

TurNAut

Messdatenbasierte Zustandsbeschreibung
von Bogenweichen in Österreich

Masterarbeit
2020

Verfasser:

Alexander Franzl

BSc.
01432072
alexander.franzl@student.tugraz.at

Betreuer:

Stefan Marschnig

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
stefan.marschnig@tugraz.at

Michael Fellingner

Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc Ing.
michael.fellinger@tugraz.at



Danksagung

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc Ing. Michael Fellingner, die die Entstehung dieser Arbeit begleitet und gefördert haben. Besonders durch die fachliche Beratung von Herrn Michael Fellingner wurden meine Fragen umfassend beantwortet und kleine Hürden schnell aus dem Weg geschafft.

Des Weiteren bedanke ich mich beim gesamten Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft für die Nutzung der Räumlichkeiten und der Arbeitsutensilien, die zur Umsetzung des Projektes notwendig waren. Ich danke auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die herzliche Aufnahme im Team.

Im Rahmen dieser Arbeit möchte ich aber auch jenen danken, die mich während meiner gesamten Studienzeit und auch darüber hinaus unterstützt und motiviert haben. Ein großer Dank gilt an dieser Stelle meinen Eltern, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und zur Finanzierung meines Studiums einen großen Beitrag geleistet haben. Auch bei meinen langjährigen Freunden und Zeichensaalkollegen möchte ich mich herzlich für die tolle Zeit und die gute Zusammenarbeit bedanken.

Kurzfassung

Weichen stellen ein zentrales Element in der Bahninfrastruktur dar. Sie ermöglichen einen Gleiswechsel und bilden somit die Grundlage für eine Netzbildung. Aufgrund der zahlreichen Weichenkomponenten sowie der konstruktiven Ausführung unterliegen Weichen einer erhöhten Belastung, wodurch ihnen intensiviert und vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Um Betriebsstörungen aufgrund von Weichenausfällen bereits im Vorhinein auszuschließen, ist es notwendig, den Zustand von Weichen zu kennen. Dafür sind wiederum Methoden erforderlich, die eine Zustandsbeschreibung möglich machen. Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Zustandsbeschreibung von Bogenweichen anhand der Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 der ÖBB. Grundlegend ist dabei, dass die Messdaten der ÖBB bereits seit dem Jahr 2001 zur Verfügung stehen. Zudem finden die Messungen unter Last statt, womit das tatsächliche Weichenverhalten abgebildet wird. Die Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 sind für eine Zustandsbeschreibung von relativ kurzen Weichenbereichen allerdings nur bedingt geeignet, da die Messsignale der unterschiedlichen Messfahrten nicht synchron sind. Der Algorithmus CoMPACT bietet eine passende Lösung für dieses Problem. CoMPACT steht dabei für Condition Monitoring and Prediction Analytics for Turnouts. Dieser Algorithmus ermöglicht eine Nachstationierung sämtlicher Messdaten und gewährleistet, dass diese im Anschluss in synchroner Form vorliegen. Somit ist der Grundstein für eine Zustandsbeschreibung von Weichen anhand von Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 gelegt.

Zu den am häufigsten durchgeführten maschinellen Instandhaltungsarbeiten zählen Stopfmaßnahmen. Mit dieser Instandhaltungsmaßnahme kann die Gleislage korrigiert und somit die Soll-Geometrie wiederhergestellt werden. Zur Beurteilung der Gleislage wird hierfür die Standardabweichung der Längshöhe in einem Wellenlängenbereich von 3-25 m herangezogen. Anhand der Standardabweichung der Längshöhe lassen sich zudem getätigte Stopfeinsätze detektieren und Bereiche innerhalb der Weiche bestimmen, die für eine schlechte Gleislage verantwortlich sind.

Eine andere wichtige Instandhaltungsmaßnahme stellt die Schotterbettreinigung dar. Diese Maßnahme wird im Normalfall nur bei sehr schlechtem Schotterzustand ausgeführt, da Schotterbettreinigungen sehr aufwendig und kostspielig sind. Eine Methode zur Schotterzustandsbeschreibung ist daher ebenfalls von Interesse. Dies geschieht anhand von Leistungsdichteberechnungen, basierend auf Längshöhenmesssignalen im Wellenlängenbereich von 3-25 m. Analysiert wird dabei die Rauigkeit der Längshöhenmessung. Entwicklungen in den Rauigkeiten lassen folglich auf den Schotterzustand schließen.

Die für einfache Weichen entwickelten Methoden bilden die Grundlage für die Stationierung der Messdaten von Bogenweichen sowie für die darauffolgenden Auswertungen anhand der Standardabweichung der Längshöhe bzw. der Leistungsdichte. Ziel der Arbeit ist es zu überprüfen, ob diese Methoden auch für Bogenweichen anwendbar sind und falls nicht, welche Anpassungen hierfür notwendig sind.

Abstract

Turnouts are a central element in the railway infrastructure. They enable trains to change between the tracks and thus form the basis for network formation. Due to the numerous turnout components as well as their design, turnouts are subjected to high loads. To exclude operational disturbances due to turnout failures in advance, it is necessary to know the condition of turnouts. This requires methods, which enable a condition description. Therefore, this thesis deals with the description of the condition of curved turnouts based on the measurement data of the track recording car EM 250 of the Austrian Federal Railways. Prerequisite is that the measurement data are available in time series back to the year 2001. In addition, the measurements take place under load, which represents the real turnout behaviour. However, the measurement data of the track recording car EM 250 are not suitable for describing the condition of relatively short turnout areas, as the measurement signals of the different measurement runs are not synchronous. The algorithm CoMPACT solves this problem. CoMPACT stands for Condition Monitoring and Prediction Analytics for Turnouts. The algorithm enables all measurement data to be re-positioned and ensures that the data are available synchronously. This forms the base for a description of the condition of turnouts based on measured data from the track recording car.

One of the most frequently performed maintenance tasks is tamping. Geometrical parameters are corrected and initial geometry is restored. Assessing the geometrical condition of turnouts, the standard deviation of the longitudinal level in a wavelength range of 3-25 m is used. The standard deviation of the longitudinal level can also be taken to detect tamping operations carried out and for determining areas with fast deterioration within the entire turnout length.

Another important maintenance task is ballast cleaning. Usually, this maintenance task is carried out only when the ballast is in a very poor condition, as ballast cleaning is very complex and expensive. Therefore, a method for describing the ballast condition is of special interest as well. This is done by means of power density calculations based on longitudinal level measurement signals. Analysis of the roughness of the longitudinal level measurements (3-25m), represented by a linear approximation function within the power density spectrum, are executed. This roughness of the measurement signal is closely related to the ballast condition.

The methods developed for straight turnouts form the basis for further considerations. The aim of the work is to check whether these methods can be applied to curved turnouts as well and, if not, which adjustments are necessary.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Entwicklungen rund ums Thema Weiche	3
2.1	3D-Weichenvermessung	3
2.2	ESAH – Elektronische System-Analyse im Herzstückbereich	3
2.3	SCM Weichendiagnose.....	3
2.4	KONUX.....	4
2.5	Zustandsbeschreibung mittels Sensordaten (Projekt INTELLISWITCH).....	4
2.6	Zustandsbeschreibung auf Basis der Messdaten des Oberbaumesswagens	5
3	Oberbaumesswagen EM 250	7
3.1	Allgemeines	7
3.2	Messsysteme.....	7
3.2.1	Inertialmesseinheit (IMU).....	8
3.2.2	Optisches Spurweitenmesssystem	9
3.2.3	Differential Global Positioning System (dGPS)	9
3.2.4	Video-Monitoring	10
3.2.5	Schienenprofilmessung	10
3.2.6	Schienenoberflächenmessung	10
3.2.7	Weitere mögliche Messsysteme	10
4	CoMPAcT	12
4.1	Allgemeines	12
4.1.1	Referenzsignal	13
4.1.2	Synchronität	14
4.1.3	Messkanalgruppen.....	15
4.2	Abhängigkeiten	17
4.2.1	Messkanalgruppe MD002.....	17
4.2.2	Messkanalgruppe MD002 + MD133.....	18
4.2.3	Messkanalgruppe MD133.....	18
4.2.4	Messkanalgruppe MD002 + MD169.....	19
4.2.5	Messkanalgruppe MD169.....	19
4.3	Nachstationierung.....	20
4.3.1	Laden der Daten und Identifizierung der Befahrungsrichtung	20
4.3.2	Identifizierung des befahrenen Astes	21
4.3.3	Identifizierung Herzstückspitze und Stationierung der ungefilterten Halbspurweiten... 22	
4.3.4	Stationierung der Halbspurweiten gefiltert	22
4.3.5	Stationierung der Gesamtpurweite MD002	22
4.3.6	Stationierung der Gesamtpurweite MD133	22
4.3.7	Stationierung des Schienenfußabstandes.....	23
4.3.8	Stationierung der Schienenneigung.....	23
4.3.9	Stationierung der Richtungssignale (3-25 m)	23
4.3.10	Stationierung der Richtungssignale (1-70 m bzw. 25-70 m).....	24
4.3.11	Stationierung der Längshöhensignale (3-25 m)	25
4.3.12	Stationierung der Längshöhensignale (1-70 m bzw. 25-70 m).....	26
4.3.13	Bereichsidentifikation innerhalb der stationierten Signale	26
4.3.14	Ergebnis des abgeschlossenen Stationierungsprozesses	26

5	Anwendung von CoMPACT auf Bogenweichen	29
5.1	Betrachtete Bogenweichen	29
5.2	Messdaten	30
5.3	Anwendbarkeit	30
5.4	Besonderheiten bei der Anwendung	30
5.4.1	Änderung der Messfahrtrichtung auf der Südbahn	30
5.4.2	Größerer Datensatz mit mehreren Weichen.....	31
6	Datenauswertung	32
6.1	Standardabweichung der Längshöhe (σ_h).....	32
6.1.1	Vergleich ausgewerteter Daten mit tatsächlich ausgeführten Stopfeinsätzen	33
6.1.2	Auswertung Standardabweichung der Längshöhe	34
6.1.3	Zusammenfassung Standardabweichung der Längshöhe.....	47
6.2	Leistungsdichtespektrum (LDS)	48
6.2.1	Schotterzustand vor und nach einer Schotterbettreinigung	51
6.2.2	Nähere Betrachtung der Eingangsdaten.....	52
6.2.3	Schotterzustand Bereichsdefinition	56
7	Zusammenfassung	62
7.1	CoMPACT	62
7.2	Standardabweichung der Längshöhe	63
7.3	Leistungsdichte	64
8	Ausblick	66

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

„Weichen stellen die komplexesten Bauteile im Fahrweg der Eisenbahn dar. Als Voraussetzung für einen sicheren Betrieb sind die Weichen in fast alle Teilsysteme der Eisenbahn zu integrieren oder bei deren Planung zu berücksichtigen.“ [1]

„Eine hoch verfügbare Infrastruktur ist die Voraussetzung für einen leistungsfähigen und zuverlässigen Eisenbahnverkehr. Instandhaltung ist notwendig, um Infrastrukturelemente funktionsfähig zu halten. Dies gilt insbesondere für Weichen als betrieblich essentielles, aber störanfälliges Element.“ [2]

Im Netz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) befinden sich auf einer Gleislänge von 9.785 km insgesamt 13.485 Weichen. [3]

Die Instandhaltungskosten von Weichen betragen rund 25 % der gesamten Instandhaltungskosten der Strecke. Zudem sind die Weichenanlagen aufgrund der beweglichen Komponenten für die meisten betrieblichen Störungen im Netz verantwortlich. [4]

Im Jahr 2018 wurden in Österreich 302 Weichen erneuert, 641 Weichen geschliffen und 1.652 Weichen gestopft. Prozentuell auf die Gesamtanzahl der Weichen gesehen wurden somit 2,2 % der Weichen erneuert, 4,7 % der Weichen geschliffen und 12,2 % der Weichen gestopft. [5]

Die große Anzahl an Weichen und die hohen Instandhaltungskosten lassen erkennen, dass der Erhaltung von Weichen eine entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Hinzu kommt die Nichtverfügbarkeit von Weichen und die damit einhergehenden, teils erheblichen Einschränkungen im Betrieb aufgrund nicht durchgeführter Instandhaltungsarbeiten, die Weichen zu einem essentiellen Bestandteil der Eisenbahninfrastruktur machen. Neben einfachen Weichen – die prinzipiell schon genug Störpotenzial bieten – finden auch Bogenweichen Anwendung im Netz der ÖBB.

Bogenweichen unterliegen im Vergleich zu einfachen Weichen noch größeren Verschleißerscheinungen. Vor allem erhöhte Beschleunigungen oder negative Überhöhungen in Außenbogenweichen führen zu stärkeren Belastungen und dadurch zu erhöhtem Instandhaltungsaufwand. [6]

Bisher wurden genauere Betrachtungen hinsichtlich des Weichenverhaltens etwas vernachlässigt. Manuelle Weicheninspektionen sind aufgrund der teils subjektiven Wahrnehmung der inspizierenden Person unzureichend, um genaue Aussagen über den Zustand einzelner Komponenten oder der gesamten Weiche treffen zu können. Ortsfeste Diagnosesysteme erlauben zwar eine kontinuierliche Überwachung verschiedenster Weichenbauteile, eine

genaue und einfache Möglichkeit das Weichenverhalten unter Last zu beurteilen, ist dennoch nicht gegeben. Messdaten für eine Analyse wären durch die regelmäßige Befahrung mit dem Oberbaumesswagen EM 250 der ÖBB vorhanden. Dieser Messwagen wurde jedoch hauptsächlich für die Messung des freien Streckengleises konzipiert. Die Rohdaten sind daher in dieser Form für eine Zustandsbeschreibung von verhältnismäßig kurzen Weichenbereichen nicht geeignet.

Es fehlte lange an einer geeigneten Methode diese Daten entsprechend aufzubereiten, um anschließend eine Zustandsbeschreibung von Weichen durchzuführen. An diesem Punkt soll nun diese Arbeit ansetzen. Sie behandelt die automatisierte Zustandsbeschreibung von Bogenweichen anhand von Messdaten, die durch den Oberbaumesswagen EM 250 der ÖBB erfasst werden. Grundlage für dieses Vorhaben bildet der von Michael Fellingner für einfache Weichen entwickelte Algorithmus CoMPACT, der bereits eine entsprechende Aufbereitung der Messdaten ermöglicht. [7]

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte:

- I Entwicklungen rund ums Thema Weiche (Kapitel 2)
- I Beschreibung des Oberbaumesswagen EM 250 (Kapitel 3)
- I Beschreibung des Nachstationierungsalgorithmus CoMPACT (Kapitel 4)
- I Anwendung von CoMPACT auf ausgewählte Bogenweichen (Kapitel 5)
- I Datenauswertung und Vergleich der Daten (Kapitel 6)
- I Zusammenfassung (Kapitel 7)
- I Ausblick (Kapitel 8)

2 Entwicklungen rund ums Thema Weiche

In diesem Kapitel wird auf aktuelle Entwicklungen hinsichtlich Überwachung und Zustandsbeschreibung von Weichen eingegangen. Hierzu gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren, Methoden oder Produkten. Folgend werden einige davon näher beschrieben.

2.1 3D-Weichenvermessung

Bei der 3D-Weichenvermessung wird mittels spezieller Kameras die Weiche dreidimensional vermessen. Damit lässt sich vor allem das Verschleißverhalten sehr gut abbilden und in weiterer Folge der Weichenzustand beschreiben. Neben der 3D-Aufnahme werden zusätzlich Fotos vom jeweiligen Bereich aufgenommen. Durch Einblendung von Radprofilen in die 3D-Aufnahme kann der Rad-Schiene-Kontakt näher betrachtet und die Berührungspunkte analysiert werden. Möglich ist auch eine Abstandsmessung, sprich an jeder beliebigen Stelle können die Abstände zweier Punkte aus dem 3D-Modell herausgemessen werden. [8]



Abbildung 2-1: 3D-Aufnahme Weichenherz¹

2.2 ESAH – Elektronische System-Analyse im Herzstückbereich

Das ESAH-System der Deutschen Bahn Systemtechnik wurde speziell für die Analyse des Herzstückbereichs entwickelt. Das ESAH-System ist unterteilt in die Bereiche ESAH-mobil, ESAH-stationär und ESAH-Fahrzeug. ESAH-mobil dient dabei vor allem der lokalen Analyse der Belastung von Weichenherzstücken (Stoßbelastung), ESAH-stationär der lokalen Analyse von Schwelleneinsenkungen im Herzbereich und ESAH-Fahrzeug ermöglicht eine Überwachung des Radüberlaufs im Herzstückbereich sowie die Berechnung der Belastung und Ableitung des Verschleißzustandes mittels Beschleunigungssensoren. [9]

2.3 SCM Weichendiagnose

Das Weichendiagnosesystem SCM (switch condition monitoring) der Firma voestalpine Railway Systems ermöglicht einen sicheren Betrieb der Weichenanlagen indem es bevorstehende Weichenstörungen frühzeitig aufzeigt. Mittels Sensortechnik lässt sich nicht nur überprüfen, ob der Weichenverschluss ordentlich funktioniert, es können auch eine Vielzahl

¹ Quelle Abbildung: https://www.s7-railsupport.com/userfiles/files/downloads/3DIRC_desc_de.pdf (Zugriff am 25.07.2020)

an anderen Parametern gemessen werden, wie zum Beispiel die Temperatur der Anlage, die Stellbewegungen oder die auftretende Beschleunigung. [10]

2.4 KONUX

Die Weichenüberwachung mit dem System KONUX funktioniert über IoT-Sensoren und mit Hilfe von künstlicher Intelligenz. Diese Sensoren messen kontinuierlich Parameter wie Vibration oder Beschleunigung. Dieses System liefert neben möglichen Schwellenhohllagen beispielsweise auch Informationen zum Zugtyp der über den Sensor fährt oder zu dynamischen Belastungen. Durch Beiziehung zusätzlicher Datenquellen mit der Nutzung von künstlicher Intelli-



Abbildung 2-2: Sensor KONUX-System²

genz sind zum Beispiel Aussagen über die Weichenbelastung und Abnutzungs- oder Verschmutzungsgrad des Schotterbetts möglich. Die Verknüpfung unterschiedlichster Datenquellen (wie zum Beispiel Witterungsdaten oder Temperatur) mit dem System KONUX ermöglicht auch noch weitere Analysen. [11]

2.5 Zustandsbeschreibung mittels Sensordaten (Projekt INTELLISWITCH)

INTELLISWITCH (Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings) war ein Projekt der Technischen Universität Dänemark. Es wurde mittels modernster Sensortechnik versucht, eine Zustandsbeschreibung von Weichen anhand von Zustandsindikatoren zu ermöglichen, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden. Verwendet wurden dabei vor allem Beschleunigungsmesssensoren, da dynamische Belastungen hauptverantwortlich für den Verschlechterungsprozess einer Weiche sind.

Das Projekt gliederte sich in fünf Arbeitspakete (WP, engl. working package). Arbeitspaket 1 befasste sich grundsätzlich mit der Datenbeschaffung jener Daten, die nicht durch andere Messverfahren bzw. den Messwagen erfasst werden und für die somit die Installation von Messsensoren notwendig ist. Arbeitspaket 2 umfasste die Überwachung der Anlagen anhand der zuvor generierten Daten. Im Arbeitspaket 3 sollten Modelle entwickelt werden, die ein besseres Verständnis über das Zusammenwirken aller Subsysteme ermöglichen. Zudem sollte herausgefunden werden, welche Parameter Anzeichen für eine

² Quelle Abbildung: <https://www.konux.com/de/loesung/> (Zugriff am 25.07.2020)

Verschlechterung des Zustands liefern und wie sich eine solche Verschlechterung möglicherweise verhindern lässt. Im Arbeitspaket 4 wurden Weichenkomponenten, die ein ungewöhnliches Verhalten aufweisen, einer metallurgischen Untersuchung unterzogen. Neben der metallurgischen Prüfung wurden unter anderem auch eine Elektronenmikroskopie sowie Röntgenbeugungsmethoden durchgeführt. Ziel der Untersuchungen in Arbeitspaket 4 war das Erkennen von beschädigten Bereichen, bevor es überhaupt zu einem Versagen

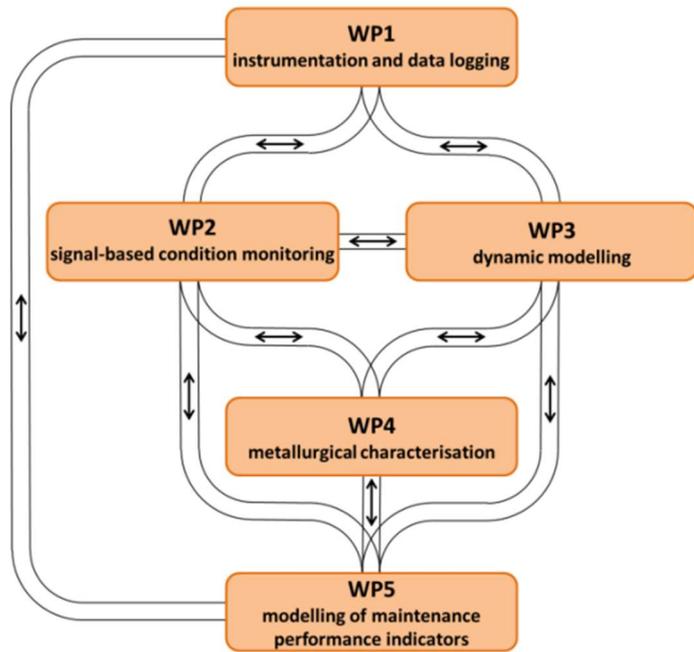


Abbildung 2-3: Intelliswitch Arbeitspakete³

kommen kann. Zudem sollten Erkenntnisse gewonnen werden, welche Materialien sich besser bzw. schlechter für die jeweilige Weichenkomponente eignen. Im letzten Arbeitspaket (WP5) wurden die zuvor generierten Daten zusammengefasst. Darüber hinaus wurde versucht, für diese Vielzahl an Daten ein Modell zu entwickeln, das in weiterer Folge einen oder mehrere Indikatoren ausgibt, um den Weichenzustand beschreiben zu können. [12] Anhand der Messdaten von 88 Weichen wurde beispielsweise ein Schotter-Qualitäts-Index entwickelt, der die Grundlage für unterschiedliche Verschlechterungsmodelle in verschiedenen Abschnitten innerhalb der Weiche bildet. [13]

2.6 Zustandsbeschreibung auf Basis der Messdaten des Oberbaumesswagens

In Abbildung 2-4 ist ein Ausschnitt eines Längshöhenmesssignals dargestellt, das durch den Oberbaumesswagen aufgenommen wurde. Ein großer Vorteil der Zustandsbeschreibung mittels Messdaten des Oberbaumesswagens liegt darin, dass keine kostspieligen Messsensoren installiert werden müssen, um an die benötigten Daten zu gelangen. Zudem finden die Messungen unter Last (unter dem Eigengewicht des Messwagens) statt. In Österreich sind diese Messdaten seit dem Jahr 2001 vorhanden, wodurch auch eine

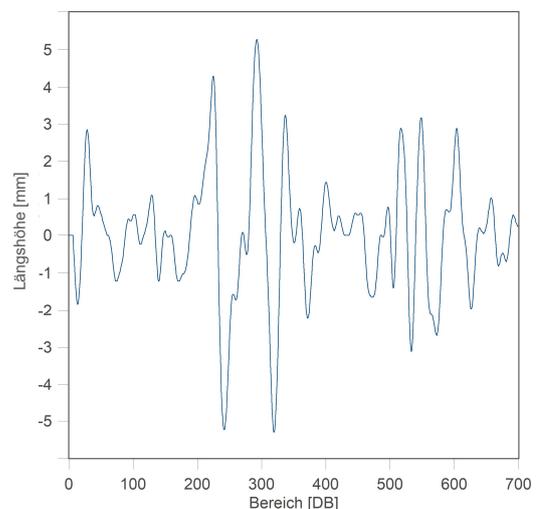


Abbildung 2-4: Messsignal

³ Quelle Abbildung: Project description INTELLISWITCH, Technical University of Denmark

Zeitreihenbildung möglich ist. Gemessen werden dabei beispielsweise Spurweite, Beschleunigung, Richtung oder Längshöhe. Da der Oberbaumesswagen grundsätzlich für die freie Strecke konzipiert wurde, ist eine Anpassung bzw. eine Bearbeitung der Daten erforderlich, um mit diesen Messsignalen eine Zustandsbeschreibung von Weichen zu ermöglichen. Als nachteilig in diesem Zusammenhang erweist sich die Tatsache, dass in Österreich meist nur der durchgehende Ast der Weiche bei einer Messfahrt vermessen wird. Dementsprechend kann vorwiegend auch nur eine Zustandsbeschreibung für diesen Bereich durchgeführt werden.

3 Oberbaumesswagen EM 250

„Das Gleisnetz ist ein dynamisches System. Unterschiedliche Faktoren wie Zugverkehr, Untergrundbeschaffenheit, Temperaturschwankungen oder Niederschlag verursachen ständig Veränderungen. Instandhaltungsmaßnahmen können aber nur dann effizient geplant werden, wenn der aktuelle Gleiszustand bekannt ist und vor allem mögliche Verschlechterungen zu erkennen sind.“ [14]

3.1 Allgemeines

Bereits Ende des Zweiten Weltkrieges wurde in Österreich begonnen die Gleisgeometrie spurgebunden und automatisiert zu erfassen, um Aussagen über den Gleiszustand treffen zu können. [15] Im Jahr 1985 wurde dann der selbstfahrende Oberbaumesswagen EM 80 der Firma Plasser & Theurer angeschafft. Dieser ermöglichte Messungen bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h. [16] Später folgte die Anschaffung des Oberbaumesswagens EM 250, mit dem auch heute noch kontinuierliche Messungen bis zu einer Geschwindigkeit von 250 km/h durchgeführt werden. Es handelt sich dabei um einen umgebauten Waggon, der unkompliziert an jeden beliebigen Zug angehängt werden kann und somit keine eigene Fahrtrasse benötigt. Zudem können betriebliche Störungen durch die hohen Messgeschwindigkeiten weitgehend verhindert werden. Diese Messungen im österreichischen Streckennetz werden je nach Streckenrang zwischen ein- und viermal pro Jahr durch den Messwagen vorgenommen. [17]



Abbildung 3-1: Oberbaumesswagen EM 250⁴

3.2 Messsysteme

Die ÖNORM EN 13848-1 definiert die maßgebenden Parameter der Gleisgeometrie, die mithilfe des Gleismesswagens erfasst werden müssen: [18]

- Spurweite
- Längshöhe
- Überhöhung
- Richtung
- Verwindung

⁴ Quelle Abbildung: <https://www.carinzia.net/imagesf/DSC02602.jpg> (Zugriff am 28.03.2020)

Zudem legt die ÖNORM EN 13848-1 fest, dass die Abtastschrittweite für die einzelnen Messpunkte nicht größer als 25 cm sein soll. Beim EM 250 ist die Abtastschrittweite also dementsprechend 25 cm.

