

Bachelorarbeit

Detektion von Fehlern am Gleis mittels Frequenzanalyse am Beispiel eines Fahrweg-Fahrzeug- Modells

Detection of track irregularities on a scale track-vehicle-model using frequency analysis



Verfasser: Ibrahim Aboul Seoud
Studiengang: Bauingenieurwesen

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin
Betreuer: Dr.-Ing. Sebastian Rapp

Stuttgart, den 27. Oktober 2018



Universität Stuttgart

stud E-2018/12

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Bachelorarbeit

- selbständig verfasst habe,
- keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe,
- weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist,
- weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht habe und
- dass das elektronische Exemplar mit den anderen Exemplaren übereinstimmt.

Stuttgart, den 27. Oktober 2018

.....
Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mir bei der Verfassung der Bachelorarbeit zur Seite standen.

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Ullrich Martin, der es ermöglichte diese Bachelorarbeit am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen zu verfassen.

Des Weiterem gilt mein besonderer Dank meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Sebastian Rapp, der mir während der gesamten Bearbeitungszeit mit fachlich wertvollen Hinweisen und Tipps zur Seite stand sowie mir die Möglichkeit gab auch praktische Einblicke zu erlangen.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch meiner Partnerin und meiner Familie für die Motivation, die moralische Unterstützung und vor allem, dass sie immer für mich da waren.

Vielen Dank an alle die Zeit, Geduld und Mühen in meine Arbeit investiert haben.

Stuttgart, den 27. Oktober 2018

.....

Unterschrift

Aufgabenstellung

An Regelzügen angebrachte Sensoren, wie z.B. Beschleunigungssensoren, bieten die Möglichkeit den Fahrwegzustand kontinuierlich zu überwachen sowie dessen Zustand in Echtzeit zu ermitteln und zu bewerten. Um Einzelfehler im Messschrieb bewerten zu können, ist eine Klassifikation der detektierten Fehler notwendig. D.h. es muss zwischen den einzelnen Fehlern und deren Muster im Messschrieb unterschieden werden. Hierfür ist die Ausarbeitung der Charakteristik einzelner Fehler notwendig, die unter anderem von der Frequenz in der gemessenen Beschleunigung geprägt ist.

Im Rahmen der Bachelorarbeit soll am Beispiel eines Fahrweg-Fahrzeug-Modells eine Frequenzanalyse zu einzelnen im Modell existierenden Fehlern (Schienenbruch, Schienenstoß, punktuelle Instabilität) durchgeführt werden. Hierzu sollen die Messschriebe im Bereich von Fehlern mittels der Fast Fourier Transformation, der spektralen Beschleunigungsdichte und der Wavelet-Analyse untersucht werden. Die Auswertung der Messdaten sowie die anschließend zu entwickelte Logik zur Fehlererkennung, sollen mit Hilfe der Software Laboratory (MATLAB) erfolgen.

Im Einzelnen wird verlangt:

- Literaturrecherche zur Erfassung des Fahrwegzustands mittels Sensoren an Regelzügen (Beschreibung der Messmethoden und der detektierten Fehler sowie der in der Literatur verwendeten Auswertmethoden)
- Beschreibung des Fahrzeug-Fahrweg-Modells und der dort enthaltenen Fehler
- Untersuchung typischer Frequenzbereiche einzelner Fehler im Messschrieb mittels der Fast Fourier Transformation, der spektralen Beschleunigungsdichte und der Wavelet-Analyse
- Vergleich der Methoden hinsichtlich der Fehlererkennung mit Positionsangabe, der Rechenzeit und der möglichst frühzeitigen Erkennung von Gleislagefehlern
- Untersuchung des Einflusses der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Zugzusammensetzung des Messzuges auf die Fehlererkennung
- Entwicklung einer Logik zu Detektion von Gleislagefehlern im Modell und strukturierte Darstellung der Logik mit der Software Enterprise Architect

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
1.1	Entgleisungen durch Gleislagefehler (Rückblick)	1
1.2	Ziel und Zweck der Arbeit	1
2	Literaturübersicht und Stand der Technik.....	2
2.1	Methoden zur Erkennung von Gleislagefehlern und Schienenfehlern	2
2.1.1	Gleismessfahrzeug.....	2
2.1.2	Achslagerbeschleunigung.....	4
2.1.3	Gleisbegehung	5
2.1.4	Georadarmessung.....	5
3	Aufbau eines Bahnkörpers in konventioneller Schotterbauweise	7
3.1	Einleitung	7
3.2	Oberbau	7
3.2.1	Schienen	7
3.2.2	Schwellen.....	9
3.2.3	Befestigungsmittel	9
3.2.4	Bettung.....	10
3.3	Unterbau	11
4	Beschreibung der Gleisfehler	12
4.1	Schienenstoß	12
4.2	Schienenbruch	13
4.3	Punktuelle Instabilität.....	14
4.4	Steifigkeitswechsel im Brückenbereich	15
4.5	Richtlinien.....	16
5	Beschreibung des Fahrweg-Fahrzeug-Modells	17
5.1	Teststrecke.....	17
5.1.1	Hochbahnkonstruktion.....	17
5.1.2	Feder-Schrauben-Konstruktion.....	18
5.1.3	Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen	19
5.1.4	Stromversorgung der einzelnen Module	19
5.2	Fehlererzeugung	19
5.3	Software	21
5.3.1	Software zur Erfassung der Messdaten	22
5.3.2	Messdaten Import mit MATLAB.....	23
6	Gleisfehler	24

6.1.1	Datenbearbeitung.....	26
6.2	Zuordnung der Gleisfehler im Messschrieb	26
6.3	Gleisfehler Darstellung	33
7	Frequenzanalyse	47
7.1	Diskrete Fourier Transformation	47
7.1.1	Fast-Fourier-Transformation.....	50
7.2	Spektrale Beschleunigungsdichte.....	51
7.3	Wavelet-Analyse	52
8	Auswertung der Beschleunigungsdaten	55
8.1	Vermeidung des Alias-Effekts.....	55
8.1.1	Auswertung der FFT.....	56
8.2	Auswertung der spektralen Beschleunigungsdichte.....	65
8.3	Vergleich Fast Fourier Transformation und Spektrale Beschleunigungsdichte.....	74
8.4	Logik zur Erkennung der Fehler im Modell	77
8.5	Fehlertyp Längshöhenfehler	86
8.6	Auswertung der Wavelet-Analyse.....	91
9	Zusammenfassung und Ausblick	95
10	Literaturverzeichnis	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messprinzip der RAILab-Technik für die Gleisgeometriemessung [6]	3
Abbildung 2: TTCi Messfahrzeug mit Lokomotive [9]	3
Abbildung 3: Messzug mit GPS Antenne [11]	5
Abbildung 4: Beschleunigungssensor am Achslager [11].....	5
Abbildung 5: Georadar-Messeinrichtung an einem Messfahrzeug [13]	6
Abbildung 6: Gebräuchlichste Schienenformen und ihre Abmessungen [18]	8
Abbildung 7: Schnitt K Oberbau [19].....	10
Abbildung 8: K Oberbau auf Holzschwellen [15]	10
Abbildung 9: Wassereinwirkungen und Druckverhältnisse [20]	11
Abbildung 10: Schienenstoß im Real System [1].....	12
Abbildung 11: Schienenstoß im Modell	12
Abbildung 12: Schienenbruch im Real System [23].....	13
Abbildung 13: Schienenbruch im Modell [24]	13
Abbildung 14: Punktuelle Instabilität im Real System [25].....	14
Abbildung 15: Punktuelle Instabilität im Modell [24]	14
Abbildung 16: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Real System [26].....	15
Abbildung 17: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Modell [24].....	15
Abbildung 18: Teststrecke mit Messsystem [24]	17
Abbildung 19: Langwellige Gleislagefehler in der Längshöhe [24].....	18
Abbildung 20: Aufbau Feder-Schrauben-Konstruktion [3]	18
Abbildung 21: Konstruktion der Modulverbindung [24].....	19
Abbildung 22: Detaillierte Ansicht auf die Stromversorgung der vier Streckenabschnitte [24]	19
Abbildung 23: Schienenbruch im Modell [24]	20
Abbildung 24: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Modell [24].....	20
Abbildung 25: Punktuelle Instabilität im Modell [24]	20
Abbildung 26: Eingebaute Fehler und deren Position im Modell [24].....	21
Abbildung 27: Befehle zur Bedienung des Messsystems	22
Abbildung 28: Messschrieb der Vertikalbeschleunigung	26
Abbildung 29: Position der Fehler im Messschrieb.....	27
Abbildung 30: Logik der For-Schleife zur Detektion des Maximums für ein definiertes Messintervall.....	28
Abbildung 31: Schienenbruch 1 mit Angabe des Maximums.....	29
Abbildung 32: Schienenbruch 2 mit Angabe des Maximums.....	29

