellenlänge von ca. 0,30 m zugeordnet. Isolierstöße werden im Schwellenfach verbaut. Dadurch verändert sich die Geometrie der Schiene und es kommt an diesem Punkt zur Anregung der beiden Schienenenden. In der Regel wird ein fließender Übergang von einem Schienenende auf das andere forciert. Eine gute Anlagenqualität lässt sich daher durch eine anregungsarme Überlaufgeometrie darstellen. Durch einen Mangel kann dieser jedoch zu einer stoßartigen Anregung der Schiene führen, der sich über das Frequenzverhalten zeigt und damit eindeutig dem Isolierstoß zugeordnet wird. Der Isolierstoß lässt sich daher vor allem durch die unterschiedlichen Systemeigenschaften der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler identifizieren.

5.3.3 Beeinflussung der Gleislage durch Schienenfehler im Bereich der Signaltechnik

Die Sicherung von Zugfahrten durch Signaltechnik stellt eine der wichtigsten Anforderungen an den Bahnbetrieb dar. Je nach Signalisierung kommt es zum Halten, das sich im Bereich der Signaltechnik ebenfalls auf die Schienenoberfläche und die Gleislage auswirkt. Durch das

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

Bremsen und Anfahren wird ein erhöhter Verschleiß auf der Schienenoberfläche verursacht, der sich in Form von Materialverformung bzw. Abrieb zeigt und den Eisenbahnoberbau negativ beeinflusst. Aufgrund der Unebenheit auf der Schienenoberfläche kommt es bei nachfolgenden Zugfahrten zu einer erhöhten Anregung der Überlaufgeometrie zwischen Rad und Schiene, welche die Schiene in Schwingung versetzt und über die Zeit zu einer mangelhaften Gleislage führt.

Im Folgenden werden die Auswirkungen von Fahrflächenfehlern auf die Gleislage analysiert. Dafür werden erneut die im Kapitel 5.2 beschriebenen Streckenabschnitte ausgewertet. Es werden sieben Signalanlagen verortet, die sich nicht nur auf das Richtungsgleis (1) auswirken, sondern auch dem Gleiswechselbetrieb (GWB) dienen. Dabei kommt es zu Fahrten aus der Gegenrichtung (2) im Richtungsgleis. Je nach Wirkungsweise des jeweiligen Hauptsignals lassen sich daher Fehler vor oder hinter der Anlage lokalisieren. Die Tabelle 25 verknüpft daher die Örtlichkeit mit der Signalisierung der jeweiligen Anlage über den Streckenkilometer.

Tabelle 25: Fahrbahn- und Trassierungsmerkmale in Verbindung mit den analysierten Signalstandorten

QS	Kilometer	Bezeichnung	Störstelle	Richtung	Typ	Lage
1.	13,695 km	24P1	nein	2 (GWB)	Ausfahrtsignal	Bogen
2.	14,227 km	24N4	nein	1	Ausfahrtsignal	Bogen
3.	14,987 km	24FF	nein	2 (GWB)	Einfahrtsignal	Gerade
4.	20,120 km	2416	ja	2 (GWB)	Lichthauptsignal	Gerade
5.	31,960 km	26V35	nein	1	Lichtvorsignal	Gerade
6.	33,400 km	2835	nein	1	Lichthauptsignal	Gerade
7.	67,515 km	33V61	nein	1	Lichtvorsignal	Gerade

In der Abb. 78 wird das Frequenzverhalten der am linken Achslager analysierten Spektren dargestellt. Dabei lassen sich sehr ähnliche Signalstrukturen zwischen den einzelnen Frequenzbändern erkennen.

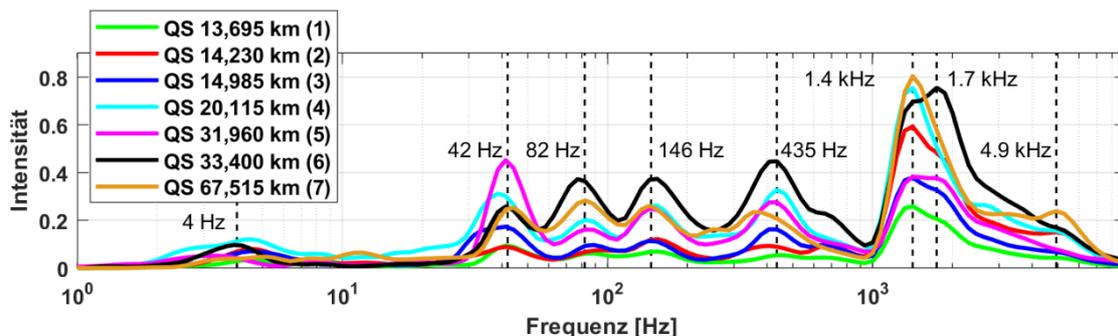


Abb. 78: Frequenzverhalten von Schienenfehlern im Bereich der Signaltechnik am linken Achslager

Im Frequenzbereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lassen sich über die Abb. 78 die stärksten Signalspitzen zwischen 3 Hz (8,33 m) und 5 Hz (5,00 m) darstellen. Dabei werden ähnliche Überlagerungen und Intensitäten zwischen allen Frequenzbändern wahrgenommen. Die stärksten Frequenzinhalte lassen sich in Verbindung mit dem QS4 (cyan) hervorheben. Der Querschnitt zeigt den bereits im Kapitel 5.2.2.3 identifizierten Einzelfehler, dem eine mangelhafte Gleislage aufgrund von hohlliegender Schwellen zugeordnet wurde.

Ein noch deutlicheres Übereinstimmungsverhältnis lässt sich über das Spektrum von $f > 30 \text{ Hz}$ erkennen. Diesem wird die Schwellenfachfrequenz von 41 Hz (0,61 m) zugeordnet. Außerdem

5 Anwendung der entwickelten Methode

können Frequenzinhalte aus dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) bei 82 Hz (0,31 m) und 146 Hz (0,17 m) hervorgehoben werden, welche jedoch in ihrer Amplitude variieren. Fallen die Intensitäten der Schwellenfachfrequenz in diesem Zusammenhang schwächer aus als die der Fahrbahnkomponenten, wird die Anregung der Schiene durch eine mangelhafte Schienenverbindung (z. B. Isolierstoß) verursacht, die den Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten dominiert. Lassen sich hingegen geringe Intensitäten wahrnehmen, werden diese als Unterschwingung der Schwellenfachfrequenz gedeutet, die hier als eine harmonische Schwingung interpretiert wird.

Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) werden in der Abb. 78 um das Spektrum von 435 Hz (0,06 m) wahrgenommen, die sich den Eigenschaften von Schlupfwellen oder denen eines Isolierstoßes zuordnen lassen. Darüber hinaus können ebenfalls sehr ähnliche Signalspitzen bei einer Frequenz von 1,4 kHz (0,02 m), 1,7 kHz (0,02 m) sowie 4,9 kHz (0,01 m) hervorgehoben werden, die das Spektrum der Fahrflächenfehler dominieren. Über die hochfrequenten Anteile lassen sich Fehler in der Schienenoberfläche darstellen, die hier auf kurzweilige Fehler im Millimeterbereich deuten. Diese lassen sich entsprechend der Tabelle 12 den Eigenschaften von Riffeln zuordnen. Mit der Tabelle 26 wird darüber hinaus das Übereinstimmungsverhältnis der Frequenzbänder spezifiziert.

Tabelle 26: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Signalstandorten der in Abb. 78 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	13,695	14,230	84,5	84,8	81,9	71,9	99,6	84,5
2	13,695	14,985	62,4	56,4	72,2	91,9	99,9	76,6
3	13,695	20,115	70,3	67,1	74,4	86,2	98,8	79,4
4	13,695	31,960	28,4	95,7	69,3	84,2	97,3	75,0
5	13,695	33,400	58,6	33,0	72,4	91,7	96,1	70,4
6	13,695	67,515	65,7	67,7	75,3	85,6	97,4	78,3
7	14,230	14,985	89,0	89,6	80,5	67,2	99,6	85,2
8	14,230	20,115	81,5	93,5	88,0	41,2	98,5	80,5
9	14,230	31,960	28,3	93,9	91,6	43,9	97,2	71,0
10	14,230	33,400	77,6	8,0	83,9	54,9	96,4	64,1
11	14,230	67,515	58,8	33,9	63,5	43,9	98,3	59,7
12	14,985	20,115	80,2	93,4	86,4	94,7	98,0	90,5
13	14,985	31,960	32,3	76,6	89,8	96,0	98,1	78,6
14	14,985	33,400	74,8	31,6	92,4	98,3	97,1	78,9
15	14,985	67,515	40,3	10,8	86,2	95,5	96,8	65,9
16	20,115	31,960	59,2	82,3	96,2	99,3	94,1	86,2
17	20,115	33,400	78,7	1,5	93,3	98,4	92,1	72,8
18	20,115	67,515	60,2	10,6	76,1	98,7	98,2	68,7
19	31,960	33,400	72,5	11,3	92,0	98,6	99,7	74,8
20	31,960	67,515	5,3	45,6	71,1	99,3	93,3	62,9
21	33,400	67,515	29,9	86,0	84,5	98,8	92,1	78,3

Mit dem Ergebnis der Tabelle 26 werden sehr unterschiedliche Übereinstimmungsergebnisse im Spektrum der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) lokalisiert. Diese deuten vor allem auf eine veränderte Gleisgeometrie in den einzelnen Gleisabschnitten. Dabei können über das Frequenzverhalten allein keine Einzelfehler analysiert bzw. beurteilt werden. Der Beurteilungsmaßstab der Gleislagequalität wird daher nach wie vor durch die Amplitudenstärke des Dreipunktsignals in Verbindung mit dem SR-Verfahren bestimmt. Mit der Analyse der Frequenzblöcke zeigt sich,

5.3 Auflösung von Frequenzinhalten an Komponenten der Fahrbahn

dass im unmittelbaren Umfeld der Signaltechnik die größten Frequenzunterschiede im Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zwischen der Gleislage und den Fahrbahnkomponenten verortet werden. Die geringste Ähnlichkeit wird in der Tabelle 26 an der Frequenzbandkombination 17 mit 1,5 % dargestellt. Das Übereinstimmungsergebnis wird hier durch die unterschiedlichen Frequenzinhalte zwischen dem QS4 (20,120 km) und dem QS6 (33,400 km) bestimmt. Dabei zeigt das Frequenzverhalten des QS4 den bereits im Kapitel 5.2.2.3 analysierten Einzelfehler.

Ein deutlich besseres Übereinstimmungsverhältnis lässt sich über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) und der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) wahrnehmen. Entsprechend der Tabelle 26 lassen sich über alle Signalpaarungen signifikante Übereinstimmungsmerkmale aufzeigen, die nur in Verbindung mit dem QS2 und dem Spektrum zwischen $400 \text{ Hz} < f < 1000 \text{ Hz}$ geringer ausfallen. In Kombination mit dem QS2 wird ebenfalls der geringste Übereinstimmungsgrad bestimmt. Dieser wird in Verbindung mit der Frequenzbandkombination 11 ein Mittelwert von 59,7 % zugeordnet, welche als einzige Signalpaarung keine signifikante Übereinstimmung zeigt.

Das vergleichbare Spektrum der am linken Achslager analysierten Frequenzinhalte lässt sich ebenfalls am rechten Achslager darstellen. Jedoch variiert das Frequenzverhalten am rechten Achslager deutlich stärker. Die Abb. 79 zeigt die Frequenzbänder der Signalstandorte.

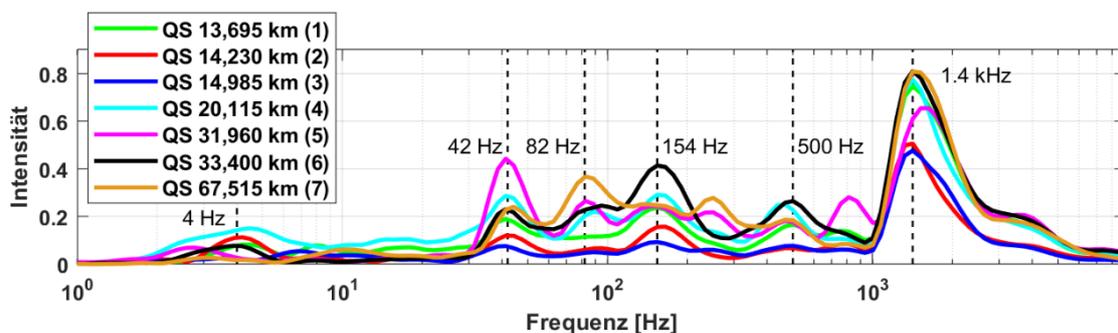


Abb. 79: Frequenzverhalten von Schienenfehlern im Bereich der Signaltechnik am rechten Achslager

Im Bereich der Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$) werden die stärksten Intensitäten (Abb. 79) zwischen $2 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ wahrgenommen. Dabei lässt sich über das Spektrum keine eindeutige Aussage über die Gleislagequalität treffen. Die erhöhte Intensität verweist hier in erster Linie auf eine veränderte Gleisgeometrie, die sich über das analysierte Frequenzverhalten jedoch nicht eindeutig beurteilen lässt. Entsprechend der Abb. 79 wird die größte Signalspitze am QS4 (cyan) beobachtet und einer Frequenz von 4,5 Hz (5,56 m) zugeordnet. Dabei lässt sich erst in Verbindung mit dem Dreipunktsignal eine Störstelle verorten, die am QS4 als Einzelfehler (Kapitel 5.2.2.3) bewertet wird.

Mit dem Übergang ($30 \text{ Hz} < f < 80 \text{ Hz}$) zum Spektrum der Fahrbahnkomponenten sowie diesem selbst ($80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) lassen sich dem QS1 (grün), QS2 (rot) und QS3 (blau) sehr ähnliche Signalstrukturen und Signalspitzen bei 42 Hz (0,60 m) und 154 Hz (0,16 m) zuordnen. Außerdem zeigen sich über den QS4 (cyan) und QS6 (schwarz) gleiche Frequenzinhalte. Diese werden durch das Spektrum von 42 Hz, 82 Hz und 154 Hz bestimmt. Ein wiederum anderer Amplitudenverlauf lässt sich am QS5 (magenta) und QS7 (braun) wahrnehmen. Hier werden Spektren von 42 Hz, 82 Hz und 250 Hz hervorgehoben.

5 Anwendung der entwickelten Methode

Mit der Darstellung der Frequenzinhalte lassen sich im Bereich der Fahrflächenfehler (400 Hz < f < 9000 Hz) Spektren von 500 Hz (0,05 m), 810 Hz (0,03 m) und 1,4 kHz (0,02 m) aufzeigen. Dabei dominiert das Frequenzverhalten von 1,4 kHz über das Spektrum der Fahrflächenfehler. Das Frequenzverhalten um die 500 Hz und 810 Hz fällt hier deutlich geringer aus, wobei das Spektrum von 810 Hz ausschließlich über den QS5 (magenta) wahrgenommen wird. Der Übereinstimmungsgrad der Frequenzbänder lässt sich entsprechend der Tabelle 27 interpretieren.

Tabelle 27: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Signalstandorten der in Abb. 79 dargestellten Frequenzbänder

Kombination			Frequenzbereiche [Hz]					Mittel
			1 - 30	30 - 80	80 - 400	400 - 1000	1000 - 9000	
1	13,695	14,230	59,7	92,1	95,9	19,4	98,2	73,0
2	13,695	14,985	51,2	85,2	89,7	92,8	99,7	83,7
3	13,695	20,115	78,7	86,5	92,1	63,0	99,4	84,0
4	13,695	31,960	3,2	95,1	60,7	4,1	97,5	52,1
5	13,695	33,400	49,2	78,7	97,4	77,3	99,9	80,5
6	13,695	67,515	63,9	32,0	15,1	67,2	99,6	55,6
7	14,230	14,985	13,6	90,5	88,5	8,6	98,8	60,0
8	14,230	20,115	73,3	96,9	92,0	42,5	99,3	80,8
9	14,230	31,960	14,8	95,4	55,7	82,3	91,8	68,0
10	14,230	33,400	86,8	58,9	97,2	44,9	98,5	77,2
11	14,230	67,515	0,9	11,9	8,6	47,7	96,9	33,2
12	14,985	20,115	42,8	94,8	78,3	86,9	99,3	80,4
13	14,985	31,960	9,3	92,3	61,6	20,5	96,3	56,0
14	14,985	33,400	1,6	55,1	81,6	91,8	99,6	65,9
15	14,985	67,515	56,5	4,9	6,0	89,4	99,2	51,2
16	20,115	31,960	39,2	95,7	70,6	37,4	95,2	67,6
17	20,115	33,385	76,1	58,0	95,4	90,2	99,7	83,9
18	20,115	67,515	41,8	14,4	40,9	97,9	98,7	58,7
19	31,960	33,400	51,5	77,5	57,4	56,5	97,1	68,0
20	31,960	67,515	0,2	34,5	78,3	42,7	98,2	50,8
21	33,400	67,515	7,7	81,6	18,3	94,7	99,5	60,3

In der Tabelle 27 lassen sich die geringsten Übereinstimmungsergebnisse, wie schon in der Abb. 79, im Spektrum der Gleislage (1 Hz < f < 30 Hz) verorten. Durch die geringe Ähnlichkeit werden den analysierten Frequenzbandkombinationen sehr unterschiedliche Formen der Gleisgeometrie zugeordnet. Dabei kann über das Ergebnis der Tabelle 27 keine Aussage über die Gleislagequalität getroffen, sondern nur die Ähnlichkeit zwischen den einzelnen Störstellen bewertet werden.