Die Messfahrzeuge der Firma Plasser & Theurer sind grundsätzlich mit einer berührungslosen Inertialmesseinheit, einer doppelten optischen Spurweitenmessung sowie einem integrierten Navigationssystem ausgestattet. Je nach Ausstattungsvariante können eine Vielzahl an Messsystemen – wie Schienenprofilmessung, Achslagerbeschleunigungsmessung oder Video-Monitoring – zusätzlich installiert werden. [19]

3.2.1 Inertialmesseinheit (IMU)

Die Inertialmesseinheit (IMU) ist ein Multisensorsystem, mit dem die relative Gleislage bestimmt werden kann. Drei senkrecht aufeinander stehende Beschleunigungssensoren erfassen die Bewegung und drei Kreiselkompassse erfassen die Rotation entlang der jeweiligen Koordinatenachse. Mittels zweifacher Integration werden zuerst die Geschwindigkeit und danach der zurückgelegte Weg ermittelt. Anschließend kann dadurch eine dreidimensionale Trajektorie (Fahrweg) abgeleitet werden. [20]

Am Messwagen EM 250 ist das POS/TG-System der Firma Applanix installiert. Dieses System kombiniert die IMU mit dem optischen Spurweitenmesssystem (siehe Punkt 3.2.2) und einem GPS-Navigationssystem. Dies bietet den Vorteil, dass durch das integrierte Navigationssystem ein von der IMU ausgehender Drift der Messergebnisse unterbunden wird. Der Drift, also die Abweichung der Positionierungsgenauigkeit, entsteht aufgrund der doppelten Integration und wächst mit dem Quadrat der Zeit. Noch genauere Standortdaten lassen sich mit Hilfe von dGPS erzielen (siehe Punkt 3.2.3). Mit diesem System sind Messgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h möglich. [19] [21]

Abbildung 3-2 zeigt den Messrahmen der Fa. Plasser & Theurer, auf dem die Inertialmesseinheit sowie die zwei optischen Spurweitenmesssysteme angebracht sind. Dieser Rahmen – der an den vier Achslagern des Drehgestells befestigt ist – gewährleistet, dass die IMU und die Sensoren stets parallel zur Schienenoberfläche ausgerichtet sind. Die zuvor erwähnten drei Beschleunigungssensoren sowie die drei Kreiselkompassse erzeugen eine 3D-Trajektorie, wie sie auch in Abbildung 3-2 ersichtlich ist. [22]

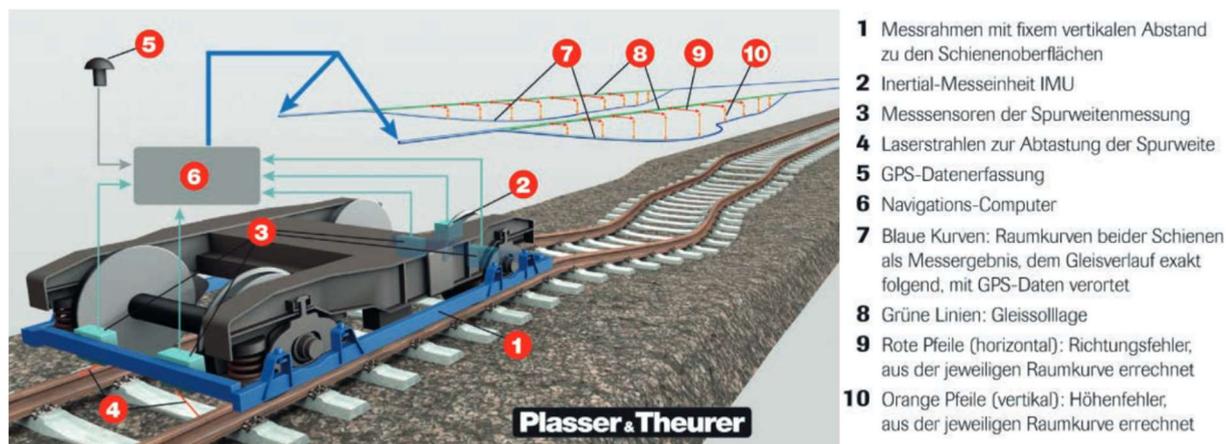


Abbildung 3-2: Gleisgeometriemessung Fa. Plasser & Theurer⁵

3.2.2 Optisches Spurweitenmesssystem

Das doppelte optische Spurweitenmesssystem (Dual OGMS) besteht aus insgesamt vier Messsensoren, wobei zwei am vorderen Teil des Messrahmens und zwei am hinteren Teil befestigt sind (siehe auch Abbildung 3-2). [23]

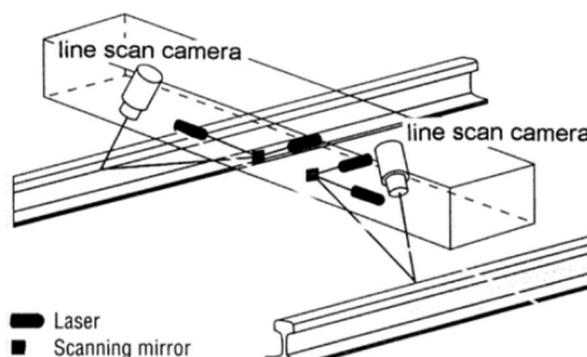


Abbildung 3-3: Prinzip der optischen Spurweitenmessung (OGMS)⁶

Die Messung der Spurweite 14 mm unterhalb der Schienenoberkante erfolgt über Lasertriangulation mit Hilfe von zwei Lasern, zwei Galvo-Spiegeln und zwei Zielkameras (siehe Abbildung 3-3). [22]

3.2.3 Differential Global Positioning System (dGPS)

Eine verbesserte Positionierungsgenauigkeit der gemessenen Daten wird über den dGPS-Dienst EPOSA erreicht. [24] EPOSA (Echtzeit Positionierung Austria) ist ein von der Energie Burgenland AG, ÖBB Infrastruktur AG und Wiener Netze GmbH gegründetes Unternehmen und ermöglicht eine hochpräzise Positionierung mit Abweichungen von nur wenigen Zentimetern. Um derart geringe Abweichungen zu erzielen, sind gleichzeitig Signale von sechs Satelliten notwendig, die vom GPS-, GLONASS-, GALILEO- oder BEIDOU-System stammen. [25] Die Verwendung eines genauen Navigationssystems ist wesentlich, da die Sensoren der IMU – wie bereits zuvor erwähnt – ohne regelmäßiger Standortsynchronisation einem Drift unterliegen, der zu erheblichen Abweichungen führen kann. [20]

⁵ Quelle Abbildung: Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Nr. 5, Mai 2013, S. 22

⁶ Quelle Abbildung: Hansmann, F., Innovative Messdatenanalyse – ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis, S. 147

3.2.4 Video-Monitoring

Am Oberbaumesswagen EM 250 sind an beiden Wagenenden Videokameras angebracht. Damit wird beispielsweise eine Vegetationskontrolle im Gleisbereich möglich. Die Informationen aus dem Video-Monitoring sind zur genauen Zuordnung wiederum mit Standortdaten versehen. [26]

3.2.5 Schienenprofilmessung

Der Messwagen ist mit den Systemen ORIAN 6 und ORIAN HR der Firma KLD-Systems ausgestattet. ORIAN 6 besteht aus vier Lasern und jeweils zwei Kameras pro Schiene. Die Kombination aus Laser und Kamera liefert alle 2,5 m einen entzerrten, hochgenauen Querschnitt des Schienenprofils, aus dem beispielsweise die Höhen- und Seitenabnutzung sowie Schienenneigung oder Überwälzung bestimmt werden können. Zudem lässt sich durch dieses System eine Spurweitenmessung realisieren. ORIAN HR bedient sich zweier weiterer Kameras zur Bestimmung der lauftechnischen Eigenschaften. Diese Kameras sind dabei auf den Bereich des Rad-Schiene-Kontaktes ausgerichtet. Eine Abtastung der Messpunkte erfolgt mit ORIAN HR alle 5 m. Durch die Messergebnisse von ORIAN HR lassen sich Aussagen über die Äquivalente Konizität treffen. [26]

3.2.6 Schienenoberflächenmessung

Die Schienenoberflächenmessung basiert auf einer Laser-Distanz-Sehnenmessung, wobei drei unsymmetrisch angeordnete Laser in Schienenmitte eine Sehne mit einer Länge von 150 mm aufspannen. Die Schienenoberfläche wird mit einer Abtastrate von 5 mm aufgenommen. Dies ermöglicht Aussagen über den Zustand der Schiene in einem Wellenlängenbereich von etwa 15 bis 1.000 mm. [27]

3.2.7 Weitere mögliche Messsysteme

Die Firma Plasser & Theurer bietet unter anderem folgende Messsysteme an, die je nach Kundenwunsch am Messwagen installiert werden können (siehe Abbildung 3-4):

Variable Messsysteme
• Schienenprofilmesssystem (optional: Softwarepaket zur Berechnung der äquivalenten Konizität)
• Achslagerbeschleunigungsmesssystem
• Riffelmesssystem (optional: Software zur automatischen Stoßlückenmessung)
• Lichtraumprofilmesssystem / Schotterprofilmesssystem
• Fahrleitungsgeometriemesssystem mit Mastortungssystem
• Stromabnehmer für dynamische Fahrleitungsmessung
• Fahrleitungsparametermesssystem (Spannung, Stromabnehmeranpresskraft, Beschleunigungen)
• Überwachungssystem für Fahrdrahtstärkeabnutzung
• Ultraschall-Schienenfehler-Erkennungssystem
Video-Monitoringsysteme
• Gleisumgebungsvideo in Fahrtrichtung (aus Sicht des Fahrers), ggf. Tunnelbeleuchtung
• Videosystem zur Überwachung der dynamischen Fahrdrahtlage
• Gleiskomponentenüberwachungssystem (Schienenoberfläche, Befestigungsmittel, Schienenlaschen, Schwellenzustand)
• Aufnahme der Stromschienen
• Gleisumgebungsvideo mittels Wärmebildkamera
• Head-Check-Überwachungssystem
Weitere Parameter
• Innen- und Umgebungstemperatur
• Luftfeuchtigkeit
• Schienentemperatur
• Heißläufersimulation
• Dynamische Schienenbefestigungsmessung (Gauge Restraint Messsystem)
• Stromschienen-Profilmessung
• Schienenlärmmessung
• Wagenkastenbewegungen

Abbildung 3-4: Messsysteme der Fa. Plasser und Theurer⁷

⁷ Quelle Abbildung: EIK – Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2014, S. 60

4 CoMPAcT

Wie einleitend schon erwähnt, kommt der Instandhaltung von Weichen eine hohe Bedeutung zu. Daher ist es wichtig, den Zustand von Weichen zu kennen. Noch wichtiger ist es jedoch, den Zustand von Weichen voraussagen zu können. Dazu bedarf es geeigneter Prognosemodelle, die wiederum geeignete Daten benötigen. Als Grundlage hierfür dienen die Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250. Dieser führt je nach Streckenrang ein- bis viermal pro Jahr Messungen am Gleis der ÖBB durch (siehe Punkt 3.1).

Die folgenden Absätze orientieren sich an dem Bericht *Datenbasierte Zustandsbeschreibung und Prognose des Weichenverhaltens* [28] sowie an der Präsentation *GleisPROPHET Weichen 2018 - Messdatenaufbereitung* [29].

Sämtliche Abbildungen wurden mit den Programmen imc FAMOS und RStudio erstellt, sofern nicht auf andere Quellen verwiesen wird.

4.1 Allgemeines

Der Oberbaumesswagen wurde grundsätzlich dafür konzipiert, Messungen auf freier Strecke durchzuführen beziehungsweise um Aussagen über den Zustand des Gleises auf freier Strecke treffen zu können. Dementsprechend ist eine exakte Stationierung der Messdaten von untergeordneter Bedeutung, da Abweichungen von einigen Metern bei der Berechnung statistischer Kennwerte mit einer Einflusslänge von etwa 100 m keinen Einfluss haben. Wie Abbildung 4-1 beispielhaft zeigt, ist es nicht möglich, die exakte Lage der Weiche in dem 500-Meter-Abschnitt (1 DB = 25 cm) des Längshöhenmesssignals zu erkennen. Folglich ist auch eine exakte Zuordnung der Messwerte für den jeweiligen Weichenbereich nicht möglich.

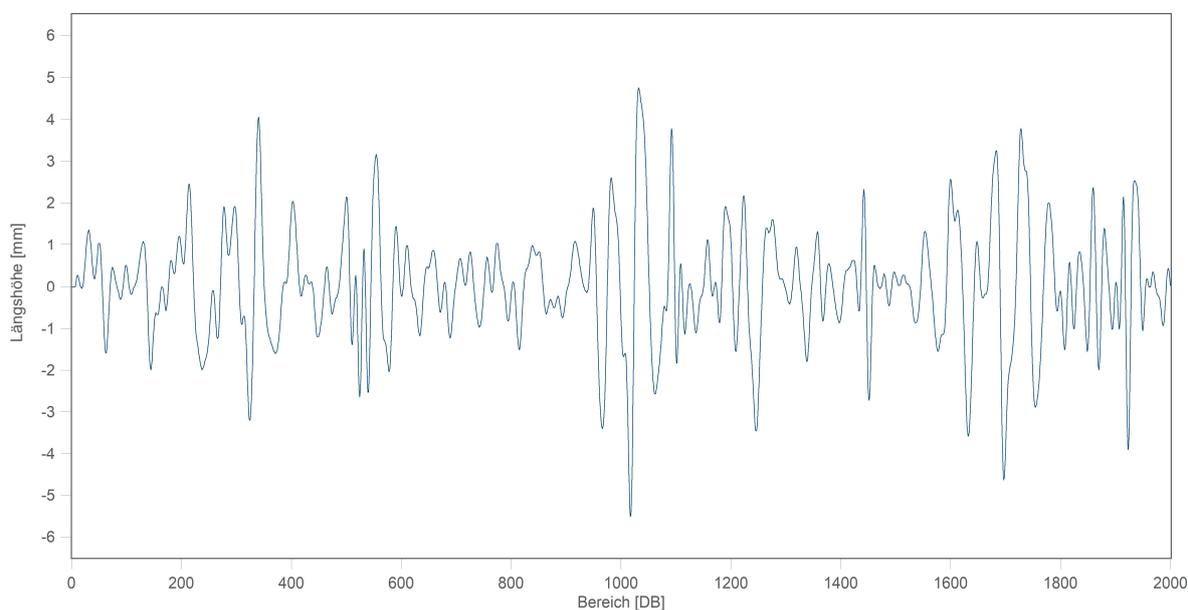


Abbildung 4-1: Messsignal der Längshöhe

Für die Beschreibung des Weichenverhaltens sind Abweichungen in der genannten Dimension nicht akzeptabel. Trotzdem werden die Messdaten des EM 250 als geeignet erachtet, da sie seit dem Jahr 2001 vorhanden sind und somit eine Zeitreihenbildung möglich ist.

Um nun das Verhalten von Weichen über die Zeit beschreiben zu können, ist eine Methode notwendig, die eine exakte Stationierung der Daten gewährleistet. Feller [7] hat dazu im Rahmen seiner Dissertation den Algorithmus CoMPAcT entwickelt. CoMPAcT steht für Condition Monitoring and Prediction Analytics for Turnouts. Dieser Algorithmus gewährleistet dabei nicht nur die genaue Stationierung der Messdaten, sondern auch die Synchronität aller Messdaten untereinander. Im Folgenden wird nun näher auf den genannten Algorithmus eingegangen.

4.1.1 Referenzsignal

Zu Beginn stellt sich die Frage, wie sich eine Weiche eindeutig innerhalb eines Messsignals identifizieren lässt. Bei näherer Betrachtung der ungefilterten Halbspurweite auf der Herzseite fällt auf, dass es im Bereich des Herzstücks zu einem charakteristischen Ausschlag des Messsignals kommt (Abbildung 4-2 → blaues Signal). Das liegt daran, dass die Laser der Spurweitenmessung im Bereich der Herzstücklücke entlang der Flügelschiene messen und erst durch Erfassung des Herzstücks wieder die korrekte Halbspurweite aufnehmen, wodurch das Signal schlagartig abfällt. Ähnlich sieht die Situation bei der Betrachtung der ungefilterten Halbspurweite auf der Radlenkerseite aus. Im Bereich des Radlenkers lässt sich ebenfalls keine korrekte Halbspurweite messen und es kommt dadurch zu einem Fehlerwert (Abbildung 4-2 → rotes Signal).

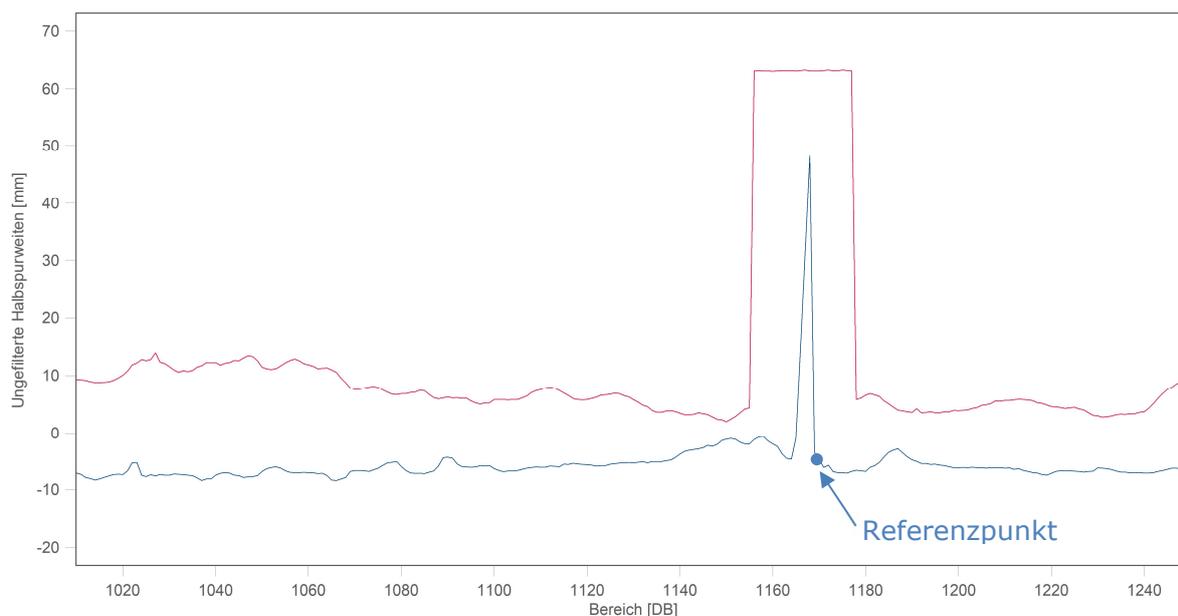


Abbildung 4-2: Signale der ungefilterten Halbspurweiten

Aufgrund dieser einzigartigen Charakteristik wird das Messsignal der ungefilterten Halbspurweite auf der Herzseite als Referenzsignal festgelegt und der im Bild markierte Punkt als Referenzpunkt für den Verschiebeprozess fixiert. Es ist somit möglich, die exakte Lage der Weiche im Messsignal zu bestimmen. Alle weiteren Messsignale beziehen sich folgend auf dieses Referenzsignal.

4.1.2 Synchronität

Ein weiteres Problem stellt die Frage der Synchronität der einzelnen Messsignale untereinander dar, also dass ein Punkt X im einen Messsignal an derselben Stelle wie im anderen Messsignal liegt. Um dieses Problem zu lösen kommen drei unterschiedliche Methoden in Frage, die Kreuzkorrelationsfunktion, die Dynamische Zeitnormierung oder die Methode der Euklidischen Distanz. [30]

Die Kreuzkorrelationsfunktion überprüft zwei unterschiedliche Messsignale auf ihre Verschiebung in x-Richtung. Stimmen beide Messsignale bei einer bestimmten Verschiebung überein, dann weist die Kreuzkorrelationsfunktion ein Maximum auf. Somit ist die Größe der notwendigen Verschiebung ermittelbar. In welche Richtung das jeweilige Signal verschoben werden muss, kann jedoch erst in einem zweiten Berechnungsschritt ermittelt werden.

Die Dynamische Zeitnormierung (engl. Dynamic Time Warping) findet vorwiegend in der Spracherkennung Anwendung. In Bezug auf den Vergleich zweier Messsignale ist es denkbar, dass diese Methode gewisse Bereiche im einen Signal auch im anderen erkennt und sich somit eine Verschiebung ermitteln lässt. Da bei der Methode der Dynamischen Zeitnormierung eine Zerrung bzw. Stauchung der jeweiligen Signale vorgenommen wird, erscheint diese Methode als ungeeignet.

Die dritte Möglichkeit stellt die Methode der Euklidischen Distanz dar, welche auch im Algorithmus CoMPACT angewendet wird. Die Euklidische Distanz an sich ist der Abstand zweier Punkte P_1 und P_2 , der durch

$$d_{(P_1|P_2)} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (\text{Formel 4-1})$$

gegeben ist. Zur Beurteilung der Synchronität sind jedoch nur die vertikalen y-Anteile von Bedeutung, da die horizontalen x-Anteile genau die Verschiebung darstellen, die ermittelt werden soll (entspricht jeweils einem Vielfachen der Abtastschrittweite von 25 cm). Für die Vielzahl der Messpunkte zweier Messsignale M_1 und M_2 lässt sich die Formel nun nach

$$D_{(M_1|M_2)} = \sqrt{\sum_{n=1}^i (y_{i|M_2} - y_{i|M_1})^2} \quad (\text{Formel 4-2})$$

umformen. Das Ziel ist die Berechnung einer Verschiebefunktion $V_{x(M_1|M_2)}$ (siehe Abbildung 4-3), deren Minimum die notwendige Verschiebung des Messsignals vorgibt, um Synchronität zu erreichen. Dazu ist es erforderlich, eine schrittweise Variation der Stationierung (um die Abtastschrittweite) sowie parallel die Berechnung der Euklidischen Distanz $D_{(M_1|M_2)}$ durchzuführen.

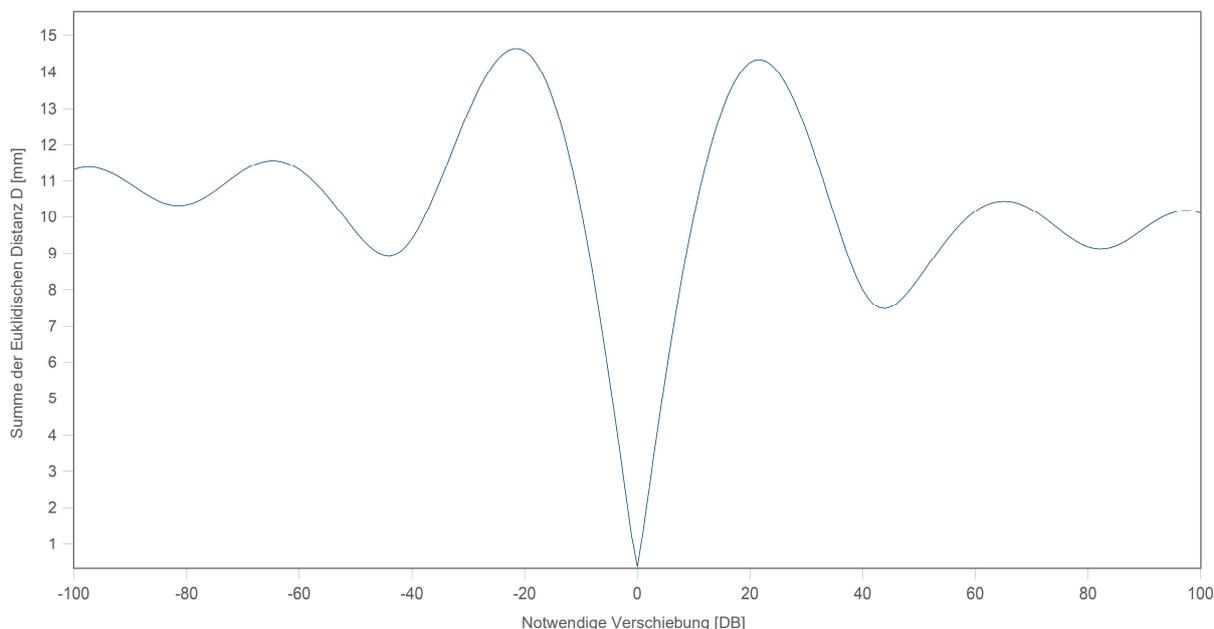


Abbildung 4-3: Verschiebefunktion

Wie bereits erwähnt, entspricht die Verschiebung einem Vielfachen der Abtastschrittweite. Hierfür wird die Einheit DB (Data Break) eingeführt, wobei ein DB genau der Abtastschrittweite von 25 cm entspricht. Liegt das Minimum der Verschiebefunktion wie in Abbildung 4-3 beispielsweise bei $x = 0$ DB, dann sind beide Messsignale synchron, andernfalls muss das zweite Signal entsprechend verschoben werden.

4.1.3 Messkanalgruppen

Die Messdaten sind ausgehend vom jeweiligen Messinstrument am Messwagen in Messkanalgruppen unterteilt. Folgende Messkanalgruppen stehen zur Verfügung: [29]

- Messkanalgruppe Allgemein – Fahrtrichtung und Wagenstellung
- Messkanalgruppe MD002 – Spurweitenmessung EM 250
- Messkanalgruppe MD133 – Spurweiten-, Schienenfuß- und Schienenneigungsmessung
- Messkanalgruppe MD167 – Spurweitenmessung EM 80
- Messkanalgruppe MD169 – Richtung, Längshöhe, Überhöhung und Verwindung
- Messkanalgruppe MD160 – Dominante Amplitude / Wellenlängen aus SOF
- Messkanalgruppe SOF – Schienenoberflächenscan

Für die weitere Bearbeitung werden die Messdaten der betrachteten Weichen im Normalfall in einem Bereich um ± 1.000 DB (= ± 250 m) um den Weichenanfang in eine Datenbank (EBW Turnout Database) überführt. In dieser Datenbank finden alle weiteren Bearbeitungsschritte statt.

Im Folgenden werden jedoch nur die Messkanalgruppen MD002, MD133 und MD169 berücksichtigt. Für die Messkanalgruppe Allgemein ist eine korrekte Stationierung unwesentlich, MD167 betrifft einen anderen Messwagen und für die Messungen der Schienenoberfläche (Messkanalgruppe MD160 und SOF) wurden vorerst keine Abhängigkeiten zwischen dieser Messkanalgruppe und einem anderen Messsignal festgestellt.

4.1.3.1 Messkanalgruppe MD002 – Spurweitenmessung EM 250

In der Messkanalgruppe MD002 finden sich folgende Messsignale:

- Halbspurweite links ungefiltert (MD002_LEFT_GAGE_UF)
- Halbspurweite links gefiltert (MD002_LEFT_GAGE_F)
- Halbspurweite rechts ungefiltert (MD002_RIGHT_GAGE_UF)
- Halbspurweite rechts gefiltert (MD002_RIGHT_GAGE_F)
- Spurweite (MD002_GAUGE)
- Achslagerbeschleunigung links (MD002_LEFT_RIFFEL)
- Achslagerbeschleunigung rechts (MD002_RIGHT_RIFFEL)
- Geschwindigkeit des Messfahrzeugs (MD002_SPEED)

4.1.3.2 Messkanalgruppe MD133 – Spurweiten-, Schienenfuß- und Schienenneigungsmessung

In der Messkanalgruppe MD 133 finden sich folgende Messsignale:

- Spurweite (MD133_FXGAUGE)
- Schienenprofil links (MD133_FXWEIGHTLEFTOVERSTORE)
- Schienenprofil rechts (MD133_FXWEIGHTRIGHTOVERSTORE)
- Weichenmarkierung (MD133_SWITCH_FLAGS)
- Schienenfußabstand (MD133_FXBASEGAUGE)
- Schienenneigung links (MD133_CANTLEFT)
- Schienenneigung rechts (MD133_CANTRIGHT)

4.1.3.3 Messkanalgruppe MD169 – Richtung, Längshöhe, Überhöhung und Verwindung

In der Messkanalgruppe MD 169 finden sich folgende Messsignale:

- Krümmung (MD169_CURVATURE)
- Richtung links / rechts 1-70m / 25-70 m (MD169_LEFT/RIGHT_ALIGNMENT_LONG)
- Richtung links / rechts 3-25m (MD169_LEFT/RIGHT_ALIGNMENT_MEDIUM)
- Richtung links / rechts 3-25m (MD169_LEFT/RIGHT_ALIGNMENT_SHORT)
- Längshöhe links / rechts 1-70m / 25-70 m (MD169_LEFT/RIGHT_PROFILE_LONG)
- Längshöhe links / rechts 3-25m (MD169_LEFT/RIGHT_PROFILE_MEDIUM)
- Längshöhe links / rechts 3-25m (MD169_LEFT/RIGHT_PROFILE_SHORT)
- Überhöhung (MD169_SUPERELEVATION)
- Verwindung 3m Basis (MD169_VERW3)
- Verwindung 9m Basis (MD169_VERW9)
- Verwindung 16m Basis (MD169_VERW16)

4.2 Abhängigkeiten

Wie bereits zuvor beschrieben, wird als Referenzsignal das Signal der ungefilterten Halbspurweite auf der Herzseite festgelegt. Zur Überprüfung der Synchronität beziehen sich folgend alle anderen Messsignale auf dieses. Es muss sowohl innerhalb einer Messkanalgruppe als auch übergreifend zwischen den Messkanalgruppen Synchronität vorherrschen. [29]

4.2.1 Messkanalgruppe MD002

- 1) Zu Beginn wird das Referenzsignal mit dem Signal der ungefilterten Halbspurweite auf der Radlenkerseite untersucht. Eine visuelle Kontrolle der Synchronität ist durch Überprüfung der charakteristischen Ausschläge in den Signalen möglich. Rechnerisch kann mittels euklidischer Distanz im unbeeinflussten Bereich (Spurweite = konstant) überprüft werden, ob die beiden Messsignale synchron sind.
- 2) Als nächstes wird die Synchronität des Referenzsignals mit der gefilterten Halbspurweite auf der Herzseite überprüft. Dies geschieht wiederum mittels der Berechnung der euklidischen Distanz.
- 3) Da die ungefilterte Halbspurweite auf der Radlenkerseite bereits in synchroner Form vorliegt, kann dieses Signal mit dem Signal der gefilterten Halbspurweite auf der Radlenkerseite verglichen werden und somit Synchronität erreicht werden.

- 4) Die Synchronität der Gesamspurweite kann durch Differenzbildung der gefilterten Halbspurweiten und anschließender Gegenüberstellung mit der Gesamspurweite überprüft werden.
- 5) Als problematisch erweist sich die Prüfung der Synchronität zwischen den Spurweitensignalen und den Signalen der Achslagerbeschleunigungsmessung sowie zwischen den Spurweitensignalen und der Messgeschwindigkeit. Da hier keine eindeutigen Zusammenhänge erkannt werden, muss vorerst das Vorhandensein von Synchronität vorausgesetzt werden und deren Nachweis zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Im Zuge dieser Arbeit werden diese Messsignale nicht berücksichtigt, da die Werte der Messungen gemittelt vorliegen und anhand dieser keine konkreten Aussagen getroffen werden können.

4.2.2 Messkanalgruppe MD002 + MD133

In diesen beiden Messkanalgruppen finden sich eigenständige Spurweitenmessungen. Es ist daher relativ einfach möglich, mittels Berechnung der euklidischen Distanz die Synchronität beider Spurweitenmesssignale (MD002_GAUGE und MD133_FXGAUGE) zu überprüfen bzw. eine erforderliche Verschiebung zu ermitteln.

4.2.3 Messkanalgruppe MD133

- 1) Das Signal der Schienenfußabstandsmessung ist dem der Spurweitenmessung sehr ähnlich, Abweichungen gibt es aber hinsichtlich der Werte in y-Richtung. Für die Bestimmung der Synchronität mittels euklidischer Distanz sind diese Abweichungen jedoch nicht wesentlich, da sich trotz der Differenz ein Minimum errechnen lässt, das wiederum die notwendige Verschiebung angibt.
- 2) Die Überprüfung der Synchronität der Schienenneigungsmessungen kann über folgenden Zusammenhang erfolgen (Formel 4-3):



Abbildung 4-4: Zusammenhang Schienenneigung – Spurweite⁸

⁸ Quelle Abbildung: Eigene Darstellung – erstellt mit AutoCAD

$$x = a - b - h * \tan(\alpha) - h * \tan(\beta) - c \quad (\text{Formel 4-3})$$

Spurweite_{gerechnet} = x

Schienenfußabstand = a

Schienenkopfbreite = b

Schienenneigung links = α

Schienenneigung rechts = β

Profilhöhe = 172 – 14 = 158 mm = h (... 172 mm für 60E1 bzw. 161 mm für 54E2)

konstanter Faktor = c

Durch den gemessenen und bereits synchronen Schienenfußabstand abzüglich der Schienenkopfbreite sowie abzüglich der horizontalen Anteile (die sich aus der Profilhöhe mal dem Tangens der Schienenneigungen ergeben), lässt sich die Spurweite errechnen. Die Messungen beziehen sich auf das 60E1-Schienenprofil. Sofern im betrachteten Abschnitt ein anderes Schienenprofil vorliegt, muss zusätzlich noch ein konstanter Faktor c berücksichtigt werden. Beim 60E1-Profil ist dieser Faktor dementsprechend null. Beim 54E2-Profil beträgt der Faktor 5,3 mm und ergibt sich aus der abweichenden Schienenkopfbreite ($\Delta = 5,0$ mm) sowie aus einem zusätzlichen horizontalen Anteil aufgrund der geringeren Profilhöhe ($\Delta = 0,3$ mm).

- 3) Die Signale der linken und rechten Schienenprofilmessung wurden nicht weiter berücksichtigt.

4.2.4 Messkanalgruppe MD002 + MD169

Für die Signale der linken und rechten Richtungsmessung (3-25 m) besteht die Möglichkeit, eine Abhängigkeit zur gefilterten linken bzw. rechten Halbspurweite (3-25 m) herzustellen. Das in Punkt 3.2.1 beschriebene POS/TG-System berechnet die Richtung aus der gemessenen Wagenverdrehung mit der gefilterten Halbspurweitenmessung. Es ist daher wiederum durch Berechnung der euklidischen Distanz möglich, die Synchronität zwischen diesen Signalen zu überprüfen.

4.2.5 Messkanalgruppe MD169

- 1) Die Synchronität zwischen der linken und rechten Richtungsmessung (3-25 m) und der linken und rechten Richtungsmessung (1-70 m) kann durch einfache Wellenlängenfilterung überprüft werden. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bis zum Jahr 2015, da ab dann das Messsignal MD169_LEFT/RIGHT_ALIGNMENT_LONG nur noch für den Wellenlängenbereich 25-70 m vorhanden ist. Für die Messungen

nach 2015 wird daher angenommen, dass die Daten in synchroner Form vorliegen. Nach erfolgter Stationierung wird dies anschließend kontrolliert.

- 2) Zwischen den Signalen der Richtungsmessung (3-25 m) und den der Längshöhenmessung (3-25 m) können keine Zusammenhänge erkannt werden. Es muss daher wiederum angenommen werden, dass die Messsignale in synchroner Form vorliegen und dies anschließend kontrolliert werden.
- 3) Die Synchronität zwischen der linken und rechten Längshöhenmessung (3-25 m) und der linken und rechten Längshöhenmessung (1-70 m) kann wiederum durch einfache Wellenlängenfilterung überprüft werden. Auch hier ist das nur bis zum Jahr 2015 möglich, danach muss abermals Synchronität vorausgesetzt werden.
- 4) Der Nachweis der Synchronität zwischen der Überhöhungsmessung und der Längshöhe (3-25 m) erfolgt durch die Berechnung der Querhöhe. Dazu ist die Differenz der Längshöhe der linken Schiene (3-25 m) mit der Längshöhe der rechten Schiene (3-25 m) zu bilden. Durch Berechnung der euklidischen Distanz kann die Synchronität überprüft beziehungsweise nachgewiesen werden.
- 5) Da die Längshöhensignale bereits zuvor stationiert wurden, werden die Signale der Verwindungsmessung nicht eigens stationiert, sondern aus der Längshöhe errechnet. Somit liegen auch die Signale der Verwindung in synchroner und nachstationierter Form vor.
- 6) Die Signale der Krümmung werden nicht näher betrachtet, da diese Signale nur für die Identifizierung des befahrenen Astes notwendig sind und hierfür keine Präzisionsstationierung erforderlich ist.