Abbildung 33: Achsabstand am Fahrzeugmodell	29
Abbildung 34: Punktuelle Instabilität mit Angabe des Maximums	30
Abbildung 35: Schienenstoß 1 mit Angabe des Maximums	31
Abbildung 36: Schienenstoß 2 mit Angabe des Maximums	31
Abbildung 37: Schienenstoß 3 mit Angabe des Maximums	31
Abbildung 38: Schienenstoß 4 mit Angabe des Maximums	31
Abbildung 39: Steifigkeitswechsel an Brückenanfang und -ende mit Angabe des Maximums	32
Abbildung 40: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 1.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden	34
Abbildung 41: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 2.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden	35
Abbildung 42: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 1.Schienenbruchs für zwölf Fahrtrunden	36
Abbildung 43: Vertikale Beschleunigung in Bereich der punktuellen Instabilität für zwölf Fahrtrunden	37
Abbildung 44: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 3.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden	38
Abbildung 45: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 4.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden	39
Abbildung 46: Vertikale Beschleunigung im Bereich der Brücke für zwölf Fahrtrunden	40
Abbildung 47: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 2.Schienenbruchs für zwölf Fahrtrunden	41
Abbildung 48: Mittelwert für die einzelnen Fehler im Modell	43
Abbildung 49: Logik für die Einstellung und Messung	44
Abbildung 50: Logik für die Detektion des Maximums	44
Abbildung 51: Logik für die Zuordnung der Gleisfehlern anhand ihrer maximalen Beschleunigungswerte	45
Abbildung 52: Ablauf Wavelet Transformation	54
Abbildung 53: Original Signal	55
Abbildung 54: Gefiltertes Signal	56
<i>Abbildung 55: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 3</i>	<i>58</i>
Abbildung 56: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenbruch 2	58
Abbildung 57: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenbruch 1	59
Abbildung 58: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 2	59
Abbildung 59: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 4	60
Abbildung 60: Verlauf der Fast Fourier Transformation Brücke	61

Abbildung 61: Verlauf der Fast Fourier Transformation punktuelle Instabilität.....	61
Abbildung 62: Logik für den Ablauf der Fehlerklassifizierung	63
Abbildung 63: Logik für die Zuordnung der Gleisfehlern anhand der Fast Fourier Transformation.....	64
Abbildung 64: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 1.....	66
Abbildung 65: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 2.....	67
Abbildung 66: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 3.....	68
Abbildung 67: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 4.....	69
Abbildung 68: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte Schienenbruch 1.....	70
Abbildung 69: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte Schienenbruch 2.....	70
Abbildung 70: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte punktuelle Instabilität	71
Abbildung 71: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Brücke	72
Abbildung 72: Vergleich FFT und SBD Schienenbruch 1	74
Abbildung 73: Vergleich FFT und SBD Schienenstoß 1	75
Abbildung 74: Vergleich FFT und SBD Schienenstoß 2.....	75
Abbildung 75: Vergleich FFT und SBD punktuelle Instabilität.....	76
Abbildung 76: Logik für die Zuordnung der Fehler anhand der spektralen Beschleunigungsdichte	77
Abbildung 77: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenbruch 1 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	79
Abbildung 78: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenbruch 2 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	79
Abbildung 79: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 2 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	80
Abbildung 80: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 3 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	80
Abbildung 81: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 4 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	81
Abbildung 82: Mittels Frequenzanalyse erkannte punktuelle Instabilität in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	81
Abbildung 83: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 1 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	82
Abbildung 84: Mittels Frequenzanalyse erkannte Brücke in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	82
Abbildung 85: Logik für die Zuordnung der Fehler anhand der spektralen Beschleunigungsdichte und der Vertikalbeschleunigung	84

Abbildung 86: Mittels Frequenzanalyse erkannte Gleislagefehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	84
Abbildung 87: Mittels Frequenzanalyse erkannte Schienenfehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	85
Abbildung 88: Mittels spektrale Beschleunigungsdichte erkannte Gleisfehler	85
Abbildung 89: Längshöhenfehler mit Holzplatte im Modell	86
Abbildung 90: Fehlertyp Längshöhenfehler.....	87
Abbildung 91: Fehlertyp punktuelle Instabilität	87
Abbildung 92: Fast Fourier Transformation Längshöhenfehler.....	88
Abbildung 93: Fast Fourier Transformation Punktuelle Instabilität.....	88
Abbildung 94: Spektrale Beschleunigungsdichte Längshöhenfehler	89
Abbildung 95: Spektrale Beschleunigungsdichte Punktuelle Instabilität	89
Abbildung 96: Mittels Frequenzanalyse erkannte Längshöhenfehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung.....	90
Abbildung 97: Sym4 Motherwavelet [33].....	91
Abbildung 98: Messschrieb mit Savitzky-Golay Filter	92
Abbildung 99: Wavelet-Analyse mit sym4 für zwölf Runden.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schienenformen und ihre Einsatzbereiche [18]	8
Tabelle 2: Abmessungen und Eigenschaften von Holz- und Betonschwellen [15].....	9
Tabelle 3: Typische Extrema des 1.Schienenstoßes.....	34
Tabelle 4: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenstoß 1	34
Tabelle 5: Typische Extrema des 2.Schienenstoßes.....	35
Tabelle 6: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenstoß 2	35
Tabelle 7: Typische Extrema des 1.Schienenbruchs.....	36
Tabelle 8: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenbruch 1	36
Tabelle 9: Typische Extrema der punktuellen Instabilität.....	37
Tabelle 10: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für die punktuelle Instabilität	37
Tabelle 11: Typische Extrema des 3.Schienenstoßes.....	38
Tabelle 12: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für den 3.Schienenstoß	38
Tabelle 13: Typische Extrema des 4.Schienenstoßes.....	39
Tabelle 14: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für den Schienenstoß 4	39
Tabelle 15: Typische Extrema der Brücke.....	40
Tabelle 16: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für die Brücke	40
Tabelle 17: Typische Extrema des 2.Schienenbruchs.....	41
Tabelle 18: Zeitliche Distanzen zwischen die Extrema für den Schienenbruch 2	41
Tabelle 19: Vertikale Beschleunigungswerte des Maximums und des Minimums für die einzelnen Fehlern	42
Tabelle 20: Fehlermerkmale bei Fast Fourier Transformation zur Fehlerklassifizierung	62
Tabelle 21: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 1	66
Tabelle 22: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 2	67
Tabelle 23: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 3	68
Tabelle 24: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 4	69
Tabelle 25: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenbruch 1	71
Tabelle 26: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenbruch 2	71
Tabelle 27: Spektrale Beschleunigungsdichte punktuelle Instabilität.....	72
Tabelle 28: Spektrale Beschleunigungsdichte Brücke.....	72
Tabelle 29: Merkmale der Fehler für die spektrale Beschleunigungsdichte	73

Abkürzungsverzeichnis

DB	Deutsche Bahn
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
EBO	Eisenbahnbau- und Betriebsordnung
FFT	Fast Fourier Transformation
DFT	Diskrete Fourier Transformation
SBD	Spektrale Beschleunigungsdichte
RAILab	Rollendes Analyse und Inspektionslabor
IFC	Instrumented Freight Car
TTCi	Transportation Technology Center, Inc.
ABA	Axel-Box-Acceleration

Formelverzeichnis

f	Frequenz [Hz]
v	Geschwindigkeit $\left[\frac{m}{s}\right]$
t	Zeit [s]
a	Beschleunigung $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
λ	Wellenlänge
f_s	Abtastfrequenz

Kurzfassung

Durch die kontinuierlich steigende Verkehrsleistung im Eisenbahnverkehr erhöht sich auch die Anzahl der gefährlichen Ereignisse [2, 3]. Einige dieser Eisenbahnunfälle [3] könnten durch eine frühzeitige Identifizierung von Fehlern am Fahrweg vermieden werden. Dabei könnte die kontinuierliche Überwachung und Bewertung des Fahrwegzustands in Echtzeit durch an Regelzügen angebrachten Sensoren erfolgen, wodurch auch eine erhebliche Kostenersparnis und Erhöhung des Fahrkomforts sowie der Sicherheit ermöglicht würde. Zur Erkennung von Fehlern können typische Frequenzbereiche genutzt werden. Um diese zu generieren wurde am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart ein Modell gebaut. Im Modell können Gleisfehler mit unterschiedlichen Geometrien und Steifigkeiten am Fahrweg installiert werden. Zur Fehlerdetektion wurde die vertikale Beschleunigung mit einem Beschleunigungssensor am Fahrzeug erzeugt. Für das Beschleunigungssignal im Bereich von Fehlern wurden dann die Frequenzen analysiert. Der Vorteil des Modells ist, dass die Positionen der Fehler im Modell bekannt sind, wodurch leicht zwischen den einzelnen Fehlern im Messschrieb unterschieden werden kann.