Der höchste Übereinstimmungsgrad der Tabelle 27 wird an der Frequenzbandkombination 3 mit einer Ähnlichkeit von 84,0 % wahrgenommen. Dabei lässt sich über die einzelnen Frequenzblöcke ein signifikanter Übereinstimmungsgrad darstellen, der auf eine sehr ähnlich ausgeprägte Störstelle und Fehlerursache zwischen dem QS1 (13,695 km) und dem QS4 (20,115 km) deutet.

Die schwächste Übereinstimmung wird hingegen an der Frequenzbandkombination 11 hervorgehoben. Diese wird durch einen Mittelwert von 33,2 % bestimmt. Dabei lassen sich über das Spektrum der Gleislage bis hin zum Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten keine charakteristischen Übereinstimmungsmerkmale darstellen. Eine Vergleichbarkeit und Bewertung

der Fehlerursache zwischen dem QS2 (14,230 km) und dem QS7 (67,515 km) erscheint daher als nahezu unmöglich.

Mit der Auswertung der Gleislage an den Signalstandorten lassen sich sehr unterschiedliche Frequenzinhalte sowie Intensitäten am linken (Abb. 78) als auch rechten (Abb. 79) Achslager hervorheben. Dabei werden über das linke Achslagerbeschleunigungssignal (Tabelle 26) deutlich höhere Übereinstimmungsmerkmale (Frequenzverhalten) lokalisiert als gegenüber dem rechten (Tabelle 27). Vor allem lassen sich über das Spektrum der Gleislage unterschiedliche Ausprägungsgrade der Störstellen aufzeigen. Mit der Darstellung der Frequenzinhalte werden zwar Qualitätsunterschiede an der Fahrbahn bestimmt, jedoch ermöglicht die Auflösung der Frequenzinhalte keine Beurteilung der Gleislagequalität. Dennoch konnte der hohe Nutzen der Einzelfehlercharakterisierung aufgezeigt werden, der für die Interpretation einer mangelhaften Gleislage sowie deren Fehlerursache als unverzichtbar erscheint und die Grundlage für eine nachhaltige Instandhaltung der Gleisanlagen darstellt.

5.4 Ergebnis der Signalanalyse

Für die Interpretation einer mangelhaften Gleislage mussten Störstellen verortet und Fehlerabschnitte festgelegt werden. Im Kapitel 5.1 wurden daher vier Streckenabschnitte definiert. Diese erfüllen alle Anforderungen, die an eine Charakterisierung von Einzelfehlern gestellt wurden. Die wichtigste Voraussetzung liegt in der Überlagerung der Fehleramplituden aus dem Dreipunktsignal des DB Fahrwegmonitorings und der DB Inspektionsmessung. Über dieses sowie den analysierten Krümmungsverlauf wurde eine Verknüpfung mit dem Streckenkilometer erzielt, der eine Interpretation der Fehlerursache in Verbindung mit der Örtlichkeit erlaubt.

Entsprechend der im Kapitel 5.2 analysierten Einzelfehler wurden unterschiedliche Frequenzen an den Störstellen aufgezeigt. Vor allem konnte aber der hohe Nutzen einer kombinierten Auswertung zwischen dem Dreipunktsignal und dem Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals dargestellt werden. Dabei variieren die Intensitäten der Wavelet-Koeffizienten als auch die Frequenzinhalte. Über diese lassen sich verschiedene Fehlerursachen darstellen, die besonders über das Spektrum der Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) wahrgenommen wurden. Auf Basis der Frequenzanteile konnten Fehler im Eisenbahnoberbau über die Wellenlänge den analysierten Störstellen zugeordnet und die Fehlerursache einer schlechten Gleislage mit dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten und dem der Fahrflächenfehler verknüpft werden. Dabei wurde über alle analysierten Frequenzbänder im Kapitel 5.2 eine erhöhte Amplitude um die 1,4 kHz wahrgenommen, die auf geometrische Fehler in der Schienenoberfläche deutet und damit eine mögliche Fehlerursache für Gleislageveränderungen darstellt.

Das Ergebnis der im Kapitel 5.3 analysierten Frequenzbänder zeigt, dass sich über die jeweils definierten Anlagenkategorien ähnliche Frequenzinhalte und je nach Anlagenzustand gleiche Intensitäten wahrnehmen lassen. Dies konnte vor allem durch die Visualisierung der Frequenzbänder verdeutlicht werden. Ebenso wurde durch die Korrelation der Frequenzbänder eine Vergleichbarkeit zwischen den Anlagentypen aufgezeigt, die eine Beurteilung über das Frequenzverhalten der Fahrbahnkomponenten erlaubt. Am Beispiel eines mangelhaften Isolierstoßes wurden im Kapitel 5.3.2 die verschiedenen Systemeigenschaften der Fahrbahnkomponenten und der Fahrflächenfehler ausgewertet, die es ermöglichen, den Isolierstoß eindeutig zu identifizieren und damit die Fehlerursache einer mangelhaften Gleislage darzustellen.

6 Zusammenfassung

Durch die DB Inspektionsmessung sowie das DB Fahrwegmonitoring wird eine zuverlässige Überwachung der Gleisgeometrie verfolgt. Das für die Bewertung der Gleislage etablierte Dreipunktsignal wurde hier als eine vergleichbare Bezugsgröße zwischen beiden Messsystemen bewertet. Anhand des Dreipunktsignals konnten im Rahmen dieser Arbeit Fehler in der Gleisgeometrie erfasst und über das DB Störgrößen-Reaktionsverfahren beurteilt werden. Darüber hinaus wurden auf Basis der Achslagerbeschleunigung die Einzelfehlercharakterisierung im Eisenbahnoberbau erfolgreich umgesetzt.

Die Verortung der Gleislagendaten stellt eine wesentliche Grundlage für die Charakterisierung von Einzelfehlern dar. Die Herausforderung liegt hier in der exakten Positionsbestimmung der Fahrzeuge. Für die Positionierung der Messwerte muss eine Verortungsgenauigkeit erzielt werden, welche die eindeutige Zuordnung zwischen dem Einzelfehler im Dreipunktsignal und der Örtlichkeit des Fehlers erlaubt. Mit der Kombination von GNSS-Daten, dem Radimpuls sowie dem Krümmungsverlauf konnte eine Lösung entwickelt werden, die eine Stationierung der Messdaten über den Streckenkilometer entsprechend dem DB Inspektionsformat erlaubt. Durch das Verschneiden dieser Informationen wird eine hochgenaue Verortung der Messwerte erzielt (Kapitel 2.2). Der zurückgelegte Weg wird dabei durch den Radimpuls bestimmt. Durch Schlupf im Rad-Schiene-Kontakt kommt es jedoch zur Beeinflussung der Wegstrecke, welche mittels einer Synchronisation zwischen der GNSS-Position und der abgewickelten Wegstrecke korrigiert wird. Die Verortung der gemessenen Gleisabschnitte orientiert sich an der absoluten Position der GNSS-Koordinaten, die hier auf den Streckenkilometer bezogen werden und den Startpunkt der jeweils abgewickelten Wegstrecke beschreibt. Mit der Nachverortung der Daten und Plausibilisierung der abgeleiteten Winkelveränderungen in die Krümmung, für die Vergleichbarkeit mit der Referenzkrümmung, konnte letztendlich eine für die Charakterisierung von Einzelfehlern ausreichende Positionsgenauigkeit erzielt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass das Frequenzverhalten einer Störstelle selbst für die hochgenaue Verortung eingesetzt werden kann. Am Beispiel eines Isolierstoßes wurde aufgezeigt, dass anhand spezifizierter Frequenzanteile die eindeutige Identifizierung der Anlage ermöglicht wird und demnach eine Positionierung des Messsystems über den Streckenkilometer erlaubt. Der hohe Nutzen dieser alternativen Verortungsmethode konnte vor allem im Zuge der Einzelfehlercharakterisierung im Kapitel 5 nachgewiesen und plausibilisiert werden.

Das DB Inspektionssystem basiert auf der RAILab-Technologie, die über ein Trägheitsmesssystem und eine optische Gleisabtastung mittels Laser alle geforderten Parameter der Gleisgeometriemessung mit einer sehr hohen Genauigkeit erfasst und alle Bedürfnisse der DB Gleislagebewertung [DB821.2001, 2020] erfüllt. Als mögliche Alternative zur Inspektion der Längshöhe wird das instandhaltungsunterstützende DB Fahrwegmonitoring bewertet, das auf Basis von Achslagerbeschleunigungen die Gleislage ermitteln kann. Der Unterschied dieser beiden Systeme liegt in der Messung von Parametern der inneren Gleisgeometrie sowie in der Häufigkeit dieser Messung. Die DB Inspektionsmessung orientiert sich hier an einer nach dem Regelwerk [DB821.2001, 2020] definierten und in regelmäßigen Abständen wiederkehrende Überwachung der Gleislage. Das DB Fahrwegmonitoring unterliegt hingegen dem Zwang des Regelzugbetriebs. Dies bedeutet, dass die Messung der Achslagerbeschleunigungen nur auf bestimmten Strecken bzw. Abschnitten erfolgt. Unabhängig davon konnte die hohe Qualität des Dreipunktsignals aus den Daten des DB Fahrwegmonitorings durch den Vergleich mit dem DB Inspektionssystem nachgewiesen werden (Kapitel 3.4.2). Neben der Beurteilung der Längshöhe können derartige Messsysteme auch die Fahrzeug-Fahrweg-Interaktionen

erfassen. In der vorliegenden Arbeit wurde daher ein Verfahren zur Ursachenanalyse von Gleislagefehlern entwickelt, das auf Basis von Achslagerbeschleunigungen arbeitet. Es nutzt gezielt mathematische Methoden und moderne Messverfahren, um die Einflüsse aus dem Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) und der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) auf die Gleislage ($1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$) darzustellen. Das Ergebnis dieser Methode liefert dabei eine deutlich effektivere Interpretation von Fehlerursachen, die bis dato nur durch unterschiedliche Analyseverfahren ermöglicht wurde.

Die Verknüpfung von Informationen aus dem DPS der Längshöhe mit dem Spektrum der 25 kHz abgetasteten Achslagerbeschleunigungen ermöglicht eine vollkommen neue Form der Gleislagebeurteilung, die eine prognosebasierte und zustandsorientierte Instandhaltung des Eisenbahnoberbaus erlaubt (Kapitel 4.2.3.2). Der Vorteil besteht in einer noch effektiveren und wirtschaftlicheren Ausnutzung der Schwellenwerte nach dem Störgrößen-Reaktionsverfahren. Aufgrund der unterschiedlichen Signaleigenschaften konnte aufgezeigt werden, dass sich eine Störstelle nicht nur über die Amplitude des Dreipunktsignals der Längshöhe bewerten lässt, sondern auch Einzelfehler über das Frequenzverhalten des Achslagerbeschleunigungssignals analysiert werden können. Durch die sehr hohe Abtastrate der Achslagerbeschleunigungen konnten die Einflüsse aus dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten (z. B. Herzstück oder Isolierstoß) und dem der Fahrflächenfehler (z. B. Schlupfwellen oder Riffeln) nachgewiesen und den Signalspitzen im Dreipunktsignal der Längshöhe zugeordnet werden (Kapitel 4.2). Eine mögliche Methode für die Darstellung von Frequenzen stellt die Wavelet-Transformation aus dem Kapitel 3.6 dar. Durch die Korrelation zwischen dem Achslagerbeschleunigungssignal und einem Morlet-Wavelet konnten ähnliche Signalstrukturen aufgezeigt werden, die als Wavelet-Koeffizienten den Übereinstimmungsgrad dieser beiden Amplitudenverläufe zueinander beschreiben. Mit steigender Skalierung des Wavelets wurden die Frequenzinhalte jedoch immer schwächer dargestellt. Dies betrifft vor allem das Spektrum der Gleislagefehler. Daher erfolgt die Beurteilung der Gleislage ausschließlich über das Dreipunktsignal der Längshöhe. Die Einflüsse aus dem Frequenzbereich der Fahrbahnkomponenten sowie die der Fahrflächenfehler lassen sich hingegen sehr deutlich unterscheiden und den Eigenschaften des Eisenbahnoberbaus zuordnen. Im Fokus der kombinierten Auswertung liegt die Anregung der Gleislage durch Frequenz von $f > 50 \text{ Hz}$, die in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit variiert. Hohe Intensitäten in den Wavelet-Koeffizienten deuten hier auf eine mögliche Fehlerursache. Letztendlich wurde mit der Darstellung der Frequenzinhalte ein Zusammenhang zwischen den im Kapitel 5.2 analysierten Störstellen bzw. Anlagen aufgezeigt. Um hier eine vergleichbare Fehlerursache am Fahrbahnsystem aufzuzeigen, wurde das Frequenzverhalten auf Basis der Wavelet-Koeffizienten an unterschiedlichen Störstellen analysiert. Einerseits wurde mittels der Wavelet-Transformation die Ähnlichkeit zwischen der Achslagerbeschleunigung und dem eingesetzten Morlet-Wavelet bewertet (Kapitel 3.6.4) und andererseits das Korrelationsergebnis aus dem Frequenzverhalten zweier Störstellen beurteilt (Kapitel 3.6.3). Mit der Kombination dieser beiden Informationen wurde nachgewiesen, dass sich über die analysierten Frequenzinhalte eine vergleichbare Fehlerursache aufzeigen lässt. Die entwickelte Methodik erlaubt daher die eindeutige Identifikation der Fehlerursache von Einzelfehlern und schafft somit die Grundlage für eine zielgerichtete und nachhaltige Instandhaltung des Eisenbahnoberbaus. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit des Eisenbahnoberbaus maßgebend erhöht und die Verfügbarkeit der Fahrbahn positiv beeinflusst.

Mit der entwickelten Methode lassen sich Fehler im Eisenbahnoberbau eindeutig über das Frequenzverhalten der Achslagerbeschleunigungen zuordnen. Ferner bietet das DB Fahrwegmonitoring den Vorteil einer frühzeitigen Erkennung von Einzelfehlern, die durch die Anregung

6 Zusammenfassung

von Frequenzen aus dem Spektrum der Fahrbahnkomponenten oder der Fahrflächenfehler erst entstehen. Neben der Prognose der Gleislage über das Dreipunktsignal der Längshöhe sowie die Bewertung des Gleislagefehlers nach dem SR-Verfahren, konnte nachgewiesen werden, dass sich Fehlerursachen einer mangelhaften Gleislage über das Frequenzverhalten aus dem Rad-Schiene-Kontakt deutlich früher lokalisieren lassen. Auf Basis der analysierten Frequenzinhalte einer Wavelet-Transformation wurde aufgezeigt, dass sich die Entwicklung eines Gleislagefehlers über das Spektrum der Achslagerbeschleunigungen wahrnehmen lässt. Letztendlich zeigt das Ergebnis des Dreipunktsignals vor allem die Auswirkungen von Fahrflächenfehlern der Schiene oder von mangelhaften Fahrbahnkomponenten. Diese Störstellen können, wie im Kapitel 4.2.1 beschrieben, über das Achslagerbeschleunigungssignal identifiziert und notwendige Instandhaltungsmaßnahmen rechtzeitig eingeplant werden. Durch die Behebung von Fehlern in der Schienenoberfläche oder den Fahrbahnkomponenten lassen sich Einzelfehler im Dreipunktsignal der Längshöhe verhindern und so eine Steigerung von sicherheitsrelevanten Anforderungen erzielen, die zur Erhöhung der Qualität und Verfügbarkeit des Fahrsystems beitragen.

7 Ausblick

Durch die unterschiedlichen Frequenzinhalte, die sich aus den Achslagerbeschleunigungen des DB Fahrwegmonitorings identifizieren lassen, wird eine Zuordnung von Fehlerursachen erst ermöglicht. Um jedoch eine effektive Charakterisierung der Einzelfehler zu erzielen, sollte das Frequenzverhalten über spezielle Frequenzmuster bewertet werden. Über diese lassen sich Störstellen eindeutig einer Fehlerursache zuordnen. Jedoch variieren die Ausprägungen des Fehlertyps. Demnach müssen mit Hilfe eines Datenmodells unterschiedliche Eigenschaften und Zustände der Fahrbahn bewertet werden. Durch den Einsatz von datenanalytischen Methoden wie maschinelles Lernen oder Deep Learning besteht dabei die Möglichkeit einer automatisierten Identifizierung von Einzelfehlern. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz könnte zudem die Effizienz der Einzelfehlermethode deutlich steigern und speziell Fehler in den Fahrbahnkomponenten oder der Schienenoberfläche unabhängig von der vorgestellten Einzelfehlermethode frühzeitig erkennen.

Aktuell können über das Fahrwegmonitoring der DB nur Daten der Längshöhe ausgewertet werden. Dabei erlaubt das FwM auch die Messung von Achslagerbeschleunigungen in der lateralen Richtung. Jedoch gestattet der aktuelle Signalverarbeitungsprozess keine Berechnung der Pfeilhöhe entsprechend dem Dreipunktsignal der DB Inspektionsmessung. Dies lässt sich auf die horizontale Bewegung der Radsätze zwischen den Schienen zurückführen, der sich gegenüber dem RAILab aus der optischen Gleisabtastung herausrechnen lässt. Fahrzeugbedingt kommt es zum Sinuslauf, der sich auf das formtreue Signal der Messung auswirkt und eine Vergleichbarkeit zwischen der DB Inspektionsmessung und dem DB Fahrwegmonitoring erschwert. Für die Auswertung der Pfeilhöhe nach Regelwerk müssen daher geeignete Messsysteme bzw. Verfahren verifiziert werden, die eine absolute Verortung zwischen den Schienensträngen erlauben. Seitens der DB Netz AG werden daher im Zuge des EU-Projekts „In2Smart2“ Wirbelstromsensoren erprobt, über die der Abstand zwischen Rad und Schiene gemessen werden soll.