4.3 Nachstationierung

Mit der Festlegung des Referenzsignals und der Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Messsignalen sind nun alle Voraussetzungen gegeben, um einen Nachstationierungsprozess durchzuführen.

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie der Stationierungsprozess vonstattengeht und welche vorbereitenden Arbeitsschritte notwendig sind, um geeignete Daten für die Auswertung zu erhalten.

4.3.1 Laden der Daten und Identifizierung der Befahrungsrichtung

Zu Beginn werden alle Daten der Messfahrten der jeweiligen Weiche geladen und mit einer eindeutigen ID-Nummer versehen. Weiters wird die Seite ermittelt, auf der sich das

Weichenherz befindet (linke oder rechte Schiene) sowie die Befahrungsrichtung des Messfahrzeuges eruiert (spitz oder stumpf). Abbildung 4-5 zeigt, wie die Befahrungsrichtung der Weiche anhand der Steigung des Signalausschlages erkennbar ist. Steigt das Signal zuerst stark an und fällt danach beinahe vertikal nach unten, so wurde die Weiche spitz befahren. Springt das Signal jedoch zuerst beinahe vertikal nach oben und fällt dann stark ab, so wurde die Weiche stumpf befahren.

Um im Zuge der Auswertung die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten, dürfen nur Messfahrten mit der gleichen Befahrungsrichtung herangezogen werden. Zudem wird festgelegt, dass für alle weiteren Schritte die Messdaten mit spitzer Befahrungsrichtung betrachtet werden. Liegen jedoch die Signale einer Weiche mit stumpfer Befahrungsrichtung vor, so müssen diese vor einer weiteren Bearbeitung entsprechend gespiegelt werden.

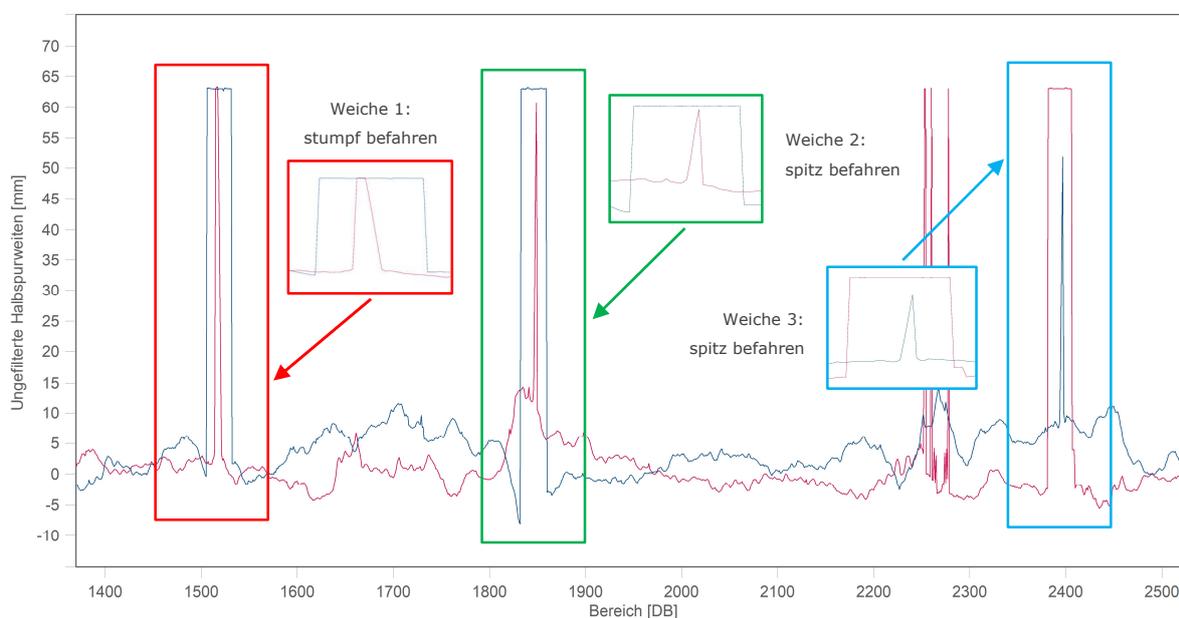


Abbildung 4-5: Halbspurweitensignale - Befahrungsrichtung

4.3.2 Identifizierung des befahrenen Astes

Wie zuvor beschrieben ist es wesentlich, nur gleiche Messfahrten zu untersuchen. Daher müssen wiederum alle Messungen ausgeschlossen werden, die einen anderen Ast als den betrachteten vermessen haben. Die Identifikation des befahrenen Astes erfolgt mittels der gemessenen Krümmung. Da das Signal der Krümmungsmessung nicht stationiert wird, ist der Mittelwert um einen Bereich von ± 100 DB um das Weichenherz zu bilden. Ist dieser Mittelwert kleiner als Zehn, wurde der durchgehende Ast – also das Stammgleis – vermessen, ist der Wert größer als Zehn, dann wurde das Zweiggleis vermessen. Für diese Bedingung wurde der Wert Zehn aus diesem Grund gewählt, da der errechnete Mittelwert bei Befahrung des durchgehenden Astes wesentlich kleiner und bei Befahrung des abzweigenden Astes wesentlich größer als Zehn ist und somit eine klare Unterscheidung möglich ist.

4.3.3 Identifizierung Herzstückspitze und Stationierung der ungefilterten Halbspurweiten

Zur Identifizierung der Herzstückspitze wird in einem ersten Schritt die Referenzmessfahrt festgelegt, wobei hierfür immer die aktuellste gültige Messfahrt herangezogen wird. Danach erfolgt die Identifizierung der Herzstückspitze anhand der Signale der ungefilterten Halbspurweiten. Das Referenzsignal wird anhand des in Abbildung 4-2 markierten, eindeutig identifizierbaren Punktes um den Wert Δ_0 auf Kilometer „Null“ verschoben – sprich stationiert. In einem nächsten Schritt wird geprüft, ob das jeweilige Signal mit dem Referenzsignal synchron ist. Falls ja, wird das Signal ebenfalls um Δ_0 verschoben und ist somit stationiert. Falls nein, muss die notwendige Verschiebung Δ_s ermittelt werden, die durch die Verschiebefunktion (siehe Abbildung 4-3) ausgedrückt wird. Die Stationierung erfolgt dann durch Verschiebung um den Wert $\Delta_0 \pm \Delta_s$. Ist die Stationierung abgeschlossen, prüft anschließend eine Kontrollsequenz die Synchronität der Signale untereinander. Diese Vorgehensweise ist nicht nur für die ungefilterten Halbspurweiten, sondern auch für alle anderen zu untersuchenden Signalen die gleiche. Sollte ein Signal der Spurweitenmessung fehlerhaft sein, eine eindeutige Identifizierung der Herzstückspitze also nicht möglich sein, so muss diese Messfahrt ausgeschlossen werden.

4.3.4 Stationierung der Halbspurweiten gefiltert

Die Stationierung der gefilterten Halbspurweite auf der Herzseite erfolgt durch Berechnung der euklidischen Distanz zwischen diesem Signal und dem der ungefilterten Halbspurweite auf der Herzseite. Dies ist möglich, da durch die Filterung nur die Fehlerwerte entfernt werden, die Signale ansonsten dieselben sind. Dasselbe gilt für die gefilterte bzw. ungefilterte Halbspurweite auf der Radlenkerseite. Ist der Stationierungsvorgang abgeschlossen, folgt eine Kontrollsequenz zur Überprüfung der Synchronität.

4.3.5 Stationierung der Gesamspurweite MD002

Wird die gefilterte und gespiegelte Halbspurweite auf der Herzseite ($MD002_LEFT/RIGHT_GAGE_F * (-1)$) von der gefilterten Halbspurweite auf der Radlenkerseite subtrahiert, so errechnet sich daraus die Gesamspurweite. Dies ermöglicht es, das gemessene Signal der Spurweite mit der berechneten Spurweite zu korrelieren und das Signal zu stationieren. Eine anschließende Kontrollsequenz dient zur Synchronitätsüberprüfung. Indirekt wird dabei auch die Synchronität der Halbspurweiten überprüft, da ansonsten die Gesamspurweiten nicht übereinstimmen würden.

4.3.6 Stationierung der Gesamspurweite MD133

Wie in Punkt 4.2.2 bereits erwähnt, ist mittels Berechnung der euklidischen Distanz zwischen der Gesamspurweite MD133 und der Gesamspurweite MD002 eine Überprüfung

der Synchronität einfach möglich. Somit wird erreicht, dass auch die Messkanalgruppen untereinander synchron sind. Zu beachten ist dabei, dass die Signale der Messkanalgruppe MD133 nur mit einer Abtastrate von 2,5 m vorliegen, es ist also noch eine Nachabtastung der Messdaten notwendig. Zudem sind die Signale erst ab dem Jahr 2015 vorhanden. Eine nachfolgende Kontrollsequenz soll die Synchronität der Gesamtspurweiten bestätigen.

4.3.7 Stationierung des Schienenfußabstandes

Die Stationierung des Schienenfußabstandes ist durch die bereits zuvor stationierte Gesamtspurweite MD133 möglich. Der zwischen den beiden Signalen auftretende Offset in y-Richtung ist dabei für die Berechnung nicht relevant. Auch hier ist nach erfolgter Stationierung eine Kontrollsequenz zur Synchronitätsüberprüfung implementiert.

4.3.8 Stationierung der Schienenneigung

Der Zusammenhang der Schienenneigung mit der Spurweite wurde in Punkt 4.2.3 erläutert. Der für die Berechnung erforderliche Schienenfußabstand ist bereits stationiert, die Schienenkopfbreite sowie die Schienenprofilhöhe und ein eventuell erforderlicher Faktor sind konstant. Die nach Formel 3-3 berechnete Spurweite kann nun mit der Spurweite MD133 verglichen und somit die Stationierung der Schienenneigung vorgenommen werden. Zu beachten ist, dass die Schienenneigungsmessung in Grad für die weitere Bearbeitung in Radiant umgerechnet werden muss ($rad = grad * \frac{\pi}{180}$). Eine abschließende Kontrollsequenz bestätigt die Synchronität der Signale.

4.3.9 Stationierung der Richtungssignale (3-25 m)

Das Richtungssignal ist Messsignal, das sich aus der gefilterten Halbspurweite und einem Anteil der Inertialmesseinheit (Wagenverdrehung) zusammensetzt. Es ist daher möglich, durch Wellenlängenfilterung der jeweiligen Halbspurweite sowie der jeweiligen Richtungsmessung und anschließender Berechnung der euklidischen Distanz die Synchronität zwischen diesen Signalen zu überprüfen. In Abbildung 4-6 oben sind die beiden Signale vor einer Wellenlängenfilterung dargestellt. Anhand derer kann in dieser Form keine Synchronität festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4-6 unten dieselben Signale nach einer Wellenlängenfilterung. In diesem Fall lässt sich nun sehr wohl eine Übereinstimmung erkennen. Das blaue Signal entspricht dem Richtungssignal und das rote dem Halbspurweitensignal.

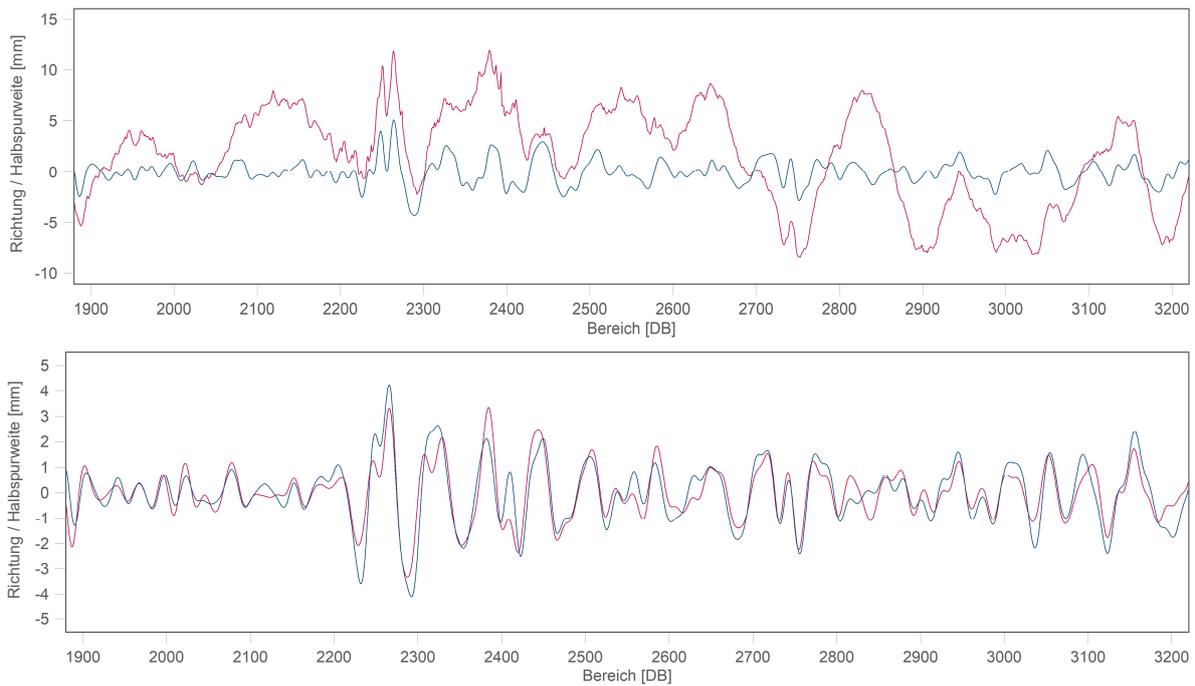


Abbildung 4-6: Richtungs- und Halbspurweitensignal ungefiltert/gefiltert

Da sich herausgestellt hat, dass diese beiden Messsignale grundsätzlich nicht synchron sind, muss eine zusätzliche Verschiebung $\Delta_{MD002|MD169}$ aufgebracht werden. Diese zusätzliche Verschiebung wird wiederum über die Verschiebefunktion ausgegeben. Erst dann kann die Verschiebung des Richtungssignals um Δ_0 erfolgen und somit das Signal stationiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer händischen Anpassung der Verschiebung, sofern der Stationierungsprozess ein nicht ausreichendes Ergebnis liefert. Zu beachten ist zudem, dass je nach Herzseite das Signal der linken bzw. rechten gefilterten Halbspurweite noch um die x-Achse gespiegelt werden muss, da ansonsten kein korrektes Ergebnis ausgegeben wird. Nach erfolgter Stationierung wird die Synchronität über eine separate Sequenz überprüft.

4.3.10 Stationierung der Richtungssignale (1-70 m bzw. 25-70 m)

Wie in Punkt 4.2.5 erwähnt, ist eine Korrelation der Richtungssignale Medium (3-25 m) mit den Richtungssignalen Long (1-70 m) durch einfache Wellenlängenfilterung möglich. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bis zum Jahr 2015, da danach die Richtungssignale Long nur noch mit einer Wellenlänge von 25-70 m vorhanden sind. Aus diesem Grund werden in einem ersten Schritt nur die Messsignale vor 2015 betrachtet und folglich stationiert. Dazu wird auch hier die zuvor errechnete zusätzliche Verschiebung $\Delta_{MD002|MD169}$ und anschließend die Verschiebung Δ_0 aufgebracht. Für die Messsignale ab 2015 wird vorerst angenommen, dass diese in synchroner Form vorliegen. Eine nachfolgende Kontrollsequenz dient der Überprüfung der Synchronität zwischen den Richtungssignalen Medium und Long vor bzw. nach 2015.

4.3.11 Stationierung der Längshöhensignale (3-25 m)

Da zwischen den Längshöhensignalen und den Richtungssignalen kein Zusammenhang gefunden wurde (siehe Punkt 4.2.5), wird angenommen, dass die Messsignale innerhalb der Messkanalgruppe MD169 synchron sind. Das bedeutet, dass auch für die Längshöhensignale die zusätzliche Verschiebung $\Delta_{MD002|MD169}$ aufgebracht wird, bevor die Signale um Δ_0 verschoben und somit stationiert werden. Überprüft wird die Synchronität direkt im Anschluss durch eine eigene Kontrollsequenz.

Es stellte sich heraus, dass die Längshöhen- und Richtungssignale nicht synchron sind und es entweder keine oder eine Abweichung von 14 DB gab. Diese Fehler lassen sich auf die Wagenstellung des Messwagens während der Messfahrt zurückführen. Wie in Abbildung 4-7 ersichtlich, stimmt die Lage des am Messrahmen befestigten Messsystems mit dem Referenzpunkt nicht überein. Je nach Wagenstellung ergibt sich hierbei also eine Abweichung von ± 7 DB, sprich eine Abweichung von insgesamt 14 DB. Aufgrund asymmetrischer Befestigung muss zudem ein Versatz von 1 DB berücksichtigt werden.

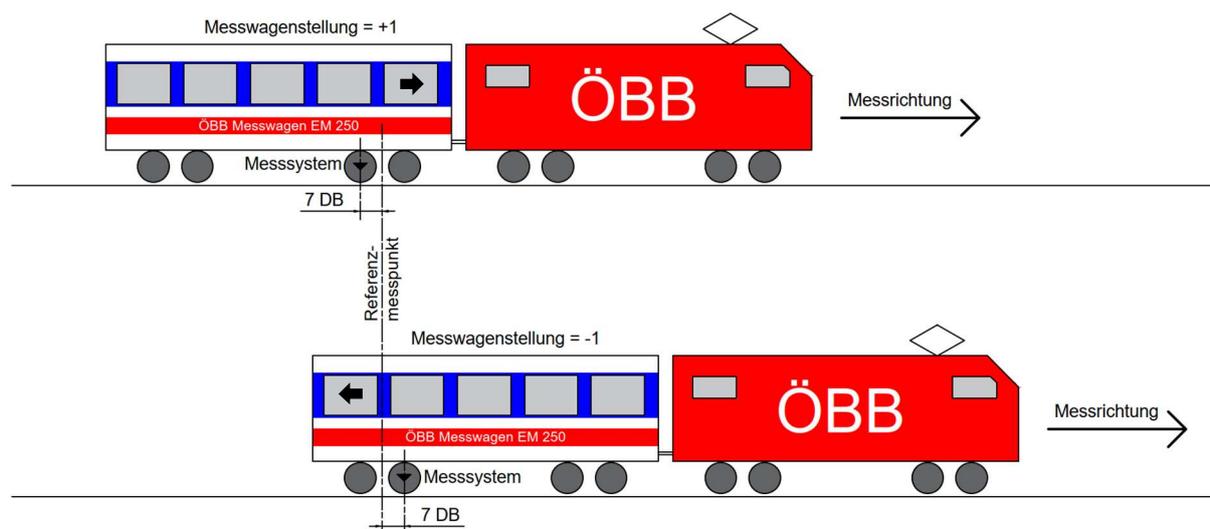


Abbildung 4-7: Einfluss Wagenstellung⁹

Diese zusätzliche Verschiebung der Längshöhensignale errechnet sich wie folgt:

$$\Delta_{\text{Messsystem}} = 7 \text{ DB} * \text{Wagenstellung} - 1 \text{ DB} \quad (\text{Formel 4-4})$$

Für alle Messfahrten mit Wagenstellung +1 ergibt sich schließlich ein Versatz von +6 DB und für alle Messfahrten mit Wagenstellung -1 ein Versatz von -8 DB. Die Verschiebung $\Delta_{\text{Messsystem}}$ muss vor dem Stationierungsprozess aufgebracht werden, um abschließend die Synchronität der Messsignale bestätigen zu können.

⁹ Quelle Abbildung: Eigene Darstellung – erstellt mit AutoCAD

4.3.12 Stationierung der Längshöhensignale (1-70 m bzw. 25-70 m)

Eine einfache Wellenlängenfilterung der Längshöhensignale Long ermöglicht einen Vergleich mit den Längshöhensignalen Medium. Damit die Messsignale schlussendlich in synchroner Form vorliegen, müssen die Daten um die bereits zuvor berechneten Verschiebungen $\Delta_{\text{Messsystem}}$, $\Delta_{\text{MD002|MD169}}$ und Δ_0 verschoben werden. Die Synchronität der nun stationierten Messsignale wird im Anschluss durch eine Kontrollsequenz überprüft. Wie bei den Richtungssignalen Long ist diese Vorgehensweise nur bis zum Jahr 2015 möglich, für die Messungen nach 2015 muss vorerst angenommen werden, dass die Messsignale synchron sind.

4.3.13 Bereichsidentifikation innerhalb der stationierten Signale

Um den jeweiligen Signalen eindeutige Bereiche (wie z. B. Weichenanfang, Weichenende) zuzuordnen zu können, wird zu jedem Weichentyp eine zugehörige Maßzeichnung benötigt, aus der die Weichenabmessungen entnommen werden. Danach ist die Lage der theoretischen Herzstückspitze zu ermitteln. Dazu wird aus dem linken und rechten ungefilterten Halbspurweitensignal der Abstand x zwischen Radlenkeranfang und Herzstück gemessen und dieser Abstand in der Maßzeichnung ausgehend vom Radlenkeranfang aufgetragen (siehe Abbildung 4-8). Die Lage der theoretischen Herzstückspitze (Abstand o) lässt sich somit aus der Maßzeichnung ermitteln. Da sämtliche Maße, ausgehend von der theoretischen Herzstückspitze, bekannt sind, können diese nun in jedem beliebigen Signal eingetragen werden – eine eindeutige Bereichszuordnung ist somit gegeben.

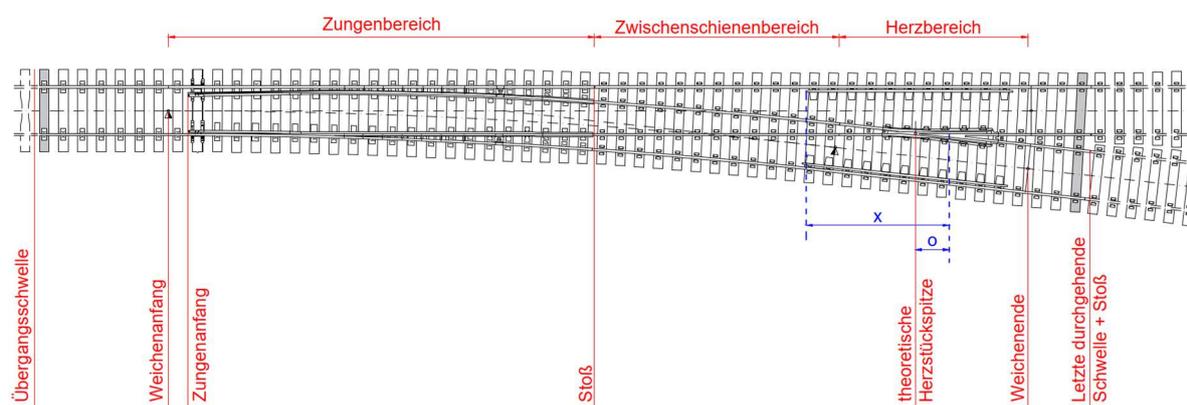


Abbildung 4-8: Bereichsidentifikation innerhalb der Weiche¹⁰

4.3.14 Ergebnis des abgeschlossenen Stationierungsprozesses

Abbildung 4-9 zeigt die unstationierten Signale sämtlicher Messfahrten am Beispiel des Längshöhenmesssignals (Wellenlänge 3-25 m). Die im Bild deutlich erkennbare Ungenauigkeit macht es unmöglich, für einen verhältnismäßig kurzen Weichenbereich Aussagen

¹⁰ Quelle Abbildung: Maßzeichnung Weiche ÖBB (EW 190-1:9 Fz(Be)) – bearbeitet mit AutoCAD

über den Zustand der Weiche treffen zu können (der in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 dargestellte Bereich von etwa 750 DB entspricht einer Länge von 187,5 m).

Im Gegensatz dazu ist mittels den stationierten Messsignalen (Abbildung 4-10) sehr wohl eine Zustandsbeschreibung über eine Zeitreihenbildung möglich.

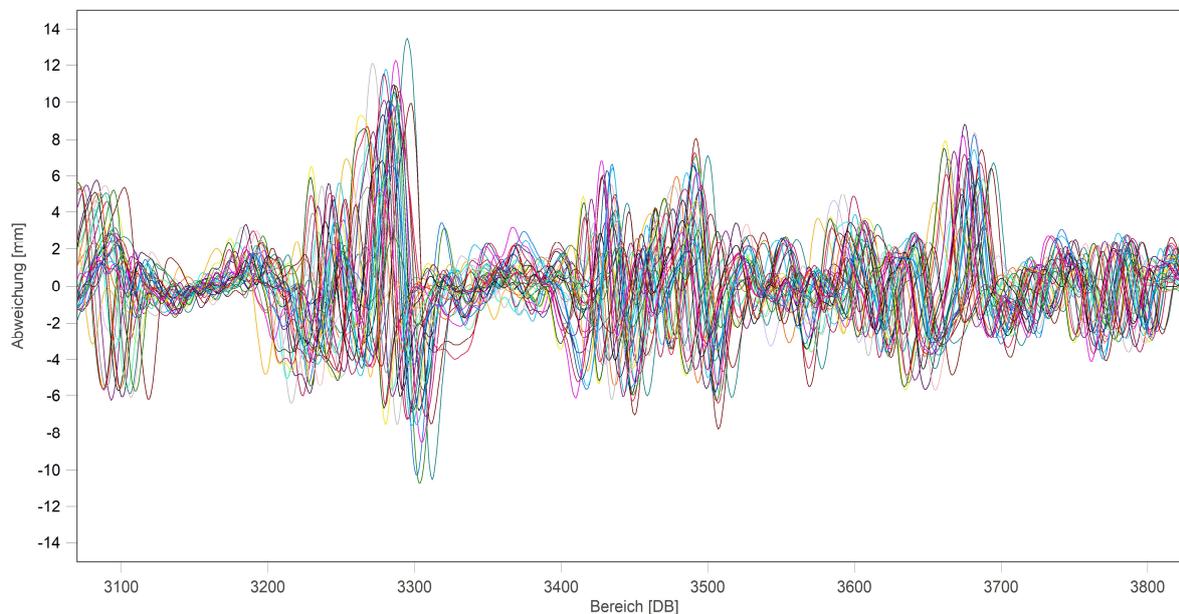


Abbildung 4-9: Signale der Längshöhe (3-25 m) unstationiert

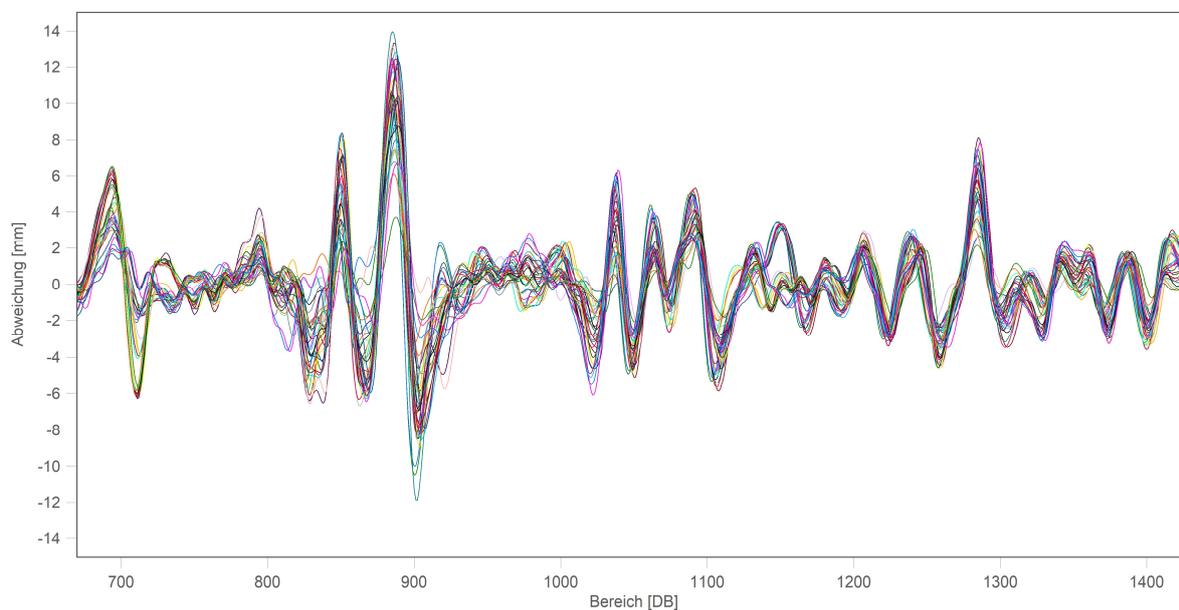


Abbildung 4-10: Signale der Längshöhe (3-25 m) stationiert

Diese zwei Abbildungen verdeutlichen anschaulich, wie wichtig stationierte Messdaten für eine Zustandsbeschreibung von Weichen sind. Ohne die Stationierung der Messdaten würden jegliche Beschreibungen über das Verhalten von Weichen zu falschen Ergebnissen führen.

Fellinger ermöglichte mit der Entwicklung von CoMPAcT bereits eine Zustandsbeschreibung von einfachen Weichen. Im nächsten Abschnitt wird nun darauf eingegangen, ob dieser Stationierungsalgorithmus auf Bogenweichen angewendet werden kann und ob in weiterer Folge auch eine Zustandsbeschreibung von Bogenweichen möglich ist.

5 Anwendung von CoMPACT auf Bogenweichen

Im Zuge der Arbeit werden insgesamt 17 Bogenweichen betrachtet (T_EBW50 bis T_EBW66), mit denen die Anwendbarkeit des Stationierungsalgorithmus CoMPACT auf Bogenweichen geprüft werden soll.

5.1 Betrachtete Bogenweichen

Bei den betrachteten Weichen handelt es sich dabei um sieben Innenbogenweichen und zehn Außenbogenweichen, wobei fünf Weichen mit Holzschwellen und 54E2-Schienenprofil und zwölf Weichen mit Betonschwellen und 60E1-Schienenprofil ausgeführt sind (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Betrachtete Bogenweichen

Nummer	Weichentyp	Schienenprofil	Abzweigradius	Schwelle	Herz	Zunge	Einbaujahr
T_EBW50	ABW	54E2	500	Holz	starr	12/FSch	1976
T_EBW51	ABW	54E2	500	Holz	starr	12/FSch	1977
T_EBW52	IBW	54E2	500	Holz	starr	12/FSch	1976
T_EBW53	IBW	54E2	500	Holz	starr	12/FSch	1977
T_EBW54	IBW	54E2	500	Holz	starr	12/FSch	1979
T_EBW55	ABW	60E1	1200	Beton	starr	18,5/Fz	1997
T_EBW56	ABW	60E1	1200	Beton	starr	18,5/Fz	1997
T_EBW57	IBW	60E1	1200	Beton	starr	18,5/Fz	1997
T_EBW58	IBW	60E1	1200	Beton	starr	18,5/Fz	1997
T_EBW59	ABW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1997
T_EBW60	ABW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1997
T_EBW61	IBW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1992
T_EBW62	ABW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1992
T_EBW63	ABW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1992
T_EBW64	ABW	60E1	500	Beton	starr	12/Fz	1998
T_EBW65	IBW	60E1	1200	Beton	starr	18,5/Fz	1997
T_EBW66	ABW	60E1	300	Beton	starr	9/Fz	1997

Die Bogenweichen T_EBW55 bis T_EBW66 wurden aufgrund durchgeführter Schotterbettreinigungen ausgewählt, um eine Beurteilung hinsichtlich des Schotterzustandes mittels Leistungsdichtespektrum treffen zu können (siehe Punkt 6.2). Sämtliche Weichen liegen auf der Südstrecke zwischen Wien und Wiener Neustadt beziehungsweise auf der Pyhrnstrecke zwischen Selzthal und St. Michael.