Um Einzelfehler im Messschrieb bewerten zu können, ist eine Klassifikation der detektierten Fehler notwendig. Im Rahmen der Bachelorarbeit erfolgt deshalb eine Frequenzanalyse zu einzelnen im Modell existierenden Fehlern. Die Messschriebe im Bereich von Fehlern wurden mittels Fast Fourier Transformation, der spektralen Beschleunigungsdichte und der Wavelet-Analyse untersucht. Darauf aufbauend wurde einer Logik zu Detektion der Gleisfehler im Modell entwickelt und mittels der Software Enterprise Architect diese dargestellt. Anschließend wurde diese Logik mit der Software MATLAB umgesetzt und getestet.

Abstract

The growing demand for rail traffic increases the number of possible dangerous railway events. Many of the occurring railway accidents can be avoided by an early identification of the track errors and their positions. The continuous monitoring and evaluation of the road condition in real time using attached sensors on regular trains can save considerable costs and offer safer and more comfortable rides for passengers. For this purpose, track error models with different geometries and requirements were installed on the railway miniature replica at the Institute of Railways and Transportation at the University of Stuttgart. The vertical acceleration of the miniature train was measured using an acceleration sensor on the vehicle.

In order to be able to evaluate individual errors in the measurement signal, a classification of the detected errors is necessary. Here, the characteristics and effects of a rail breakage, rail joints, punctual instability, and the stiffness change when driving over a bridge are examined. Due to the known positions of the track errors in the model, a distinction can be made between the individual errors in the signal in order to be able to assign them to their respective error type. The greater the track error, the greater the rash of the acceleration in the measurement record.

As part of the bachelor thesis, a frequency analysis is performed on individual errors in the model. For this purpose, the signals that are positioned in the range of the errors are to be analyzed using the Fast Fourier transformation, the Power Spectral, and the Wavelet analysis. The aim of this scientific work is to develop a logic that detects the track position error in the model using the software Enterprise Architect. This logic should then be implemented with the software MATLAB.

1 Motivation

Zur Beurteilung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts ist die Kenntnis der Gleislage von großer Bedeutung. Die frühzeitige Identifizierung von Schienen- und Gleislagefehlern erlaubt eine effiziente Instandhaltungsstrategie. Beispielsweise können punktuellen Instabilität erkannt werden bevor ein ausgeprägter Längshöhenfehler entsteht und aufwendige Instandsetzungsmaßnahmen notwendig werden [4].

1.1 Entgleisungen durch Gleislagefehler (Rückblick)

Im folgenden Kapitel werden Beispiele von Zugentgleisungen gezeigt, die durch nicht früh erkannte Gleislagefehler verursacht wurden.

Zugentgleisung am 08.08.2014 in Burgstall (Murr)

Ursächlich für die Entgleisung sind mehrere kurz hintereinanderliegende (periodische) Gleislagefehler in der Längshöhe. Die vorgefundenen Gleislagefehler resultieren aus dem eingeschränkt tragfähigen Untergrund sowie der nicht nachhaltig durchgeführten Instandsetzung. Durch die Entgleisung wurden der Oberbau, die Oberleitung und die Weichen stark beschädigt. [2]

Zugunglück am 24.01.2018 in Mailand (Italien)

Die Ursache für die Entgleisung war ein Bruch in die Schienen. Aufgrund der Entgleisung haben sich mehr als hundert Menschen leicht verletzt und drei Menschen kamen ums Leben.

1.2 Ziel und Zweck der Arbeit

In der Praxis liegen meist keine Informationen zur genauen Position der Fehler und deren Art vor. Die Klassifikation der detektierten Einzelfehler im Messschrieb, speziell in der gemessenen Beschleunigung, ist bisher nicht ausgearbeitet. Daher wurde im Fahrweg-Fahrzeug Modell ein Beschleunigungssensor angebracht und die vertikale Beschleunigung bei der Überfahrt der Fehler genauer betrachtet. Hierfür wurde eine Frequenzanalyse durchgeführt. Zweck der Frequenzanalyse ist die Untersuchung und Auswertung von dominanten Frequenzanteilen. Die einzelnen Fehler erzeugen unter anderem typische Amplituden-, Wellenlängen und Frequenzbereiche in der gemessenen Beschleunigung. Als abschließendes Ziel der Arbeit wird eine Logik zur Detektion der Fehler entwickelt.

2 Literaturübersicht und Stand der Technik

2.1 Methoden zur Erkennung von Gleislagefehlern und Schienenfehlern

Abweichungen in der Höhe bzw. in der Lage des Gleises von der planmäßigen Herstellung werden als Gleislagefehler bezeichnet. Der Fahrweg muss sicher, zuverlässig und wirtschaftlich betrieben werden können [5]. Für eine zustandsorientierte Instandhaltung des Fahrwegs kann durch unterschiedliche Verfahren, wie z.B. einer Gleisbegehung, Georadarmessungen und regelmäßigen Messfahrten mittels speziellen Gleismesszügen, der IST-Zustand des Bahnkörpers ermittelt werden.

Folgendes Kapitel gibt einen Blick über die vorhandene Literatur, die zum Thema Entwicklung intelligenter Fehlerdetektionssysteme vorhanden ist.

2.1.1 Gleismessfahrzeug

RAILab

Die Parameter der Gleisgeometrie, wie Spurweite, gegenseitige Höhenlage, horizontale und vertikale Ausrichtung der beiden Schienen, Fahrdrachtlage und Verwindung werden im laufenden Betrieb durch spezielle Gleismessfahrzeuge, wie beispielsweise das RAILab (Rollendes Analyse und Inspektionslabor) der Deutschen Bahn AG, vermessen [4]. Das RAILab besteht aus zwei Wagen. Mit einer maximalen Geschwindigkeit von 200 km/h, können die Messwagen mit einer optischen Messung mittels Laser die Gleisgeometrie erfassen [6]. Das RAILab prüft den IST-Zustand der Gleisgeometrie unter Last, so dass Längshöhenfehler im mittel- und langwelligen Wellenlängenbereich detektiert werden können [7, 8]. Die Messergebnisse werden mit dem SOLL-Zustand verglichen, so dass Abweichungen bestimmt werden können. Ein Nachteil des Messsystems ist, dass eine frühzeitige Erkennung von Fehlern nicht möglich ist, da bisher keine bestimmten Grenzwerte/ Muster für unterschiedliche Fehlerarten existieren. Es erfolgt somit keine automatische Fehlerklassifizierung der Fehler innerhalb des Messschriebs.