Die Bewertung der Gleislagequalität basiert auf der visuellen Begutachtung der in dieser Arbeit bewerteten Störstellen. Diese wiederum wurden durch einen Einzelfehler im Dreipunktsignal der Längshöhe bestimmt und in Abhängigkeit zum SR-Verfahren im Kapitel 3.5 bewertet. Mit der vorgestellten Methode zur Charakterisierung der Einzelfehler werden jedoch ausschließlich die Frequenzbereiche der Fahrbahnkomponenten ($50 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$) sowie die der Fahrflächenfehler ($400 \text{ Hz} < f < 9000 \text{ Hz}$) analysiert. Dabei liefert auch das Spektrum der Gleislagefehler ($1 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$) ein sehr unterschiedliches Frequenzverhalten, das für die Bewertung der Gleislage noch effektiver ausgewertet werden muss. Mit der Darstellung der Gleislage lassen sich vor allem die Signalspitzen des Dreipunktsignals den dominierenden Frequenzen der Achslagerbeschleunigungen zuordnen. Durch die unterschiedlichen Frequenzinhalte und Signalkurven der analysierten Achslagerbeschleunigungen sollte daher eine Unterscheidung zwischen hohlliegenden Schwellen und einer Setzung bzw. eine Kombination beider Fehlerformen eindeutig identifizierbar sein. Dies erfordert jedoch die Bewertung des lokalen Zustands des Eisenbahnoberbaus und -unterbaus, der die Interpretation des Fehlers eindeutig belegt.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- [ANGEHRN, 2016] F. Angehrn, H. Patrick Braess & U. Wiedmann; Frequenzanalyse von Achslagerbeschleunigungsmessungen, Eisenbahntechnische Rundschau, 2016
- [AUTOMAIN, 2014] Augmented Usage of Track by Optimization of Maintenance, Allocation and Inspection of Railway Networks, 2014
- [BAASCH, 2018] B. Baasch, M. Roth & J. C. Groos; In-service condition monitoring of rail tracks, Internationales Verkehrswesen, 2018.
- [BAEßLER, 2008] M. Baeßler; Lageveränderungen des Schottergleises durch zyklische und dynamische Beanspruchungen, Dissertation, TU Berlin, 2008
- [BÄNI, 2002] W. Bäni; Wavelets: eine Einführung für Ingenieure, 1. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2002
- [BIPPUS, 2015] A. Bippus; Gleislagegeometriemessung bei der DB Netz AG, Handbuch System Geometrie, Leitpfaden DB, 2015
- [BMVI, 2020] BMVI; Auf dem Weg zum Trans-Europ-Express 2.0, Pressekonferenz, 2020: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/pressekonferenz-trans-europ-express.html>
- [CAPRIOLI, 2007] A. Caprioli, A. Cigada, & D. Raveglia; Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis, 2007
- [CANTERO, 2015] D. Cantero D & B. Basu; Railway infrastructure damage detection using wavelet transformed acceleration response of traversing vehicle, Struct Control Health Monitor, 2015
- [DB, 2019] Deutsche Bahn Daten & Fakten 2018, Halbjährliche Pressekonferenz, Deutsche Bahn AG, 2019
- [DB800.0110, 2015] DB Richtlinie 800.0110; Netzinfrastruktur Technik entwerfen: Linienführung, Deutsche Bahn AG, Version 2, 2015
- [DB820.2010, 2018] DB Richtlinie 820.2010; Grundlagen des Oberbaus: Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen, Deutsche Bahn AG, Version 6.2, 2018
- [DB821.2007, 2019] DB Richtlinie 821.2007; Oberbau inspizieren: Inspektion von Schienen in Gleisen und Weichen, Deutsche Bahn AG, Version 14.1, 2019
- [DB821.2001, 2020] DB Richtlinie 821.2001; Oberbau inspizieren: Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleisfahrzeugen, Deutsche Bahn AG, Version 16, 2017
- [DB824.8110, 2020] DB Richtlinie 824.8110; Oberbauarbeiten durchführen: Gleisneu- / Gleisumbau abnehmen, Deutsche Bahn AG, Version 14, 2020
- [DB883.1000, 2021] DB Richtlinie 883.1000; Gleis- und Bauvermessung: Bahnstrecken kilometrieren, Deutsche Bahn AG, Version 2, 2019
- [DB883.9010, 2020] DB Richtlinie 883.9010; Gleis- und Bauvermessung: Begriffe und Definitionen, Deutsche Bahn AG, Version 8, 2020
- [EBA, 2021] EBA Sachgebiet 333; Leitfaden für die Erstellung von Sicherheitsberichten nach Artikel 9 (6) der Richtlinie (EU) 2016/798, Eisenbahnbundesamt, Bonn, 2021
- [EN13231, 2013] Europäische Norm 13231-1:2013; Bahnanwendungen - Oberbau - Abnahme von Arbeiten - Teil 1: Arbeiten im Schotteroberbau - Gleisen, Weichen und Kreuzungen, 2013
- [EN13848, 2016] Europäische Norm 13848-1:2016; Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislaagequalität - Teil 1 Beschreibung der Gleisgeometrie, 2016

- [EN14363, 2016] Europäische Norm 14363:2016-10; Bahnanwendungen - Versuche für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche, 2016
- [HANKER, 1952] R. Hanker, Eisenbahnbau: die Grundlagen des Gleisbaus, Springer Verlag, 1952
- [HEUNECKE, 2013] O. Heunecke, H. Kuhlmann, W. Welsch, A. Eichhorn & H. Neuner; Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, 2013
- [HOFFMANN, 1998] R. Hoffmann; Signalanalyse und -erkennung: eine Einführung für Informationstechniker, 1. Auflage, Springer Verlag, 1998
- [KIPPER, 2016] R. Kipper; Nutzung von Gleismessdaten für die Überwachung von Verformungen an Erdkörpern von Schienenfahrwegen, Dissertation, TU Dresden, 2015
- [KREYSZIG, 1991] E. Kreyszig; Statische Methoden und Ihre Anwendungen, 7. Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1991
- [LE, 2009] R. Le; Prognose von Rollkontaktermüdungsschäden an einem Herzstück der Bauart EH 60-500-1:12 mit bekannten Schädigungsmodellen, Bericht, DB Systemtechnik, München, 2009
- [LICHTBERGER, 2010] B. Lichtberger; Handbuch Gleis, 3. Auflage, Eurailpress DVV Media Group, 2010
- [LILLIN, 2018] N. Lillin, S. Rapp, S. Freudenstein, U. Martin und C. Moormann; Frühzeitige Detektion von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper; Eisenbahningenieur DVV Media Group, 2018
- [LOUIS, 1998] A. Karl Louis, P. Maaß & A. Rieder; Wavelets: Theorie und Anwendung, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Teubner Studienbücher, 1998
- [MEMSIC, 2011] Micro-ElectroMechanical Sensors and Integrated Circuit; Technical Data Mems-Based vertical Gyro VG440, Datenblatt, 2011
- [MENIUS, 2017] R. Menius & Volker Matthews; Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen, 9. Auflage, Springer Verlag, 2017
- [MOLODOVA, 2014] M. Molodova, Z. Li, A. Núñez, and R. Dollevoet; Automatic detection of squats in the railway infrastructures, 2014
- [MÖSER, 2012] M. Möser, H. Hoffmeister, G. Müller, R. Staiger, H. Schlemmer & L. Wanninger; Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Wichmann Verlag, 2012
- [PAPAELIAS, 2012] M. P. Papaelias & M. Lugg; Detection and evaluation of rail surface defects using alternating current field measurement techniques, 2012
- [PPM, 2020] Precise Positioning Management, Konfigurationsbeschreibung GPS/GNSS, Datenblatt, 2012
- [RAPP, 2018] S. Rapp, M. Ullrich, M. Strähle & M. Scheffbuch; Track-vehicle scale model for evaluation local track defects detection, Elsevier, 2018
- [RETSCHER, 1998] G. Retscher; 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 44, 1996
- [RIPKE, 1994] B. Ripke; Hochfrequente Gleismodellierung und Simulation der Fahrzeug-Gleis Dynamik unter Verwendung einer nichtlinearen Kontaktmechanik, Dissertation, TU Berlin, 1994
- [RIPKE, 2010] B. Ripke & M. Jovanovic; Wirkgesetze für die Präventionsplanung im Oberbau (Präventive Dua); Untersuchungsbericht, DB Systemtechnik, 2010
- [SANDNER, 2012] C. Sandner; Verifizierung und Weiterentwicklung des Echtzeitsystems zur kinematischen Positionsbestimmung von Messzügen der Deutschen Bahn AG, Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2012

8 Verzeichnisse

- [SANDNER, 2019] C. Sandner, J. Feng & B. Ripke; Effektivere Instandhaltung durch Überwachung und Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau, Eisenbahningenieur, 2019
- [SANDNER, 2020] C. Sandner, B. Ripke & T. Wunderlich; Monitoring and Evaluation of Railway Infrastructure, 19. Ingenieurvermessungskurs, München, 2020
- [SHIFT2RAIL, 2017] Shift2Rail, IN2SMART, D4.1 „Report on track/switch parameters and problem zones“, 2017
- [SLOVAK, 2012] B. Slovak, Anforderungen an die Testfahrten zur metrologischen Prüfung neuer Oberbaumessfahrzeuge, Dissertation, TU Berlin, 2012
- [STRÜBING, 2015] T. Strübing; Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II, Dissertation, Schriftenreihe Institut für Geodäsie der Bundeswehr Universität München, Heft 91, 2015
- [SZCZYRBA, 2013] Sebastian Szczyraba; Setzungsarme Bauweisen im Hinterfüllbereich von Brückenwiderlagern, Dissertation, Freiberg, 2013
- [TOLOYAT, 2003] H. Toliyat, K. Abbaszadeh, M. Rahimian, & L. E. Olson; Rail defect diagnosis using wavelet packet decomposition, 2003
- [WOLTER, 2012] K. U. Wolter; Rekonstruktion der originalen Gleislageabweichung aus 3-Punkt-Signalen (Wandersehenmessverfahren) und Beurteilung hinsichtlich Amplitude, Fehlerwellenlänge sowie Fehlerform, Dissertation, TU Berlin, 2012
- [WOLTER, 2014] K. U. Wolter, F. Erhard, H. Gabler & Hempe; Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb, Eisenbahntechnische Rundschau, 2014.
- [ZACHER, 2014] M. Zacher; Berechnung von Leistungsdichtespektren und ihre Anwendung in der Gleismesstechnik, Deutsche Bahn AG, 2014
- [ZIMMERMANN, 1941] H. Zimmermann; Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus, W. Ernst & Sohn, 3. Auflage, Berlin, 1941

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Ergebnis der kombinierten Gleislagebewertung; Wavelet-Analyse mit Darstellung von Intensitäten der Koeffizienten (oben) und Bewertung der Dreipunktsignale (unten)	4
Abb. 2:	Luftbild (DB GeoViewer) mit Verknüpfung von Teilen der Oberbaukonstruktion in Verbindung mit den geometrischen und geodätischen Bezugslinien der Fahrbahn.....	8
Abb. 3:	Normiertes Krümmungsbild einer Klothoide, eines S-förmig geschwungenen Übergangsbogens und eines Blossbogens	10
Abb. 4:	Trassierung der Gleislage als Krümmung (k), Winkelbild (τ) und Grundriss mit Hochwert (H) und Rechtswert (R)	11
Abb. 5:	Positionsbestimmung aus der Kombination von GNSS-Empfänger (1), Radimpulsgeber (2) und IMU (3)	13
Abb. 6:	Verortung des Streckenkilometers im DB-Ref Koordinatensystem über den Bezugspunkt zur Gleisachse und Kilometrierungslinie	15
Abb. 7:	Verortung der Monitoring- und Inspektionsdaten über die Korrelation mit der Referenzkrümmung.....	18
Abb. 8:	Beispiel der absoluten Gleislagemessung in einem linearen Trassierungselement für die Gradienten und horizontale Lage.....	20
Abb. 9:	Prinzip der Pfeilhöhenmessung vgl. [HANKER, 1952]	21
Abb. 10:	Darstellung der Pfeilhöhenmessung moderner Wandersehenmessverfahren mit unterschiedlicher Sehnenteilung.....	22
Abb. 11:	Vergleich der Mess- und Signalverarbeitungsabläufe der DB Inspektionsmessung („RAILab“) und des DB Fahrwegmonitorings („Monitoring“).....	23
Abb. 12:	Systemaufbau des Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3	26
Abb. 13:	Bezeichnung von Achsen, Sensorpositionen und Systemkomponenten des Fahrwegmonitorings am Beispiel des RAILab 3 über das Fahrzeugkoordinatensystem	26
Abb. 14:	Darstellung der Achslagerbeschleunigung (grün) in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit (rot) und der normierten Beschleunigung (blau) auf 100 km/h	28
Abb. 15:	Signalverarbeitung des formtreuen Gleislagesignals (FGS) zum bandpassgefilterten Gleislagesignal (BPS) aus den Achslagerbeschleunigungen des Fahrwegmonitorings.....	29
Abb. 16:	Betrag der Differenzen (rot) zwischen HPS der Inspektionsmessung (grün) und dem BPS des Fahrwegmonitorings (blau) für ein Beispiel der Längshöhe	30
Abb. 17:	Betrag der Differenzen (rot) zwischen dem DPS der Inspektionsmessung (grün) und dem DPS des Fahrwegmonitorings (blau) bezogen auf die Längshöhe	31
Abb. 18:	Zustandsbewertung des Eisenbahnoberbaus in Abhängigkeit zur Veränderung des Abnutzungsvorrats und Eingriffsschwellen des SR-Verfahrens [Ripke, 2010].....	32
Abb. 19:	Beurteilungsmaßstäbe der Längshöhe für die Anwendung des Störgrößen-Reaktionsverfahrens [vgl. DB821.2001, 2020].....	33
Abb. 20:	Fourier-Koeffizienten der Rechteckschwingung.....	35
Abb. 21:	Rechteckschwingung (schwarz) mit Grundschiebung (grün) und Oberschiebung (blau) sowie deren Summe (rot).....	35
Abb. 22:	Wavelets: Mexican Hat (links), Meyer (mitte) und Morlet (rechts)	36
Abb. 23:	Abstufungen eines Morlet-Wavelets über den Skalierungsparameter η	38
Abb. 24:	Beschreibung von Eigenschaften eines Morlet-Wavelets über das Frequenzverhalten in Abhängigkeit zum Skalierungsparameter η	38

8 Verzeichnisse

Abb. 25:	Dreipunktsignal der Längshöhe (blau) mit parametrisiertem Morlet-Wavelet $\eta = 45$ und $\zeta = 1350$ (rot) als Eingangssignal (oben); Berechnete Wavelet-Koeffizienten mit Auflösung über die Skalierung des Wavelets (unten)	40
Abb. 26:	Signalanalyse des 25 kHz abgetasteten Achslagerbeschleunigungssignals (blau) und dem skalierten Dreipunktsignal (grün) am Beispiel eines Morlet-Wavelets mit ähnlichem Signalverlauf	41
Abb. 27:	ALB mit Morlet-Wavelet $\eta = 83$ und $\zeta = 11700$ (oben); Ergebnis der Wavelet-Transformation mit Auflösung der Koeffizienten im Frequenzbereich (unten)	42
Abb. 28:	Interpretation der Frequenzinhalte am Querschnitt des Eisenbahnoberbaus.....	46
Abb. 29:	Darstellung der Fehlerklassen über den Frequenzbereich f sowie der Wellenlänge λ bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h, im Verhältnis zum auswertbaren Wellenlängenbereich des Dreipunktsignals der Längshöhe D_z	46
Abb. 30:	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Frequenzverhalten von Fehlern im Eisenbahnoberbau mit Beispielen der Gleislage (grün), der Fahrbahnkomponenten (rot) und der Schienenoberfläche (blau).....	46
Abb. 31:	Gleislageveränderung durch punktuelle Setzungen am Fahrbahnsystem	47
Abb. 32:	Beispiel für Hohllagen im Schotteroberbau.....	48
Abb. 33:	Beispiel einer Schlammstelle im Gleisbereich (DBVIS)	48
Abb. 34:	Ansicht eines Widerlagers zwischen Damm- und Brückenabschnitt mit Setzungsmulde im Bereich der Hinterfüllung	49
Abb. 35:	Beispiel für Schienenverbindungen mit Ausführung als Schienenschweißstoß (Links) und Isolierstoß (Rechts)	50
Abb. 36:	Beispiel eines Schienenbruchs im Bereich einer Schienenschweißung.....	51
Abb. 37:	Überlaufbereiche (rot) mit hoher Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung einer Weiche mit Herzstück (Links) und Zungenbereich (Rechts)	51
Abb. 38:	Schematischer Aufbau der Fahrbahn mit Betonschwelle (Links) und Holzschwelle (Rechts) nach DB Richtlinie [DB820.2010, 2018].....	52
Abb. 39:	Ausbildung von Schlupfwellen auf der Schienenoberfläche.....	53
Abb. 40:	Prozess der Einzelfehlercharakterisierung mit Beurteilung (1. Ergebnis) und Bestimmung der charakteristischen Fehlerursache (2. Ergebnis) einer Störstelle	55
Abb. 41:	Einzelfehlerdetektion über das Dreipunktsignal der Längshöhe D_z mit Reaktionsschwellen nach dem SR-Verfahren für eine Streckengeschwindigkeit von $120 \text{ km/h} < v < 160 \text{ km/h}$	56
Abb. 42:	Ergebnis der Wavelet-Transformation (Morlet-Wavelet) auf Basis der normierten Achslagerbeschleunigungen bei $v = 100 \text{ km/h}$	57
Abb. 43:	Ergebnis der Wavelet-Transformation mit einem Grenzwert von $C_\psi < 0,5$	57
Abb. 44:	Ergebnis der Wavelet-Transformation mit einem Grenzwert von $C_\psi = 0,25$	58
Abb. 45:	Kombinierte Auswertung mit Frequenzband (Oben), Dreipunktsignal (Mitte) und Streckeninformation (Unten) bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h	59
Abb. 46:	Auflösung der in Abb. 45 betrachteten Störstellen über das arithmetische Mittel der Wavelet-Koeffizienten mit einer Ausdehnung von 5 m Länge	60
Abb. 47:	Arithmetische Mittel für das Frequenzverhalten der Weiche W21 mit der Auflösung von 5,00 m (grün), 3,00m (braun), 1,00 m (lila) und 0,01 m (rot).....	60
Abb. 48:	Entwicklung der Gleislage über die Historie der Dreipunktsignale am Streckenkilometer 19,698 km	62
Abb. 49:	Frequenzverhalten im Herzstückbereich von Weichen mit einer Auflösung der Wavelet-Koeffizienten über einen Mittelwert von 5 m Länge bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h.....	64
Abb. 50:	Frequenzverhalten der Fahrflächenfehler ($0,4 \text{ kHz} < f < 9,0 \text{ kHz}$).....	64
Abb. 51:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W16 (rot).....	66
Abb. 52:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W19 (grün)...	67