5.2 Messdaten

Für die Auswertung stehen Messdaten vom Jahr 2001 bis zum Jahr 2020 zur Verfügung. Die Messfahrten vor 2006 werden jedoch nicht näher betrachtet, da bei diesen Messfahrten die Signale der Längshöhe noch nicht enthalten waren und diese Messfahrten für die weitere Betrachtung daher nicht wesentlich sind. Ebenso werden im Rahmen der Arbeit die Messfahrten nach dem Jahr 2018 vernachlässigt, da Anpassungen an den Bezeichnungen einzelner Messsignale vorgenommen wurden und somit dem gesamten Prozess eine Art Umbenennungslogik vorgeschaltet werden müsste. Somit stehen für den Stationierungsprozess sämtliche Messfahrten zwischen 2006 und 2018 zur Verfügung, sofern sie nicht aufgrund fehlerhafter Charakteristiken oder Ähnlichem bereits im Vorhinein ausgeschlossen wurden.

5.3 Anwendbarkeit

Fellinger entwickelte CoMPACT im Rahmen seiner Dissertation unter Betrachtung von 45 einfachen Weichen. Die vorliegende Arbeit behandelt nun die Frage, ob dieser Algorithmus auch auf Bogenweichen anwendbar ist. Grundsätzlich sind die Messdaten für einfache Weichen und für Bogenweichen dieselben, daher verändert sich auch das Referenzsignal bzw. die Charakteristik dieses Signals nicht. Lediglich die Geometrie der beiden Weichenarten unterscheidet sich.

Die Anwendung des Algorithmus auf die 17 ausgewählten Bogenweichen zeigt, dass der Algorithmus ohne jegliche Anpassungen bzw. Änderungen auch für die Stationierung von Messdaten von Bogenweichen geeignet ist und der unterschiedliche Weichentyp somit keinen Einfluss auf den Stationierungsprozess hat. Einer flächendeckenden Anwendung von CoMPACT auf einfache Weichen und Bogenweichen steht somit nichts im Wege, ebenso wenig wie einer anschließenden Zustandsbeschreibung.

5.4 Besonderheiten bei der Anwendung

Die vorhandenen Messdaten der ausgewählten Bogenweichen weisen zwei wesentliche Besonderheiten auf, die im Folgenden beschrieben werden.

5.4.1 Änderung der Messfahrtrichtung auf der Südbahn

Sämtliche Weichen auf der Südbahn haben gemeinsam, dass jene, die vor 2012 spitz befahren wurden, nun stumpf befahren werden bzw. jene, die vor 2012 stumpf befahren wurden, nun spitz befahren werden. Dies liegt an einer generellen Änderung der Befahrungsrichtung auf der Südbahn zwischen Payerbach und Wien Meidling ab dem Frühjahr 2012. Das Problem zeigte sich auch schon bei der Auswertung der Messdaten von einfachen

Weichen. Eine Spiegelung der Messdaten vor bzw. nach 2012 stellt hier eine einfache Lösung dar. Sie führt dabei zu keiner zusätzlichen Anpassung des Algorithmus. Somit können alle Messfahrten trotz Änderung der Fahrtrichtung weiter betrachtet werden.

5.4.2 Größerer Datensatz mit mehreren Weichen

Grundsätzlich weisen die Messdaten, wie in Punkt 4.1.3 erwähnt, eine Länge von 2.000 DB auf (± 250 m um den Weichenanfang). Im Rahmen der Arbeit wurden jedoch auch größere Datensätze bearbeitet, in denen mehr als eine Weiche abgebildet waren. Der Vorteil dabei ist, dass der gesamte Stationierungsprozess dabei nur einmal durchgeführt werden muss und dadurch mehrere Weichen stationiert werden. Dazu ist lediglich eine Spiegelung sowie Verschiebung der Messdaten bei unterschiedlicher Befahrungsrichtung (spitz/stumpf) bzw. nur eine Verschiebung der Messdaten bei gleicher Befahrungsrichtung notwendig. Es ist also prinzipiell möglich, beliebig große Datensätze zu bearbeiten und somit mehrere Weichen gleichzeitig zu stationieren, wodurch der Arbeitsaufwand reduziert wird.

6 Datenauswertung

Wie bereits in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 ersichtlich, ist eine Stationierung der Messdaten unabdingbar, um im Anschluss Aussagen über den Zustand der jeweiligen Weiche treffen zu können. In diesem Kapitel werden nun die 17 zuvor stationierten Bogenweichen ausgewertet und hinsichtlich zweier unterschiedlicher Kenngrößen untersucht. Einerseits anhand der Standardabweichung der Längshöhe (σ_h) und andererseits anhand des Leistungsdichtespektrums (LDS).

6.1 Standardabweichung der Längshöhe (σ_h)

Die Standardabweichung gibt an, wie sehr eine Stichprobe um ihren Mittelwert (arithmetisches Mittel) streut. Eine geringe Standardabweichung deutet auf eine geringe Streuung der Werte hin, eine hohe Standardabweichung hingegen auf eine hohe Streuung. Die Standardabweichung errechnet sich wie folgt: [31]

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Formel 6-1})$$

σ_h ... Standardabweichung der Längshöhe

x_i ... Messwert i

\bar{x} ... arithmetischer Mittelwert

n ... Größe der Stichprobe

Für die Auswertung dienen als „Stichprobe“ die Messpunkte des Längshöhensignals (3-25 m), die durch den Messwagen EM 250 alle 25 cm (= 1 DB) aufgenommen wurden. Um sicherzugehen, dass nur die Standardabweichung im Weichenbereich (Weichenanfang bis Weichenende) ausgewertet wird, muss zuvor noch eine Bereichszuordnung erfolgen – siehe Punkt 4.3.13. Da die Messdaten jeweils für die linke und rechte Schiene getrennt vorliegen, werden die Standardabweichungen für beide Seiten berechnet und diese im Anschluss gemittelt. Als Ergebnis wird somit eine gemittelte Standardabweichung über den gesamten Weichenbereich ausgegeben, die als Punkt in einem Diagramm dargestellt wird. Durch eine Zeitreihenbildung können somit Aussagen über den geometrischen Zustand der Weiche getroffen werden. Eine Zeitreihenbildung macht jedoch nur Sinn, wenn für die Auswertung stationierte Daten herangezogen werden, da nur in diesem Fall dieselben Punkte in den zu untersuchenden Messsignalen verglichen werden. Die Anwendung von CoMPACT ermöglicht dies. Durch die Auswertung der Standardabweichung der Längshöhe lassen sich getätigte Stopfeinsätze detektieren bzw. in weiterer Folge, durch Festlegung von Eingriffsschwellen, zukünftig notwendige Stopfeinsätze vorhersagen.

Am besten lässt sich die Entwicklung der Standardabweichung der Längshöhe über die Zeit mit einer linearen Funktion beschreiben [7], die im Optimalfall so aussieht wie in Abbildung 6-1 dargestellt. Die Punkte stellen die Standardabweichung der Längshöhe der jeweiligen Messfahrten dar, wobei auf der Ordinate die Standardabweichung und auf der Abszisse das Messdatum aufgetragen ist. Die blauen Linien sollen den linearen Verlauf verdeutlichen, die roten vertikalen Linien weisen auf getätigte Stopfeinsätze hin. Fellingner zeigt in seiner Dissertation, dass sich das 97,5%-Prognoseintervall besonders gut für die Auswertung getätigter Stopfeinsätze eignet. [7] Das Prognoseintervall legt Grenzen fest, in welchen die Werte der Standardabweichung der Längshöhe liegen dürfen, damit kein Stopfeinsatz an dieser Stelle gesetzt wird. Auch im Rahmen dieser Arbeit erwies sich das 97,5%-Prognoseintervall als passend.

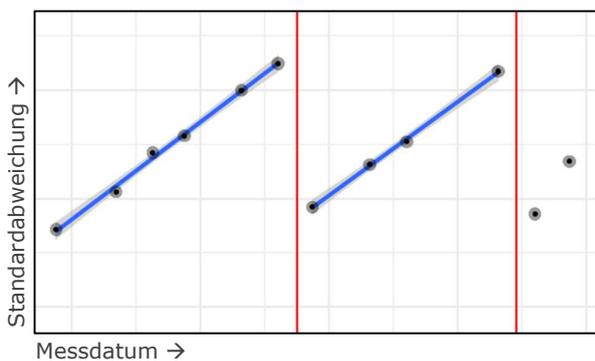


Abbildung 6-1: Standardabweichung der Längshöhe

Eine andere interessante Auswertemöglichkeit ist die Berechnung der gleitenden Standardabweichung. Dabei wird jeweils ein Fenster von drei Metern innerhalb der Weiche betrachtet, die Standardabweichung für diesen Bereich berechnet und anschließend das Fenster um einen Data Break (DB) verschoben. Für die Auswertung kann auch eine andere Abschnittslänge herangezogen werden, das Drei-Meter-Fenster liefert jedoch anschauliche Ergebnisse. Aus der gleitenden Standardabweichung lässt sich mit dem Programm imc FAMOS ein aussagekräftiger Farb-Plot erstellen, in dem die kritischen Bereiche innerhalb der Weiche identifiziert werden können.

In den nachfolgenden Abschnitten wird nun näher auf die Standardabweichung der Längshöhe bzw. auf die gleitende Standardabweichung eingegangen. Zuvor erfolgt jedoch noch ein Vergleich der ausgewerteten Daten mit tatsächlich getätigten Stopfeinsätzen. Die Informationen zu den tatsächlich getätigten Stopfeinsätzen stammen von den ÖBB.

6.1.1 Vergleich ausgewerteter Daten mit tatsächlich ausgeführten Stopfeinsätzen

Für die Weichen T_EBW50 bis T_EBW54 liegen Informationen zu tatsächlich ausgeführten Stopfeinsätzen vor. Diese werden nun mit den berechneten Stopfeinsätzen anhand Tabelle 6-1 verglichen. Eine nähere Betrachtung der ausgewerteten Daten erfolgt erst später.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die berechneten Stopfeinsätze in den Jahren 2016 und 2018 für alle Weichen mit den Angaben der ÖBB übereinstimmen. Zudem passen die Ergebnisse für das Jahr 2007 bei den Weichen T_EBW50, T_EBW51, T_EBW52 und T_EBW54

mit den Angaben der ÖBB zusammen, lediglich bei der Weiche T_EBW53 wurde im Jahr 2007 kein Stopfeinsatz detektiert. Dieselbe Situation zeigt sich im Jahr 2010, hier wurde bei der Weiche T_EBW54 kein Stopfeinsatz detektiert. Interessant sind die berechneten Stopfeinsätze im Jahr 2009 bei den Weichen T_EBW50, T_EBW51, T_EBW52 und T_EBW54. Hier wurden nämlich laut den zur Verfügung gestellten Informationen keine Stopfeinsätze durchgeführt, die Datenauswertung zeigt in diesem Jahr jedoch ganz eindeutig, dass hier eine Stopfmaßnahme stattgefunden hat.

Tabelle 6-1: Vergleich Stopfeinsätze

Weiche:		Ausführungsjahr Stopfeinsätze:													
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
T_EBW50	Angabe ÖBB:		x			x						x		x	
	berechnet:		x		x	x						x		x	
T_EBW51	Angabe ÖBB:		x			x						x		x	
	berechnet:		x		x	x						x		x	
T_EBW52	Angabe ÖBB:		x			x						x		x	
	berechnet:		x		x	x						x		x	
T_EBW53	Angabe ÖBB:		x			x								x	
	berechnet:					x								x	
T_EBW54	Angabe ÖBB:		x			x								x	
	berechnet:		x		x									x	

6.1.2 Auswertung Standardabweichung der Längshöhe

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Standardabweichung der Längshöhe einiger ausgewählter Weichen vorgenommen. Es werden bewusst nicht alle 17 betrachteten Weichen näher beschrieben, da dies in Bezug auf die vorliegende Arbeit keinen Mehrwert liefern würde. In den folgenden Abbildungen sind die gemittelte Standardabweichung der Längshöhe der linken und rechten Schiene sowie die Farb-Plots für die Herz- bzw. Radlenkerseite dargestellt. Diese Abbildungen wurden mit den Programmen RStudio bzw. imc FAMOS erstellt.

Bei der gemittelten Standardabweichung der Längshöhe der linken und rechten Schiene ist auf der Ordinate die Standardabweichung in Millimeter aufgetragen, auf der Abszisse das Messdatum in Jahren. Die roten vertikalen Linien stellen detektierte Stopfeinsätze dar. Die grau hinterlegte Fläche entspricht dem Konfidenzintervall, das den Bereich angibt, in dem der tatsächliche Mittelwert vermutet wird. Dieser Bereich ist bei mehreren Punkten entsprechend enger als bei wenigen, da bei einer größeren Datenmenge genauere Aussagen möglich sind.

Bei den, durch Berechnung der gleitenden Standardabweichung, erstellten Farb-Plots ist auf der Ordinate das Messdatum in Jahren aufgetragen und auf der Abszisse der Bereich

im Signal in Data Break (DB). Zudem ist auf der rechten Seite ein Farbspektrum dargestellt, wobei ein weiß bis gelblicher Bereich eine niedrige Standardabweichung beschreibt und ein orange bis roter Bereich eine hohe Standardabweichung. Die schwarzen vertikalen Linien stellen den Weichenanfang (WA), das Weichenende (WE) bzw. die Lage der theoretischen Herzstückspitze dar. Die blau-strichlierten horizontalen Linien markieren die getätigten Stopfeinsätze. Wie bereits zuvor erwähnt, eignet sich die Berechnung der gleitenden Standardabweichung mit anschließender Darstellung im Farb-Plot sehr gut für die Identifizierung von kritischen Bereichen innerhalb der Weiche.

6.1.2.1 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW50

Die Weiche T_EBW50 ist eine Außenbogenweiche mit Holzschwellen, 54E2-Schienenprofil, einem Abzweigradius von 500 m und liegt auf der Südbahn. In Abbildung 6-2 ist die gemittelte Standardabweichung der Längshöhe dargestellt. Im Zuge der Auswertung wurden fünf Stopfeinsätze detektiert (rote vertikale Linien). Von einem schlechten Niveau im Jahr 2007 wurde die Gleislagequalität mit den darauffolgenden Stopfeinsätzen stetig verbessert, wodurch Ende 2010 eine Standardabweichung von einem Millimeter erreicht wurde. In den folgenden sechs Jahren verschlechterte sich die Gleislagequalität nur in geringem Ausmaß, daher wurden in diesem Zeitraum keine Stopfmaßnahmen durchgeführt. In den Jahren 2016 und 2018 folgten zwei weitere Stopfeinsätze.

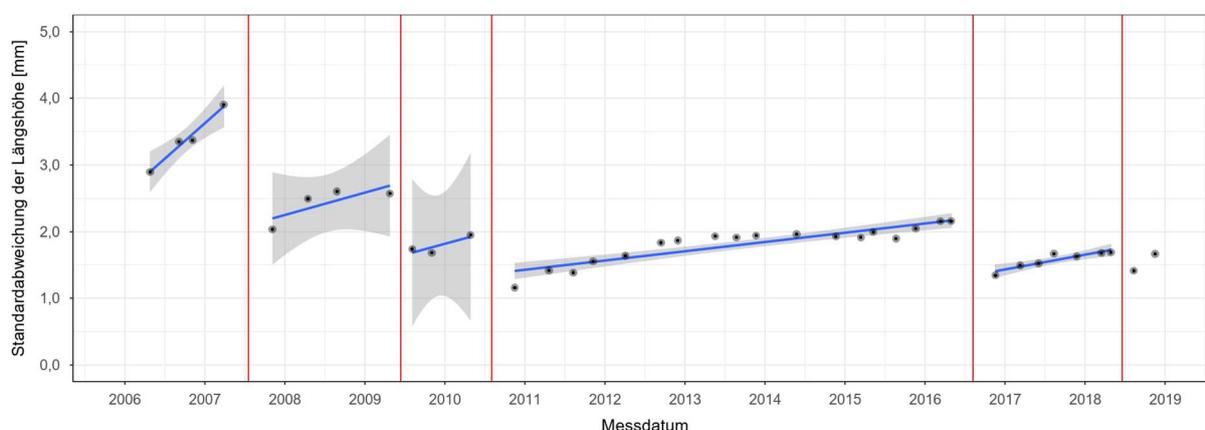


Abbildung 6-2: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW50

An dieser Stelle sei auch noch erwähnt, dass die Instandhaltungsmaßnahme Stopfen prinzipiell die einzige Möglichkeit ist, um die Längshöhe zu beeinflussen. [7] Wie beim Vergleich der ausgewerteten Daten mit den Angaben der ÖBB bereits angemerkt, wurde im Jahr 2009 ein Stopfeinsatz detektiert, der in Abbildung 6-2 recht eindeutig erkennbar ist. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Auswertung der Standardabweichung der Längshöhe ein Wert für den gesamten Weichenbereich ausgegeben wird. Es könnte sich also rein theoretisch um einen schwerwiegenden Einzelfehler handeln, der im Jahr 2009 ausgebessert wurde und so das Ergebnis „verfälscht“. Aufschluss darüber könnte im Folgenden die Betrachtung der gleitenden Standardabweichung geben.

Abbildung 6-3 zeigt den Farb-Plot der Weiche T_EBW50 auf der Herzseite. In dem Farb-Plot ist ersichtlich, dass sich vor allem der Bereich um den Weichenanfang, aber auch der Herzbereich als relativ kritisch erweisen. Des Weiteren weisen der Zungenbereich bei etwa -120 bis -90 DB und der Stoß bei etwa -80 DB, im Gegensatz zum restlichen Weichenbereich, eine erhöhte Standardabweichung auf. Gut erkennbar ist in dieser Abbildung auch, dass Mitte 2009 eindeutig ein Stopfeinsatz durchgeführt wurde, der noch dazu zu einer beachtlichen Verbesserung führte und die Gleislage vor allem im Herzbereich nachhaltig verbesserte. Der Stopfeinsatz Mitte 2007 ist dagegen im Farb-Plot weniger gut erkennbar, obwohl damit eine wesentlich größere Verbesserung der Standardabweichung im gesamten Weichenbereich erzielt werden konnte (siehe Abbildung 6-2). Das liegt daran, dass die Gleislage vor dem Stopfeinsatz im Jahr 2007 auf einem schlechten Niveau lag und mit dem Stopfeinsatz noch keine sehr gute Gleislagequalität erreicht werden konnte. Da das Farbspektrum der Standardabweichung bei 2,5 mm endet, ist dieser Stopfeinsatz dementsprechend nicht klar ersichtlich.

Anhand dieser Abbildung kann bereits gezeigt werden, dass es innerhalb von Weichen eindeutig identifizierbare Bereiche gibt, die für eine schlechte Gleislage verantwortlich sind. Auch in den folgenden Farb-Plots ist immer wieder ein ähnliches Muster erkennbar.

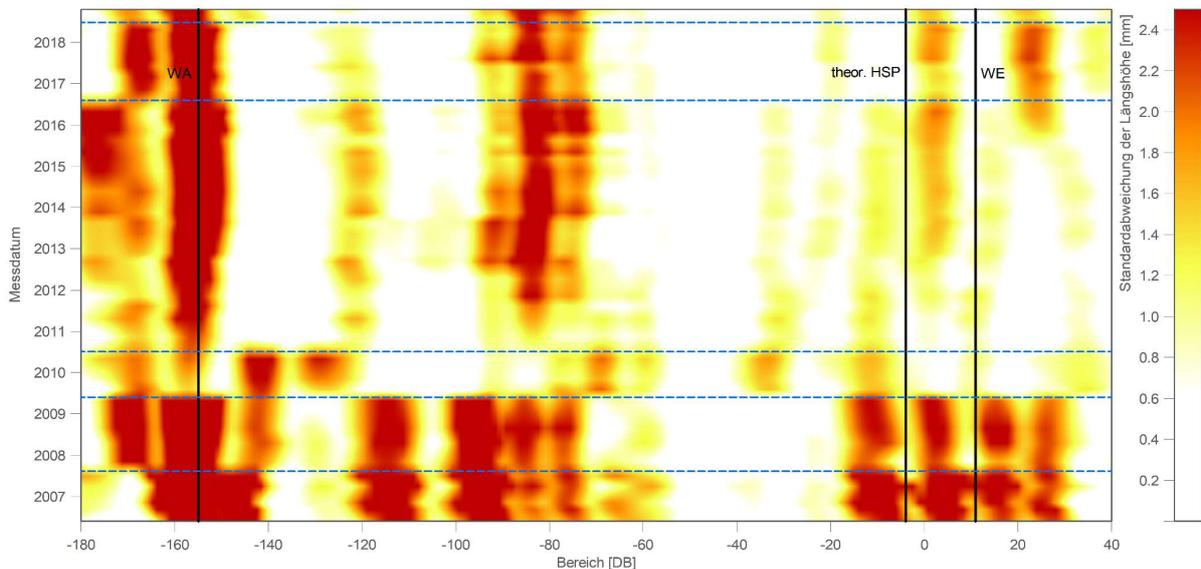


Abbildung 6-3: Farb-Plot T_EBW50 - Herzseite

Der Farb-Plot der Radlenkerseite (Abbildung 6-4) unterscheidet sich zum Farb-Plot der Herzseite hauptsächlich durch die geringere Standardabweichung im Herzbereich. Dieser Umstand ist der Herzstücklücke auf der Herzseite geschuldet, da dort eine erhöhte Beeinträchtigung aufgrund der Stoßbelastung vorliegt. Im restlichen Weichenbereich ist die Standardabweichung beider Schienen ähnlich beziehungsweise auf der Radlenkerseite etwas geringer. Aufgrund der ähnlichen Standardabweichung auf beiden Seiten ist eine Mittelung der Längshöhe der linken und rechten Schiene zur Beurteilung des geometrischen Zustandes somit gerechtfertigt.

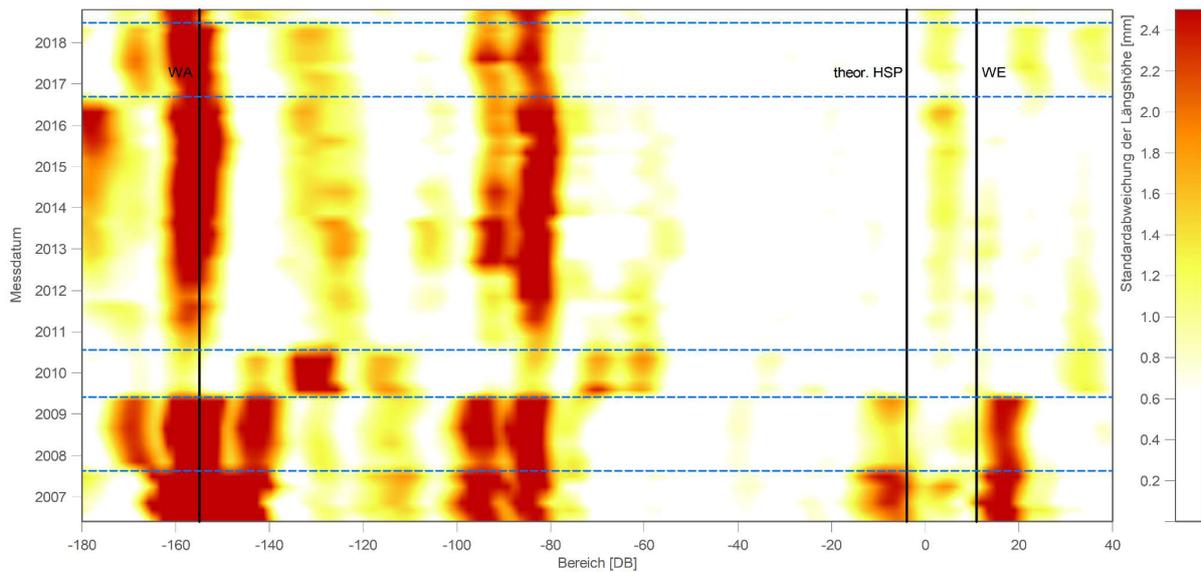


Abbildung 6-4: Farb-Plot T_EBW50 - Radlenkerseite

6.1.2.2 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW51

In Abbildung 6-5 ist die Standardabweichung der Längshöhe der Weiche T_EBW51 dargestellt. Diese Weiche liegt auf der Südbahn und die Ausführung stimmt mit jener der Weiche T_EBW50 überein. Wie zuvor sind auch bei dieser Weiche Stopfeinsätze in den Jahren 2007, 2009, 2010, 2016 und 2018 detektiert worden (siehe Abbildung 6-5). Vor allem die Instandhaltung im Jahr 2010 konnte ein relativ gutes Gleislageniveau erzielen, welches in den Folgejahren weitgehend gehalten werden konnte.

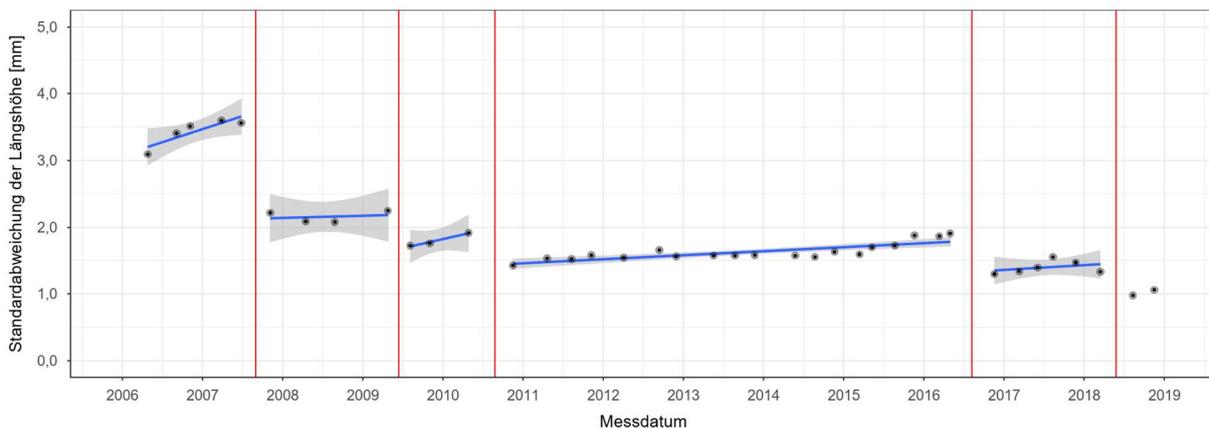


Abbildung 6-5: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW51

Auch hier tritt hinsichtlich des detektierten Stopfeinsatzes im Jahr 2009 dieselbe Frage auf wie bei der Weiche T_EBW50. Nach Berechnung der gleitenden Standardabweichung der Längshöhe zeigt der Farb-Plot der Herzseite (Abbildung 6-6) eindeutig, dass hier eine Stopfmaßnahme vorgenommen wurde, da sich das Farbspektrum im Bereich des Weichenanfangs sowie der Flügelschiene abrupt ändert. Im Farb-Plot der Herzseite fällt zudem auf, dass im Bereich von -90 DB bis -70 DB, wo laut Maßzeichnung der Weiche eigentlich der

Stoß sein müsste, eine geringe Standardabweichung vorhanden ist. Vergleicht man diesen Bereich mit dem der Weiche T_EBW50, so ist ein deutlicher Unterschied erkennbar. Möglicherweise wurde dieser Stoß sehr sorgfältig ausgeführt und ist daher in einem äußerst guten Zustand, oder es liegen andere Gründe vor, die im Zuge dieser Auswertung jedoch nicht erläutert werden.

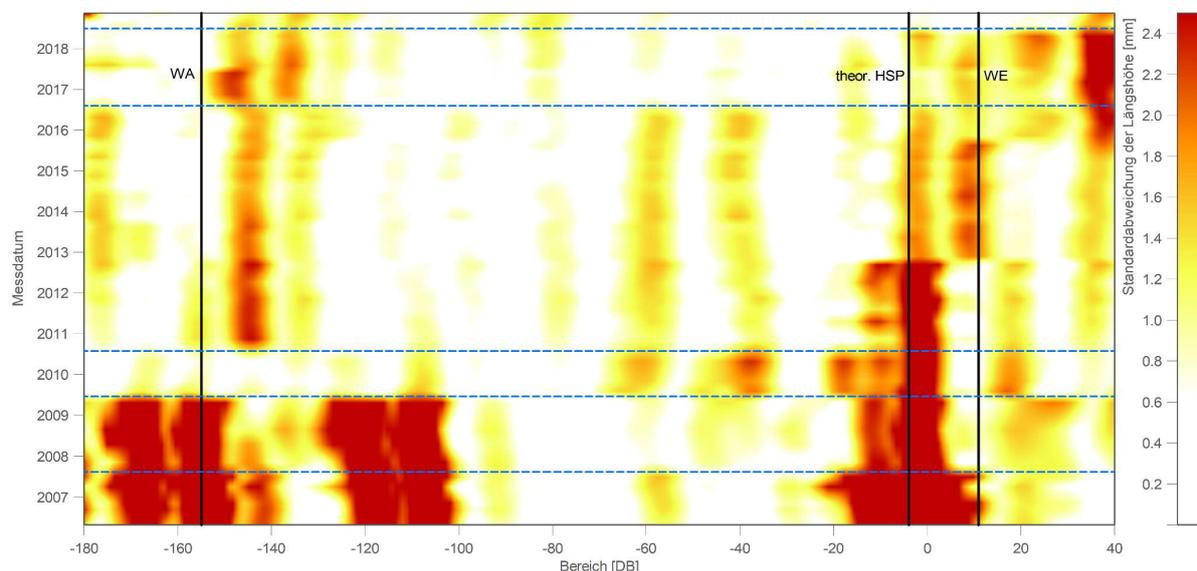


Abbildung 6-6: Farb-Plot Herzseite T_EBW51

Tendenziell ist bei der gleitenden Standardabweichung auf der Radlenkerseite (Abbildung 6-7) eine geringere Standardabweichung der Längshöhe erkennbar als auf der Herzseite. Zudem befindet sich, anders als bei der Bogenweiche T_EBW50, auch hier der Stoß in einem sehr guten Zustand. In den beiden Farb-Plots ist die Stopfmaßnahme im Jahr 2009 eindeutig erkennbar, in Abbildung 6-5 ist die Verbesserung der Standardabweichung jedoch nicht so ausgeprägt. Dies liegt daran, dass bei der Berechnung der Standardabweichung der Längshöhe der gesamte Weichenbereich gemittelt wird. Die mäßige Verbesserung im Herzbereich relativiert also die starke Verbesserung am Weichenanfang.