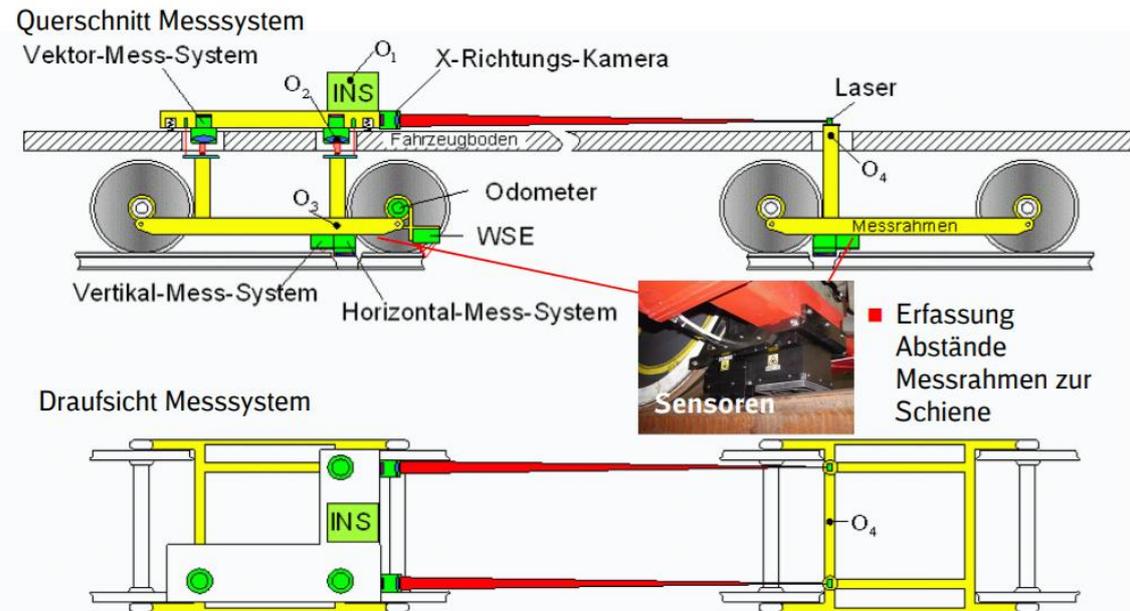


Abbildung 1: Messprinzip der RAILab-Technik für die Gleisgeometriemessung [6]

Instrumented Freight Car (IFC)

Das Transportation Technology Center, Inc. (TTCi) besitzt einen Wagen IFC (Instrumented Freight Car), der mit verschiedenen Sensoren Fehlern mit unterschiedlichen Wellenlängen unter Achslasten detektieren kann. Dehnmessstreifen, Beschleunigungssensoren und Druckaufnehmer werden für die Ermittlung der Fahrzeugbewegung verwendet, um unter anderem auch langwellige Gleislagefehler zu identifizieren. Die Beschleunigungssensoren werden für die Erkennung von kurzwelligen Irregularitäten, wie z.B. ein Schienenbruch, benötigt. Das IFC besitzt zudem eine Global Positioning System (GPS), das die Fehlerdaten mit den jeweiligen Koordinaten weiterleitet. Die Abweichungen werden im Messschrieb markiert, wenn sie einen definierten Grenzwert von $\pm 12,2$ mm erreicht haben [9].



Abbildung 2: TTCi Messfahrzeug mit Lokomotive [9]

Hi-Rail Fahrzeug

Die Firma ENSCO, Inc. kann den Zustand des Schienenwegs mittels einem dreiachsigen hi-Rail Fahrzeug, das mit einem Rail Scan System ausgestattet ist, erfassen. Das ENSCO Vehicle/Track Interaction (V/TI) Verfahren ist ähnlich zum Verfahren des IFCs. Das System hat den Vorteil, dass es automatisch verwendet werden kann und somit kein Personaleinsatz notwendig ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass es nur bestimmte Komponenten des Gleises fotografisch erfasst, wie beispielsweise die Verwindungen und Schienenköpfe, wodurch die Zeit für die Auswertung reduziert wird [9].

Nachteil des Messfahrzeugs ist, dass zwar Defekte am Gleis erkannt werden, jedoch eine Fehlerklassifizierung nicht möglich ist.

2.1.2 Achslagerbeschleunigung

Die Messung der Achslagerbeschleunigung kann verwendet werden, um Unstetigkeitsstellen am Gleis im frühen Zustand zu erkennen. In der Regel wird der Fahrweg nach Betriebsschluss oder während Wartungsarbeiten untersucht. Der Vorteil der Messtechnik der Achslagerbeschleunigung ist im Vergleich zu den anderen Methoden, dass die Messungen ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen und durch Regelzüge durchgeführt werden können [10]. Das ABA (Axel-Box-Acceleration) System besteht aus Beschleunigungssensoren, einer GPS-Antenne und einem Tachometer (Abb. 3 und 4). Die Beschleunigungssensoren werden an den Achslagern des Zuges befestigt, um die vertikalen Achslagerbeschleunigungen aufzunehmen. Die GPS-Antenne wird auf dem Zugdach installiert, um die Positionen der gemessenen Daten zu speichern. Der Tachometer dient zur konstanten Aufnahme der Fahrgeschwindigkeit und zur Kalibrierung der Positionsangabe. Die Abtastfrequenz wird auf 25,6k Hz eingestellt, so dass ausreichende Informationen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfasst werden können [11]. Die Messdaten geben einen Hinweis auf die Rad-Schiene-Kraft [12]. Ein Nachteil des ABAs ist die Beeinflussung des Signals durch die Schwingungen der Schienen und des Radsatzes. Wenn das Rad beschädigt ist, wird das Signal beeinflusst und gegebenenfalls stark verfälscht [12].

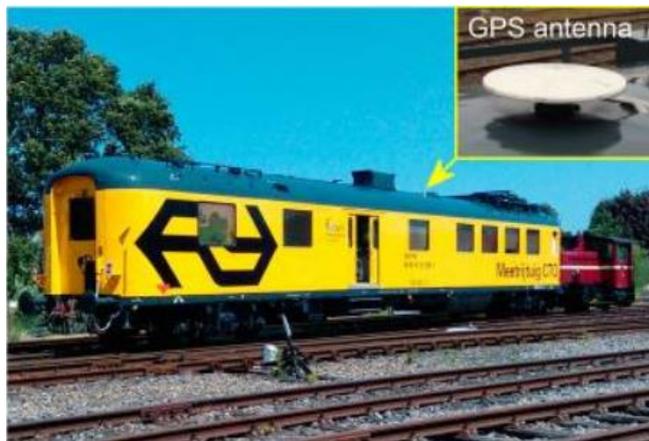


Abbildung 3: Messzug mit GPS Antenne [11]



Abbildung 4: Beschleunigungssensor am Achslager [11]

2.1.3 Gleisbegehung

Eine visuelle Prüfung ist die einfachste Methode für die Erkennung von Gleislagefehlern. Die Gleisbegehung erfordert vergleichsweise enormen Personalaufwand. Eine punktuelle Instabilität kann beispielsweise durch stehendes Wasser im Bahngraben, Hohllagen, das Anheben der Bettungsflanken, das Auftreten von feinkörnigem Bodenmaterial aus dem Schotterbett und durch das Auftreten eines periodischen Längshöhenfehler erkannt werden [4]. Ein großer Nachteil ist, dass punktuelle Instabilitäten meist im frühen Prozessverlauf zerstörungsfrei nicht erkannt werden können.

2.1.4 Georadarmessung

Das Georadarverfahren ist ein Puls-Echo-Prinzip, das mit dem Senden und Empfangen von Frequenzen zwischen 400 und 1000 Hz in den Untergrund/Unterbau eindringt [13]. Fehler an den Schichtgrenzen, wie z.B. Schottersäcke, mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften führen zu Reflektionen die an den Antennen empfangen werden. Aus den Laufzeiten, der Phasen und den Amplituden der Wellen sowie deren Intensität bildet sich ein Radargramm, wodurch man Aussagen z.B. über den Schichtenaufbau, zu Schlammstellen oder lokalen Inhomogenitäten treffen kann [4, 13]. Das Georadarmessfahrzeug ist zusätzlich mit einer Kamera und einem Hornstrahler ausgestattet. Ein Hornstrahler ist eine Art Mikrowellen-Antenne, der für die Aufnahme von höheren Frequenzbereichen dient. Georadarmessungen haben den Vorteil, dass im laufenden Betrieb der Zustand des Bahnkörpers ermittelt werden kann. Es kann zwischen einem sauberen und verschmutzten Schotter unterschieden sowie Gleisentwässerungsprobleme lokalisiert werden. Punktuelle Instabilitäten können mit dem Georadar erkannt werden [14]. Fehler am Gleis, wie z.B. ein Schienenbruch oder ein Schienenstoß, können nur visuell mit einer Kamera erfasst werden.