Abb. 53:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W15 (blau) und W22 (braun)	67
Abb. 54:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W16 (rot) und W19 (grün)	68
Abb. 55:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W16 (rot) und W22 (braun) ...	69
Abb. 56:	Vergleich der Frequenzinhalte zwischen Weiche W19 (grün) und W22 (braun)	69
Abb. 57:	Verortung von RAILab (rot) und BR189 (blau) über den Streckenkilometer der Referenzkrümmung (grün)	71
Abb. 58:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,255 km (Schienenverbindung)	72
Abb. 59:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,310 km (Zwischenschiene Weiche)	73
Abb. 60:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,340 km (Weichenende)	74
Abb. 61:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,525 km (Zwischenschiene Weiche)	75
Abb. 62:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 13,555 km (Herzstück Weiche)	76
Abb. 63:	Frequenzverhalten Streckenkilometer 14,800 km (Schienenverbindung)	76
Abb. 64:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 19,780 km (EÜ 19,778 km)	77
Abb. 65:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 19,960 km (EÜ 19,954 km)	78
Abb. 66:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 20,115 km (Hauptsignal 2416)	79
Abb. 67:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 32,715 km (BÜ 32,722 km)	80
Abb. 68:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 67,130 km (EÜ 67,095 km)	81
Abb. 69:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 67,145 km (freie Strecke) ISO	82
Abb. 70:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 68,155 km (Kabelquerung)	83
Abb. 71:	Frequenzverhalten am Streckenkilometer 68,305 km (BÜ 68,320 km)	83
Abb. 72:	Frequenzverhalten am linken Achslager bei stumpfer Befahrung des Herzstücks (Weiche)	86
Abb. 73:	Frequenzverhalten am rechten Achslager bei stumpfer Befahrung des Herzstücks (Weiche)	87
Abb. 74:	Frequenzverhalten am linken Achslager bei spitzer Befahrung des Herzstücks (Weiche)	88
Abb. 75:	Frequenzverhalten am rechten Achslager bei spitzer Befahrung des Herzstücks (Weiche)	90
Abb. 76:	Frequenzverhalten am linken Achslager (Bahnübergänge)	92
Abb. 77:	Frequenzverhalten am rechten Achslager (Bahnübergänge)	93
Abb. 78:	Frequenzverhalten von Schienenfehlern im Bereich der Signaltechnik am linken Achslager	95
Abb. 79:	Frequenzverhalten von Schienenfehlern im Bereich der Signaltechnik am rechten Achslager	97
Abb. 80:	IVL-Plan 1	115
Abb. 81:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,100 km bis 13,700 km (ALB linke Schiene)	116
Abb. 82:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,100 km bis 13,700 km (ALB rechte Schiene)	116
Abb. 83:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,700 km bis 14,100 km (ALB linke Schiene)	117
Abb. 84:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,700 km bis 14,100 km (ALB rechte Schiene)	117
Abb. 85:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,100 km bis 14,700 km (ALB linke Schiene)	118
Abb. 86:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,100 km bis 14,700 km (ALB rechte Schiene)	118
Abb. 87:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,700 km bis 15,100 km (ALB linke Schiene)	119

8 Verzeichnisse

Abb. 88:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,700 km bis 15,100 km (ALB rechte Schiene)	119
Abb. 89:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,600 km bis 19,900 km (ALB linke Schiene)	120
Abb. 90:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,600 km bis 19,900 km (ALB rechte Schiene)	120
Abb. 91:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,900 km bis 20,200 km (ALB linke Schiene)	121
Abb. 92:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,900 km bis 20,200 km (ALB rechte Schiene)	121
Abb. 93:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 31,900 km bis 32,170 km (links) und der Station 32,600 km bis 32,870 km (rechts) im ALB der linken Schiene.....	122
Abb. 94:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 31,900 km bis 32,170 km (links) und der Station 32,600 km bis 32,870 km (rechts) im ALB der rechten Schiene	122
Abb. 95:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 33,370 km bis 33,640 km (links) und der Station 34,180 km bis 34,450 km (rechts) im ALB der linken Schiene.....	123
Abb. 96:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 33,370 km bis 33,640 km (links) und der Station 34,180 km bis 34,450 km (rechts) im ALB der rechten Schiene.	123
Abb. 97:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,000 km bis 67,300 km (ALB linke Schiene)	124
Abb. 98:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,000 km bis 67,300 km (ALB rechte Schiene)	124
Abb. 99:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,300 km bis 67,700 km (ALB linke Schiene)	125
Abb. 100:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,300 km bis 67,700 km (ALB rechte Schiene)	125
Abb. 101:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,700 km bis 68,400 km (ALB linke Schiene)	126
Abb. 102:	Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,700 km bis 68,400 km (ALB rechte Schiene)	126

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen Größen und der Signalverarbeitung zwischen der Inspektionsmessung und dem Fahrwegmonitoring.....	5
Tabelle 2: Konfigurationseinstellungen des GNSS-Empfängers der Firma Precise Positioning Management (PPM) am Monitoringsystem des RAILab 3 [PPM, 2020].....	14
Tabelle 3: Anforderung der IMU für die Inspektionsmessung und das Fahrwegmonitoring [MEMSIC, 2011; iMAR, 2014].....	17
Tabelle 4: Beschreibung der in Abb. 11 dargestellten Systemmodule.....	24
Tabelle 5: Absoluter Bezug zwischen IMU und Sensorsystemen des Monitoringsystems am RAILab 3.....	27
Tabelle 6: Sensoreigenschaften des Monitoringsystems am RAILab 3 für die Messung der Pfeil- und Längshöhe (Stand 19.03.2020).....	27
Tabelle 7: Auflösung der Messsysteme für $v = 100$ km/h [SANDNER, 2020].....	27
Tabelle 8: Teilungsverhältnisse der Wandersehenmessung für die Regelinspektion der DB Netz AG zur Bestimmung der Gleislagequalität [vgl. DB821.2001, 2020].....	30
Tabelle 9: Inspektionsintervalle der Hauptgleise [vgl. DB821.2001, 2020].....	33
Tabelle 10: Bewertungsmatrix der Übereinstimmungsmerkmale.....	44
Tabelle 11: Gruppierung der Wellenlängenbereiche von λ für Fehler der Längshöhe nach EN13848-1:2016 (D) [vgl. DIN-31051, 2012].....	45
Tabelle 12: Zuordnung von Wellenlängen und Frequenzen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h zur Eingrenzung der Einzelfehler an den erläuterten Beispielen der Gleislage, Fahrbahnkomponenten und Schienenoberfläche.....	54
Tabelle 13: Auflösung der Rechenzeit einer Wavelet-Transformation nach Ausdehnung der Störstelle und Messwerten.....	57
Tabelle 14: Bewertung von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstück von Weichen.....	65
Tabelle 15: Eingrenzung der Streckenabschnitte nach Einzelfehlern und Verfügbarkeit der Monitoringdaten.....	70
Tabelle 16: Abweichungen aus der Ist- und Referenzkrümmung.....	71
Tabelle 17: Konstruktionsmerkmale der analysierten Weichen.....	85
Tabelle 18: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 72 dargestellten Frequenzbänder.....	87
Tabelle 19: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 73 dargestellten Frequenzbänder.....	88
Tabelle 20: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 74 dargestellten Frequenzbänder.....	89
Tabelle 21: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen am Herzstückbereich (Weiche) der in Abb. 75 dargestellten Frequenzbänder.....	90
Tabelle 22: Trassierungs- und Fahrbahnmerkmale der analysierten Bahnübergänge.....	91
Tabelle 23: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Bahnübergängen der in Abb. 76 dargestellten Frequenzbänder.....	92
Tabelle 24: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Bahnübergängen der in Abb. 77 dargestellten Frequenzbänder.....	94
Tabelle 25: Fahrbahn- und Trassierungsmerkmale in Verbindung mit den analysierten Signalstandorten.....	95
Tabelle 26: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Signalstandorten der in Abb. 78 dargestellten Frequenzbänder.....	96
Tabelle 27: Vergleich von Übereinstimmungsmerkmalen an Signalstandorten der in Abb. 79 dargestellten Frequenzbänder.....	98

8.4 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ABS	Ausbaustrecke
ABW	Außenbogenweiche
AG	Aktiengesellschaft
ALB	Achslagerbeschleunigungen
ALV	Anlagenverantwortlicher
Bf	Bahnhof
BÜ	Bahnübergang
BR	Baureihe
Bstg	Bahnsteig
CWT	Kontinuierliche Wavelet Transformation (engl.: Continuous-Wavelet-Transformation)
DB	Deutsche Bahn
DGPS	Differentials Verortungssystem (engl. Differential Global Positioning System)
DPS	Dreipunktsignal
EBO	Eisenbahnbetriebsordnung
EBÜT 80	Einheits-Bahnübergangstechnik
EN	Europäische Norm
ET	Elektrischer Triebwagen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EW	Einfache Weiche
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EU	Europäische Union
EÜ	Eisenbahnüberführung
FSS	Frostschuttschicht
FFT	Fast-Fourier-Transformation
LuFV	Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung
LS	Lichtsignal
FKS	Fahrzeugkoordinatensystem
FwM	Fahrwegmonitoring
GIS	Geoinformationssystem
GMTZ	Gleismesstriebzug
GNSS	Globales Navigations- und Satellitensystem (engl.: Global Navigation Satellite System)
GPS	Globales Positionierungssystem (engl.: Global Positioning System)
GTB	Geotechnischer Bericht
GUM	Leitfaden zum Ausdruck der Messunsicherheit (engl. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)
GVP	Gleisvermarkungspunkt
GWB	Gleiswechselbetrieb
Hbf	Hauptbahnhof
Hg	Höchstgeschwindigkeit
HMS	Horizontal-Mess-System
HP-Filter	Hochpass-Filter
HPS	Hochpass-Signal
IBW	Innenbogenweiche
IC	Intercity
ICE	Intercity-Express
IMU	Inertialmesssystem (engl.: Inertial Measurement Unit)

8.4 Abkürzungsverzeichnis

Imvg	Ingenieurvermessung Gleisvermarkungsplan
INS	Inertiales Navigationssystem (engl.: Inertial Navigation System)
IsM	Inspektionsmessung
ISO	Isolierstoß
IvI-Plan	Ingenieurvermessungslageplan
LA	Langsamfahrstelle
NBS	Neubaustrecke
NeiTech	Neigetechnik
PD	Produktionsdurchführung (Konzerneinheit der DB Netz AG)
PLV	Planumsverbesserung
PPP	Präzise Punktpositionierung (engl. Precise Point Positioning)
PSS	Planumsschutzschicht
RAILab	Rollendes-Analyse und Inspektionslabor
RB	Regionalbereich
RBÜT-Pintsch	Rechnergesteuerte Bahnübergangssicherung
SAP	Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung
SBAS	Satellitenbasiertes Ergänzungssystem (engl. Satellite Based Augmentation System)
SR	Störgrößen-Reaktion
SÜ	Straßenüberführung
TP-Filter	Tiefpass-Filter
UIC	Internationaler Eisenbahnverband (frz. Union internationale des chemins de fer)
VzG	Verzeichnis örtlich zulässiger Geschwindigkeit
Vzul	Örtlich zugelassene Geschwindigkeit
WK	Wavelet-Koeffizienten

8.5 Variablenverzeichnis

Zeichen	Erklärung	Einheit
A	Flächeninhalt	m^2
a	Beschleunigung	m/s^2
a_n	Achslagerbeschleunigung normiert	m/s^2
b	Sehnenlänge (Basis)	m
C_ψ	Wavelet-Koeffizient	-
c	Wandersehne Teillänge I	m
D_z	Dreipunktsignal (Längshöhe)	mm
d	Wandersehne Teillänge II	m
F	Pseudo-Frequenzen	Hz
f	Frequenz	Hz
f_0	Grundfrequenz	Hz
h	Pfeilhöhe	mm
H	Höhenpunkt	m
H_{geo}	Hochwert	m
k	Krümmung	$1/km$
k_{anf}	Krümmungsanfang	$1/km$
k_{end}	Krümmungsende	$1/km$
L	Länge Trassierungselement	m
L_p	Lotfußpunkt	m
n	Zeitabschnitt	s
o	Fourier-Koeffizienten ungerader Anteil	-
p	Fourier-Koeffizienten gerader Anteil	-
s	Weg	m
R	Radius	m
R_{geo}	Rechtswert	m
r	Korrelationskoeffizienten	-
T	Periodendauer	s
t	Zeit	s
q	Raddurchmesser	m
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h
v_e	Entwurfsgeschwindigkeit	km/h
v_m	Zielgeschwindigkeit	km/h
u	Radumdrehung	m/s^2
λ	Wellenlänge	m
λ_o	Wellenlänge obere Grenze	m
λ_u	Wellenlänge untere Grenze	m
σ	Standardabweichung	-
τ	Tangentenwinkel	rad
ω	Kreisfrequenz	rad
φ	Winkeldifferenz	gon
ζ	Translationsparameter Wavelet	-
η	Dilatationsparameter Wavelet	-

9 Anhang

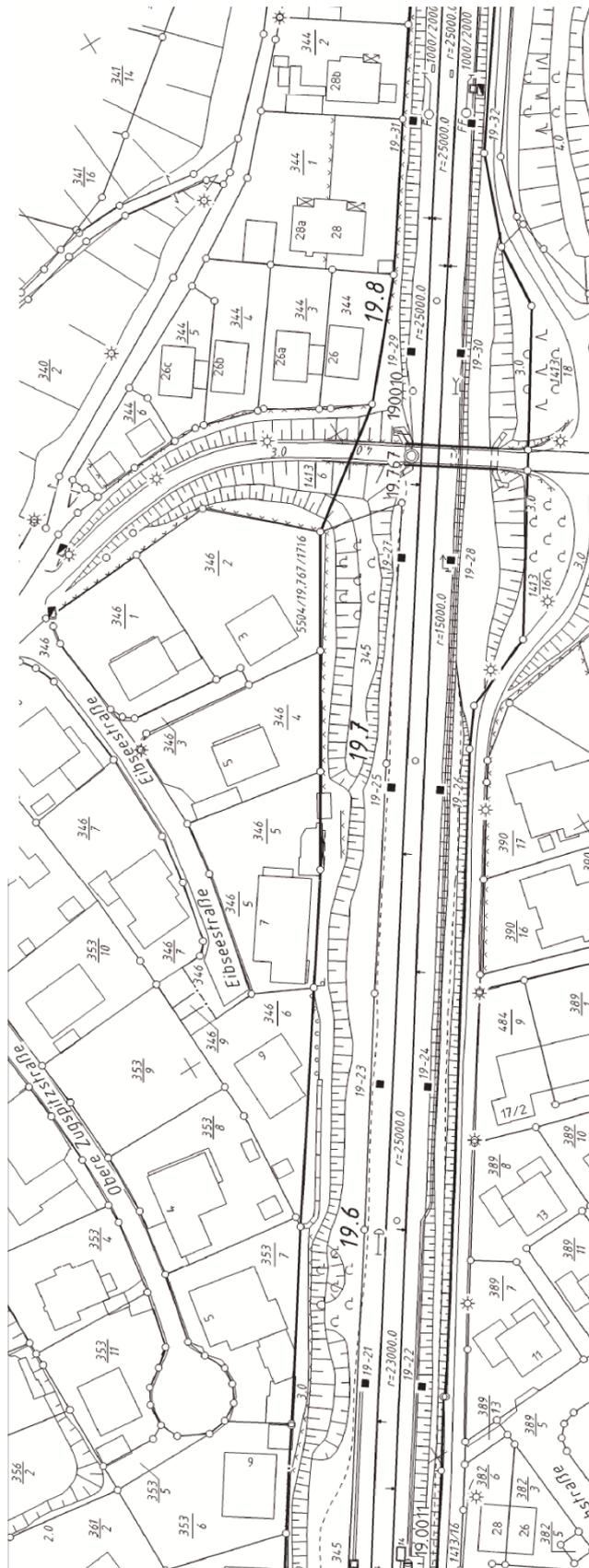


Abb. 80: IVL-Plan 1

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 13,100 km – 13,700 km.