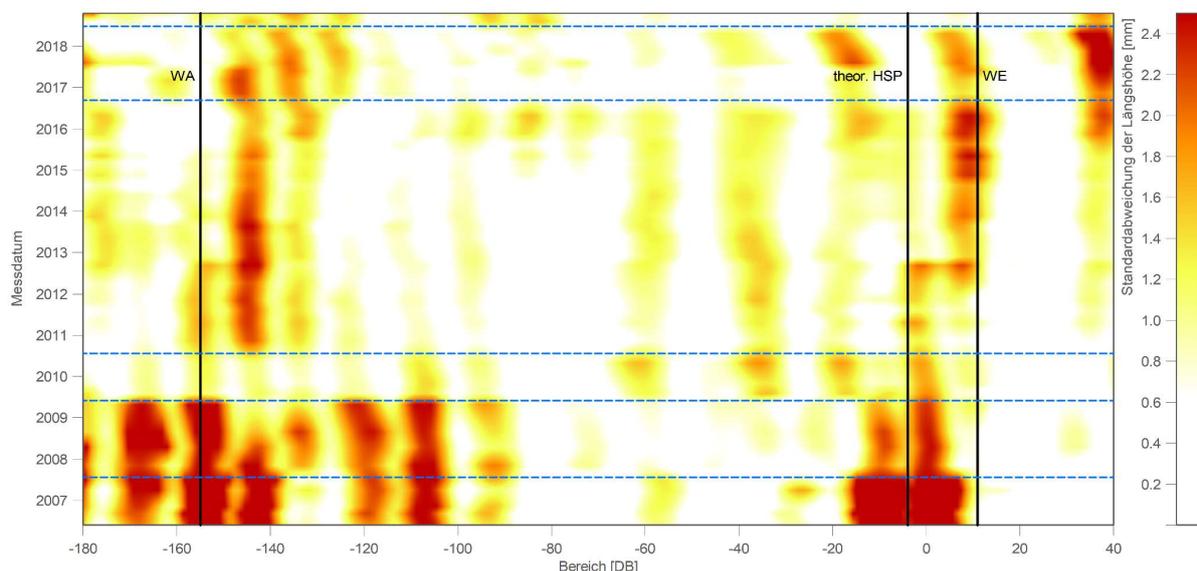


Abbildung 6-7: Farb-Plot Radlenkerseite T_EBW51

6.1.2.3 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW52

Im Gegensatz zu den beiden vorigen Bogenweichen wurde die Weiche T_EBW52 als Innenbogenweiche ausgeführt. Die Ausführungsart hinsichtlich Schwellen, Schienenprofil, Abzweigradius etc. ist allerdings die gleiche wie zuvor. Bei dieser Weiche wurden fünf Stopfeinsätze detektiert. Die Charakteristik der Verläufe ist dabei aber anders als im Optimalfall. Der Stopfeinsatz im Jahr 2007 ist auf den ersten Blick nicht eindeutig als solcher erkennbar, da er nur eine geringe Verbesserung erzielte. Die Verbesserung ist aber ausreichend, um hier einen Stopfeinsatz zu detektieren, da die Streuung der Werte bis zu diesem Zeitpunkt sehr gering ist und der betrachtete Wert somit nicht mehr im Prognoseintervall liegt. Zudem weist die höhere Verschlechterungsrate in den darauffolgenden Jahren auf einen Eingriff hin. Dieser Stopfeinsatz brachte also nicht das gewünschte Ergebnis. Erst der Stopfeinsatz im Jahr 2009 konnte den schnellen Verschlechterungsprozess stoppen und die darauffolgende Stopfmaßnahme im Jahr 2010 brachte die Gleislage wieder auf ein sehr gutes Niveau. Fraglich ist der Stopfeinsatz im Jahr 2016, dieser hätte aufgrund der bis dahin sehr geringen Verschlechterungsrate eingespart werden können, zumal sich das Gleislagenniveau im Jahr 2018 erst recht wieder auf demselben Level befand, wie durch den linearen Trend prognostiziert (strichlierte Linie).

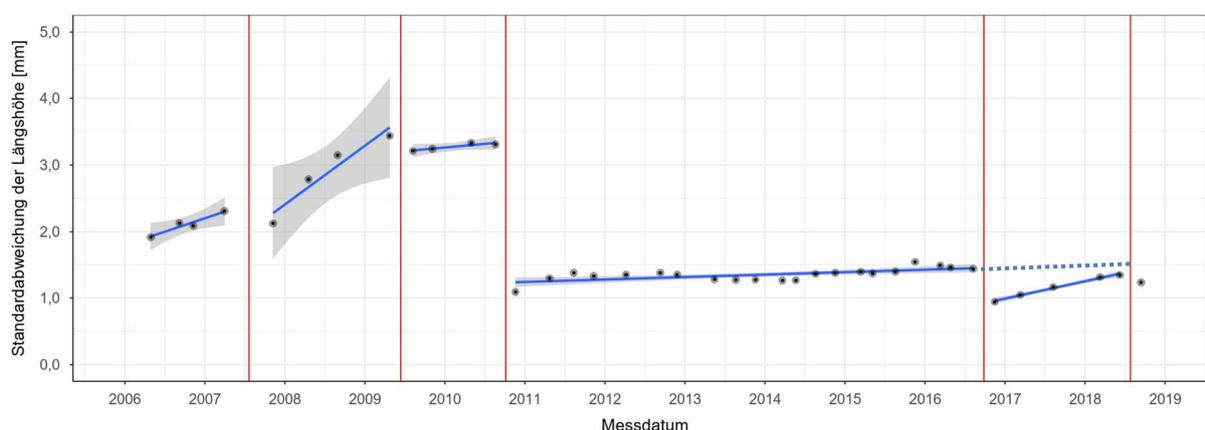


Abbildung 6-8: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW52

Abweichend von den Angaben der ÖBB muss abermals das Jahr 2009 hinsichtlich des detektierten Stopfeinsatzes näher betrachtet werden. Die gemittelte Standardabweichung der Längshöhe weist zwar keine wirkliche Verbesserung der Gleislage auf, jedoch fällt vor allem die geringere Verschlechterungsrate auf, die nach dem möglichen Stopfeinsatz erreicht wurde. Diese Tatsache lässt also vermuten, dass in diesem Jahr eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt wurde.

Aufgrund der erwähnten geringen Verbesserung lässt sich dieser Stopfeinsatz in den Farb-Plots (Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10) daher nicht wirklich erkennen. Im Farb-Plot der gleitenden Standardabweichung der Herzseite lässt sich neben dem Stopfeinsatz im Jahr

2009 auch jener aus dem Jahr 2007 nicht wirklich erkennen. Geschuldet ist dies der minimalen Verbesserung der Standardabweichung. Dagegen ist die Stopfmaßnahme im Jahr 2010 eindeutig ersichtlich. Diese Maßnahme führte jedoch auch zu einer enormen Verbesserung der Gleislagequalität (siehe Abbildung 6-8).

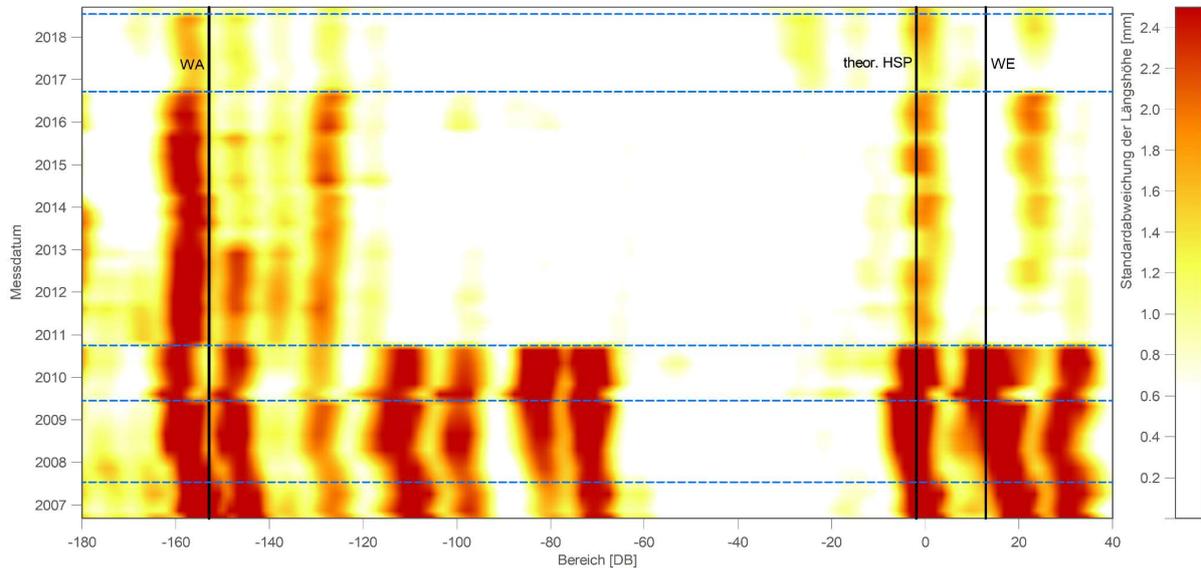


Abbildung 6-9: Farb-Plot T_EBW52 Herzseite

Beim Farb-Plot der Radlenkerseite ist die Situation im Prinzip gleich wie beim Farb-Plot der Herzseite. In den Jahren 2007 und 2009 sind die Instandhaltungsmaßnahmen nicht erkennbar, im Jahr 2010 besteht dagegen keinerlei Zweifel, dass Maßnahmen vorgenommen wurden.

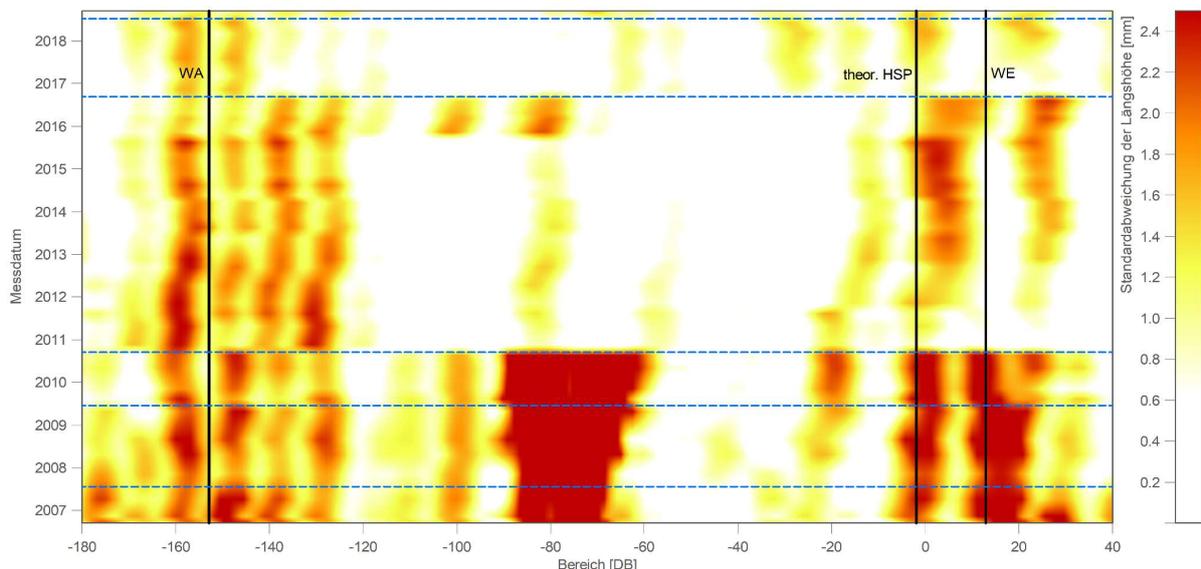


Abbildung 6-10: Farb-Plot T_EBW52 Radlenkerseite

6.1.2.4 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW53

Die Weiche T_EBW53 ist wie die Weiche T_EBW52 eine Innenbogenweiche mit Holzschwellen, 54E2-Schieneprofil und 500 m Abzweigradius. Bei dieser Bogenweiche wurden drei

Stopfeinsätze in den Jahren 2010, 2016 und 2018 eruiert, die eindeutig erkennbar sind. Auch die Verschlechterungsraten der linearen Verläufe sind sehr ähnlich. Interessant erscheint ein Messwert im Jahr 2007. Laut den Angaben der ÖBB wurde in diesem Jahr eine Stopfmaßnahme durchgeführt. Im Zuge der Auswertung wurde jedoch kein Stopfeinsatz an dieser Stelle gesetzt, da die Verschlechterungsrate nach 2007 wieder mit jener zuvor übereinstimmt und es sich daher theoretisch auch um eine Fehlmessung handeln könnte.

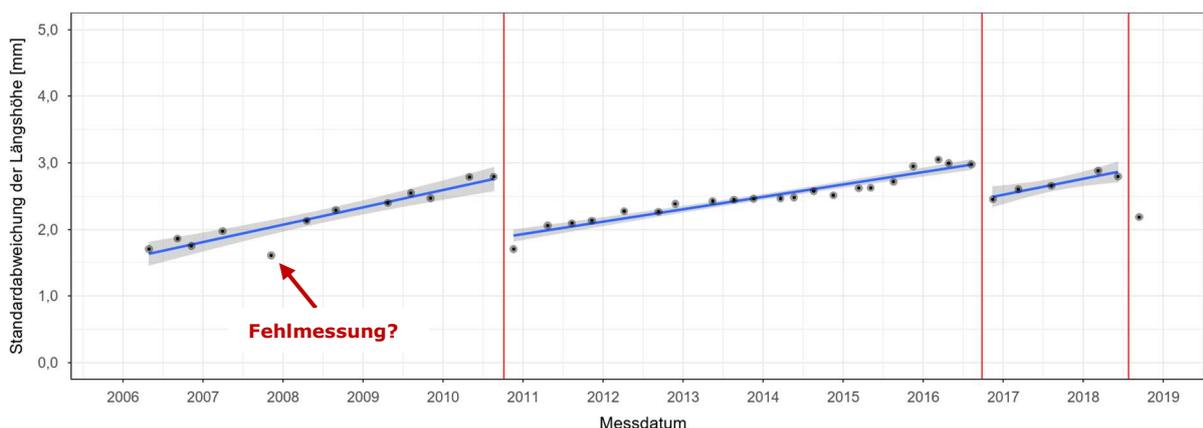


Abbildung 6-11: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW53

Die Auswertung der gleitenden Standardabweichung anhand von Farb-Plots zeigt auch bei der Bogenweiche T_EBW53 wieder eindeutig erkennbare Bereiche, die erhöhte Werte der Standardabweichung aufweisen. Dazu gehören der Isolierstoß am Weichenanfang, der Zungenbereich, der Stoß bei etwa -80 DB bzw. -30 DB und der Herzbereich. Der Stopfeinsatz im Jahr 2010 ist im Farb-Plot der Herzseite (Abbildung 6-12) nicht klar ersichtlich, jener im Jahr 2016 hingegen schon und das, obwohl die Standardabweichung nach dem Stopfeinsatz bei etwa 2,5 mm liegt. Verantwortlich dafür ist der schlechte Zustand im Herzbereich, der auch durch die Stopfmaßnahme nicht verbessert werden konnte.

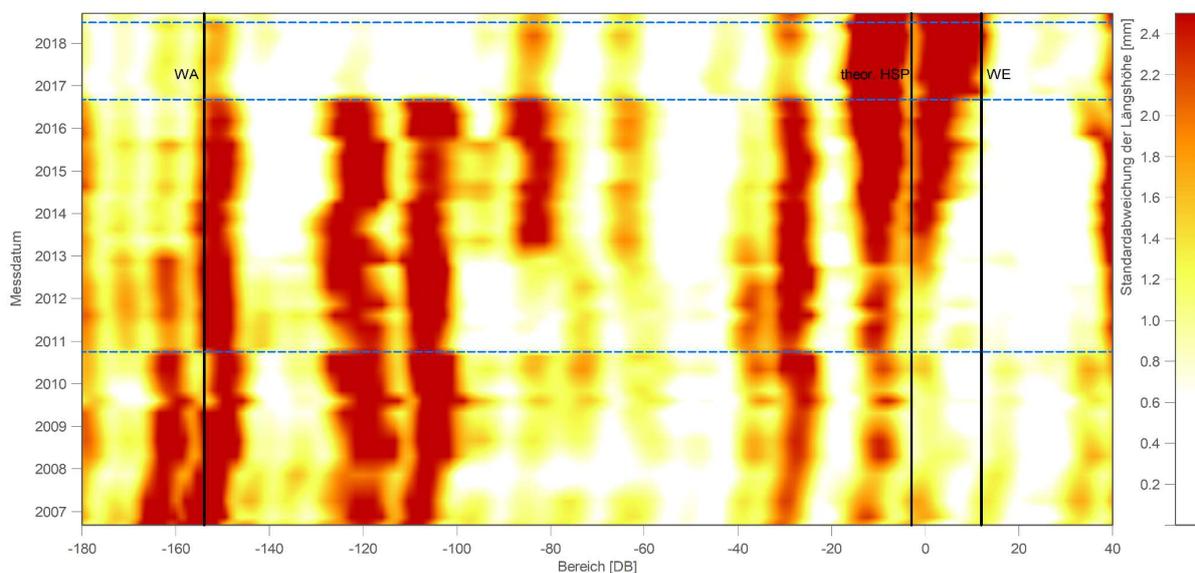


Abbildung 6-12: Farb-Plot T_EBW53 Herzseite

Im Farb-Plot der Radlenkerseite (Abbildung 6-13) lässt sich dagegen auch der Stopfeinsatz im Jahr 2010 erkennen. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Radlenkerseite eine geringere Standardabweichung über den gesamten Weichenbereich aufweist, als dies auf der Herzseite der Fall ist. Das liegt daran, dass sich die Herzseite auf der bogenäußeren Seite befindet und daher, abgesehen von der generell höheren Belastung im Herzbereich, einer höheren Beanspruchung unterliegt.

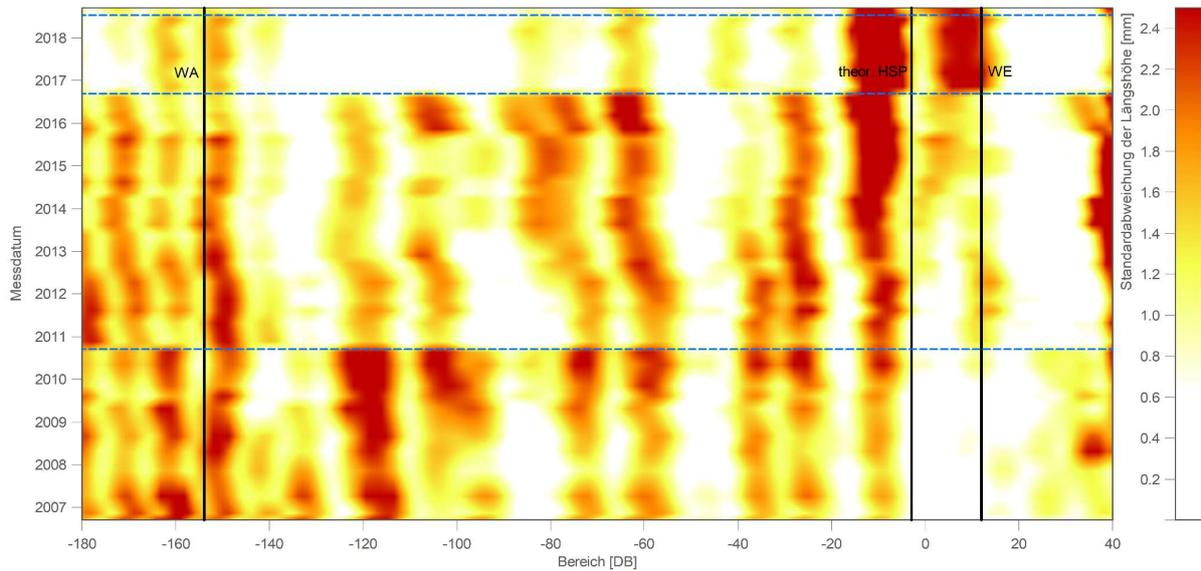


Abbildung 6-13: Farb-Plot T_EBW53 Radlenkerseite

6.1.2.5 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW54

Bei der Weiche T_EBW54 handelt es sich um eine Innenbogenweiche mit Holzschwellen, 54E2-Schienenprofil und einem Abzweigradius von 500 m. Bei dieser Bogenweiche wurden vorerst drei Stopfeinsätze in den Jahren 2007, 2016 und 2018 detektiert. Wie in Abbildung 6-14 zu sehen, kann allein aus der Standardabweichung zwischen 2007 und 2009 keine Aussage zu durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen getroffen werden. Erst danach lässt sich wieder ein Trend erkennen. Um nähere Informationen für diesen Zeitraum zu

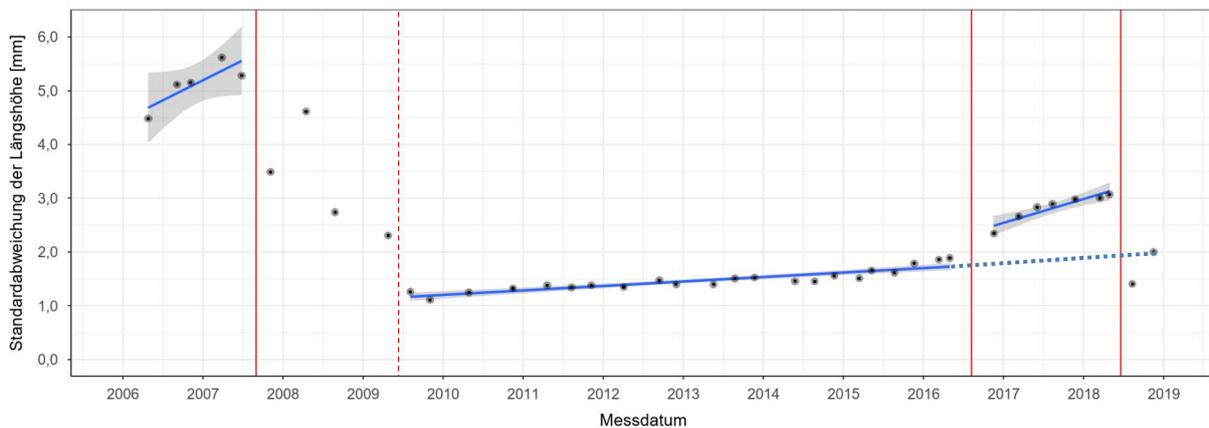


Abbildung 6-14: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW54

erhalten, könnte die gleitende Standardabweichung Aufschluss geben, die später noch genauer betrachtet wird.

Laut Angaben der ÖBB wurde im Jahr 2010 eine Stopfmaßnahme durchgeführt. Anhand der vorhandenen Messdaten ist dies jedoch unwahrscheinlich, da im Jahr 2010 keine wesentliche Änderung der Standardabweichung der Längshöhe zu sehen ist (siehe Abbildung 6-14). Bei Betrachtung des Stopfeinsatzes im Jahr 2016 fällt auf, dass sich die Standardabweichung nach der getätigten Instandhaltungsmaßnahme erhöht hat. In diesem Fall wurde durch den Stopfeinsatz die prinzipiell auf einem guten Niveau befindliche Gleislage verschlechtert und zudem in den Folgejahren eine höhere Verschlechterungsrate erzielt. Hätte dieser Stopfeinsatz nicht stattgefunden und würde sich der Zustand, wie durch die strichlierte Linie angedeutet, weiter linear verschlechtern, dann wäre diese Weiche auch im Jahr 2019 noch in einem relativ guten Zustand. Auch der Stopfeinsatz im Jahr 2018 hätte somit eingespart werden können.

Im Farb-Plot der Herzseite (Abbildung 6-15) zeigt sich, im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Weichen, vor allem im Herzbereich ein guter Zustand. Zusätzlich lässt sich anhand der gleitenden Standardabweichung deutlich ein Stopfeinsatz im Jahr 2009 erkennen, da hier über den gesamten Weichenbereich eine sprunghafte Verbesserung der Standardabweichung stattfand. Weitere Erkenntnisse über den Zeitraum zwischen Mitte 2007 und Mitte 2009 können aber auch mit der gleitenden Standardabweichung nicht gewonnen werden. Die Verschlechterung der Standardabweichung durch den Stopfeinsatz im Jahr 2016 kann besonders im Herzbereich festgestellt werden.

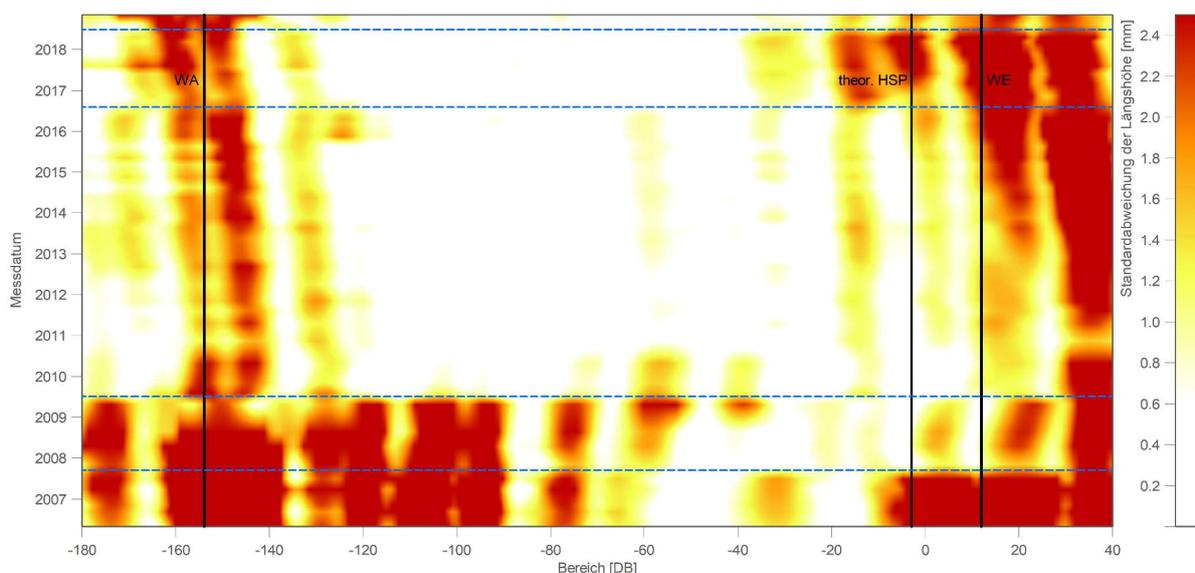


Abbildung 6-15: Farb-Plot T_EBW54 Herzseite

Der Farb-Plot der Radlenkerseite (Abbildung 6-16) ähnelt dem der Herzseite sogar im Herzbereich sehr stark, obwohl normalerweise auf der Herzseite eine höhere Standardabweichung aufgrund der höheren Belastung vorherrscht. Auch hier ist im Jahr 2009 klar ein

Stopfeinsatz ersichtlich, wodurch mit ziemlicher Sicherheit gesagt werden kann, dass in diesem Jahr eine Stopfmaßnahme durchgeführt wurde. Ebenso ist eine Verschlechterung durch den Stopfeinsatz im Jahr 2016 zu sehen – vor allem im Herzbereich.

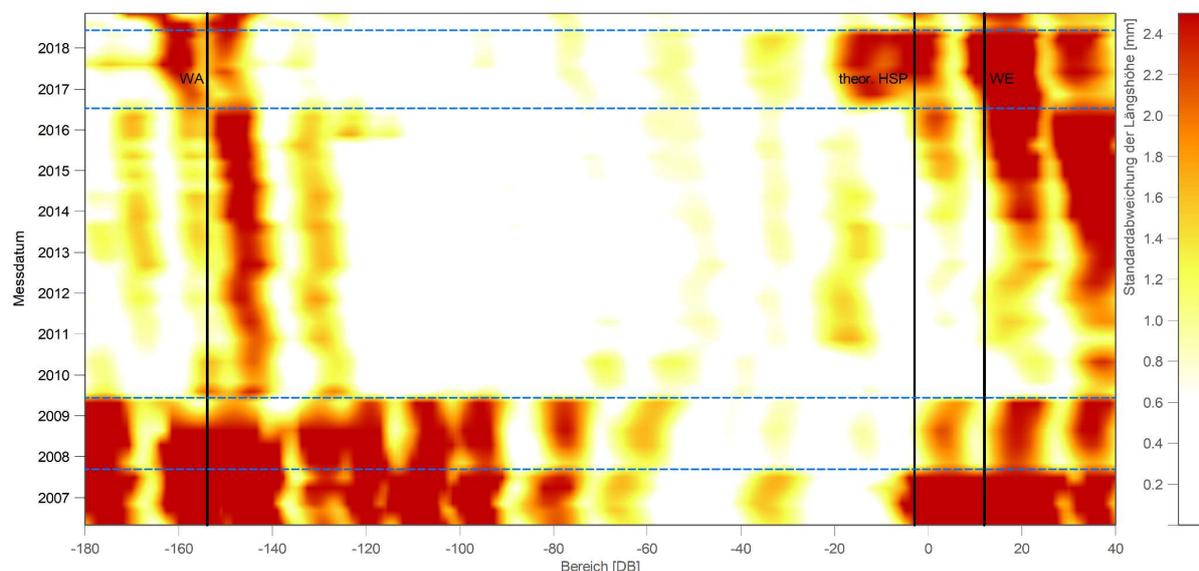


Abbildung 6-16: Farb-Plot T_EBW54 Radlenkerseite

6.1.2.6 Standardabweichung der Längshöhe T_EBW62

Abbildung 6-17 zeigt die Standardabweichung der Weiche T_EBW62, einer Außenbogenweiche mit Betonschwellen, 60E1-Schienenprofil und 500 m Abzweigradius. Bei dieser Bogenweiche konnten vorerst nur zwei Stopfeinsätze detektiert werden, einer im Jahr 2016 und einer im Jahr 2018. Bis 2015 lassen sich nur bedingt Zusammenhänge erkennen, wie zum Beispiel im Jahr 2006 bzw. 2007. Es stellt sich die Frage, warum in diesem Zeitraum kein klarer Trend erkennbar ist. Aufgrund der Vielzahl der „Ausreißer“ erscheint es äußerst unwahrscheinlich, dass es sich hierbei um Fehlmessungen handelt.

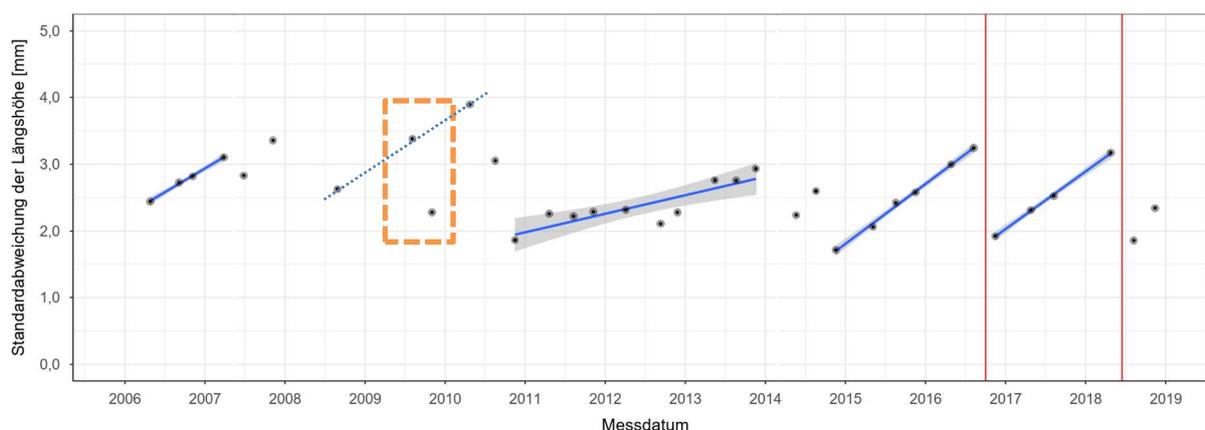


Abbildung 6-17: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW62

Um eine Erklärung für dieses Problem zu finden, wurden die Messungen im Jahr 2009 näher untersucht (oranger strichlierter Rahmen). Dazu wird das Längshöhensignal (3-25 m Wellenlänge) über den gesamten Weichenbereich betrachtet (siehe Abbildung 6-18).