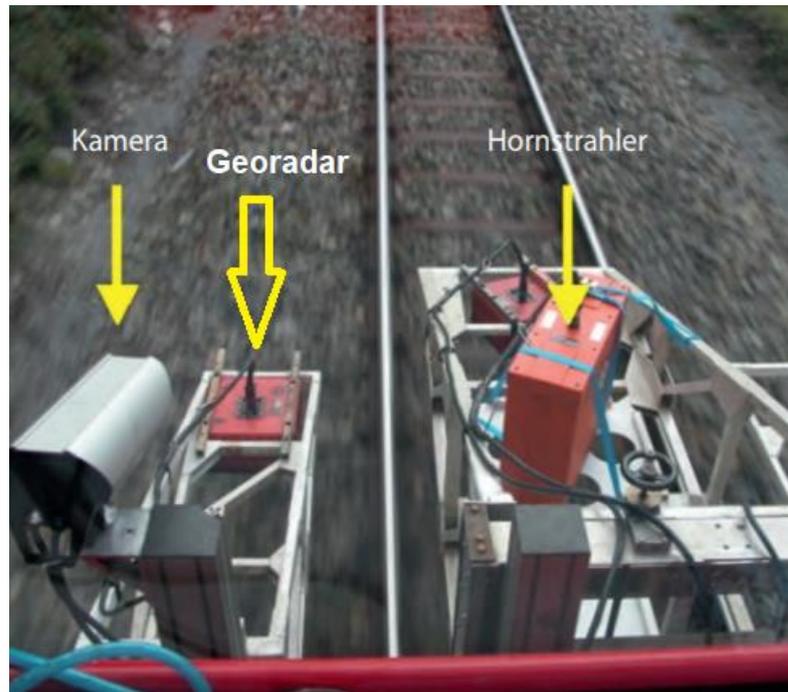


Abbildung 5: Georadar-Messeinrichtung an einem Messfahrzeug [13]

3 Aufbau eines Bahnkörpers in konventioneller Schotterbauweise

3.1 Einleitung

Der Bahnkörper bildet den Fahrweg für den gesamten Schienenverkehr. Das Gleis soll die Fahrzeuge entgleisungssicher führen, die vertikalen und horizontalen Fahrzeugkräfte aufnehmen und über Gleisrost und Schotterbett in den Untergrund ableiten [15]. Das Eisenbahngleis muss zudem Längskräfte, die primär durch Temperaturveränderungen verursacht werden, sicher aufnehmen.

3.2 Oberbau

Die Hauptbestandteile des Oberbaus sind die Schienen, die Schienenbefestigung, die Schwellen und die Bettung. Die Schienen und Schwellen werden mittels Kleineisen zu Gleisrosten, Weichen oder Kreuzungen verbunden [15]. Der Fahrbahntyp wird nach zwei unterschiedlichen Bauweisen unterschieden. Der Oberbau kann zum einen aus einem Schotterbett oder einer mineralisch gebundenen Schicht (Feste Fahrbahn) bestehen. In dieser Arbeit wird rein auf die konventionelle Schotterbauweise eingegangen. Bei dem Schotteroberbau wird das Gleis auf Schwellen in einem Schotterbett verlegt. Der Schotteroberbau muss so ausgelegt sein, dass die statische und dynamische vertikalen und horizontalen Kräfte aus den Eisenbahnbetrieb in den Untergrund sicher eingeleitet werden können [16]. Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schiene und Schwelle ist erforderlich für die gleichmäßige Übertragung der eingetragenen Kräfte. Der Schienenstahl muss verschleißfest sein und darf keine Neigung zu Brüchen und Riffelbildung aufweisen. Um eine stetige und stoß freie Bewegung der Fahrzeuge zu gewährleisten, müssen die Schienen in Längs- und Querrichtung eben sein [15].

3.2.1 Schienen

Schienen sind die linearen Trag- und Führungselemente, die parallel zueinander mit dem Abstand der Spurweite angeordnet sind und den Fahrweg für die Schienenfahrzeuge bilden. Sie bestehen aus Schienenkopf, Schienensteg und Schienenfuß. Die Wölbung zwischen Kopf und Fuß wird als Laschenkammer bezeichnet. Bei allen Schienenbahnen wird die Breitfußschiene/Vignolschiene als Regelform verbaut [17]. Die Schienen werden aus hochwertigem Stahl gewalzt. Die DB AG fordert als Regelgüte eine Mindestzugfestigkeit von $880 \frac{N}{mm^2}$ [18]. Kopfhärtete Schienen haben im Schienenkopf eine Mindestzugfestigkeit von $1175 \frac{N}{mm^2}$ [18].

Das Standardprofil S 54 (54kg/m) ist ab dem Jahr 1963 das Regelprofil in Deutschland und wird für die meisten Hauptstrecken und Bahnhofgleisen eingesetzt. Die Vignolschiene oder Breitfußschiene besteht aus einem breiten und flachen Fuß, der mit Spannklemmen auf den

Schwellen befestigt wird. Auf den Schienenfuß steht ein senkrecht schmaler Steg, der an seinem oberen Ende den Schienenkopf trägt [18].

Die Querschnitte der am häufigsten verwendeten Schienen und ihre wichtigsten Abmessungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Schienenformen und ihre Einsatzbereiche sind in Tabelle 1 aufgeführt [15].

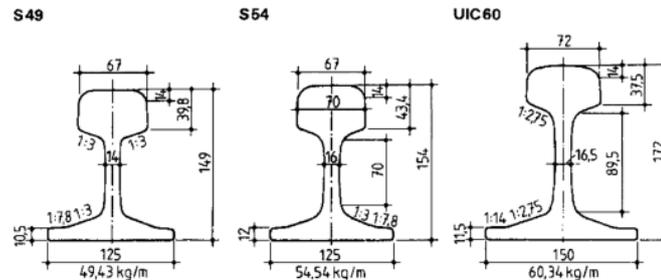


Abbildung 6: Gebräuchlichste Schienenformen und ihre Abmessungen [18]

Schie- nenform	Einsatzbereich	Höhe	Fuß
S 41	Straßenbahn auf eigenem Gleiskörper	138	125
S 49	U-Bahn, Stadtbahn, Anschlussbahn	149	125
S 54	Regelprofil in DB Gleisen	154	125
UIC 60	UIC Profil ist international eingeführt.	172	150

Tabelle 1: Schienenformen und ihre Einsatzbereiche [18]

Die Schienen werden aneinandergestoßen und anschließend verschweißt. Dabei wird das Schmelzschweißverfahren, wie z.B. das Thermit Lichtbogen- oder Pressschweißen, bevorzugt.

3.2.2 Schwellen

Schwellen werden aus Holz, Beton oder Stahl hergestellt. Für Holzschwellen wird z.B. Hartholz, Eichenholz oder Buchenholz verwendet. Wegen des hohen Gewichts von Betonschwellen von ca. 300 kg kann statt Holz, Beton eingesetzt werden. Einen Überblick über Schwellenabmessungen und Eigenschaften der Holz-, und Betonschwellen ist in Tabelle 2 angegeben.

Abmessungen/ Eigenschaften		Holzschwellen	Betonschwellen
		Form 1	B 70
Länge	l (m)	2,60	2,60
Breite	b_{oben} (m)	0,16	0,171
	b_{unten} (m)	0,26	0,30
Höhe	h (m)	0,16	0,235
Gewicht (kg)		ca. 100	304
Lebensdauer (Jahre)		3-18	ca. 60

Tabelle 2: Abmessungen und Eigenschaften von Holz- und Betonschwellen [15]

Der Schwellenabstand bezieht sich auf die Längsachse der Schwellen und wird in Abhängigkeit von der Gleisbelastung und der Tragfähigkeit des Bodens bestimmt. Der Abstand kann zwischen 0,60 m und 1,00 m variieren [15]. Bei einem wenig tragfähigem Untergrund und bei starker Verkehrsbelastung ist ein kleinerer Schwellenabstand und eine größere Schotterhöhe zu wählen, um die Belastung stärker verteilen zu können.

3.2.3 Befestigungsmittel

Die Befestigungsmittel müssen sicherstellen, dass die Schwellen sich nicht verdrehen und in Längsrichtung nicht verschoben werden. Sie verbinden die Schienen mit den Schwellen zu einem Gleisrost. Der Schienenfuß wird im Befestigungspunkt gegen die Schwelle mit einem Anpressdruck von 210 kN beidseitig angepresst [15]. Die bevorzugte Konstruktion der Befestigungsmittel für Holz-, und Stahlschwellen im Schotterbett kann Abbildung 8 entnommen werden. Die Schienen müssen eine elastische Lagerung im Befestigungspunkt aufweisen, um die dynamischen Beanspruchungen aufnehmen zu können. Es wird erreicht, indem eine elastische Kunststoffzwischenlage zwischen Schienenfuß und Schwelle eingebaut wird. Sowie durch die verwendeten Nägel, Klammern oder Federringe eine entsprechende elastische Lagerung geschaffen wird [15].