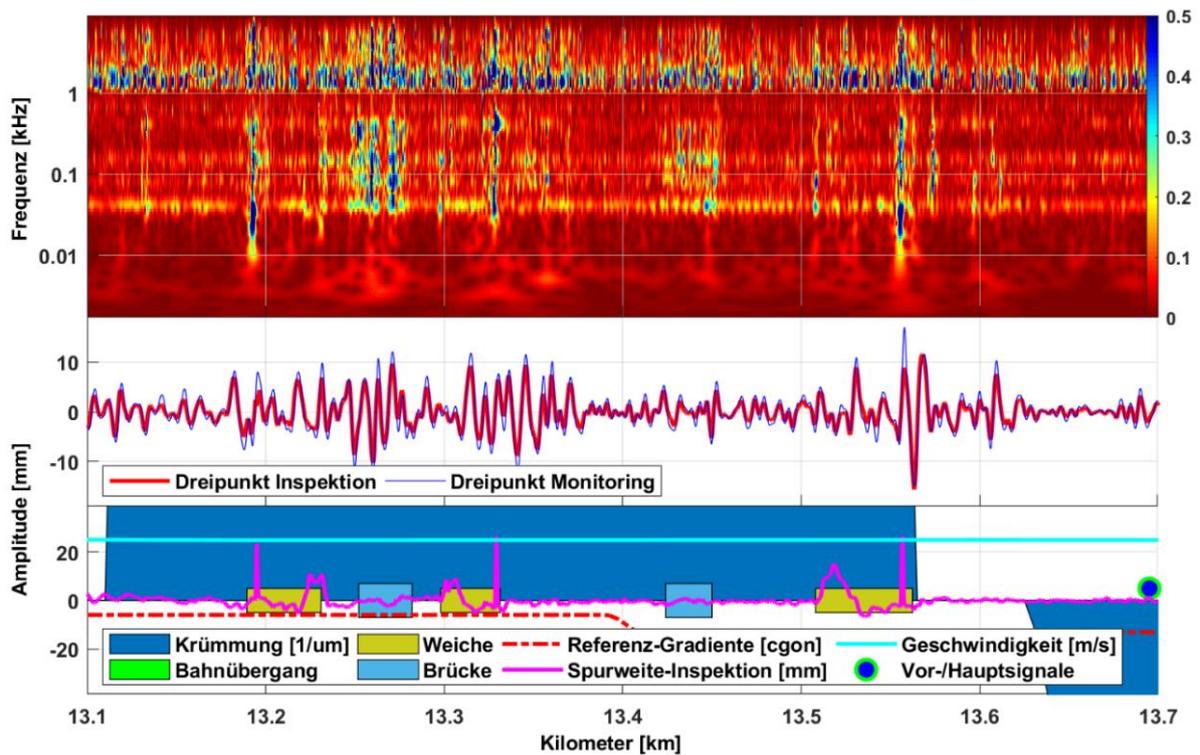


Abb. 81: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,100 km bis 13,700 km (ALB linke Schiene)

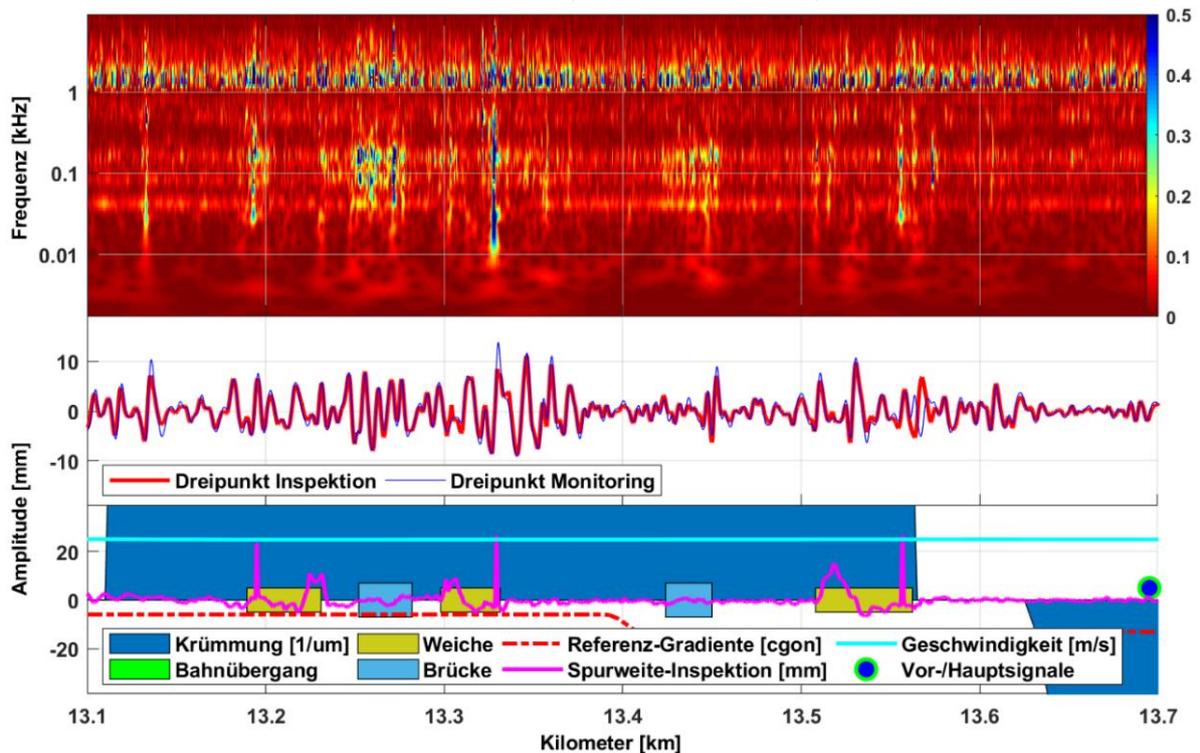


Abb. 82: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,100 km bis 13,700 km (ALB rechte Schiene)

Auswertung der Streckenkilometer 13,700 km – 14,100 km.

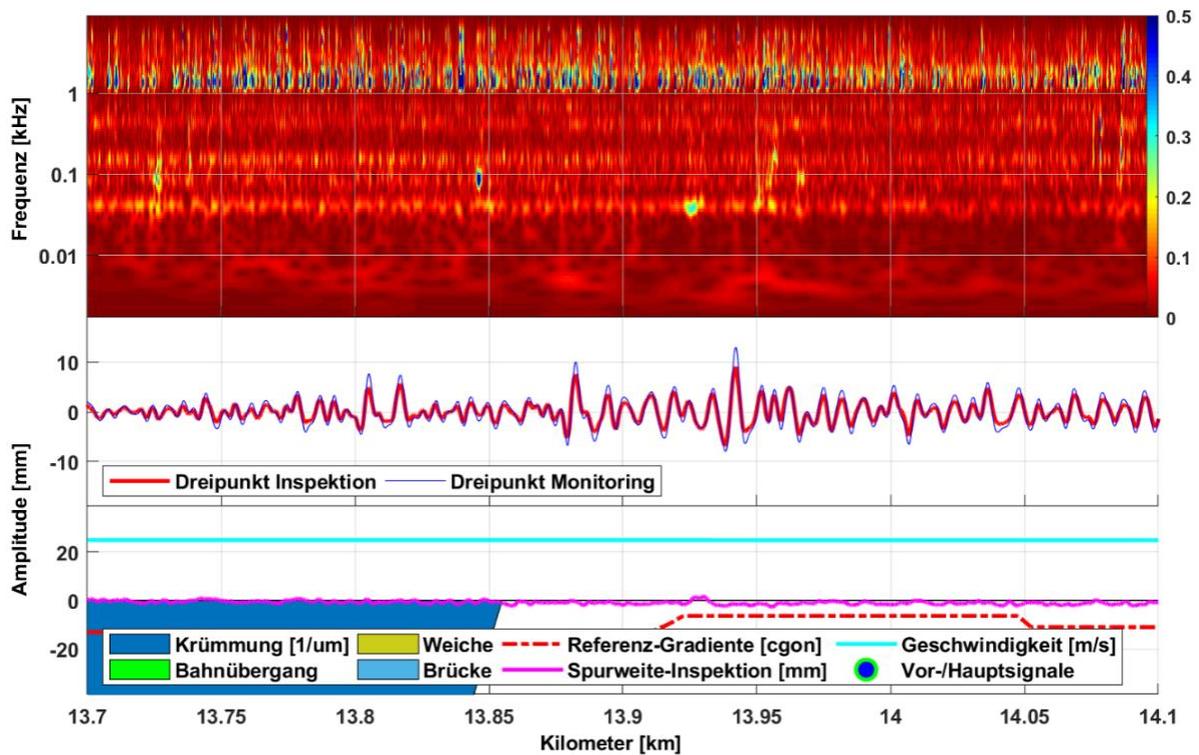


Abb. 83: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,700 km bis 14,100 km (ALB linke Schiene)

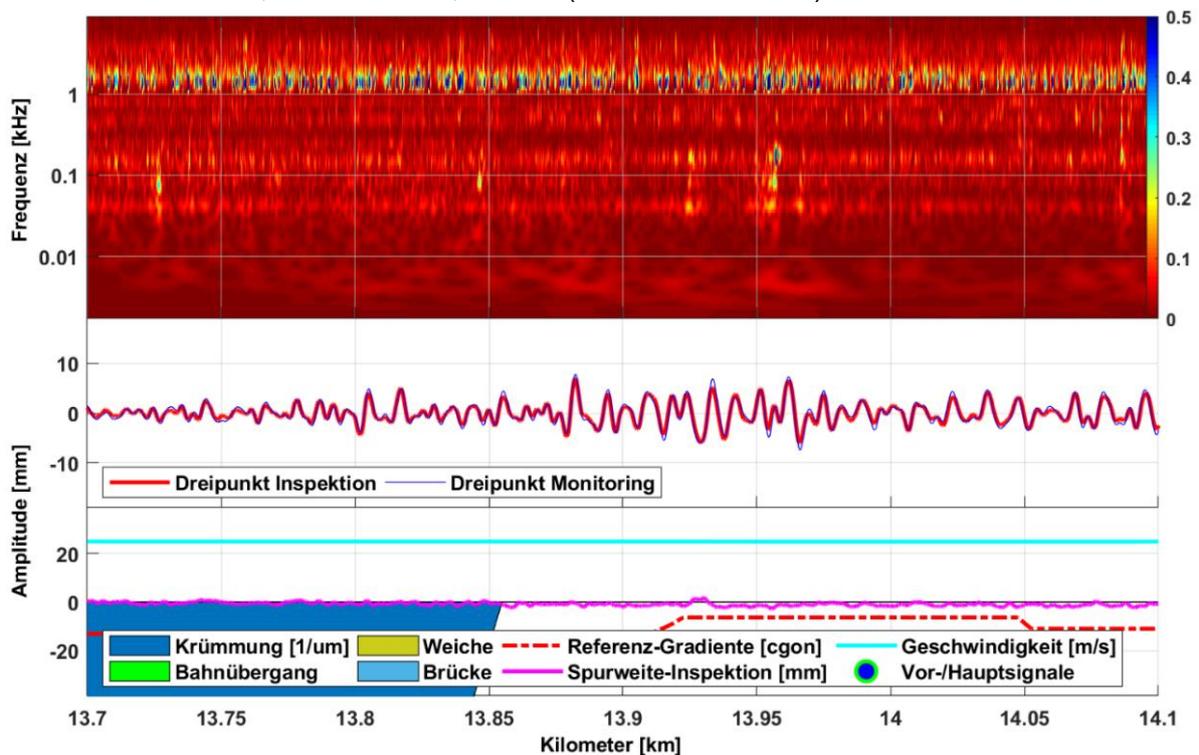


Abb. 84: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 13,700 km bis 14,100 km (ALB rechte Schiene)

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 14,100 km – 14,700 km.

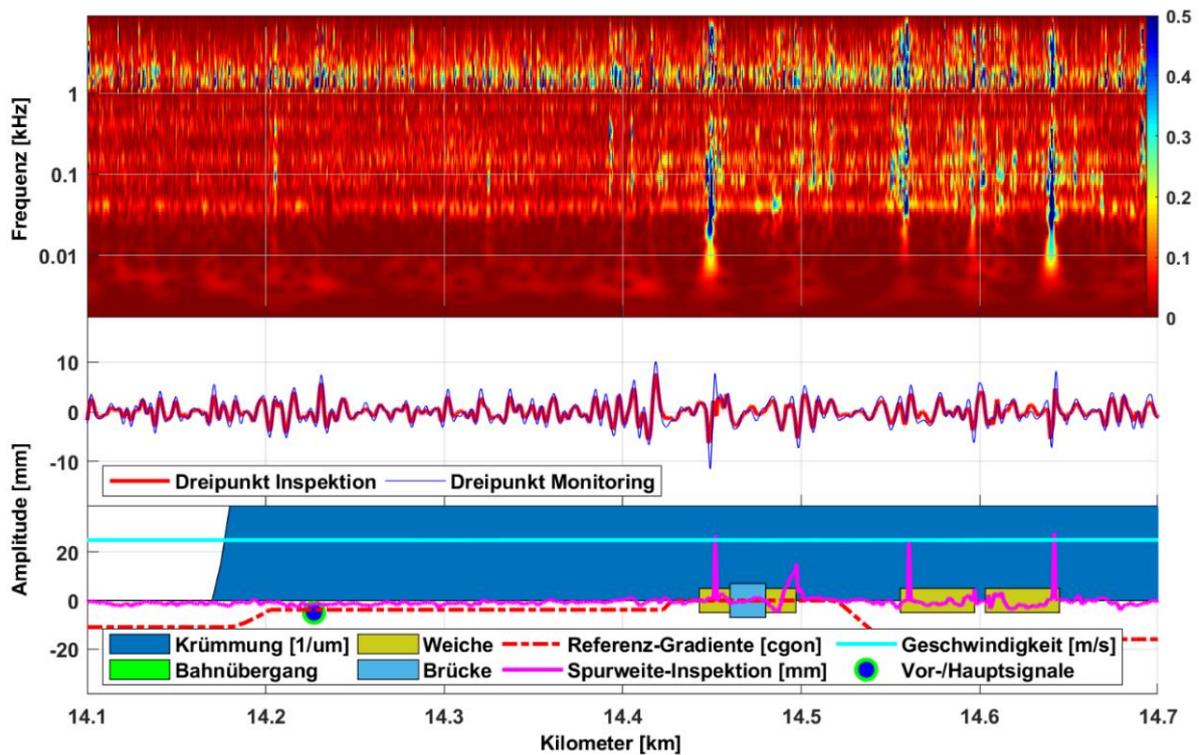


Abb. 85: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,100 km bis 14,700 km (ALB linke Schiene)

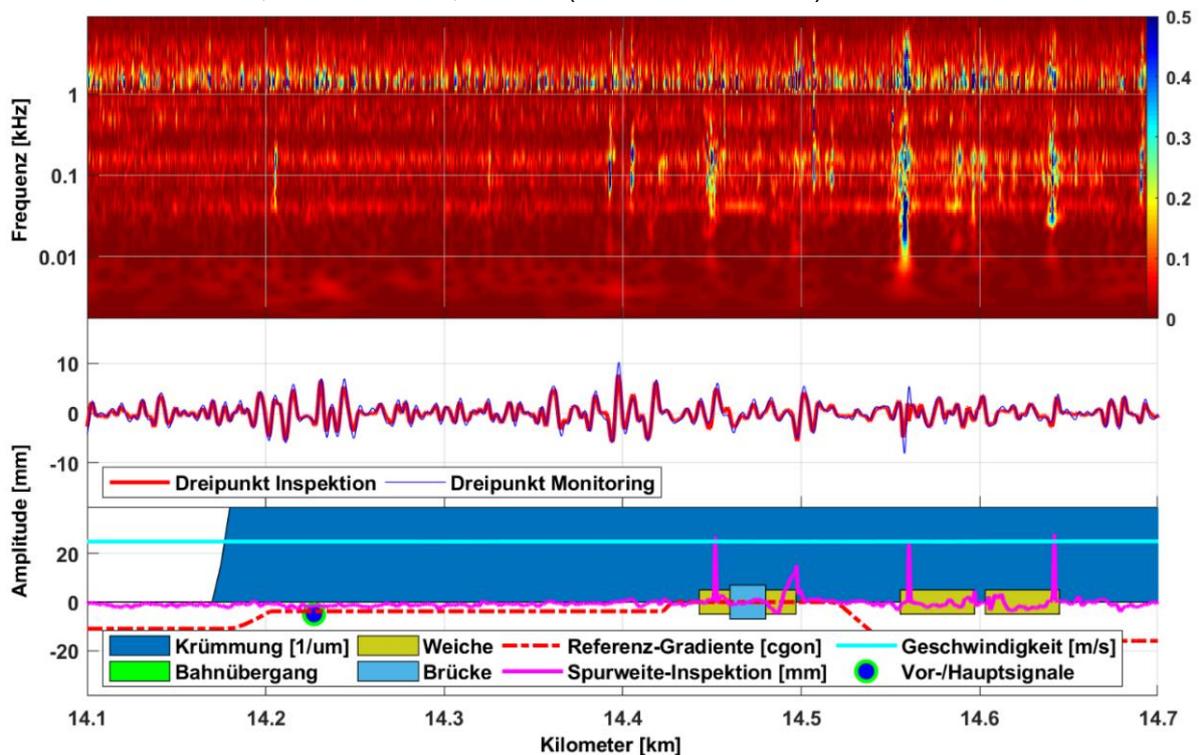


Abb. 86: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,100 km bis 14,700 km (ALB rechte Schiene)

Auswertung der Streckenkilometer 14,700 km – 15,100 km.