Es fällt auf, dass die beiden Messsignale fast über den gesamten Bereich praktisch identisch sind, außer im Bereich von etwa -160 bis -140 DB, also genau am Weichenanfang. Bei diesem Einzelfehler handelt es sich vermutlich um einen stark beeinträchtigten Isolierstoß. Möglicherweise wurde hier versucht, durch Behebung dieses Einzelfehlers eine größere Instandhaltungsmaßnahme hinauszuzögern. Damit konnte auch eine deutliche Verbesserung der Standardabweichung von etwa -12 mm auf -4 mm erreicht werden. Allerdings war diese Verbesserung nur von kurzer Dauer, da sich, wie in Abbildung 6-17 zu sehen ist, die Standardabweichung in weiterer Folge wieder deutlich verschlechterte.

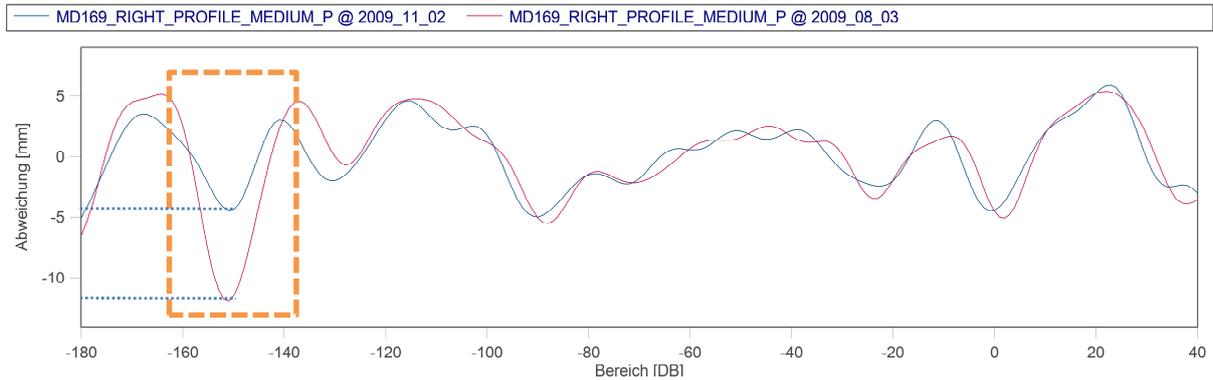


Abbildung 6-18: Längshöhensignale T_EBW62 (2009)

Da nun bekannt ist, dass ein Einzelfehler dieses Verhalten in Abbildung 6-17 stark beeinflussen kann und somit eine plausible Detektion von Stopfeinsätzen unmöglich macht, muss eine Alternative gefunden werden, um trotzdem durchgeführte Stopfmaßnahmen detektieren zu können. Eine einfache Lösung bietet dabei die Variation des betrachteten Bereiches. In diesem Fall wird der Weichenanfang für die Berechnung der Standardabweichung nicht berücksichtigt. Abbildung 6-19 zeigt nun die Standardabweichung der Längshöhe der Bogenweiche T_EBW62, für deren Berechnung nur der Bereich vom Stoß bei etwa -80 DB bis zum Weichenende betrachtet wurde.

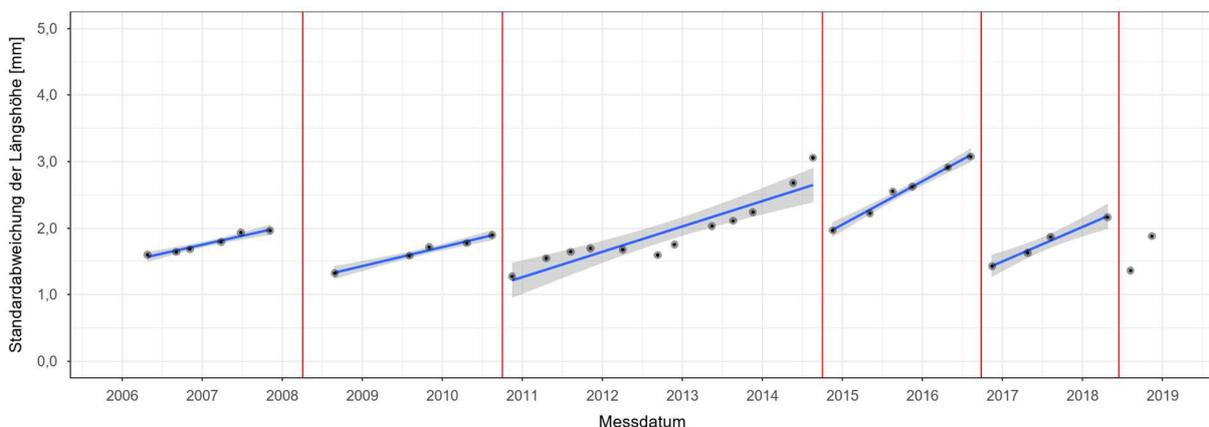


Abbildung 6-19: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW62 (geänderte Bereichsgrenzen)

Wie unschwer erkannt werden kann, gibt es im Gegensatz zu Abbildung 6-17 eindeutige Zusammenhänge, die eine Detektion von Stopfeinsätzen zulassen. Anhand dieser Abbildung können daher fünf Stopfeinsätze in den Jahren 2008, 2010, 2014, 2016 und 2018 detektiert werden.

Mit diesem Beispiel werden die Grenzen der angewendeten Methode deutlich, da es nämlich nicht automatisiert möglich ist, Einzelfehler für die Berechnung der Standardabweichung der Längshöhe auszuschließen. Wie zuvor beschrieben, verfälscht ein Einzelfehler das gesamte Ergebnis, da die Standardabweichung für den gesamten Weichenbereich berechnet wird. In diesen Fällen muss eine nähere Betrachtung der Weiche erfolgen und, falls erforderlich, der Bereich für die Berechnung der Standardabweichung manuell variiert werden.

Der Farb-Plot der Herzseite der Bogenweiche T_EBW62 (Abbildung 6-20) zeigt vor allem am Weichenanfang und im Herzbereich eine hohe Standardabweichung. Gut erkennbar sind auch die Stopfeinsätze im den Jahren 2010 und 2016. Der Stopfeinsatz im Jahr 2008 ist anhand dieses Farb-Plots jedoch nicht erkennbar, obwohl die Standardabweichung bei dieser Stopfmaßnahme von 2,0 mm auf etwa 1,3 mm verbessert wurde. Anhand dieser Abbildung könnte auch Anfang 2014 eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt worden sein, da eine eindeutige Verbesserung bei etwa -90 dB ersichtlich ist.

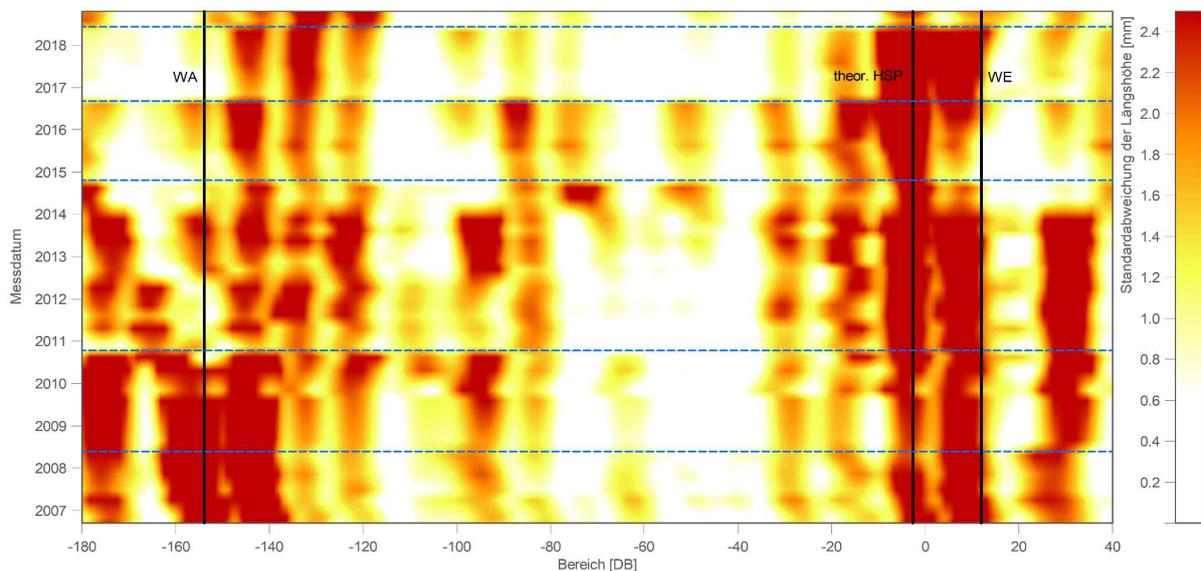


Abbildung 6-20: Farb-Plot T_EBW62 Herzseite

Der Farb-Plot der Radlenkerseite (Abbildung 6-21) weist ein ähnliches Verhalten wie jener der Herzseite auf. Dabei sind wiederum der Weichenanfang sowie der Herzbereich in einem relativ schlechten Zustand, im Vergleich zur Herzseite ist jedoch der Stoß im Bereich von -80 dB auf einem besseren Niveau. Auf der Radlenkerseite lassen sich vor allem die Stopfeinsätze in den Jahren 2010, 2014 und 2016 erkennen. Die im Farb-Plot der Herzseite ersichtliche Verbesserung im Bereich von -90 dB Anfang 2014 ist auch auf der

Radlenkerseite zu sehen, wodurch in diesem Zeitraum wahrscheinlich ein Eingriff stattgefunden hat. Anhand Abbildung 6-19 kann dabei aber nicht von einem Stopfeinsatz ausgegangen werden. Es wären weitere Betrachtungen notwendig, um die Ursache für diese Charakteristik zu ergründen.

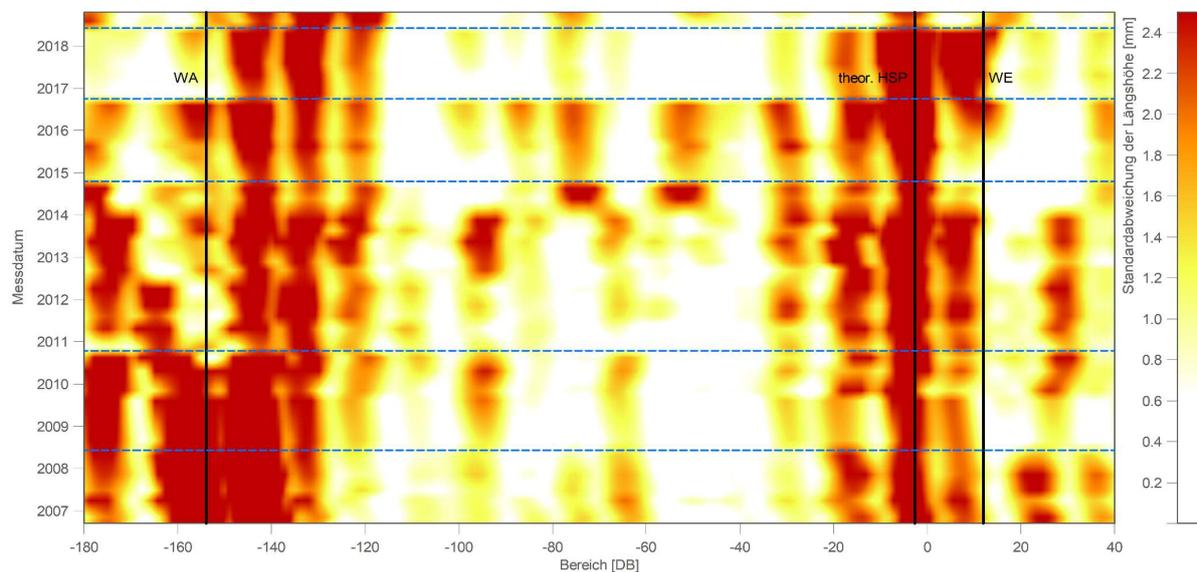


Abbildung 6-21: Farb-Plot T_EBW62 Radlenkerseite

6.1.3 Zusammenfassung Standardabweichung der Längshöhe

In Anbetracht der vorangehenden Auswertung eignet sich die Methode der Berechnung der Standardabweichung der Längshöhe sehr gut zur Detektion von durchgeführten Stopfeinsätzen. In Kombination mit der gleitenden Standardabweichung lassen sich nicht nur die Bereiche innerhalb der Weiche finden, die für eine schlechte Gleislage verantwortlich sind, sondern auch Unsicherheiten hinsichtlich detektierter Stopfeinsätze weitgehend beseitigen. Problematisch erweist sich die Methode der gleitenden Standardabweichung und anschließender Darstellung im Farb-Plot bei hohen Standardabweichungen und geringen Verbesserungen, da durch das Farbspektrum die Änderungen der Standardabweichung nicht mehr klar ersichtlich sind.

Anhand der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Bogenweichen kann gezeigt werden, dass die Auswertung mittels Standardabweichung sowie gleitender Standardabweichung in gleicher Weise wie bei einfachen Weichen funktioniert. Es sind daher keine weiteren Anpassungen an der bestehenden Auswertemethodik notwendig. Dies liegt vor allem darin begründet, dass der Stationierungsalgorithmus auch für Bogenweichen funktioniert und sämtliche Messsignale in stationierter und synchroner Form vorliegen.

6.2 Leistungsdichtespektrum (LDS)

Über die spektrale Leistungsdichte wird die auf die Frequenz bezogene Leistung eines Signals in einem infinitesimalen Frequenzband angegeben. Ein Leistungsdichtespektrum (engl.: power density spectrum) entsteht dann, wenn die spektrale Leistungsdichte über dem Frequenzspektrum aufgetragen wird. Die Gesamtleistung eines Signals lässt sich mittels dem Integral über alle Frequenzen berechnen. Die spektrale Leistungsdichte besitzt die Dimension Leistung mal Zeit und wird in der Einheit Watt/Hertz angegeben. [32]

Die spektrale Leistungsdichte soll es ermöglichen, den Schotterzustand von Weichen zu beschreiben. Bisher wurden Zustandsbeschreibungen des Gleisschotters vorwiegend nur für das freie Streckengleis anhand der Fraktalanalyse durchgeführt. Hansmann und Landgraf entwickelten dazu eine Methode, die es erlaubt, mittels Wellenlängenanalyse den Zustand des Schotters sowie des Unterbaus über die Rauigkeit des Längshöhensignals zu beschreiben. Dabei wird durch Anwendung der Fraktalanalyse das Längshöhensignal in drei Wellenlängenbereiche unterteilt. Der erste Bereich umfasst die Wellenlängen von 1-3 m, der zweite Bereich jene von 3-25 m und der dritte die Wellenlängen von 25-70 m. Im Zuge dessen stellte sich heraus, dass sich der mittlere Bereich (Wellenlänge 3-25 m) sehr gut für die Beschreibung des Schotters und der langwellige Bereich (25-70 m) sehr gut für die Beschreibung des Unterbaus eignet. [22] [33] Die Fraktalanalyse bedient sich der Modified Divider Length Method. Diese benötigt zwei Stützpunkte, um eine Wellenlänge ausreichend beschreiben zu können. Für die zu untersuchende Wellenlänge ist demnach die doppelte Einflusslänge notwendig. Hansmann und Landgraf wählten für die in Österreich übliche, maximale Wellenlänge eines Messsignals von 70 m eine Einflusslänge von 150 m. Da Weichen nur über eine begrenzte Längsausdehnung verfügen, erweist sich die Fraktalanalyse aufgrund der eben erwähnten Anforderungen für die Beschreibung des Schotterzustandes von Weichen als nicht optimal. Michael Fellingner beschäftigte sich daher im Rahmen seiner Dissertation mit der spektralen Leistungsdichte, auf die nun näher eingegangen wird. [7]

Das Leistungsdichtespektrum (LDS) errechnet sich anhand Formel 6-2:

$$LDS_f = 2 * D_x * \frac{\left(\sum_{i=0}^L \left[a_i * \cos \left(\frac{2\pi * i * f}{L} \right) \right] \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^L \left[a_i * \sin \left(\frac{2\pi * i * f}{L} \right) \right] \right)^2}{L}$$

(Formel 6-2)

D_x = Abtastrate (25 cm)

a = Eingangsdaten

f = betrachtete Frequenz

L = Länge des Eingangsdatensatzes

Die Division durch die Länge des Eingangsdatensatzes ist notwendig, um die Vergleichbarkeit zwischen Leistungsdichtespektren, basierend auf einer unterschiedlichen Länge der Eingangsdatensätze, zu ermöglichen. Unterschiedliche Längen der zu vergleichenden Daten können somit das Ergebnis nicht beeinflussen.

Da der Begriff der Wellenlänge im Eisenbahnwesen gängiger ist als der Begriff der Frequenz und die Wellenlänge und die Frequenz ohnehin in direktem Zusammenhang stehen, wird im Folgenden mit dem Begriff der Wellenlänge gearbeitet.

Abbildung 6-22 zeigt das Leistungsdichtespektrum (LDS) des Längshöhensignals einer Messfahrt in einem doppelt-logarithmischen Diagramm. Auf der Abszisse sind die Wellenlängenbereiche in Meter aufgetragen, auf der Ordinate die Leistungsdichte in $\text{mm}^2/1/\text{m}$. Die rot markierten Zahlen bei 3 m bzw. 25 m verdeutlichen den Wellenlängenbereich, in dem die Beschreibung des Schotterzustandes erfolgt.

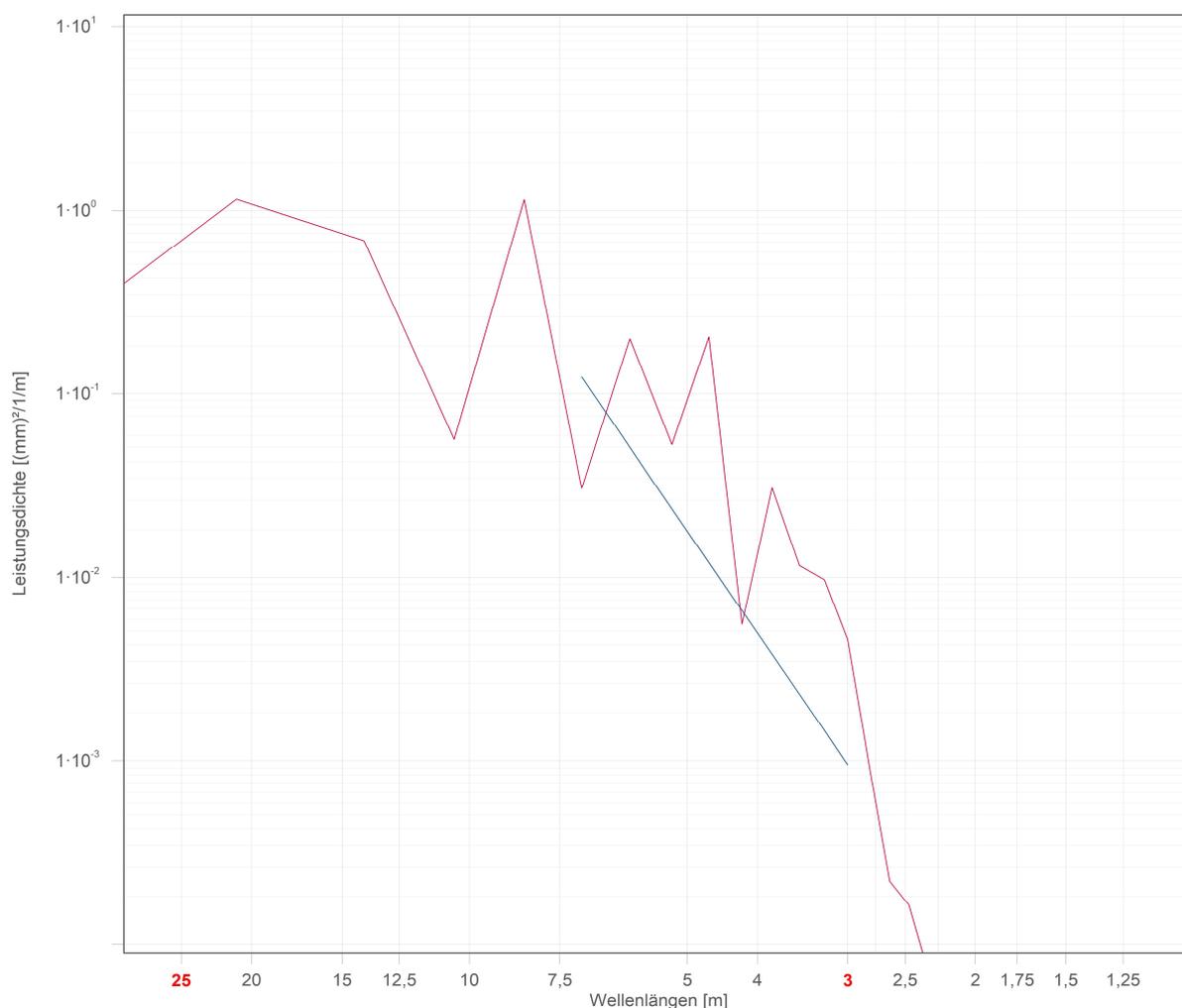


Abbildung 6-22: Leistungsdichtespektrum (LDS)

Allein aus dem Leistungsdichtespektrum lässt sich noch auf keinen Schotterzustand schließen, dazu bedarf es weiterer Überlegungen. Wie bereits zuvor erwähnt, zeigten Hansmann und Landgraf anhand der Fraktalanalyse, dass Änderungen im Wellenlängenbereich von 3-25 m auf einen unzureichenden Schotterzustand hinweisen und aufgrund dieser Änderungen auf einen konkreten Schotterzustand geschlossen werden kann. Frühere Anwendungen des Leistungsdichtespektrums zeigten zudem, dass besonders im Wellenlängenbereich von 1,5 m bis 7,6 m die Verschlechterung des Schotterzustandes ersichtlich wird. [34]. Da der Oberbaumesswagen EM 250 der ÖBB nur den Wellenlängenbereich von 3-25 m erfasst, wird folgend für die weiteren Betrachtungen der Wellenlängenbereich von 3,0 bis 7,6 m berücksichtigt. Der Schotterzustand soll nun durch Beurteilung der Rauigkeit der Kurve in diesem Bereich bestimmt werden. Dies gestaltet sich jedoch schwierig, da die Kurve stark schwankt. Aus diesem Grund erfolgt eine Beurteilung anhand einer Annäherung mittels linearer Funktion (siehe Abbildung 6-22 – blaue Linie). Die Kurve der Leistungsdichte wird dabei mit LDS^* bezeichnet, die angenäherte Gerade mit \overline{LDS} .

Die Regressionsgerade \overline{LDS} errechnet sich nach Formel 6-3:

$$\overline{LDS} = \alpha + \beta * f_i^* \quad (\text{Formel 6-3})$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}) * (LDS_i^* - \overline{LDS}_i^*)}{(f_i - \bar{f})^2}$$

$$\alpha = \overline{LDS}^* - \beta * \bar{f}$$

Daraus lässt sich anschließend die Leistungsdichtezahl BCI (engl. Ballast Condition Index) berechnen. Hierfür muss lediglich die Regressionsgerade \overline{LDS} einmal abgeleitet werden (Formel 6-4).

$$BCI = \frac{d(\overline{LDS})}{d(f)} \quad (\text{Formel 6-4})$$

Ändert sich die Leistungsdichte innerhalb des beschriebenen Bereichs, dann ändert sich auch die Steigung der Regressionsgeraden, welche schließlich durch den BCI ausgedrückt wird. Dieses Verhalten wird für die Beschreibung der Rauigkeit des Messsignales und somit für die Beschreibung des Schotterzustandes herangezogen.

Es stellt sich nun die Frage, wie ein guter Schotterzustand definiert wird bzw. wann ein guter Schotterzustand vorherrscht. Michael Fellingner beschreibt in seiner Dissertation, dass nach einer durchgeführten Schotterbettreinigung von einem guten Schotterzustand ausgegangen werden kann. Einerseits ist diese Instandhaltungsmaßnahme sehr aufwendig und kostspielig und wird im Normalfall nur bei sehr schlechtem Schotterzustand

durchgeführt. Andererseits werden Schotterbettreinigungen hinsichtlich der Qualität des Schotterbetts sehr gut dokumentiert. Der Zustand eines Gleises kann nach erfolgter Schotterbettreinigung also durchaus mit einer Gleisneulage verglichen werden. Zudem sind Messdaten vor und nach dieser Instandhaltungsmaßnahme vorhanden, wodurch die Definition eines guten bzw. schlechten Schotterzustandes möglich wird. [7]

6.2.1 Schotterzustand vor und nach einer Schotterbettreinigung

Im Zuge dieser Arbeit wurden insgesamt zwölf Bogenweichen betrachtet, bei denen eine Schotterbettreinigung nach dem Jahr 2005 stattfand (siehe Tabelle 5-1). Für diese Weichen wurden die Leistungsdichten der einzelnen Längshöhenmesssignale im Bereich zwischen 3,0-7,6 m ermittelt und anschließend die zugehörigen Leistungsdichtezahlen berechnet. Um einen Trend zu erkennen wurden daher die vier errechneten Werte vor und die vier errechneten Werte nach einer Schotterbettreinigung notiert. Die Informationen zu durchgeführten Schotterbettreinigungen stammen wiederum von den ÖBB.

Die Daten des BCI lassen sich nun in einem Box-Plot darstellen (Abbildung 6-23). Der orange Box-Plot zeigt dabei jeweils die vier Werte nach einer Schotterbettreinigung (= guter Schotterzustand) und der blaue Box-Plot die vier Werte vor einer Schotterbettreinigung (= schlechter Schotterzustand). Anhand dieser Grafik fällt auf, dass der gute Schotterzustand zwar eine viel geringere Spannweite als der Schlechte aufweist, die beiden Box-Plots sich im oberen Bereich aber nicht wirklich unterscheiden. Es kann anhand dieser Abbildung also nicht eruiert werden, ob die zu untersuchende Weiche einen guten oder schlechten Schotterzustand aufweist. Daher müssen die Eingangsdaten näher betrachtet und jene Weichen, bei denen keine Schotterbettreinigung durchgeführt wurde bzw. mit der Schotterbettreinigung keine Verbesserung erzielt werden konnte (z. B. wenn zuvor bereits ein guter Schotterzustand vorhanden war), ausgeschlossen werden. Danach lassen sich anhand des Box-Plots Bereiche festlegen, die einen guten bzw. einen schlechten Schotterzustand definieren.

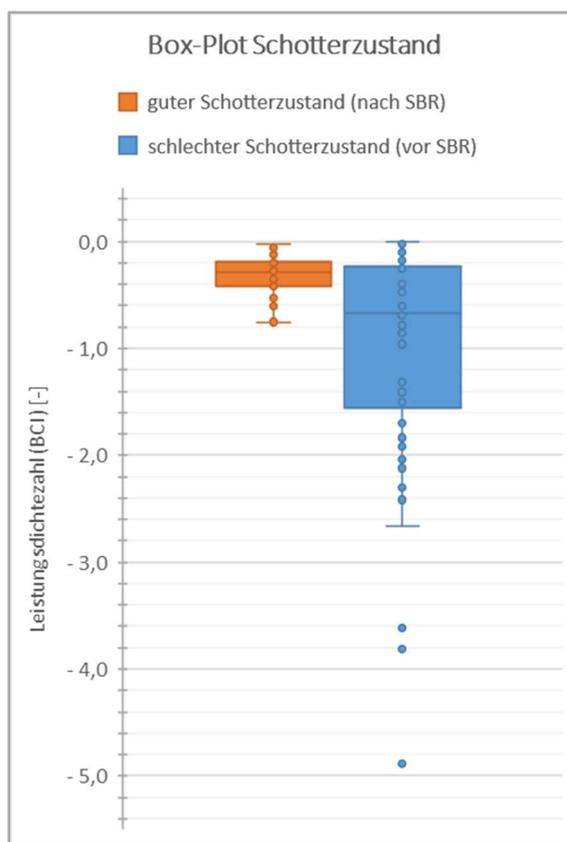


Abbildung 6-23: Box-Plot Schotterzustand

6.2.2 Nähere Betrachtung der Eingangsdaten

Um im weiteren Verlauf Bereiche zu definieren, mit denen ein guter oder schlechter Schotterzustand bestimmt werden kann, müssen zuvor plausible Eingangsdaten vorliegen. In Tabelle 6-2 sind für die Bogenweichen T_EBW55 bis T_EBW66 die vier Werte des BCI vor bzw. nach einer Schotterbettreinigung aufgelistet. Die rot markierten Weichen sind jene, die für spätere Betrachtungen ausgeschlossen werden müssen.

Tabelle 6-2: Eingangsdaten Leistungsdichtezahl

Weiche Nr.:	Messungen vor SBR				Messungen nach SBR			
	4	3	2	1	1	2	3	4
T_EBW55	-0,2217	-0,1335	-0,2334	-0,1755	-0,1875	-0,4219	-0,7502	-0,2816
T_EBW56	-0,4113	-0,4283	-0,6069	-0,2580	-0,1368	-0,2328	-0,4172	-0,3078
T_EBW57	-0,4747	-0,5934	-0,6446	-0,6950	-0,0859	-0,1805	-0,3046	-0,0862
T_EBW58	-0,4003	-0,4643	-0,7866	-0,9586	-0,0343	-0,1978	-0,0554	-0,2141
T_EBW59	-0,5971	-0,8569	-0,9615	-2,6619	-0,4611	-0,1113	-0,2637	-0,0260
T_EBW60	-0,0248	-0,0408	-0,0081	-0,0018	-0,2792	-0,3076	-0,4735	-0,0595
T_EBW61	-1,4519	-1,5055	-2,3064	-1,9238	-0,4122	-0,6059	-0,2984	-0,4944
T_EBW62	-0,9453	-1,3032	-1,3209	-1,4099	-0,4089	-0,5280	-0,3050	-0,3967
T_EBW63	-0,9913	-1,4631	-1,6503	-2,3397	-1,2880	-1,6602	-1,4797	-1,8893
T_EBW64	-2,0417	-1,8372	-1,6984	-2,1231	-0,3512	-0,5744	-0,7529	-0,7570
T_EBW65	-0,0999	-0,1111	-0,0173	-0,0854	-0,2905	-0,2600	-0,3111	-0,1287
T_EBW66	-3,8157	-2,4189	-3,6134	-4,8875	-0,1714	-0,6853	-0,2665	-0,2465

Grundsätzlich kann durch Berechnung der Leistungsdichte sehr genau bestimmt werden, wann eine Schotterbettreinigung durchgeführt wurde, da diese Instandhaltungsmaßnahme im Normalfall zu einer deutlichen Verbesserung des Schotterzustands führt. Die Werte der Leistungsdichtezahl sollten dadurch nach einer Schotterbettreinigung wesentlich geringer sein als zuvor.

Zuerst werden nun jene Weichen näher beschrieben, die laut Tabelle 6-2 für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden müssen. Zudem werden anschließend beispielhaft zwei Bogenweichen betrachtet, bei denen eine Schotterbettreinigung den gewünschten Erfolg herbeiführte. Dies soll verdeutlichen, wann eine Schotterbettreinigung notwendig ist und welcher Effekt mit dieser Maßnahme bewirkt werden kann.