Je nach Zustand der Zwischenlage und der Federringe wirkt eine Kraft von 215 kN auf den Schienenfuß [15]. Die Rippenplatten geben den Schienen in Querrichtung den für die Spursicherung erforderlichen Halt. Bei Holzschwellen wird die Konstruktion als K-Oberbau (Abbildung 7 und 8) bezeichnet.

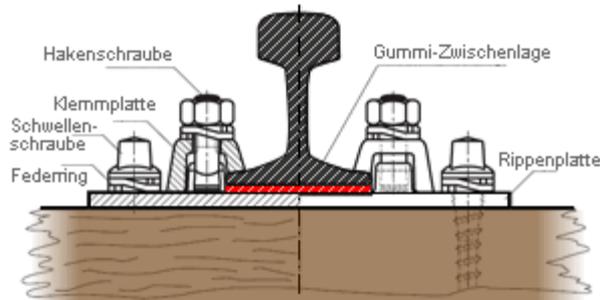


Abbildung 7: Schnitt K Oberbau [19]

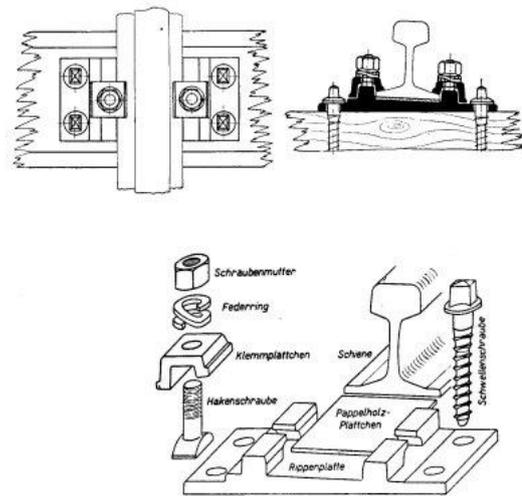


Abbildung 8: K Oberbau auf Holzschwellen [15]

3.2.4 Bettung

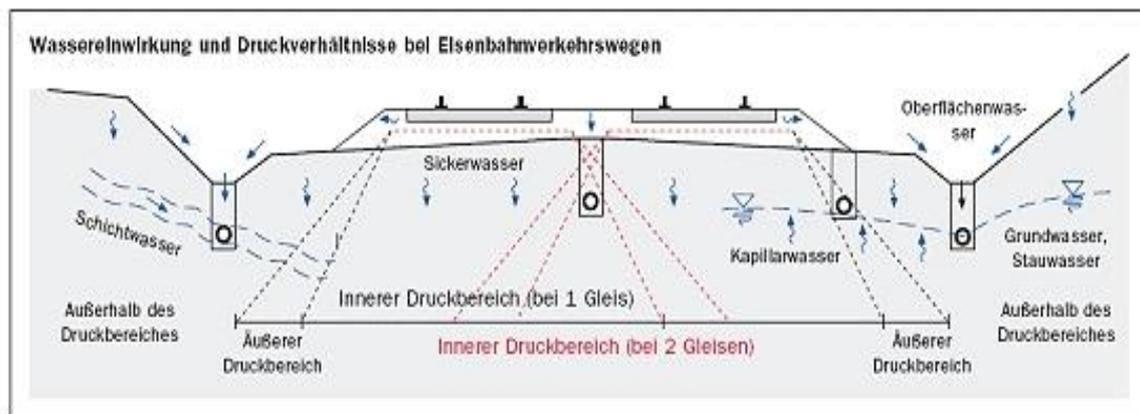
Die Bettung bildet die feste Unterlage für das Gleis und soll die Schwellen in fester und unverrückbarer Lage sichern. Die Bettung muss zudem die Kräfte, von der Verkehrsbelastung aufnehmen und an den Untergrund weiterleiten. Zudem muss sie wasser- und luftdurchlässig sein, damit Niederschlagswasser und Oberflächenwasser abfließen können. Das Bettungsmaterial besteht aus festem wetterbeständigem Hartgestein von gleichmäßigem, nicht schiefriem Gefüge und besitzt einen hohen Widerstand gegen Zerreiben, Zerschlagen und Zerdrücken. Der Bettungsschotter weist in der Regel eine Körnung von 22,4 bis 65 mm auf. Die Mindestdruckfestigkeit beträgt $180 \frac{N}{mm^2}$. Geeignete Gesteine sind z.B.: Basalt, Diabas, Diorit, Grauwacke und Quarzit [15].

3.3 Unterbau

Die Hauptaufgabe des Unterbaus ist die sichere Aufnahme der Kräfte von dem auf ihn ruhenden Oberbau. Als Unterbau wird der nicht durch bautechnische Maßnahmen veränderte anstehende Boden oder Fels bezeichnet. Die Tragfähigkeit des Bodens hängt von dem Verdichtungsgrad des Bodens ab. Mittels Proctorversuchen (DIN 18127) können im Labor die Zusammenhänge zwischen Wassergehalt und Trockendichte ermittelt werden. Das anfallende Wasser sollte möglichst zeitnah und direkt vom Bahnkörper ableitbar sein.

Die obere Ebene des Unterbaus wird gut verdichtet und mit einer Neigung von 1:20 ausgebildet. Diese Ebene wird als Erdplanum bezeichnet. Somit wird etwa 90% des Oberflächenwassers aus dem Bereich der Fahrbahn in seitliche offene Entwässerungsanlagen abgeleitet. Zum Erdplanum gehört auch die Sperrschicht, dessen Oberfläche (Planie) den obersten Abschluss des Unterbaus bildet. Ungebundenes Bodenwasser wie auch Grund- und Kapillarwasser werden in Tiefenentwässerungen eingeleitet.

Eine wirkungsvolle Entwässerung der Bahnanlagen ist notwendig, da der Boden durch das Eindringen von Wasser seine Tragfähigkeit verlieren kann.



Drainagesysteme im Schienenbereich müssen gute hydraulische und mechanische Eigenschaften aufweisen

Abbildung 9: Wassereinwirkungen und Druckverhältnisse [20]

4 Beschreibung der Gleisfehler

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Gleisfehler im Real System und im Modell beschrieben. Die Gleisfehler im Modell werden mit den Fehlern im Real System verglichen und deren Bezug beschrieben.

4.1 Schienenstoß

Real System

Schienenstöße bilden sich infolge von Verformungen an der Schiene. Die Ursache kann beispielsweise eine mangelhafte Ausführung der Schweißverbindung oder Dehnungen, die durch große Temperaturunterschiede hervorgerufen werden, entstehen. Der Stoß ist eine Unstetigkeitsstelle im Gleis und erfordert in der Regel einen hohen Instandhaltungsaufwand [15].

Ein Schienenstoß der sich direkt über einer Schwelle befindet, wird als ein ruhender Stoß bezeichnet. Sollte der Stoß jedoch zwischen zwei Schwellen liegen, so spricht man von einem schwebenden Stoß [21]. Durch die schlagartige Beanspruchung beim Anlauf und Ablauf der Räder wird die ruhende Stoßschwelle ungleichmäßig belastet und es entstehen große Verformungen. Bei einem schwebenden Stoß ragen dagegen die Schienenenden jeweils als Kragarme über die Schwelle hinaus [21].

Modell

Schienenstöße im Modell sind als schwebende Stöße montiert. Der erste Stoß hat eine Länge von 1 cm. Der zweite hat eine innere Länge von 1 cm und eine äußere Länge von 1,4 cm. Beim dritten Schienenstoß beträgt die Länge des Kragarms 2,3 cm und ist somit der größte Stoß im Modell. Der letzte Schienenstoß ist der kleinste und hat eine Länge von 0,9 cm.



Abbildung 10: Schienenstoß im Real System [1]



Abbildung 11: Schienenstoß im Modell

4.2 Schienenbruch

Real System

Das Auftreten von Schienenbrüchen beeinträchtigt die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs erheblich, so dass der Fahrweg nicht mehr genutzt werden kann. Ein Schienenbruch ist ein Durchbruch oder Ausbruch der Schiene. Schienenbrüche entstehen überwiegend durch eine hohe Verkehrsbelastung, bei starken Temperaturschwankungen oder durch Schweißfehler. Schienenbrüche werden in folgende drei Arten unterteilt [21].