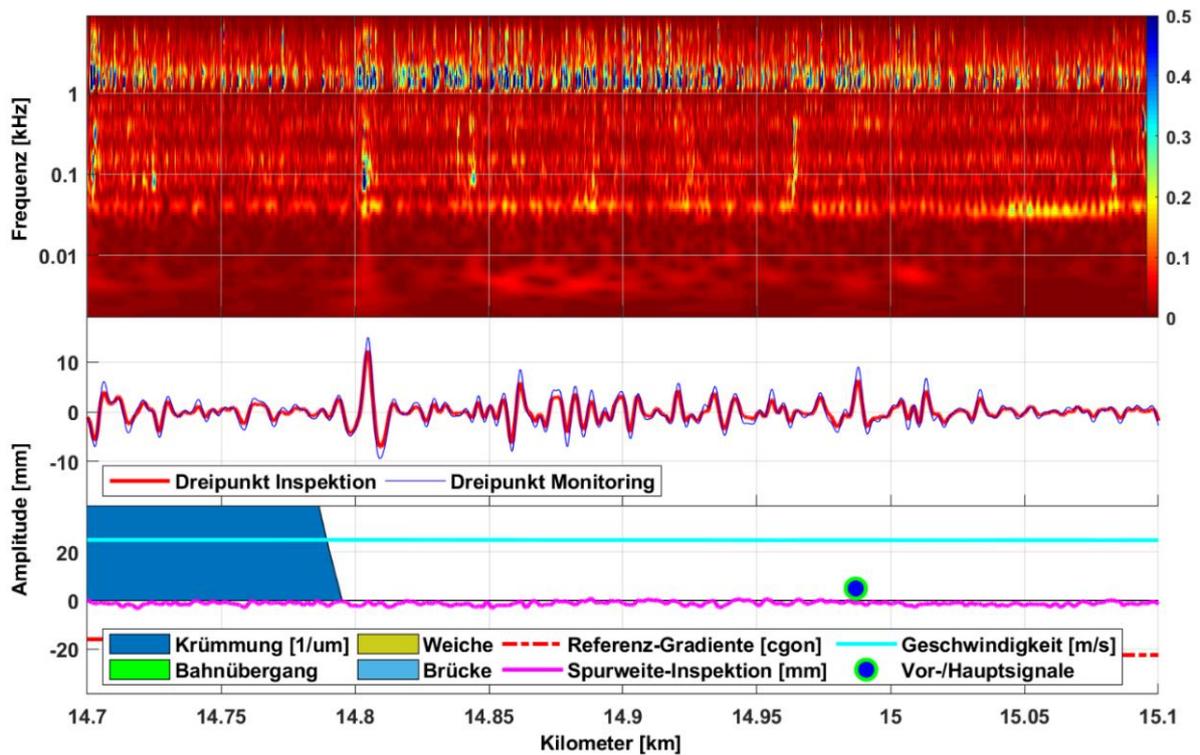


Abb. 87: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,700 km bis 15,100 km (ALB linke Schiene)

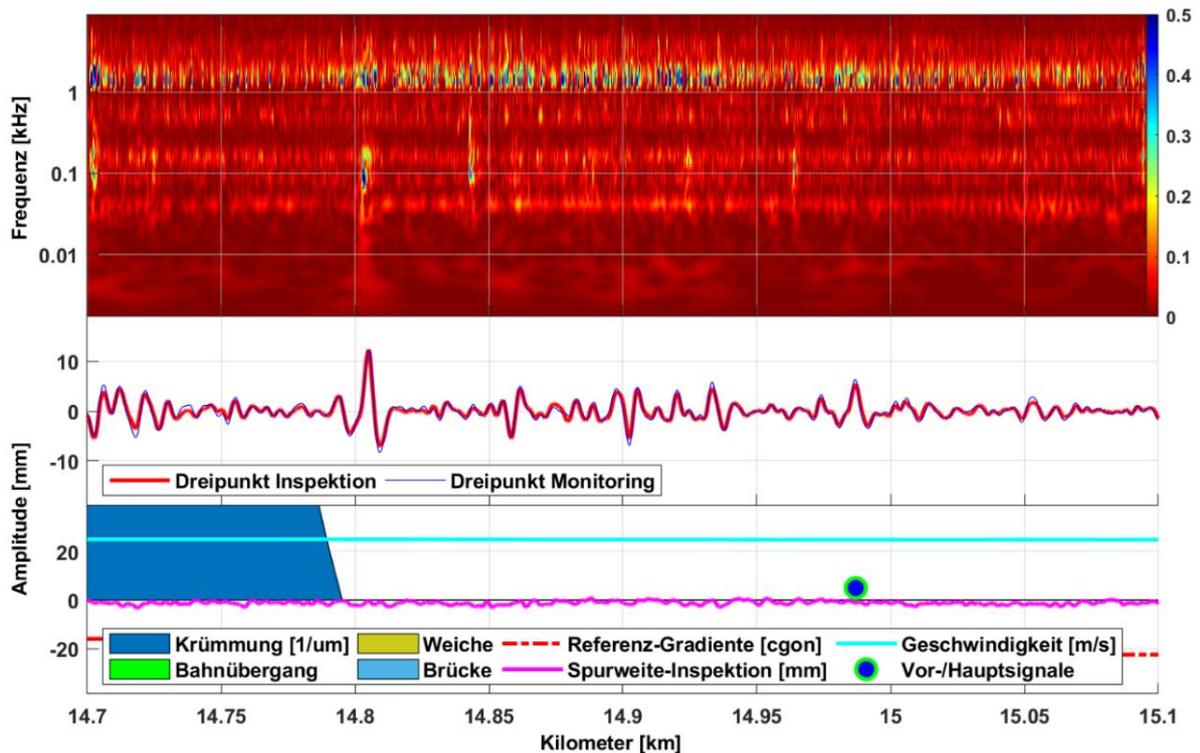


Abb. 88: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 14,700 km bis 15,100 km (ALB rechte Schiene)

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 19,600 km – 19,900 km.

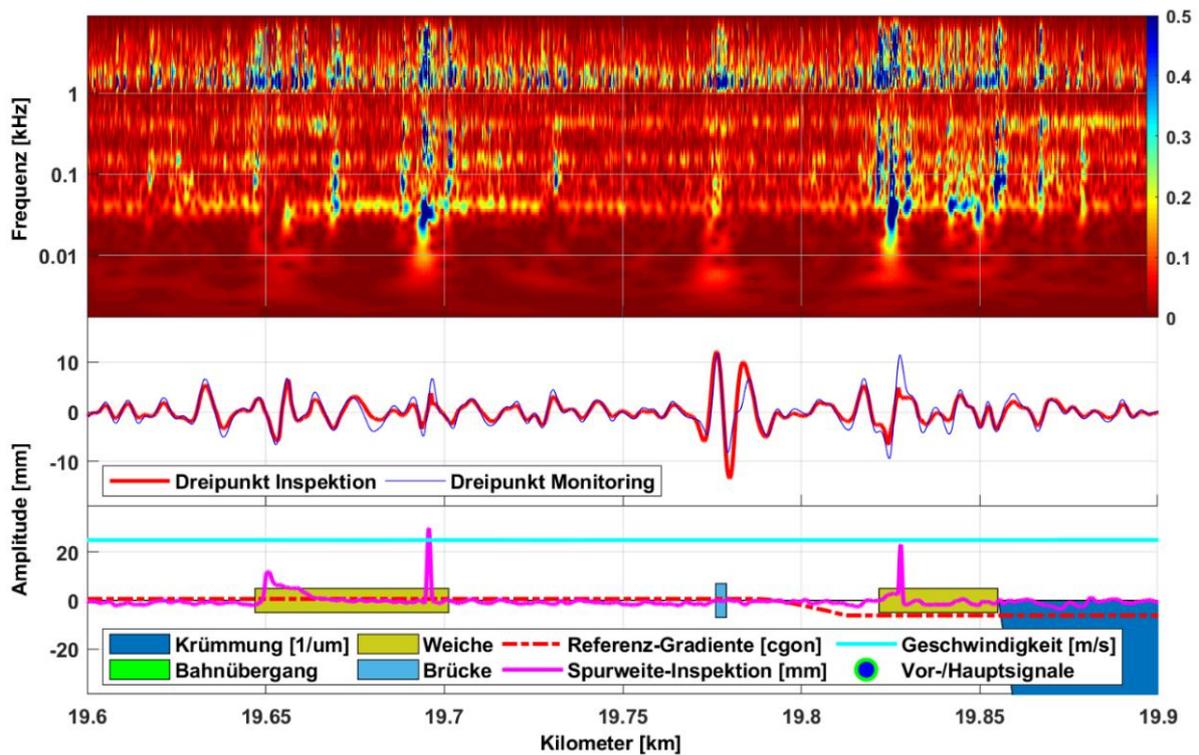


Abb. 89: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,600 km bis 19,900 km (ALB linke Schiene)

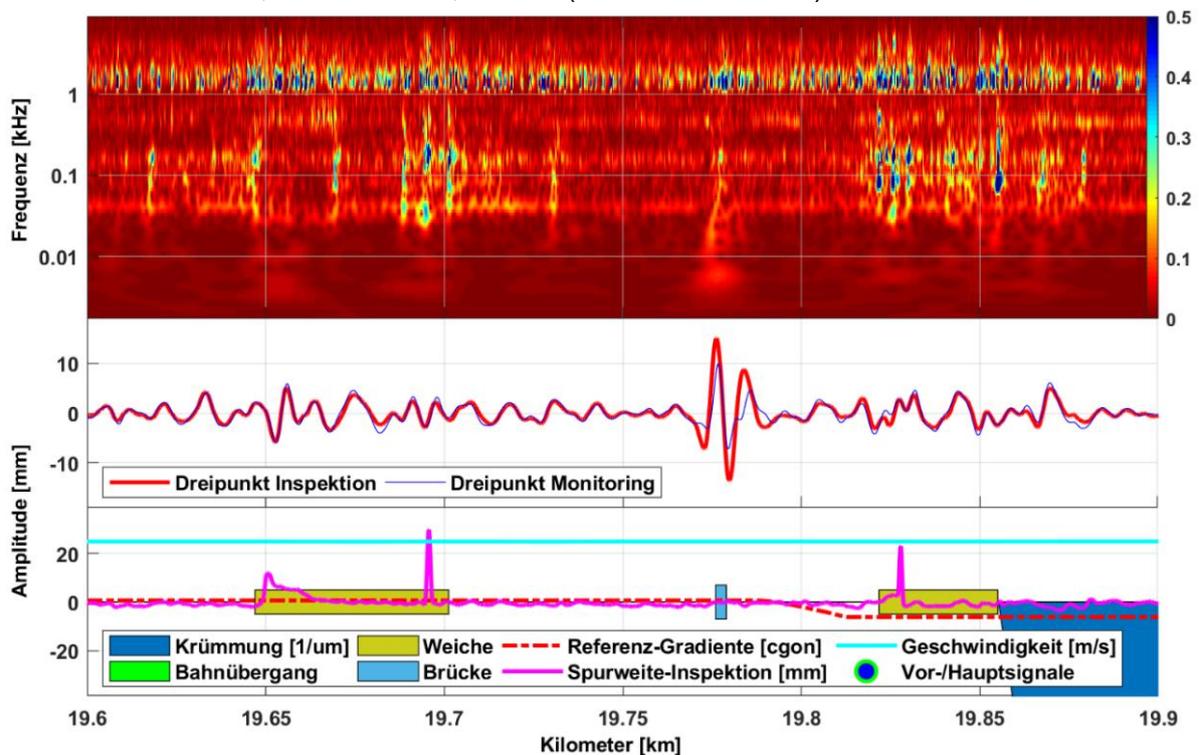


Abb. 90: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,600 km bis 19,900 km (ALB rechte Schiene)

Auswertung der Streckenkilometer 19,900 km – 20,200 km.

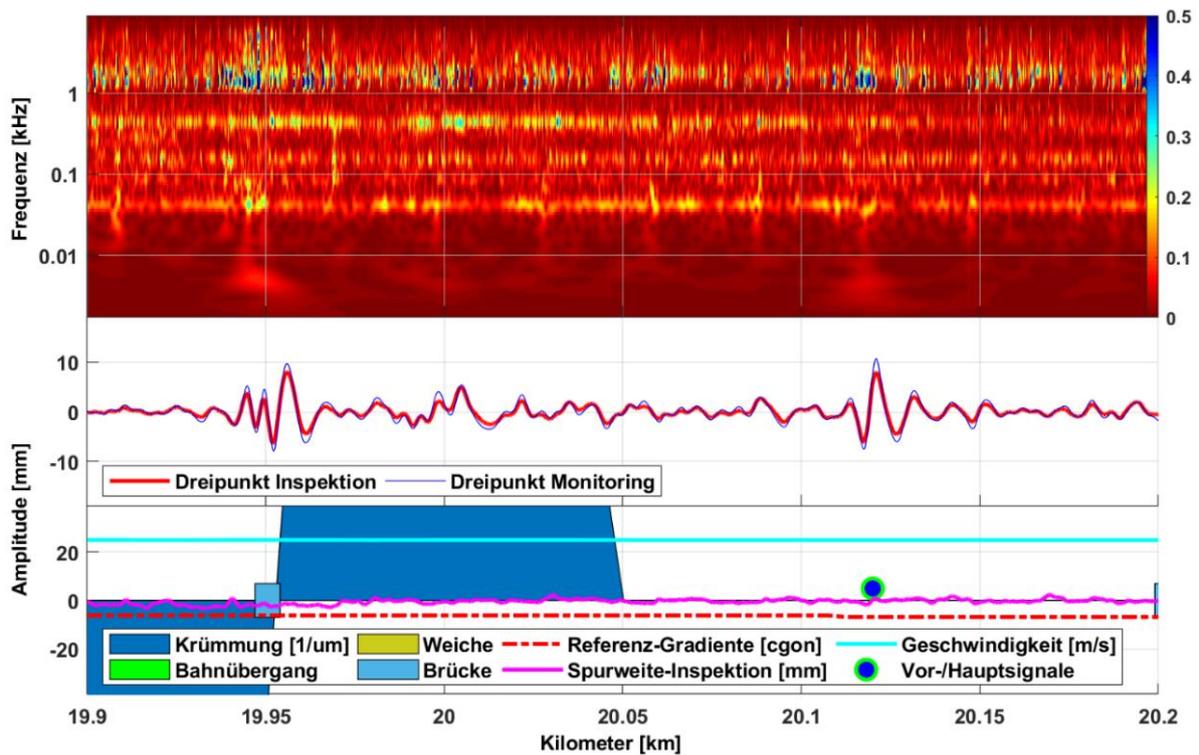


Abb. 91: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,900 km bis 20,200 km (ALB linke Schiene)

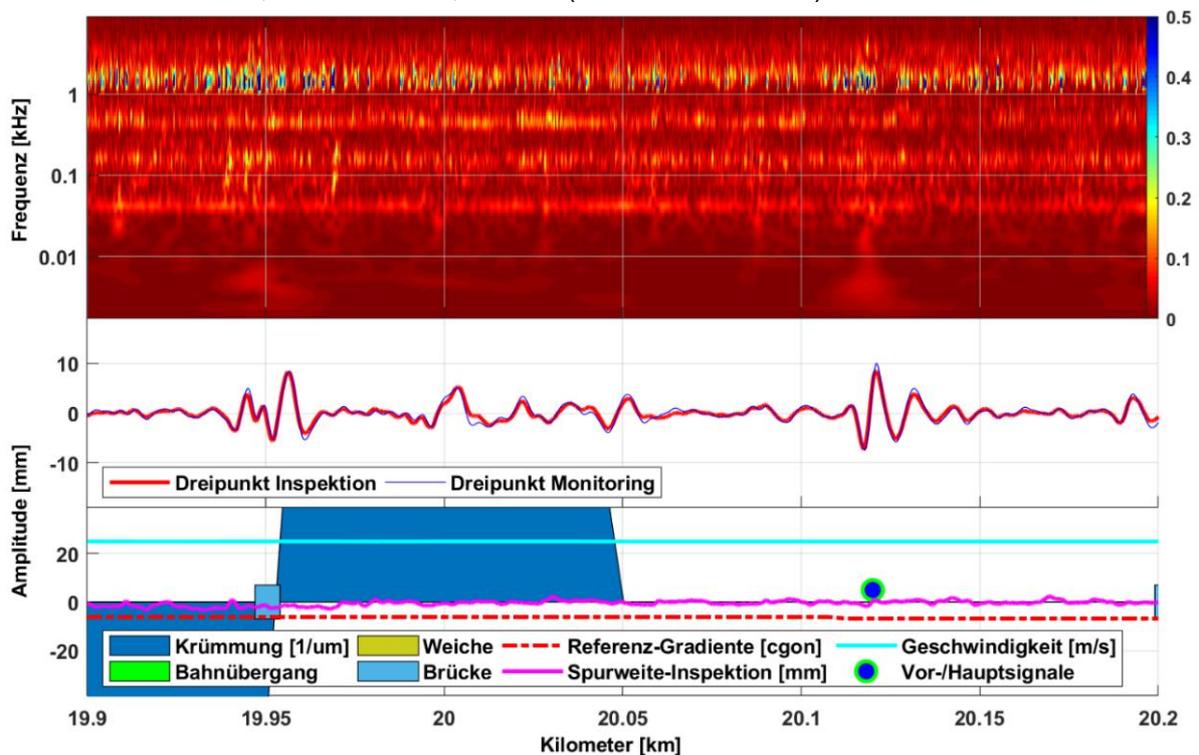


Abb. 92: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 19,900 km bis 20,200 km (ALB rechte Schiene)

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 31,900 km – 32,170 km; 32,600 km – 32,870 km.