6.2.2.1 Ausschluss der Eingangsdaten T_EBW55

In Abbildung 6-24 sind die Leistungsdichte zahlen aller Messfahrten der Bogenweiche T_EBW55 dargestellt. Es zeigt sich ein relativ konstanter Verlauf im Bereich zwischen 0,0

bis etwa -0,5 mit einer sehr geringen Verschlechterung (siehe blau-strichlierte Linie). Laut den Angaben der ÖBB wurde im Jahr 2015 eine Schotterbettreinigung durchgeführt. Anhand der Daten ist das jedoch äußerst unwahrscheinlich. Sofern hier dennoch eine Schotterbettreinigung stattfand, hatte diese keine Wirkung, da zuvor bereits ein guter Schotterzustand vorhanden war. Diese Weiche wird daher nicht weiter berücksichtigt.

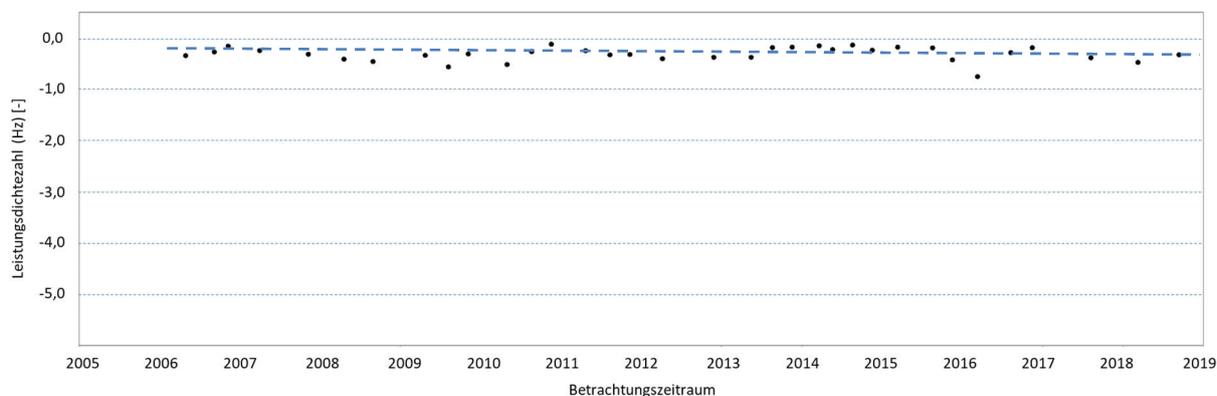


Abbildung 6-24: Leistungsdichte T_EBW55

6.2.2.2 Ausschluss der Eingangsdaten T_EBW56

Die Bogenweiche T_EBW56 weist wie die Bogenweiche T_EBW55 relativ geringe Unterschiede zwischen den Werten der Leistungsdichte zahlen auf, wobei bei dieser Weiche die Werte etwas mehr streuen (siehe Abbildung 6-25). Diese Bogenweiche wird von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, da laut den Angaben der ÖBB im Jahr 2015 eine Schotterbettreinigung durchgeführt wurde, die Werte der Leistungsdichte zahl in diesem Bereich aber nur geringe Unterschiede aufweisen. Es kann daher, basierend auf den Daten, nicht von einer Schotterbettreinigung ausgegangen werden.

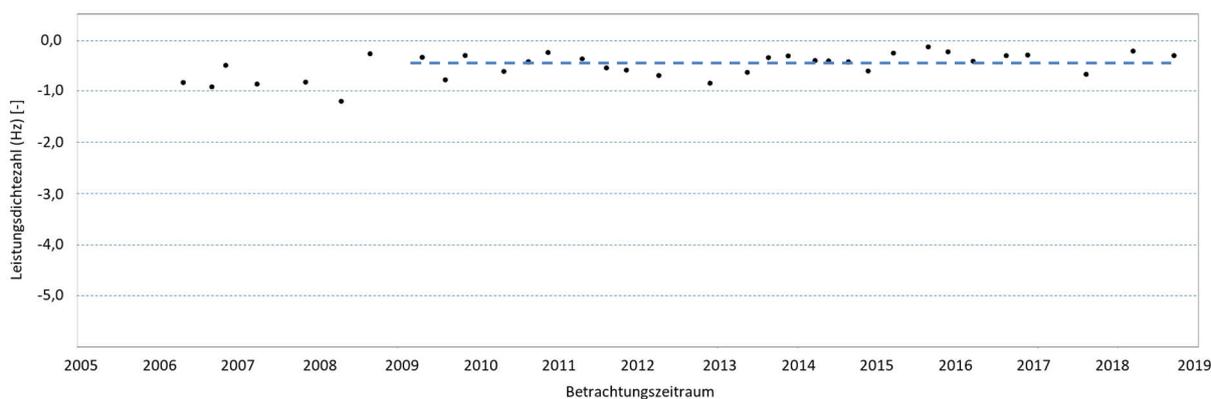


Abbildung 6-25: Leistungsdichte T_EBW56

6.2.2.3 Ausschluss der Eingangsdaten T_EBW60

Wie in Tabelle 6-2 zu sehen, sind die Werte der Bogenweiche T_EBW60 nach der Schotterbettreinigung sogar höher als zuvor, wodurch diese Daten eine Bereichszuordnung für

einen guten oder schlechten Schotterzustand folglich unplausibel erscheinen lassen. Aus diesem Grund und wegen der niedrigen Werte der Leistungsdichte wird die Weiche T_EBW60 ebenfalls von allen weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

6.2.2.4 Ausschluss der Eingangsdaten T_EBW63

Bei den Daten der Weiche T_EBW63 sind zwar Unterschiede zwischen den Werten vor bzw. nach der Schotterbettreinigung zu sehen, jedoch sind die Werte nach der Schotterbettreinigung immer noch um einiges höher als die der anderen Weichen, sprich eine mögliche Schotterbettreinigung brachte nicht den gewünschten Erfolg. Da kein sehr guter Schotterzustand im Zuge dieser Instandhaltungsmaßnahme vorliegt, werden die Werte der Bogenweiche T_EBW63 nicht weiter berücksichtigt.

6.2.2.5 Ausschluss der Eingangsdaten T_EBW65

Die Daten der Bogenweiche T_EBW65 zeigen einen relativ konstanten Verlauf ohne wirkliche Abweichungen, wie in Abbildung 6-26 ersichtlich ist. Auch die Werte vor und nach 2015, wo laut ÖBB die Schotterbettreinigung durchgeführt wurde, weichen nur gering voneinander ab. Daher wird diese Weiche aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

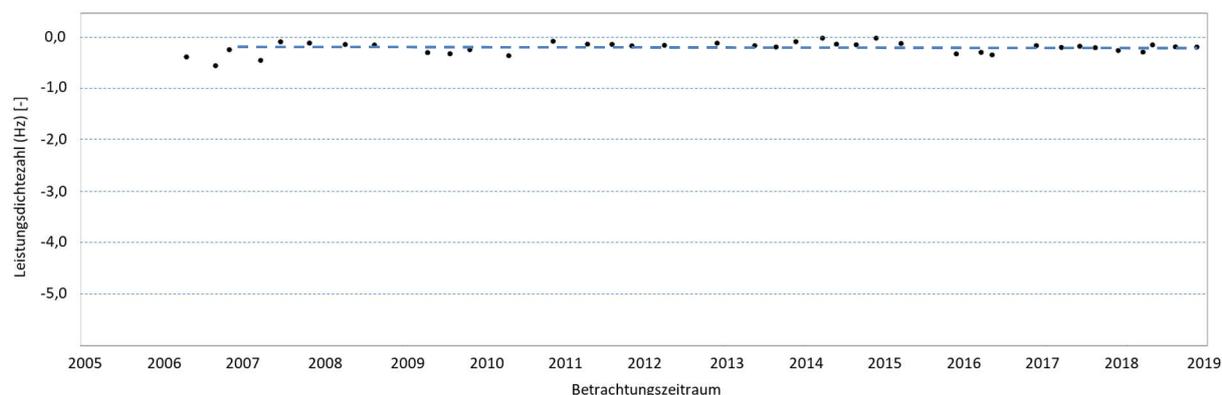


Abbildung 6-26: Leistungsdichte T_EBW65

6.2.2.6 Eingangsdaten Schotterbettreinigung T_EBW64

Bei der Bogenweiche T_EBW64 wurde zwischen 2011 und 2012 eine Schotterbettreinigung durchgeführt. In Abbildung 6-27 ist neben der sprunghaften Verbesserung der Leistungsdichtezahl im Jahr 2011, die durch die Schotterbettreinigung herbeigeführt wurde, auch eine nachhaltige Verbesserung des Schotterzustands zu sehen, da die Verschlechterungsrate vor dieser Instandhaltungsmaßnahme deutlich höher war. Die rot-strichlierte Linie deutet dabei die durchgeführte Instandhaltung an, die blau-strichlierten Linien die Verschlechterungsrate. Da der Schotterzustand bei dieser Weiche vor der Schotterbettreinigung noch nicht extrem schlecht war, brachte diese Maßnahme rein optisch nur eine

„mäßige“ Verbesserung. Die erzielte geringere Verschlechterungsrate in den Folgejahren bestätigt jedoch den nachhaltigen Erfolg der Schotterbettreinigung.

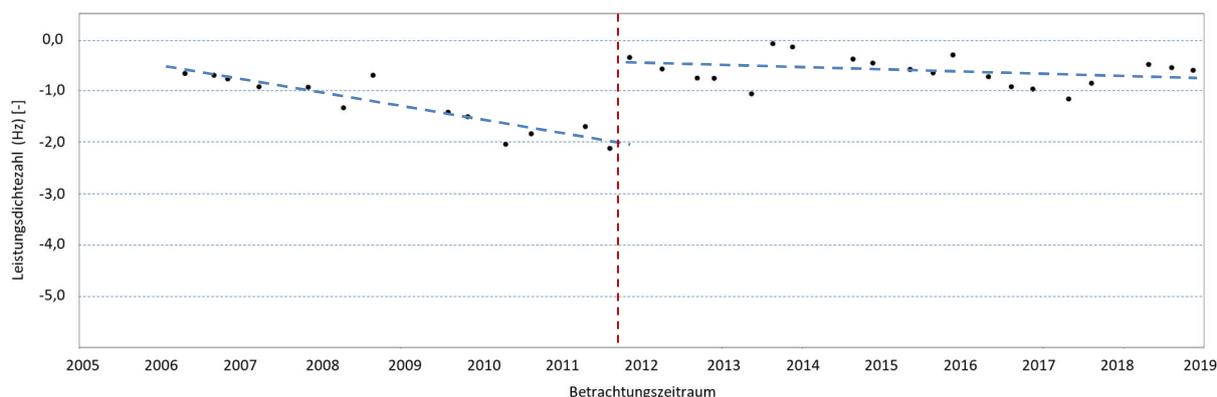


Abbildung 6-27: Leistungsdichte T_EBW64

6.2.2.7 Eingangsdaten Schotterbettreinigung T_EBW66

Anhand der Daten der Bogenweiche T_EBW66 lässt sich klar verdeutlichen, welchen Effekt eine Schotterbettreinigung erzielen kann. In Abbildung 6-28 stellt die rot-strichlierte Linie die zwischen 2014 und 2015 durchgeführte Schotterbettreinigung dar, die blau-strichlierten Linien zeigen dagegen die Verschlechterungsraten. Diese Instandhaltungsmaßnahme im Jahr 2014 brachte eine Verbesserung der Leistungsdichte von -4,9 auf etwa -0,2. Zudem konnte eine nachhaltige Verbesserung des Schotterzustandes erzielt werden, wodurch die Leistungsdichte in den darauffolgenden Jahren nie unter den Wert -1,0 fiel.

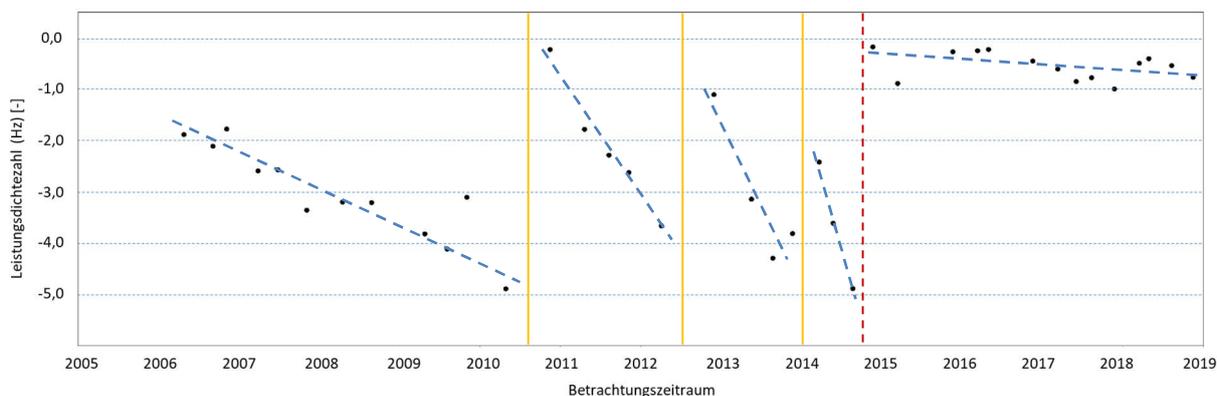


Abbildung 6-28: Leistungsdichte T_EBW66

Im Gegensatz zu Abbildung 6-27 ist in dieser Abbildung bis zur Schotterbettreinigung im Jahr 2014 kein annähernd konstanter Verlauf zu sehen, sondern es sind mehrere Sprünge in den Verläufen vorhanden. In den Jahren 2010, 2012 und 2014 sind immer wieder starke Verbesserungen der Leistungsdichte ersichtlich, welche durch die gelben Linien verdeutlicht werden. Gleich im Anschluss dieser sprunghaften Verbesserungen fällt die Leistungsdichte jedoch wieder stark ab. Zudem erhöht sich nach jeder sprunghaften Verbesserung die Verschlechterungsrate, sprich der Schotterzustand verschlechterte sich nach

jedem Eingriff noch schneller. Erst die Schotterbettreinigung im Jahr 2014 führte zu einem zufriedenstellenden Ergebnis.

Wie anhand der Standardabweichung der Längshöhe der Weiche T_EBW66 zu sehen ist (Abbildung 6-29), wurden genau bei diesen sprunghaften Verbesserungen des Schotterzustands Stopfmaßnahmen durchgeführt. Grundsätzlich sind Stopfmaßnahmen anhand der Leistungsdichte nicht klar erkennbar. Die Erklärung für das obige Verhalten liegt daher aller Voraussicht nach in Stopfeinsätzen, bei denen eine massive Neuschotterzugabe stattgefunden hat, um eine Schotterbettreinigung hinauszuzögern.

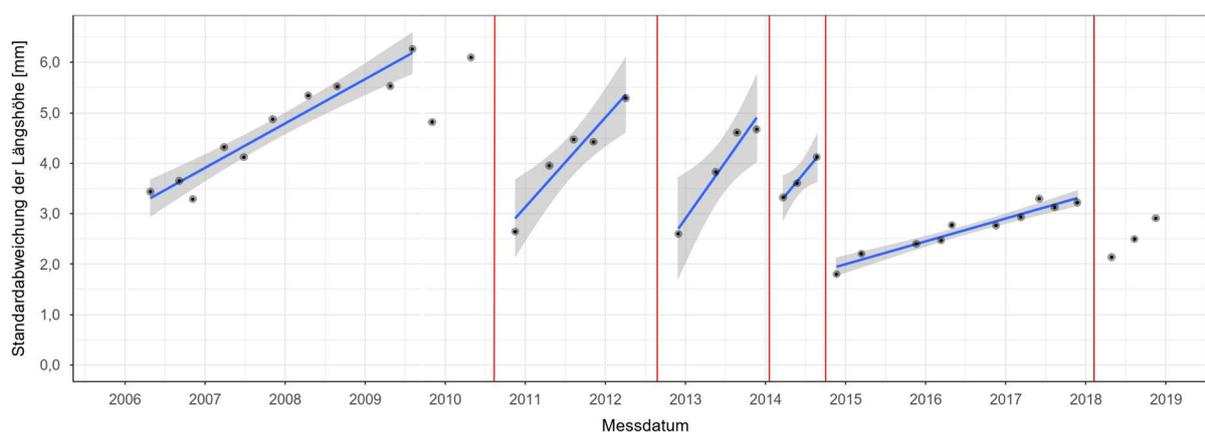


Abbildung 6-29: Standardabweichung T_EBW66

Dieses Beispiel verdeutlicht anschaulich, wie durch eine Schotterbettreinigung ein extrem schlechter Schotterzustand auf ein weitaus höheres Niveau gehoben und folgend ein nachhaltig guter Schotterzustand erreicht werden kann. Des Weiteren zeigt dieses Beispiel, dass eine Stopfmaßnahme mit massiver Neuschotterzugabe zwar kurzfristig eine deutliche Verbesserung liefert, auf längere Sicht jedoch nicht wirtschaftlich und nicht sinnvoll ist. Es sei noch angemerkt, dass die Bogenweiche T_EBW66 mit einem Abzweigradius von 300 m die Weiche mit dem geringsten Radius aller betrachteten Bogenweichen ist. Dieser Umstand könnte möglicherweise für den schlechten Schotterzustand vor der Schotterbettreinigung mitverantwortlich gewesen sein.

6.2.3 Schotterzustand Bereichsdefinition

In den vorigen Abschnitten wurden die Eingangsdaten näher betrachtet und nicht plausible Daten aufgrund unzureichender Informationen ausgeschlossen. Schlussendlich bleiben nun sieben Bogenweichen übrig, deren Daten für die weitere Auswertung herangezogen werden. Dies führt zu einer Verschiebung der Grenzen im Box-Plot. Wie in Abbildung 6-30 links zu sehen ist, verschiebt sich der Box-Plot des schlechten Schotterzustands (blau) im Vergleich zu Abbildung 6-23 deutlich nach unten. Durch den Ausschluss unplausibler Daten lässt sich nun eine Bereichsdefinition festlegen, mit der anschließend ein Schotterzustand als gut oder schlecht eingeordnet werden kann. In Abbildung 6-30 rechts sind vier

Bereiche, basierend auf den gegebenen Eingangsdaten dargestellt, die einen guten oder schlechten Schotterzustand definieren. Auf diese Bereichsdefinition wird folgend näher eingegangen.

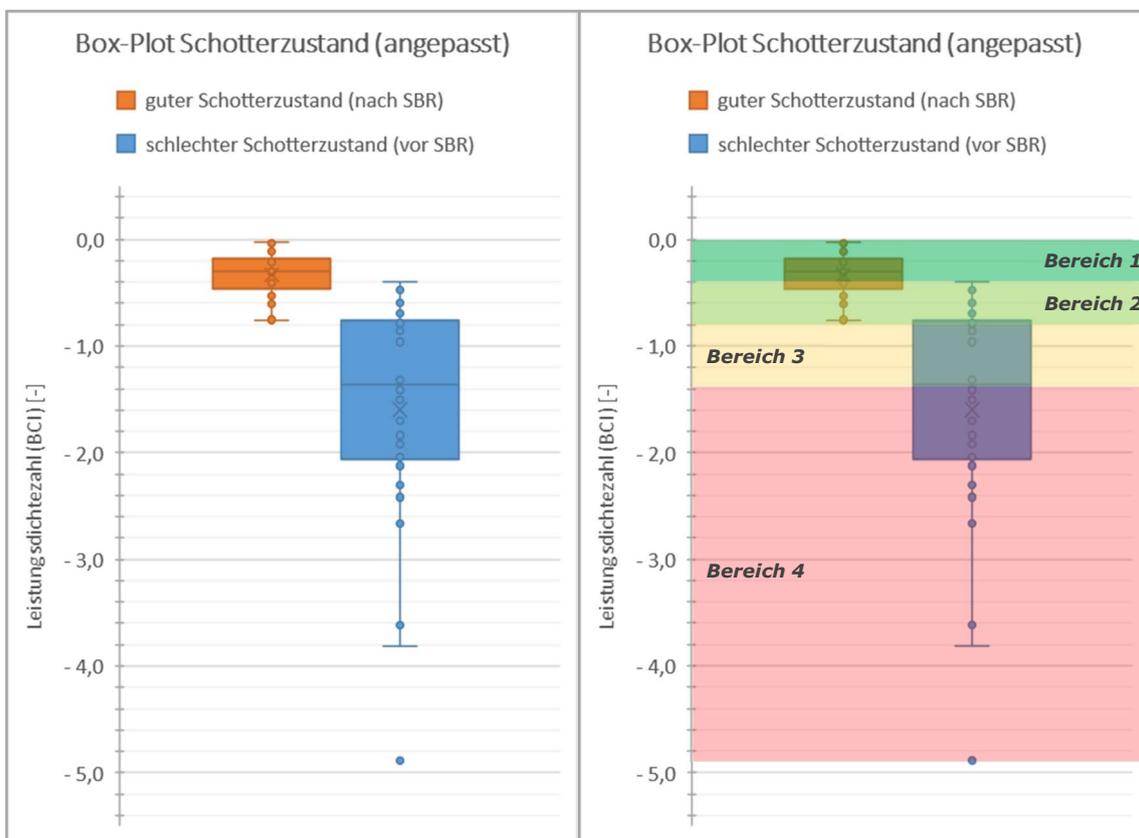


Abbildung 6-30: Box-Plot Schotterzustand angepasst / Bereichsdefinition BCI

Bereich 1 definiert einen sehr guten Schotterzustand. Die Leistungsdichtezahl dieses Bereichs reicht von 0,00 bis -0,40. Bereich 1 umfasst nur Werte, die oberhalb des Box-Plot des schlechten Schotterzustandes (blau) liegen und somit von diesem nicht erfasst werden.

Bereich 2 stellt einen guten Schotterzustand dar. Dieser Bereich erstreckt sich vom oberen Whisker des rechten Box-Plots bei -0,40 bis zum unteren Whisker des linken Box-Plots bei -0,80. Es wird dadurch der Überlappungsbereich beider Box-Plots abgebildet.

In Bereich 3 fallen alle Weichen, die einen mäßigen Schotterzustand aufweisen. Dieser Bereich erstreckt sich vom unteren Whisker des linken Box-Plots bei etwa -0,80 bis zum Median des rechten Box-Plots bei etwa -1,40.

Bereich 4 definiert einen schlechten Schotterzustand und reicht vom Median des rechten Box-Plots bei -1,40 bis zum untersten Wert bei -4,90. Dieser Wert zeigt sich als Ausreißer im Box-Plot und stellt zugleich den niedrigsten Wert aller Eingangsdaten dar.

Durch Berechnung des Schotterzustandsindex einer Weiche ist es nun möglich, eine Aussage über den jeweiligen Schotterzustand zu treffen. Diese Auswertung basiert auf Daten von nur sieben Bogenweichen und ist daher nur bedingt aussagekräftig. Vergleicht man dies jedoch mit dem Ergebnis von Fellingner (siehe Abbildung 6-31), der die Auswertung anhand Daten von einfachen Weichen durchführte, dann stimmen beide Ergebnisse gut überein. Wesentlichster Unterschied zwischen diesen Auswertungen ist, dass es bei den Daten von einfachen Weichen keine Überlappung zwischen den Werten vor und nach einer Schotterbettreinigung gibt. Diese Abweichung ist vermutlich nicht dem unterschiedlichen Weichentyp geschuldet, sondern der geringen Datenmenge. Wahrscheinlich würden sich bei einer größeren Datenmenge der Bogenweichen die Bereichsgrenzen verschieben und dann noch besser mit jenen der einfachen Weichen übereinstimmen.

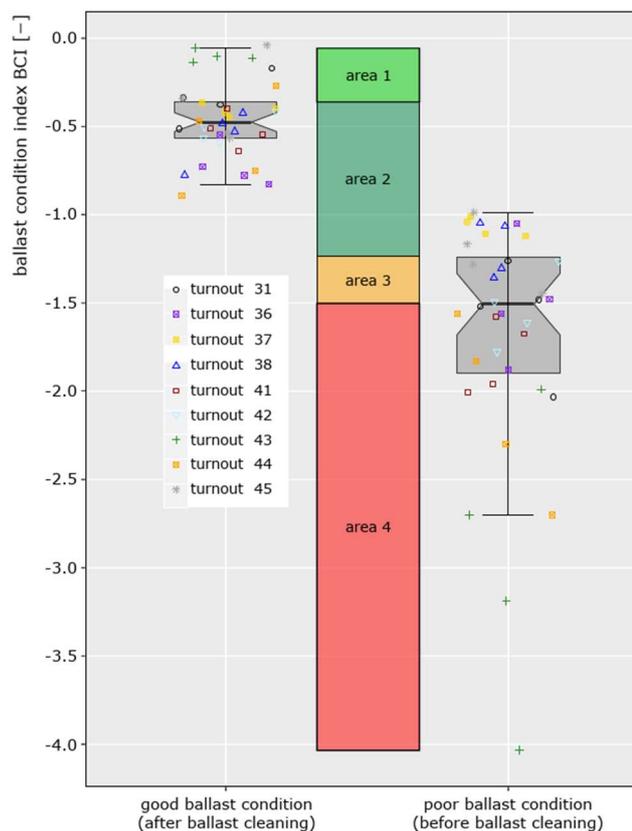


Abbildung 6-31: Bereichsdefinition BCI einfache Weichen¹¹

Es kann mit dem erzielten Ergebnis grundsätzlich gezeigt werden, dass mittels Berechnung der Leistungsdichte eine Schotterzustandsbeschreibung möglich ist und die von Fellingner entwickelte Methodik für einfache Weichen und auch für Bogenweichen gleichermaßen funktioniert. Es fehlt an dieser Stelle lediglich an einer größeren Datenmenge, um eine noch bessere Übereinstimmung zwischen den beiden Ergebnissen der unterschiedlichen Weichentypen zu erzielen. Vor allem durch Abbildung 6-28 wird ersichtlich, welcher Effekt mittels einer Schotterbettreinigung erzielt werden kann. In Abbildung 6-24 wird dabei das Gegenteil verdeutlicht. Es wurde hier nämlich eine Schotterbettreinigung durchgeführt, obwohl vor der Instandhaltungsmaßnahme bereits ein guter Schotterzustand vorhanden war. Das durch die Leistungsdichte generierte Wissen ermöglicht es, überflüssige und unwirksame Schotterbettreinigungen zu vermeiden und somit Instandhaltungskosten einzusparen. Die zuvor erstellte Bereichsdefinition wird nun an zwei ausgewählten Bogenweichen angewendet und somit der Schotterzustand dieser beiden Weichen beschrieben.

¹¹ Quelle Abbildung: Fellingner, M., Sustainable Asset Management for Turnouts - From measurement data analysis to behaviour and maintenance prediction, S. 103

6.2.3.1 Schotterzustand Bogenweiche T_EBW55

Sämtliche errechneten Punkte der Leistungsdichtezahl der Bogenweiche T_EBW55 liegen hauptsächlich in Bereich 1 und einige wenige Punkte in Bereich 2 (Abbildung 6-32). Es kann daher gesagt werden, dass sich diese Weiche, bezogen auf den Schotterzustand, in einem sehr guten bis guten Zustand befindet und in näherer Zukunft jedenfalls keine Schotterbettreinigung notwendig wird. Die durchgeführte Schotterbettreinigung im Jahr 2014 (rote strichlierte Linie) war in diesem Fall wirkungslos.

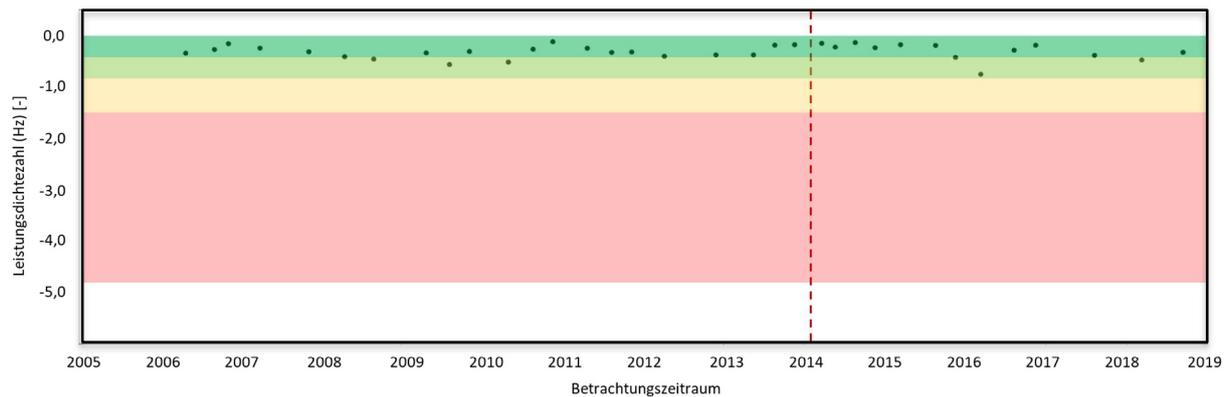


Abbildung 6-32: Schotterzustand T_EBW55

6.2.3.2 Schotterzustand Bogenweiche T_EBW62

Abbildung 6-33 zeigt die Werte der Leistungsdichtezahl der Bogenweiche T_EBW62. Bis zur durchgeführten Schotterbettreinigung im Jahr 2014 (rote strichlierte Linie) liegen die Werte zwischen Bereich 2 und Bereich 4, sprich diese Bogenweiche weist bereits teilweise einen schlechten Schotterzustand auf. Nach der Instandhaltung im Jahr 2014 ist zwar eine Verbesserung zu erkennen, der Schotterzustand verschlechtert sich anschließend aber wieder relativ schnell, sodass zwischen 2017 und 2018 die Leistungsdichtezahl in Bereich 3 zu liegen kommt und der Schotterzustand somit nur als mäßig angesehen werden kann. Diese Schotterbettreinigung führte daher nur bedingt zum gewünschten Erfolg.

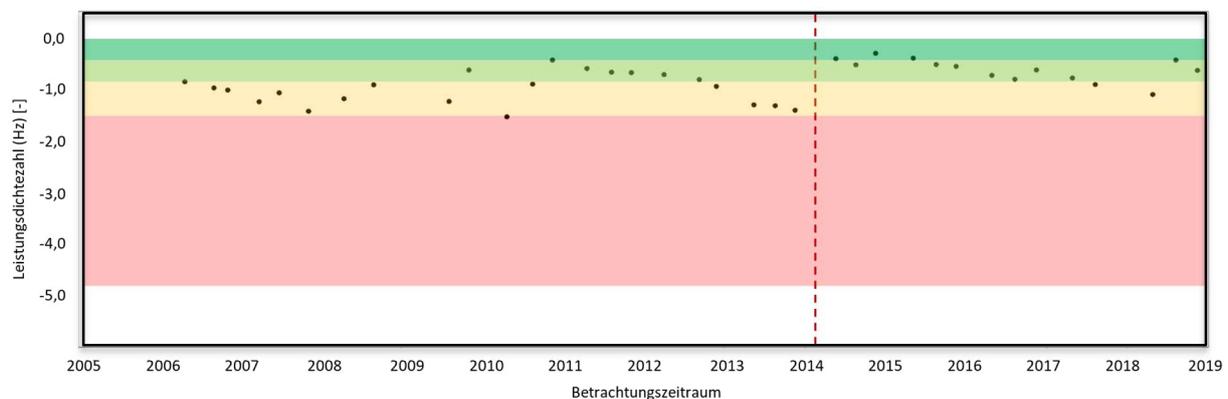


Abbildung 6-33: Schotterzustand T_EBW62

6.2.3.3 Schotterzustand Bogenweiche T_EBW53

Im Normalfall kann davon ausgegangen werden, dass Betonschwellen für die Beschädigung des Gleisschotters verantwortlich sind. Im Umkehrschluss müssten also jene Weichen auf Holzschwellen einen guten Schotterzustand aufweisen. Betrachtet man die Leistungsdichtezahlen für die Bogenweiche T_EBW53 (Abbildung 6-34), fällt auf, dass die Werte beinahe gänzlich in Bereich 1 liegen und somit ein sehr guter Schotterzustand vorhanden ist. Für diese Weiche bestätigt sich somit diese Annahme.