- Waagerechte Schienenbrüche verlaufen parallel zur Fahrtrichtung im Steg und trennen den Schienenkopf vom Schienenfuß. [22]
- Senkrechte Schienenbrüche verlaufen quer zur Fahrtrichtung durch das vollständige Schienenprofil. [22]
- Nierenbrüche verlaufen über einige Zentimeter in Längsrichtung im Steg und ändern dann ihre Richtung zum Schienenfuß hin. [22]

Modell

Im Modell sind zwei Schienenbrüche installiert, wobei sie unterschiedliche Längen haben. Der erste Schienenbruch besitzt einen Bruch parallel zur Fahrtrichtung im Steg, so dass es einen waagerechten Schienenbruch darstellt. Er hat eine äußere Länge von 2 cm und eine innere Länge von 1 cm und befindet sich direkt am Anfang des zweiten Kreisbogens. Der zweite Schienenbruch hat eine Bruchlänge von 1 mm in Längsrichtung und stellt einen Nierenbruch dar.



Abbildung 12: Schienenbruch im Real System [23]

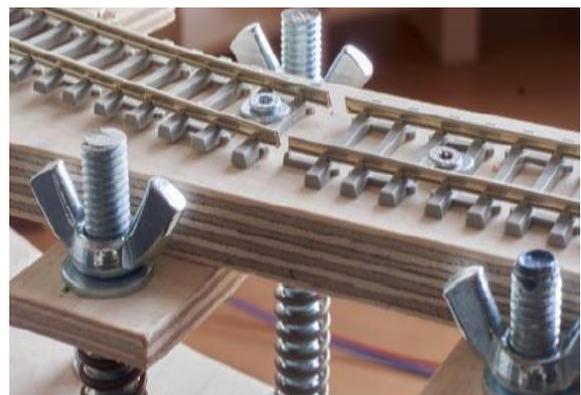


Abbildung 13: Schienenbruch im Modell [24]

4.3 Punktuelle Instabilität

Real System

Punktuelle Instabilitäten werden als „kurzwellige Gleislagefehler bei relativer Einsenkung unter Verkehrsbelastung mit einer Wellenlänge von ca. 3 m bis 25 m“ am Bahnkörper in konventioneller Schotterbauweise definiert [4]. Punktuelle Instabilitäten können in zwei Arten unterschieden werden. Sie können durch das Aufweichen des anstehenden Bodens oder aufgrund von Schotterzertrümmerung verursacht werden [4]. Durch die Dicke des Schotterbetts oberhalb des Untergrunds/ Unterbaus ist es schwierig eine punktuelle Instabilität frühzeitig zu erkennen. In dieser Arbeit wird deshalb die vertikale Beschleunigung betrachtet, mit dieser eine punktuelle Instabilität im Modell erkannt werden soll.

Modell

Die Punktuelle Instabilität im Modell wurde durch einen Längshöhenfehler mit einer Gesamtlänge von 14 cm gebildet. Der Tiefpunkt befindet sich in der Mitte und hat eine Tiefe von 2mm, so dass sich eine kleine Parabel im Fahrweg bildet. Der parabelförmige Weg erzeugt das gleiche Verhalten, wie bei einer Einsenkung oder Aufweichung des Bodens im Real System.



Abbildung 14: Punktuelle Instabilität im Real System [25]



Abbildung 15: Punktuelle Instabilität im Modell [24]

4.4 Steifigkeitswechsel im Brückenbereich

Real System

Steifigkeitswechsel, wie beispielsweise der Übergang zu einer Brücke oder sich verändernde Oberbauformen (Bahnübergang), können ebenfalls eine Unstetigkeitsstelle verursachen [26]. Die Interaktion Gleis/Brücke spielt eine große Rolle bei der Planung von Gleisanlagen, aufgrund der schwimmenden Lagerung des Gleises auf einem Balken mit zwei Stützen. [27]. Es wurde deshalb im Modell der Einfluss der Steifigkeitswechsel auf die gemessene Beschleunigung untersucht.

Modell

Die Gesamtlänge der Brücke beträgt 15,3 cm. Die Übergangsbereiche, die den Gleisfehler verursachen, wie beispielsweise die Auffahrt und Abfahrt von der Brücke haben im Modell eine Länge von ca. 1,3 cm.



Abbildung 16: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Real System [26]



Abbildung 17: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Modell [24]

4.5 Richtlinien

Für die Beurteilung der Qualität der Gleisgeometrie legt aktuell die Richtlinie 821 der Deutschen Bahn AG die Grundsätze für die Inspektion des Oberbaus fest. Die Einhaltung der empfohlenen Toleranz- und Grenzwerte ermöglicht eine sichere Betriebsführung und wird in drei Hauptniveaus definiert [7]:

- SR_A ist der Wert, bei dessen Überschreitung eine Beurteilung hinsichtlich der Einplanung einer Instandsetzungsmaßnahme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erforderlich ist [7].
- SR_{100} ist der Wert, der den technisch/wirtschaftlichen Abnutzungsvorrat beinhaltet. Bei dessen Überschreitung ist eine Instandsetzung bis zur nächsten Regelinspektion erforderlich [7].
- SR_{lim} ist der Wert, bei dessen Überschreitung eine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit zu erwarten ist. Eine Instandhaltung ist in kürzest möglicher Zeit durchzuführen [7].

Alternativ wird gemäß EN 13848, Teil 5 drei Sicherheitsniveaus unterschieden:

- Aufmerksamkeitsgrenze (AL): Bezieht sich auf den Wert, der, falls er überschritten wird, zu einer Analyse des geometrischen Gleiszustandes führt, und der in der regulär geplanten Instandhaltungsarbeiten berücksichtigt wird [7].
- Eingriffsgrenze (IL): Bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen erfordert, damit die Sicherheitsgrenze nicht vor der nächsten Inspektion erreicht werden kann [7].
- Sicherheitsgrenze (IAL): Bezieht sich auf den Wert, der, wenn er überschritten wird, Maßnahmen erfordert, welche zur Reduzierung des Risikos der Entgleisung führt. Dies kann entweder durch Sperren des Gleises, Reduzierung der Geschwindigkeit oder durch Korrektur der Gleisgeometrie erfolgen [7].

5 Beschreibung des Fahrweg-Fahrzeug-Modells

Das Modell besteht aus einer 4,04 m langen Teststrecke, einem Modellzug und einem Beschleunigungssensor mit Funkmodul. An dem Modellzug wird der Beschleunigungssensor befestigt. Es werden unterschiedlichen Fehlern am Gleis mit bekannter Position auf der Teststrecke erzeugt. Die Reihenfolge der Fehler sowie die Ortsangabe erlaubt die systematische Zuordnung und Auswertung der Fehlereigenschaften im Messschrieb [24].

5.1 Teststrecke

5.1.1 Hochbahnkonstruktion

Die Teststrecke ist in vier Abschnitte aufgeteilt. Sie besteht aus zwei Geraden und zwei Kreisbögen die zusammen eine ovale Strecke bilden.

Mit einer Feder-Schrauben-Konstruktion können leicht Gleisfehler in der Längshöhe mit unterschiedlichen Amplituden und Wellenlängen erzeugt werden. Die Strecke kann mit einer Hochbahn-Konstruktion verglichen werden, da diese auf Pfähle gelagert ist. Mit der Feder-Schrauben-Konstruktion können auch Verwindungsfehler sowie eine Überhöhung im Bogen eingestellt werden [24].