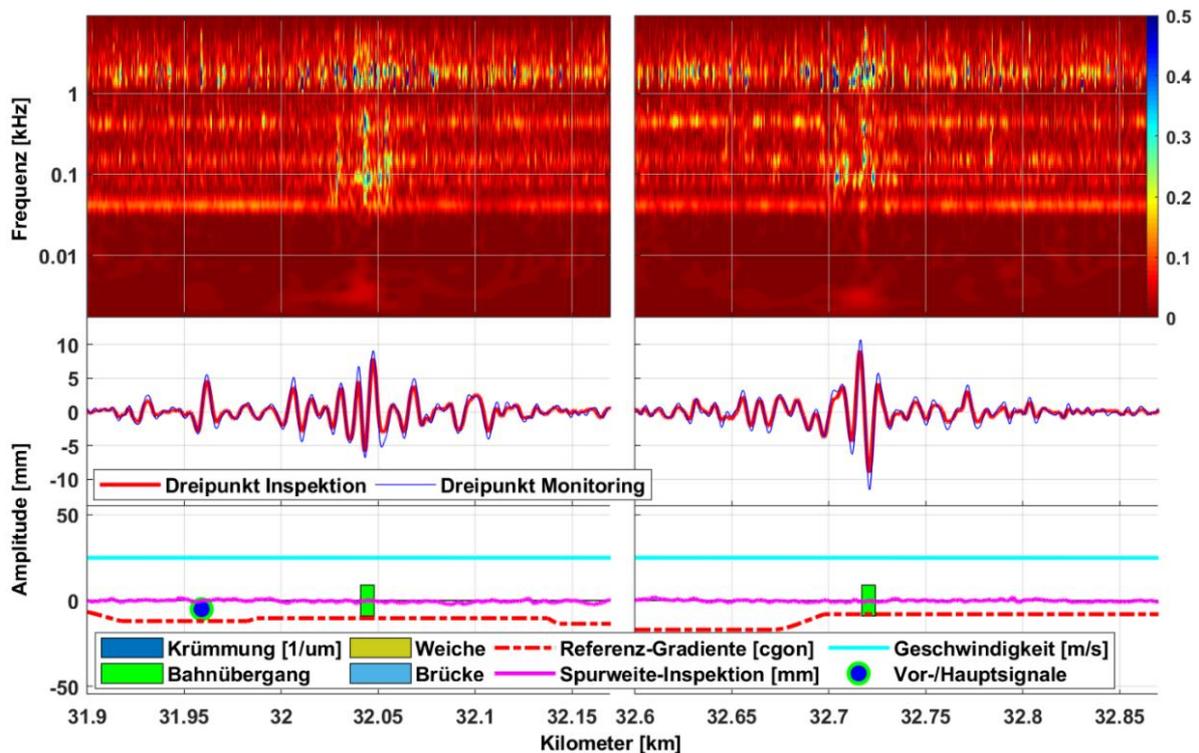


Abb. 93: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 31,900 km bis 32,170 km (links) und der Station 32,600 km bis 32,870 km (rechts) im ALB der linken Schiene

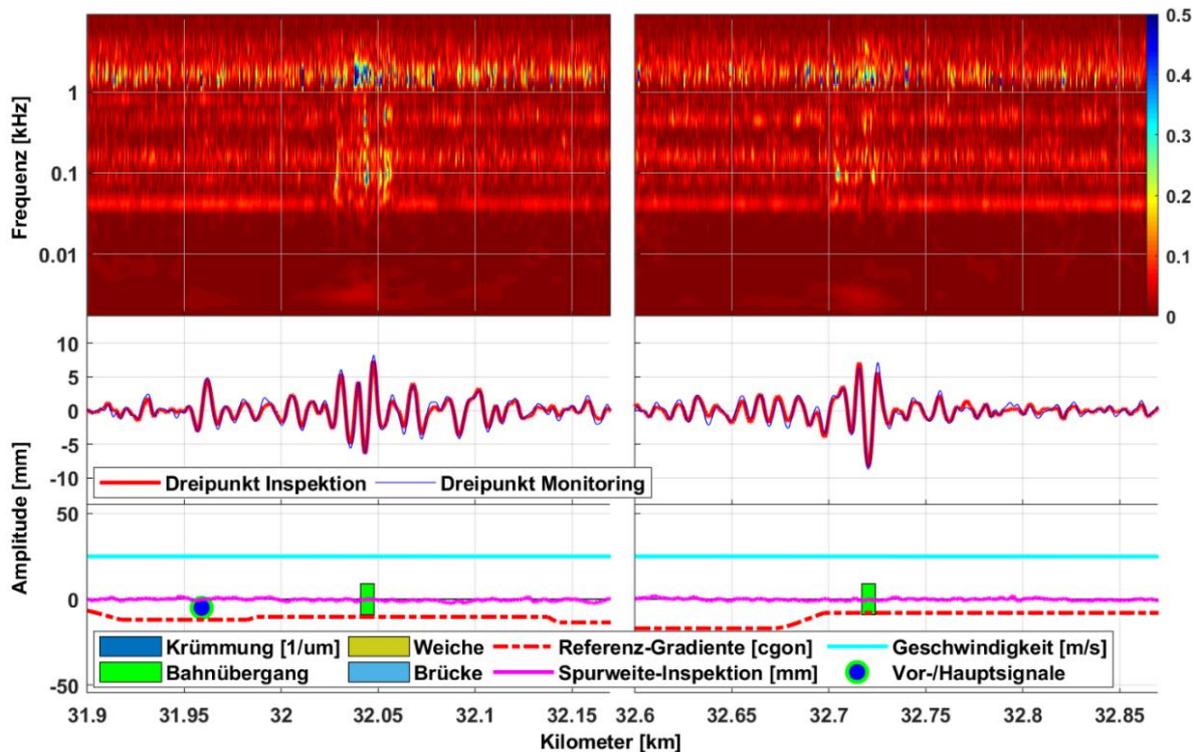


Abb. 94: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 31,900 km bis 32,170 km (links) und der Station 32,600 km bis 32,870 km (rechts) im ALB der rechten Schiene

Auswertung der Streckenkilometer 33,350 km – 33,620 km; 34,180 km – 34,500 km.

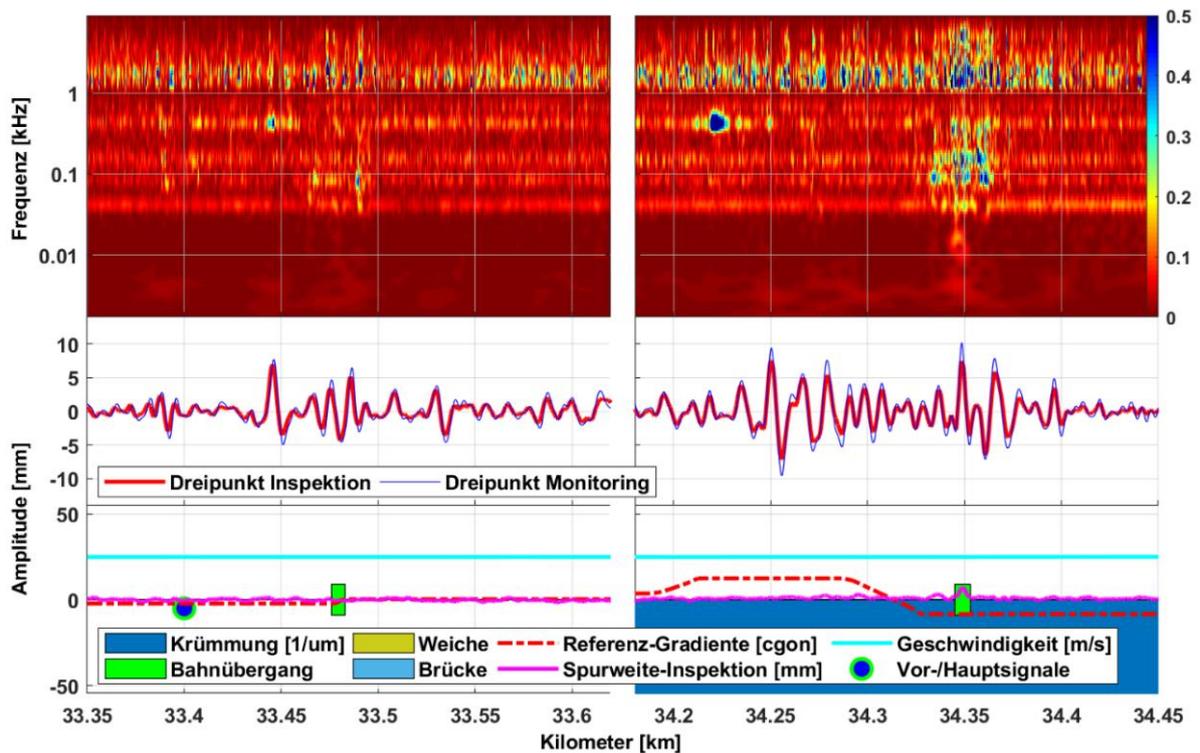


Abb. 95: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 33,370 km bis 33,640 km (links) und der Station 34,180 km bis 34,450 km (rechts) im ALB der linken Schiene

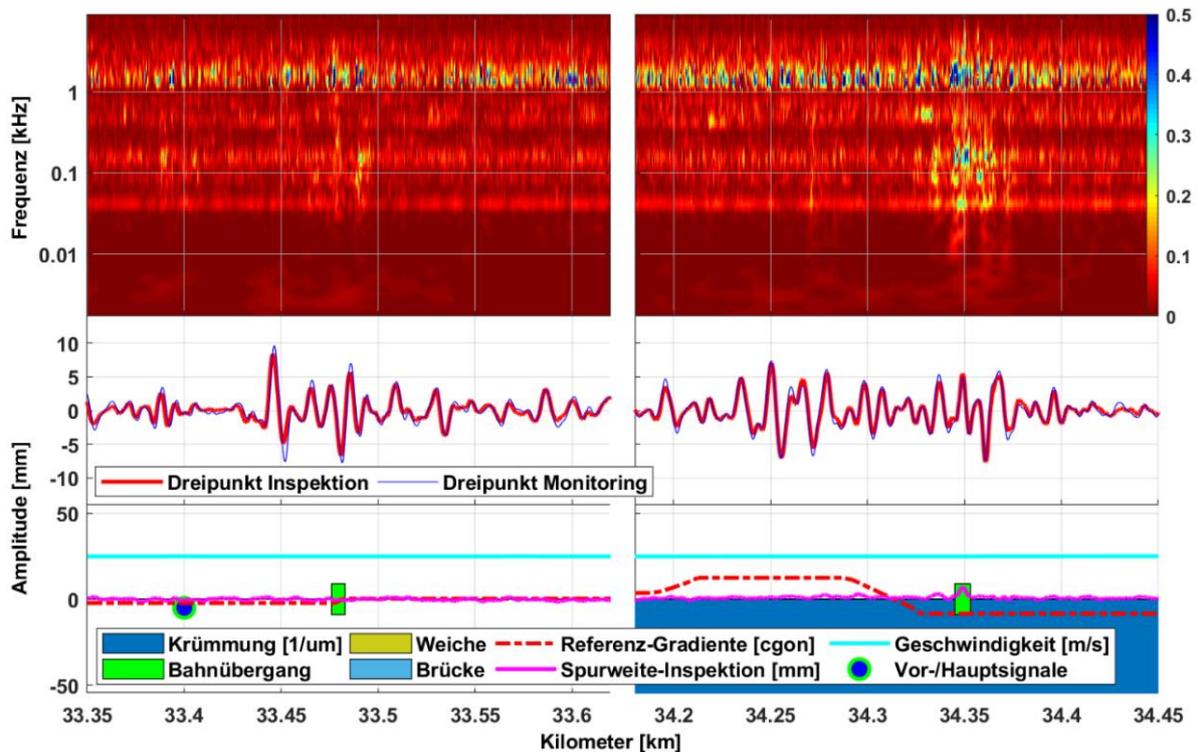


Abb. 96: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 33,370 km bis 33,640 km (links) und der Station 34,180 km bis 34,450 km (rechts) im ALB der rechten Schiene.

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 67,000 km – 67,300 km.

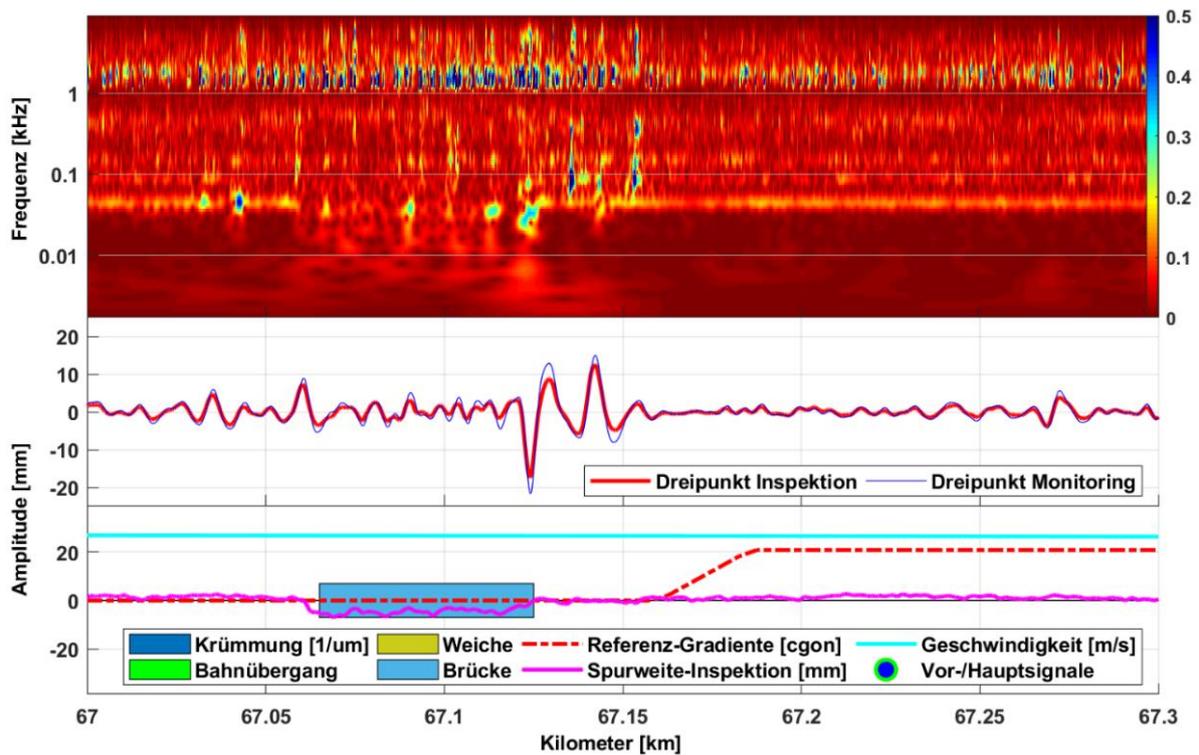


Abb. 97: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,000 km bis 67,300 km (ALB linke Schiene)

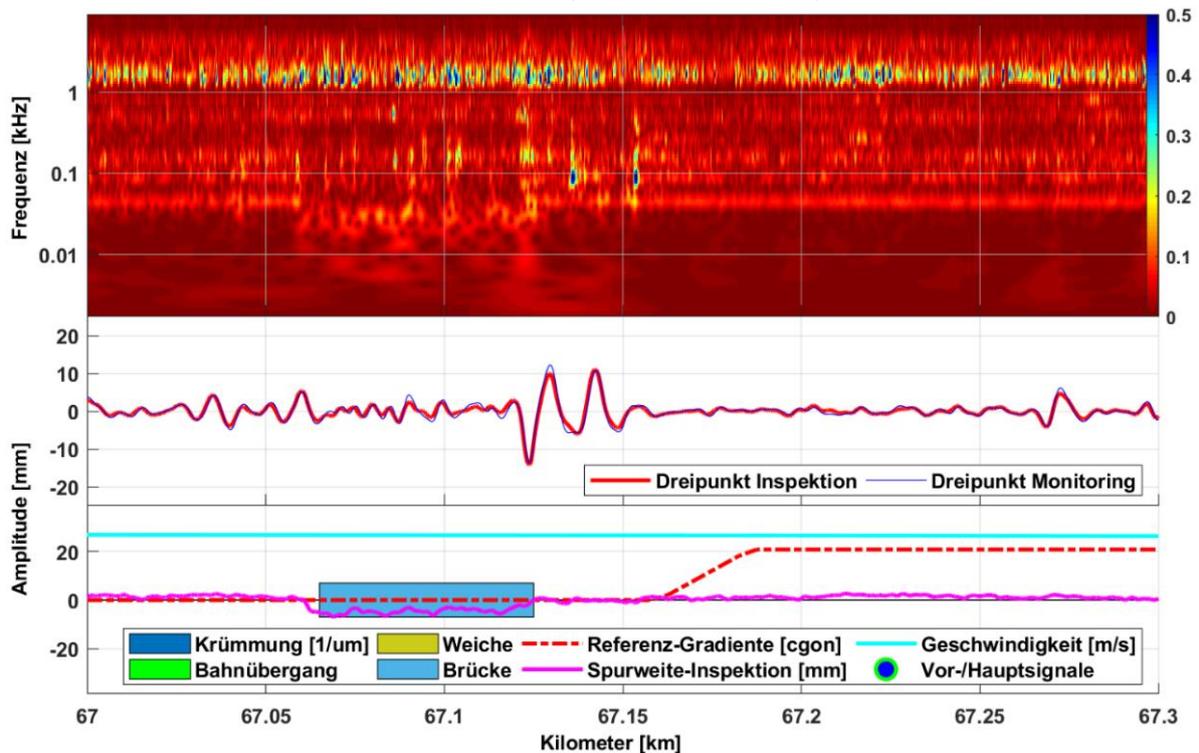


Abb. 98: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,000 km bis 67,300 km (ALB rechte Schiene)

Auswertung der Streckenkilometer 67,300 km – 67,700 km.