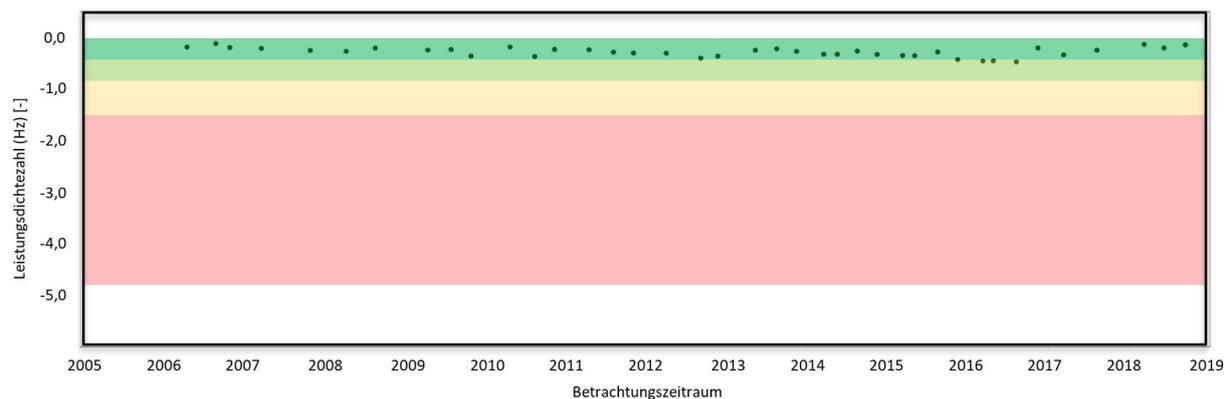


Abbildung 6-34: Schotterzustand T_EBW53

6.2.3.4 Schotterzustand Bogenweiche T_EBW52

Die Bogenweiche T_EBW52 ist wie die Bogenweiche T_EBW53 mit Holzschwellen ausgeführt. Bei dieser Weiche zeigt sich jedoch ein anderes Bild als zuvor. Wie in Abbildung 6-35 ersichtlich, weist die Weiche vor dem Jahr 2011 einen mäßigen bis schlechten Schotterzustand auf. Erst ab dem Jahr 2011 liegen die Werte der Leistungsdichtezahl vorwiegend in Bereich 1. Das bedeutet in diesem Fall, dass Ende 2010 eine Schotterbettreinigung durchgeführt wurde (siehe rote strichlierte Linie), die eine sprunghafte und vor allem nachhaltige Verbesserung des Schotterzustandes erzielte. Anhand dieser Abbildung lässt sich erkennen, dass es auch bei Weichen mit Holzschwellen zu einem erheblichen Verschleiß des Gleisschotters kommen und dadurch eine Schotterbettreinigung erforderlich werden kann.

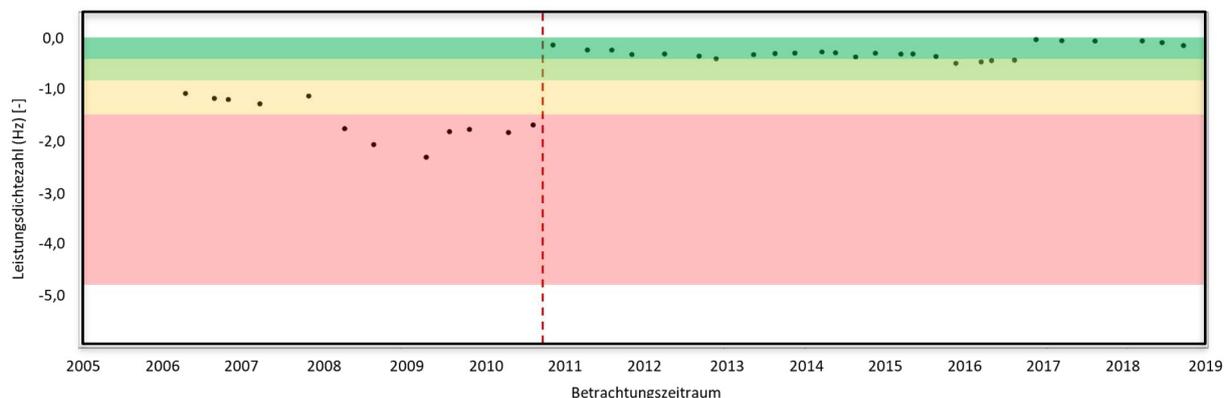


Abbildung 6-35: Schotterzustand T_EBW52

Um nun vorhersagen zu können, wann zukünftig eine Schotterbettreinigung notwendig wird bzw. durchgeführt werden soll, sind zusätzliche Betrachtungen erforderlich. Mittels Zeitreihen- bzw. Trendanalysen sind in weiterer Folge Prognosen möglich, die jedoch nicht Teil dieser Arbeit sind und worauf aus diesem Grund auch nicht näher eingegangen wird.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, anhand von Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 den Zustand von ausgewählten Bogenweichen zu beschreiben. Grundlage für diese Zustandsbeschreibung bildeten Methoden, die von Fellingner für einfache Weichen entwickelt wurden. Es sollte herausgefunden werden, ob diese Methoden auch für die Zustandsbeschreibung von Bogenweichen geeignet sind und falls nicht, welche Anpassungen an den Methoden notwendig sind, damit diese auch auf Bogenweichen anwendbar sind. Neben der Erklärung der Funktionsweise des Stationierungsalgorithmus CoMPAcT und der Besonderheiten beim Stationierungsvorgang wurden auch die Zustandsbeschreibung anhand der Standardabweichung der Längshöhe sowie der Leistungsdichte betrachtet. Im Folgenden werden die wesentlichen Punkte dieser Arbeit nochmals zusammengefasst.

7.1 CoMPAcT

Anhand von Abbildung 7-1 lässt sich sehr gut in nur einem einzigen Bild zusammenfassen, warum die Anwendung des Stationierungsalgorithmus CoMPAcT erforderlich ist, um eine Zustandsbeschreibung von Weichen mittels Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 zu ermöglichen. Eine Zustandsbeschreibung mit unstationierten Messdaten, wie in Abbildung 7-1 oben dargestellt, funktioniert zwar für längere Abschnitte des freien Streckengleises, für die relativ kurzen Weichenbereiche führt dies jedoch zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Erst die Anwendung von CoMPAcT liefert die Lösung für dieses Problem.

Der Stationierungsalgorithmus bearbeitet die Eingangsdaten derart, dass sämtliche Messsignale innerhalb einer Messfahrt sowie auch die Messsignale aller jemals durchgeführten Messfahrten in synchroner Form vorliegen. Abbildung 7-1 unten zeigt die stationierten Messdaten nach der Anwendung von CoMPAcT. Mit diesen Daten können nun anhand von Zeitreihenbildung Rückschlüsse auf den Verschlechterungsprozess des Weichenzustandes

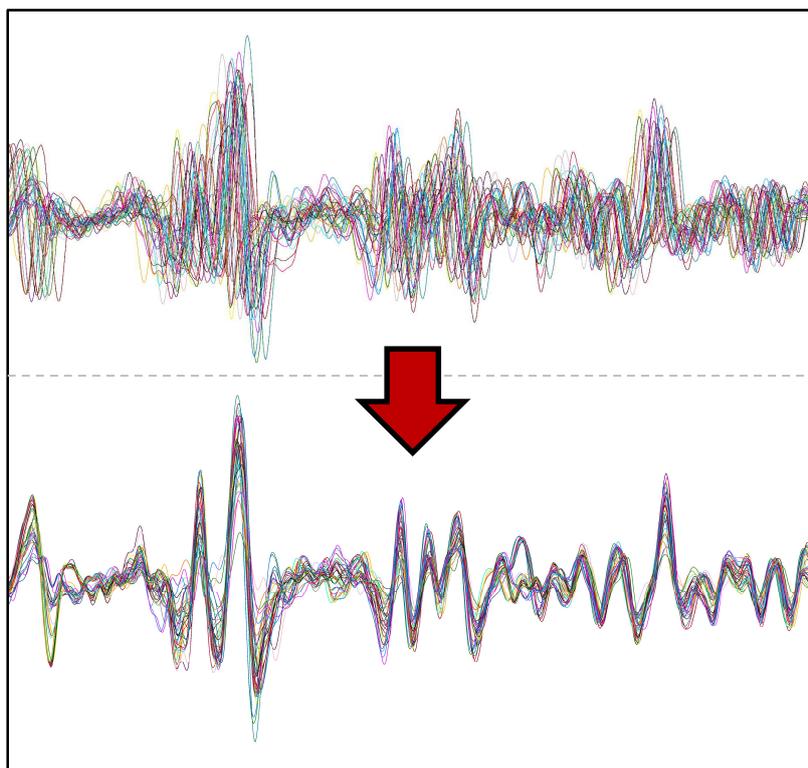


Abbildung 7-1: Ergebnis Stationierung mittels CoMPAcT

getroffen werden. Dadurch ist es im weiteren Verlauf prinzipiell auch möglich, einen zukünftigen Weichenzustand zu prognostizieren und somit eine optimierte Instandhaltungsplanung zu gewährleisten.

Im Zuge dieser Arbeit wurden sämtliche Sequenzen des Stationierungsalgorithmus betrachtet und diese auf ihre Kompatibilität mit den Messdaten einer Bogenweiche überprüft. Diese Überprüfung konnte für alle Sequenzen erfolgreich durchgeführt werden. Es traten keine Komplikationen auf, die auf den unterschiedlichen Weichentyp zurückzuführen waren.

Es konnte somit gezeigt werden, dass sich der für einfache Weichen entwickelte Stationierungsalgorithmus CoMPACT in der gleichen Form auch für Bogenweichen anwenden lässt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde der Algorithmus auf 16 weitere Bogenweichen angewendet, mit deren stationierten Daten nachfolgend eine Auswertung hinsichtlich der Standardabweichung der Längshöhe sowie der Leistungsdichte erfolgte.

7.2 Standardabweichung der Längshöhe

Mit der Standardabweichung der Längshöhe lässt sich grundsätzlich die Gleislage der Weiche beschreiben. Es wurde für jede Messfahrt über den gesamten Weichenbereich die Standardabweichung des Längshöhensignals errechnet. Durch Zeitreihenbildung der errechneten Werte wird der Verschlechterungsprozess der Gleislage ersichtlich. Anhand der Berechnung der Standardabweichung der Längshöhe ist zudem eine Detektion von durchgeführten Stopfeinsätzen möglich, da die Instandhaltungsmaßnahme Stopfen die einzige Möglichkeit ist, um die Gleislage zu beeinflussen. Abbildung 7-2 zeigt beispielhaft die Werte der Standardabweichung der Längshöhe sämtlicher Messfahrten von 2006 bis 2019. Neben den detektierten Stopfeinsätzen in den Jahren 2010, 2016 und 2018, bei denen eine sprunghafte Verbesserung der Standardabweichung stattfand, lässt sich anhand der blauen Linien auch sehr deutlich das lineare Verschlechterungsverhalten erkennen.

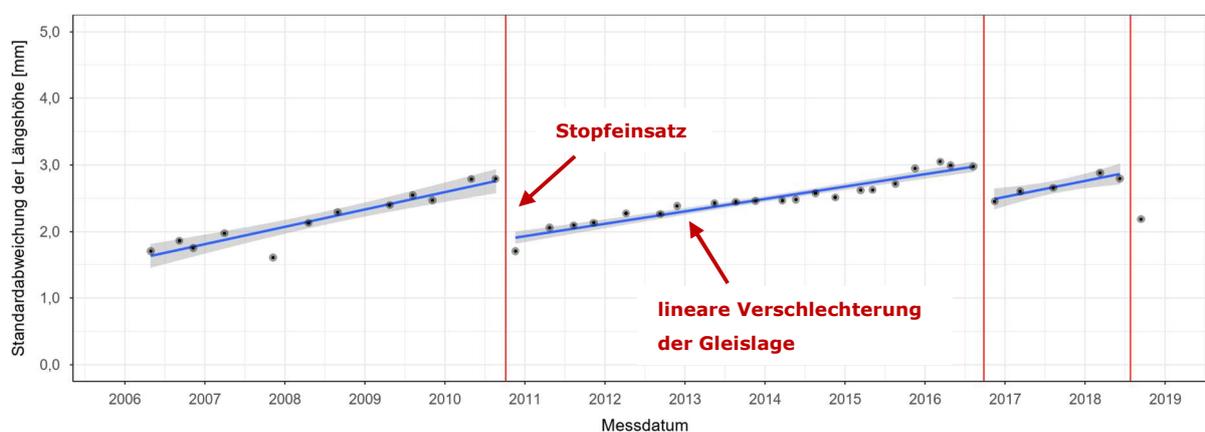


Abbildung 7-2: Ergebnis Standardabweichung der Längshöhe

Neben der reinen Standardabweichung der Längshöhe wurde auch noch die gleitende Standardabweichung der Längshöhe betrachtet. Es wurde dafür ein 3-Meter-Fenster gewählt, das nach der Berechnung der Standardabweichung jeweils um einen Data Break (1 DB = 25 cm) verschoben wurde, bis dieses Fenster den gesamten Weichenbereich durchlaufen hat. Dadurch lässt sich ein Farb-Plot erstellen, anhand dessen die kritischen Bereiche innerhalb einer Weiche erkannt werden können. Im Zuge der Auswertung stellte sich heraus, dass vor allem der Isolierstoß am Weichenanfang sowie der Herzbereich eine erhöhte Standardabweichung aufweisen und somit für eine schlechte Gleislage verantwortlich sind. Ebenso die Stöße innerhalb der Weiche weisen eine erhöhte Standardabweichung auf, wogegen im Zwischenschienenbereich die Standardabweichung der Längshöhe verhältnismäßig gering ist.

Es konnte im Zuge der Auswertung gezeigt werden, dass die für einfache Weichen entwickelten Methoden der Zustandsbeschreibung mittels Standardabweichung der Längshöhe sowie gleitender Standardabweichung auch für Bogenweichen funktionieren.

7.3 Leistungsdichte

Die Berechnung der Leistungsdichte ermöglicht es, den Schotterzustand einer Weiche zu beschreiben. Dazu wird die Rauigkeit eines Längshöhensignals im Wellenlängenbereich von 3,0-7,6 m betrachtet. Dieser Wellenlängenbereich ergibt sich aus früheren Forschungen zur Schotterzustandsbeschreibung anhand der Leistungsdichte sowie aus den gegebenen Eingangsdaten. Durch Berechnung einer Regressionsgeraden im zuvor genannten Wellenlängenbereich und anschließender Bildung der ersten Ableitung dieser Geraden erhält man die Leistungsdichtezahl, mit dieser nachfolgend eine Schotterzustandsbeschreibung möglich wird.

Abbildung 7-3 zeigt die Leistungsdichtezahlen sämtlicher Messfahrten einer Bogenweiche. Dabei ist klar ersichtlich, dass vor der Schotterbetteinigung (Bereich 1) die Werte der Leistungsdichtezahl einer großen Streuung unterliegen und der Schotterzustand teilweise sehr schlecht ist. Nach der Schotterbetteinigung (Bereich 2) ist die Streuung um ein

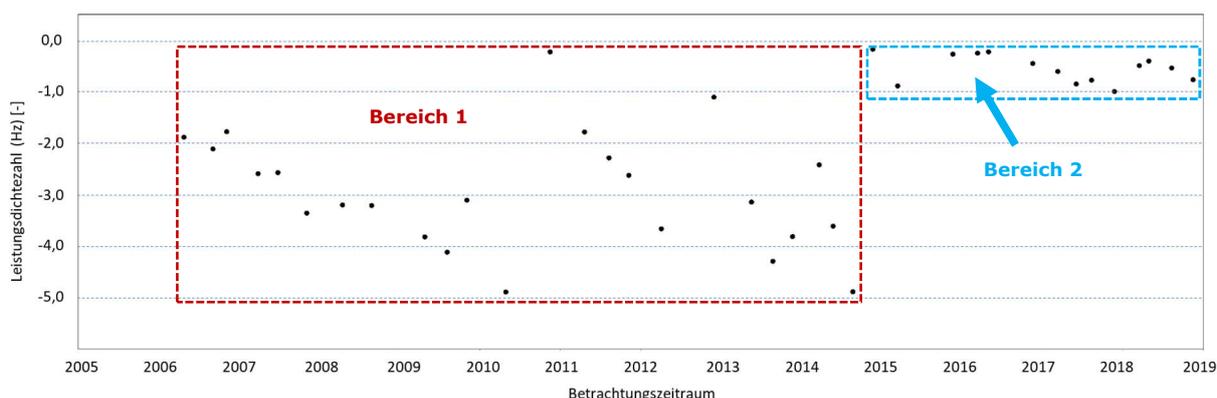


Abbildung 7-3: Ergebnis Auswertung Leistungsdichte

Vielfaches geringer und der Schotterzustand befindet sich auf einem hohen Niveau. Dieses Beispiel zeigt nicht nur den Effekt einer Schotterbettreinigung, sondern auch, dass die entwickelte Methode der Schotterzustandsbeschreibung funktioniert.

Im Rahmen der Arbeit wurden anhand von sieben Bogenweichen Bereiche festgelegt, die sehr guten, guten, mäßigen und schlechten Schotterzustand definieren. Durch Berechnung der Leistungsdichtezahl kann folglich der Schotterzustand einer Weiche beurteilt und basierend auf dieser Grundlage entschieden werden, ob eine Schotterbettreinigung notwendig ist oder nicht. Mit diesem Wissen können in Zukunft erhebliche Instandhaltungskosten eingespart werden, da Schotterbettreinigungen somit nur ausgeführt werden würden, wenn sie wirklich notwendig sind. Durch Zeitreihen- bzw. Trendanalysen ließen sich auch zukünftige Schotterbettreinigungen prognostizieren.

Abschließend kann gesagt werden, dass mittels Berechnung der Leistungsdichte der Schotterzustand einer Weiche bestimmt werden kann und die Methode in gleicher Weise sowohl bei einfachen Weichen als auch bei Bogenweichen funktioniert.

8 Ausblick

Durch Anwendung von CoMPACT ist es prinzipiell möglich, für den Großteil der im Netz der ÖBB eingebauten Weichen eine Zustandsbeschreibung anhand der Messdaten, die durch den Oberbauwagen EM 250 aufgenommen werden, durchzuführen. Es ist jedoch zu beachten, dass weitere Untersuchungen nötig sind, um bei der Auswertung der Standardabweichung der Längshöhe den Einfluss von Einzelfehlerbehebungen auf das Ergebnis auszuschließen. Dafür ist es wesentlich, dass die Informationen zu diesen Instandhaltungen gut dokumentiert und anschließend in den Algorithmus implementiert werden. Des Weiteren ist es für eine Schotterzustandsbeschreibung anhand der Leistungsdichtezahl erforderlich, eine große Anzahl an Bogenweichen auszuwerten, da eine Bereichsfestlegung für einen guten oder schlechten Schotterzustand erst dann aussagekräftig ist.

Die beiden Methoden – Standardabweichung der Längshöhe sowie Leistungsdichte – beziehen sich auf das Längshöhensignal MEDIUM (Wellenlänge 3-25 m). Sämtliche anderen Messsignale, die im Zuge der Anwendung von CoMPACT mitstationiert wurden, bleiben hierbei unberücksichtigt. Es ist daher genügend Potential für weitere Betrachtungen vorhanden. Als interessant erweist sich dabei das Schienenoberflächenmesssignal (SOF), das auch schon am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft näher untersucht wird. Durch Wellenlängenfilterung kann in diesem Signal nicht nur das Herzstück eruiert werden, sondern beispielsweise auch der Isolierstoß am Weichenanfang. Dadurch besteht wiederum die Möglichkeit einer Zustandsbeschreibung. Auch anhand der Spurweitensignale sind weitere Untersuchungen durchführbar, die auf den Zustand von Schwellen bzw. Schienenbefestigungen schließen lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Zustandsbeschreibung nur für den durchgehenden Ast der Weichen vorgenommen. Der abzweigende Ast konnte aufgrund fehlender Datenmenge nicht näher untersucht werden. Eine Zustandsbeschreibung für diesen Bereich ist in Anbetracht der erhöhten Krafterwirkungen aber auch von großem Interesse. Dafür muss zukünftig allerdings auch eine häufigere Vermessung des abzweigenden Astes vorgenommen werden.

Mit dem Stationierungsalgorithmus CoMPACT wurde der Grundstein für sämtliche Betrachtungen bezüglich der Zustandsbeschreibung von Weichen anhand der Messdaten des Oberbaumesswagens EM 250 gelegt. Da das System Eisenbahn sich hinsichtlich der verwendeten Materialien und der angewendeten Messmethoden ständig weiterentwickelt, wird es immer Verbesserungsbedarf geben. Dieser Umstand verlangt es, Veränderungen anzunehmen, von altbewährten Methoden öfter abzusehen und offen für Innovationen zu sein. Ein erster Schritt in diese Richtung ist möglicherweise durch die Anwendung von CoMPACT gelungen. Welches Potential darin steckt, konnte mit dieser Arbeit bereits gezeigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Lay und R. Rensing, „Weichen,“ in *Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 3. Auflage*, Seeheim-Jugenheim, Borken, Springer Vieweg Verlag, 2019, p. 315.
- [2] T. Böhm, „Präzise Vorhersage von Weichenstörungen,“ *EI - Eisenbahningenieur*, p. 50, Oktober 2015.
- [3] ÖBB-Infrastruktur AG, „Zahlen Daten Fakten,“ Wien, 2020.
- [4] E. Lay und R. Rensing, „Weichen,“ in *Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 3. Auflage*, Seeheim-Jugenheim, Borken, Springer Vieweg Verlag, 2019, p. 250.
- [5] ÖBB-Infrastruktur AG, „Netzzustandsbericht 2018,“ Wien, 2019.
- [6] Gleisbau-Welt, „Weichenarten - Bogenweiche,“ [Online]. Available: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/weiche/weichenarten>. [Zugriff am 02. 07. 2020].
- [7] M. Fellingner, „Sustainable Asset Management for Turnouts - From measurement data analysis to behaviour and maintainance prediction,“ Dissertation, 2020.
- [8] system7 rail support GmbH, „3D-Weichenvermessung,“ [Online]. Available: https://www.s7-railsupport.com/userfiles/files/downloads/3DIRC_desc_de.pdf. [Zugriff am 25. 07. 2020].
- [9] Deutsche Bahn Systemtechnik, „ESAH - Diagnosetechnik,“ [Online]. Available: https://www.db-systemtechnik.de/resource/blob/3233610/763f3cb992a3cf3ab0fbdf6dfe21a18f/Aktuell_weichenherzstueckdiagnose_esah_deutsch-data.pdf. [Zugriff am 25. 07. 2020].
- [10] voestalpine AG, „SCM Weichendiagnose,“ [Online]. Available: <https://www.voestalpine.com/railway-systems/de/produkte/scm-weichendiagnose/>. [Zugriff am 01. 09. 2020].

- [11] T. Böhm und N. Weiß, „Weichenanalytik – Smarte Sensoren und künstliche Intelligenz für die rundum gesunde Weiche,“ *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, pp. 42-45, Mai 2017.
- [12] D. Juul Jensen, *INTELLISWITCH - project description*, Technical University of Denmark.
- [13] Asadzadeh S. M., et. al., „Ballast Degradation Modeling for Turnouts based on Track Recording Car Data,“ Technical University of Denmark, 2018.
- [14] Plasser & Theurer, „Relevante Daten für gezielte Instandhaltungen: Messarbeiten,“ [Online]. Available: <https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/messarbeiten.html>. [Zugriff am 28. 03. 2020].
- [15] M. Landgraf, „Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn - Von der Messdatenanalyse zum Anlagenmanagement,“ Dissertation, 2016.
- [16] Wikipedia, „ÖBB X627.8,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96BB_X627.8. [Zugriff am 28. 03. 2020].
- [17] ÖBB-Infrastruktur AG, „Regelwerk 06.01.01: Instandhaltungsplan Oberbau“.
- [18] Austrian Standards International, „ÖNORM EN 13848-1, Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität, Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie,“ Wien, 2019.
- [19] F. Auer, „Berührungslos arbeitende Gleismessfahrzeuge und Auswertung der Messdaten,“ *EIK - Eisenbahn Ingenier Kompendium*, pp. 59-60, 2014.
- [20] Gleisbau-Welt, „Vormessen mit Inertialmesssystem,“ [Online]. Available: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/gleisbau-und-instandhaltung/gleisvermessung/vormessen-mit-inertialmesssystem/>. [Zugriff am 29. 03. 2020].
- [21] G. Oberlechner und J. Zywiell, „POS/TG - Innovation auf dem Gebiet der Gleisgeometriemessungen,“ *EI - Eisenbahningenieur*, pp. 6-7, 2001.
- [22] F. Hansmann, „Innovative Messdatenanalyse – ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis,“ Dissertation, 2015.

- [23] Plasser&Theurer, „Unsere berührungslose Messtechnik ist Stand der Technik,“ [Online]. Available: <https://www.plassertheurer.com/de/mediathek/aktueller-newsletter/1809-04.html>. [Zugriff am 11. 10. 2020].
- [24] T. Weinold und A. Grimm-Pitzinger, „Die Lagerung der Gleisvermessungen der ÖBB,“ *VGI - Vermessung und Geoinformation*, p. 351, 2012.
- [25] EPOSA - Echtzeit Positionierung Austria, „Satellitensysteme,“ [Online]. Available: <http://www.eposa.at/technologie/satellitensysteme/>. [Zugriff am 30. 03. 2020].
- [26] W. Hanreich, „Moderne Fahrweginspektion mit dem Oberbautechnischen Messwagen EM 250,“ *ZEVrail*, pp. 20-24, 2004.
- [27] S. Knappe, „Global Railway Review,“ [Online]. Available: <https://www.globalrailwayreview.com/article/1567/corrugation-and-dip-angle-measurements-performed-by-eurailscout/>. [Zugriff am 09. 06. 2020].
- [28] M. Fellingner, P. Wilfling und S. Marschnig, „Datenbasierte Zustandsbeschreibung und Prognose des Weichenverhaltens,“ Graz.
- [29] M. Fellingner und P. Wilfling, *GleisPROPHET Weichen 2018 - Messdatenaufbereitung (Präsentation)*, 2018.
- [30] M. Fellingner, P. Wilfling und S. Marschnig, „CoMPACT - Data based Condition Monitoring and Prediction Analytics for Turnouts,“ Graz.
- [31] Statista.com, „Definition Standardabweichung,“ [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/126/standardabweichung/>. [Zugriff am 03. 07. 2020].
- [32] „Spektrale Leistungsdichte,“ [Online]. Available: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spektrale_Leistungsdichte. [Zugriff am 14. 08. 2020].
- [33] M. Landgraf und F. Hansmann, „Fractal analysis as an innovative approach for evaluating the condition of railway tracks,“ *Journal of Rail and Rapid Transit*, p. 596–605, 2019.
- [34] A. Hamid, K. Rasmussen, M. Baluja und T.-L. Yang, „Analytical Descriptions of Track Geometry Variations,“ U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1983.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: 3D-Aufnahme Weichenherz ¹	3
Abbildung 2-2: Sensor KONUX-System ²	4
Abbildung 2-3: Intelliswitch Arbeitspakete ³	5
Abbildung 2-4: Messsignal	5
Abbildung 3-1: Oberbaumesswagen EM 250 ⁴	7
Abbildung 3-2: Gleisgeometriemessung Fa. Plasser & Theurer ⁵	9
Abbildung 3-3: Prinzip der optischen Spurweitenmessung (OGMS) ⁶	9
Abbildung 3-4: Messsysteme der Fa. Plasser und Theurer ⁷	11
Abbildung 4-1: Messsignal der Längshöhe	12
Abbildung 4-2: Signale der ungefilterten Halbspurweiten	13
Abbildung 4-3: Verschiebefunktion	15
Abbildung 4-4: Zusammenhang Schienenneigung – Spurweite ⁸	18
Abbildung 4-5: Halbspurweitensignale - Befahrungsrichtung	21
Abbildung 4-6: Richtungs- und Halbspurweitensignal ungefiltert/gefiltert	24
Abbildung 4-7: Einfluss Wagenstellung ⁹	25
Abbildung 4-8: Bereichsidentifikation innerhalb der Weiche ¹⁰	26
Abbildung 4-9: Signale der Längshöhe (3-25 m) unstationiert	27
Abbildung 4-10: Signale der Längshöhe (3-25 m) stationiert	27
Abbildung 6-1: Standardabweichung der Längshöhe	33
Abbildung 6-2: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW50	35
Abbildung 6-3: Farb-Plot T_EBW50 - Herzseite	36
Abbildung 6-4: Farb-Plot T_EBW50 - Radlenkerseite	37
Abbildung 6-5: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW51	37
Abbildung 6-6: Farb-Plot Herzseite T_EBW51	38
Abbildung 6-7: Farb-Plot Radlenkerseite T_EBW51	38
Abbildung 6-8: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW52	39
Abbildung 6-9: Farb-Plot T_EBW52 Herzseite	40
Abbildung 6-10: Farb-Plot T_EBW52 Radlenkerseite	40
Abbildung 6-11: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW53	41
Abbildung 6-12: Farb-Plot T_EBW53 Herzseite	41
Abbildung 6-13: Farb-Plot T_EBW53 Radlenkerseite	42
Abbildung 6-14: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW54	42
Abbildung 6-15: Farb-Plot T_EBW54 Herzseite	43
Abbildung 6-16: Farb-Plot T_EBW54 Radlenkerseite	44
Abbildung 6-17: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW62	44
Abbildung 6-18: Längshöhensignale T_EBW62 (2009)	45

Abbildung 6-19: Standardabweichung der Längshöhe T_EBW62 (geänderte Bereichsgrenzen).....	45
Abbildung 6-20: Farb-Plot T_EBW62 Herzseite	46
Abbildung 6-21: Farb-Plot T_EBW62 Radlenkerseite.....	47
Abbildung 6-22: Leistungsdichtespektrum (LDS)	49
Abbildung 6-23: Box-Plot Schotterzustand	51
Abbildung 6-24: Leistungsdichte T_EBW55	53
Abbildung 6-25: Leistungsdichte T_EBW56	53
Abbildung 6-26: Leistungsdichte T_EBW65	54
Abbildung 6-27: Leistungsdichte T_EBW64	55
Abbildung 6-28: Leistungsdichte T_EBW66	55
Abbildung 6-29: Standardabweichung T_EBW66.....	56
Abbildung 6-30: Box-Plot Schotterzustand angepasst / Bereichsdefinition BCI.....	57
Abbildung 6-31: Bereichsdefinition BCI einfache Weichen ¹¹	58
Abbildung 6-32: Schotterzustand T_EBW55	59
Abbildung 6-33: Schotterzustand T_EBW62	59
Abbildung 6-34: Schotterzustand T_EBW53	60
Abbildung 6-35: Schotterzustand T_EBW52	60
Abbildung 7-1: Ergebnis Stationierung mittels CoMPAcT	62
Abbildung 7-2: Ergebnis Standardabweichung der Längshöhe	63
Abbildung 7-3: Ergebnis Auswertung Leistungsdichte.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Betrachtete Bogenweichen.....	29
Tabelle 6-1: Vergleich Stopfeinsätze	34
Tabelle 6-2: Eingangsdaten Leistungsdichtezahl	52

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at