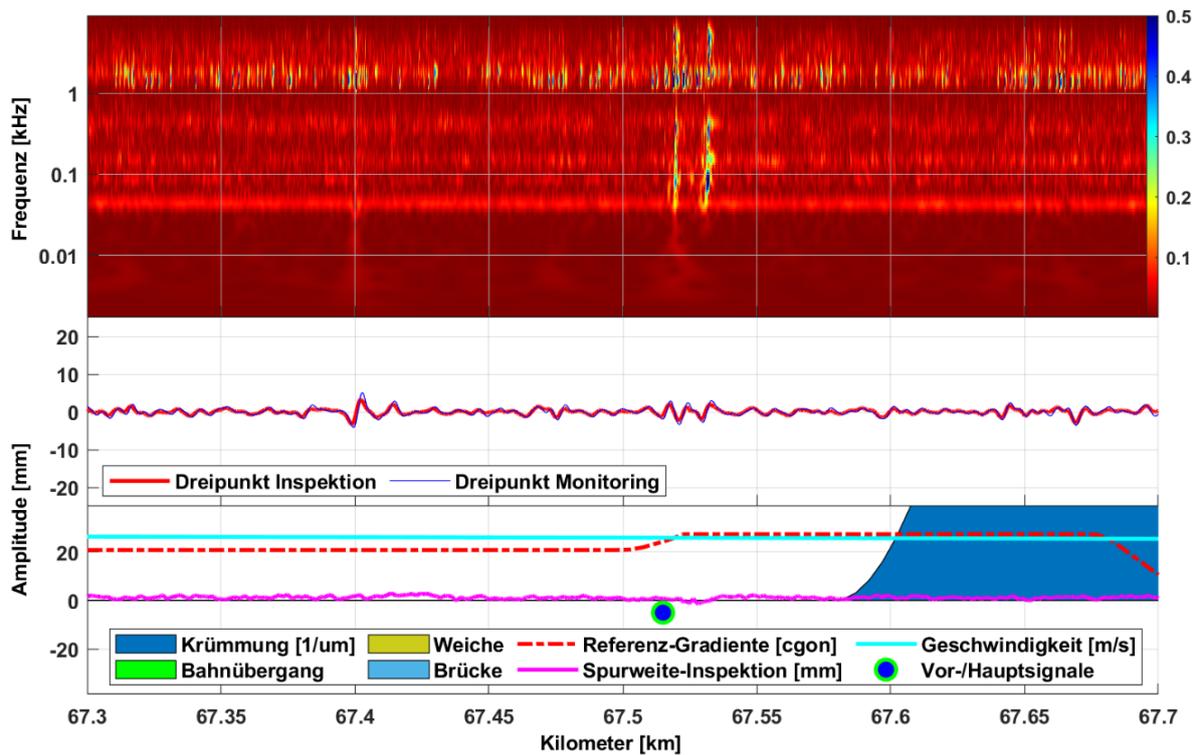


Abb. 99: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,300 km bis 67,700 km (ALB linke Schiene)

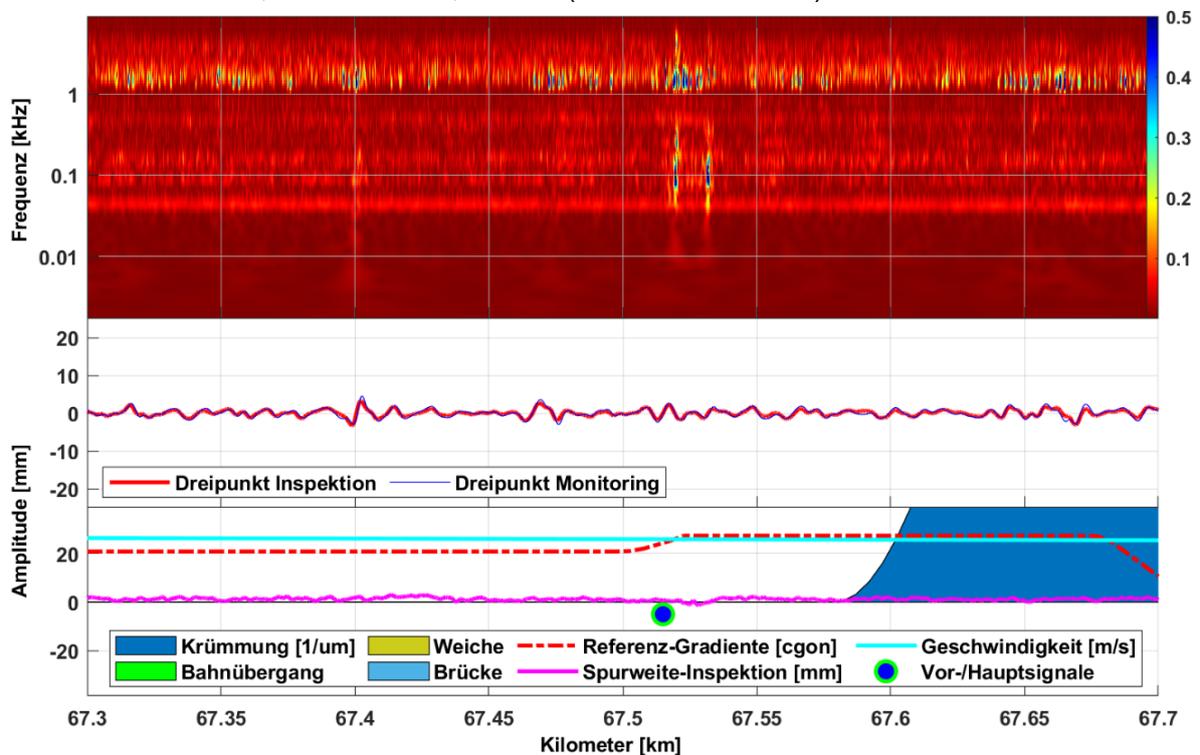


Abb. 100: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,300 km bis 67,700 km (ALB rechte Schiene)

9 Anhang

Auswertung der Streckenkilometer 67,700 km – 68,400 km.

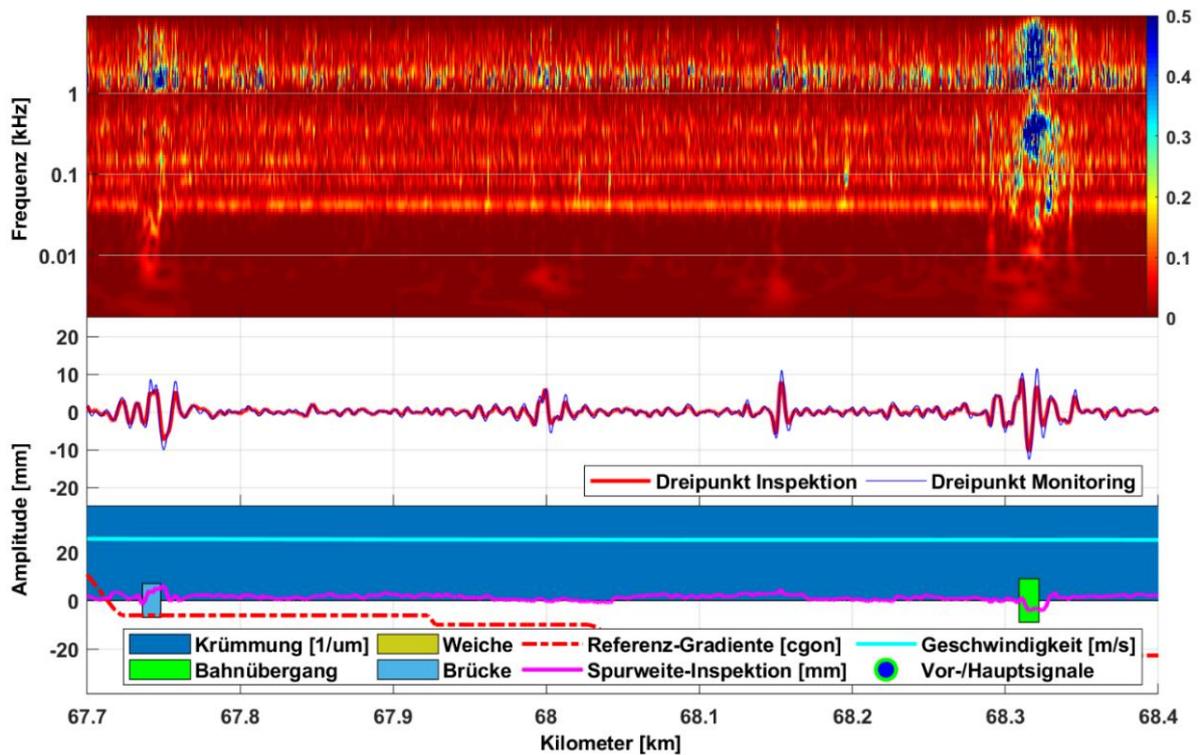


Abb. 101: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,700 km bis 68,400 km (ALB linke Schiene)

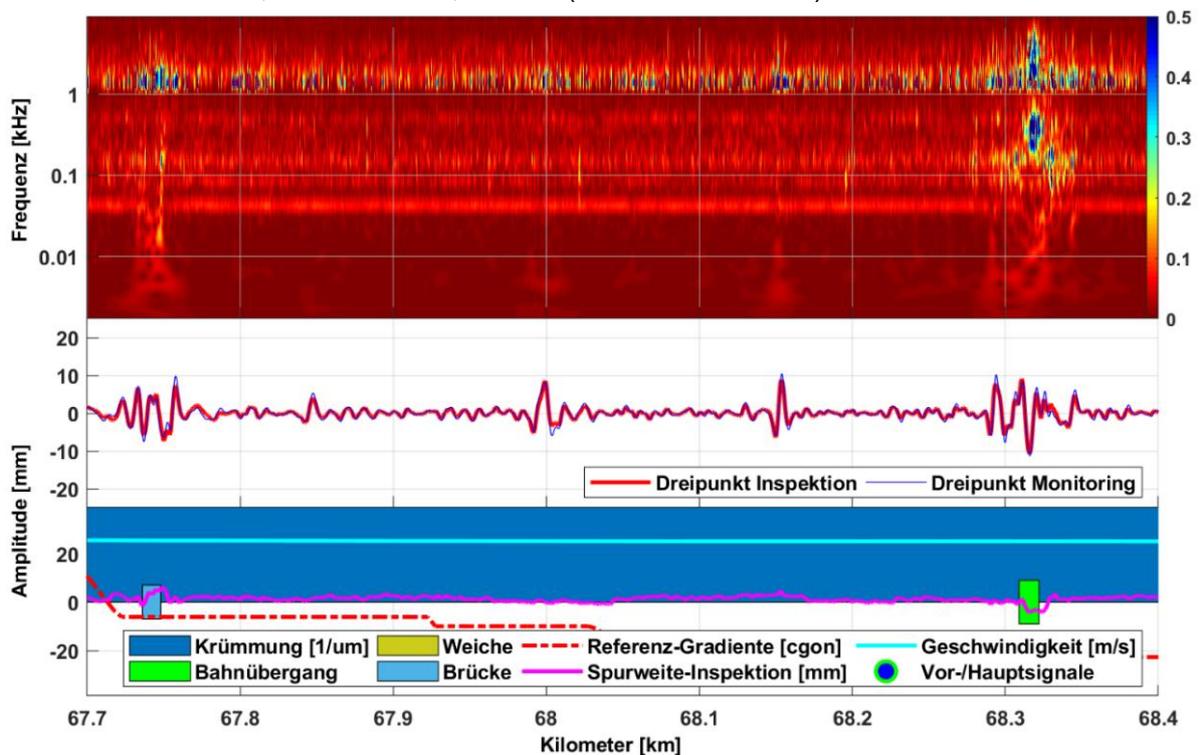


Abb. 102: Auswertung, Charakterisierung und Zuordnung von Gleislageveränderungen an der Station 67,700 km bis 68,400 km (ALB rechte Schiene)

Danksagung

Ein großer Dank gilt dem Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München, welcher unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich die Durchführung dieser Dissertation erst ermöglichte. Durch seine umfangreichen Erfahrungen trägt er einen maßgebenden Beitrag an der Umsetzung dieser Arbeit. Ganz besonders möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen bedanken, das mir auch in schwierigen Situationen einen großen Rückhalt gab und mich immer wieder neu motivierte. Dies gilt ebenfalls für die Kollegen des Lehrstuhls für Geodäsie. Vor allem möchte ich an dieser Stelle bei Herrn Dr. Ing Peter Wasmaier für seine tatkräftige Unterstützung danken.

Meinem Arbeitgeber der DB Netz AG gilt ebenso ein besonderer Dank. Stellvertretend möchte ich mich bei meinem Chef Herrn Dr. Ing. Manfred Zacher und meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Burchard Ripke bedanken. Durch die jahrelange Erfahrung im Bereich des Eisenbahnwesens standen mir die Kollegen jederzeit für Fragen und Antworten zur Verfügung.

Mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Stempfhuber verbindet mich mein gesamtes Master-Studium an der Beuth Hochschule für Technik Berlin. Ohne sein Arrangement, seine Hartnäckigkeit und den Kontakt zur Technischen Universität München wäre diese Arbeit am Lehrstuhl für Geodäsie nicht möglich gewesen. Ich möchte mich daher herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung auf meinem eingeschlagenen Weg bedanken.

Ein weiterer Dank gilt dem Lehrstuhl für Verkehrswegebau von Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein, für die Übernahme des Koreferats und seiner Mitarbeiter, mit denen ich über die gesamte Promotionszeit einen sehr angenehmen fachlichen Austausch von wissenschaftlichen Meinungen teilen konnte. Das Gefühl der gegenseitigen Wertschätzung war immer gegeben und wird uns hoffentlich bei zukünftigen gemeinsamen Projekten weiter begleiten.

Der Fahrwegmessung, den Regelwerksautoren sowie den Kollegen der Messtechnik und Rad-Schiene-System gilt ebenfalls ein besonderer Dank. Ohne die fachliche Unterstützung bei der Datenaufnahme sowie dem Aufzeigen von theoretischen Auswertemethoden, -verfahren und neuen Berechnungsansätzen, wäre eine erfolgreiche Bearbeitung dieser Arbeit niemals möglich gewesen. Durch die unzähligen fachlichen Diskussionen wurde das Thema immer wieder neu hinterfragt und letztendlich in die richtigen Bahnen geleitet.

Mit der Produktionsdurchführung München verbindet mich ein weiterer großer beruflicher Lebensabschnitt meiner Promotionszeit. Ohne die alltäglichen Herausforderungen im operativen Geschäft der DB Netz AG wäre die Idee einer Einzelfehlercharakterisierung über die Eigenschaften der Gleislage nicht in den Fokus einer neuen Bewertungsmethode gerückt. In diesem Zusammenhang danke ich den Kollegen der Instandhaltung sowie Planung & Steuerung, die mir bei Fragen zur Eisenbahninfrastruktur immer weiterhelfen konnten und so maßgeblich am Ergebnis dieser Arbeit beteiligt waren.

Meiner Frau Annika Sandner geb. Holtkamp möchte ich an dieser Stelle ganz besonders dafür danken, dass sie mir während der gesamten Promotionszeit einen Rückenhalt gab, mich immer wieder neu motivierte und mich bei allen anfallenden Themen unterstützte. Ohne ihr Verständnis und ihren täglichen Einsatz, insbesondere nach der Geburt unseres Sohnes Mattheo, wäre die Bearbeitung dieser Dissertation nicht möglich gewesen.