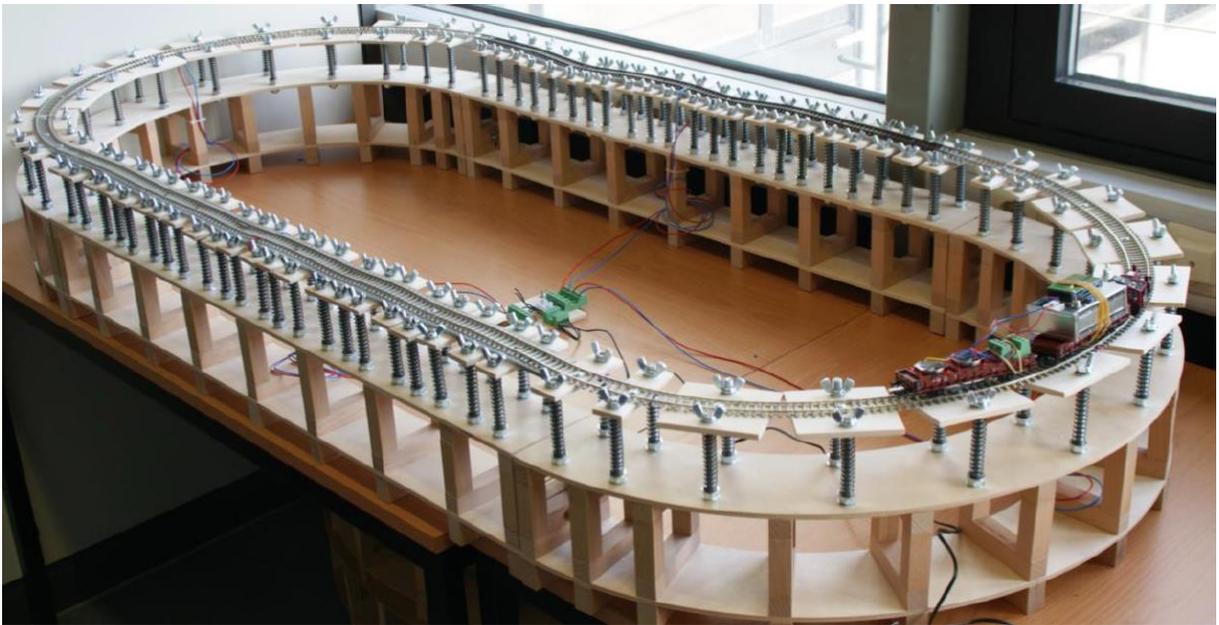


Abbildung 18: Teststrecke mit Messsystem [24]

5.1.2 Feder-Schrauben-Konstruktion

Der Aufbau der Konstruktion besteht aus Flügelschrauben die von einer Unterlegscheibe an den Holzplättchen befestigt sind. Die Gewindestange wird von einer Flügelschraube und einer Mutter eingespannt. Die Feder läuft über die Gewindestange von der Unterkonstruktion bis zur unteren Seite des Holzplättchens auf [24].

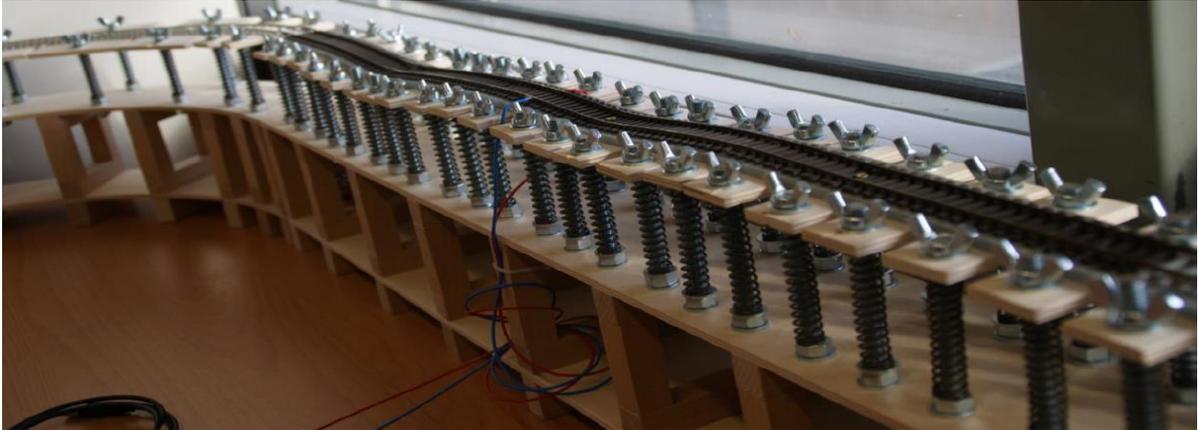


Abbildung 19: Langwellige Gleislagefehler in der Längshöhe [24]

Aufbau:



Flügelschraube
 Unterlegscheibe
 Holzplättchen
 Unterlegscheibe
 Gewindestange
 Feder
 Normale Mutter
 Unterlegscheibe
 Unterkonstruktion
 Unterlegscheibe
 Sicherungsmutter

Abbildung 20: Aufbau Feder-Schrauben-Konstruktion [3]

5.1.3 Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen

Die einzelnen Module sind mittels einer Gewindestange mit Hutmutter und Flügelschraube verbunden. Dies ermöglicht einen einfachen und zugleich schnellen Auf- und Abbau sowie eine platzsparende Lagerung.



Abbildung 21: Konstruktion der Modulverbindung [24]

5.1.4 Stromversorgung der einzelnen Module

Jeder Streckenabschnitt wird einzeln mit einer maximalen Spannung von 12 Volt versorgt, um mögliche Unterbrechungen der Stromversorgung an den Übergängen zu vermeiden [24].

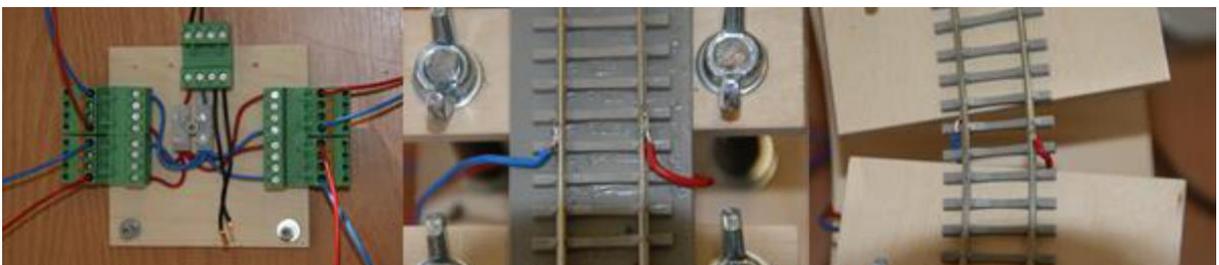


Abbildung 22: Detaillierte Ansicht auf die Stromversorgung der vier Streckenabschnitte [24]

5.2 Fehlererzeugung

Um eine einfache systematische Zuordnung der Gleisfehler zu erreichen wurden folgende Schienen- und Gleisfehler eingebaut:

- 4 Schienenstöße
- 2 Schienenbrüche (Abbildung 23)
- 1 punktuelle Instabilität (Abbildung 25)
- 1 Steifigkeitswechsel im Brückenbereich (Abbildung 24)

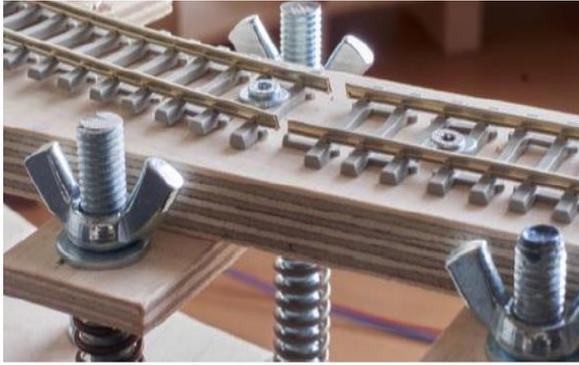


Abbildung 23: Schienenbruch im Modell [24]



Abbildung 24: Steifigkeitswechsel am Brückenanfang und-ende im Modell [24]



Abbildung 25: Punktueller Instabilität im Modell [24]

Im Realsystem kann die genaue Position und die Art der Fehler aufgrund von Informationsmangel nicht ermittelt werden. Das Modell hat dagegen den sehr großen Vorteil, dass die genaue Position der Fehler im Modell bekannt ist. Man kann die Fehler bestimmten Mustern im Messschrieb leicht zuteilen. Dies ermöglicht eine Fehlerklassifizierung, die durch unterschiedliche Algorithmen beschrieben und getestet werden kann [7]. Anhand von festgelegten Toleranz- und Grenzwerten kann anschließend eine Einzelfehlerbetrachtung durchgeführt werden. Um die Eigenfrequenz des Messfahrzeuges zu erhöhen, wurde ein zusätzliches Gewicht am Messwagen befestigt.

Die Zusammensetzung des Messzuges, dessen Fahrtrichtung sowie die Position der Fehler ist in Abbildung 26 dargestellt und wurde während der Untersuchung nicht geändert. Der Messzug hielt nach einer Rundenfahrt immer am gleichen Streckenabschnitt (Anfang des ersten Kreisbogens) für ca. 3 s bevor eine erneute Rundenfahrt startete. Die Fahrzeuggeschwindigkeit betrug bei der Überfahrt der Fehler ca. 0,37m/s [24].

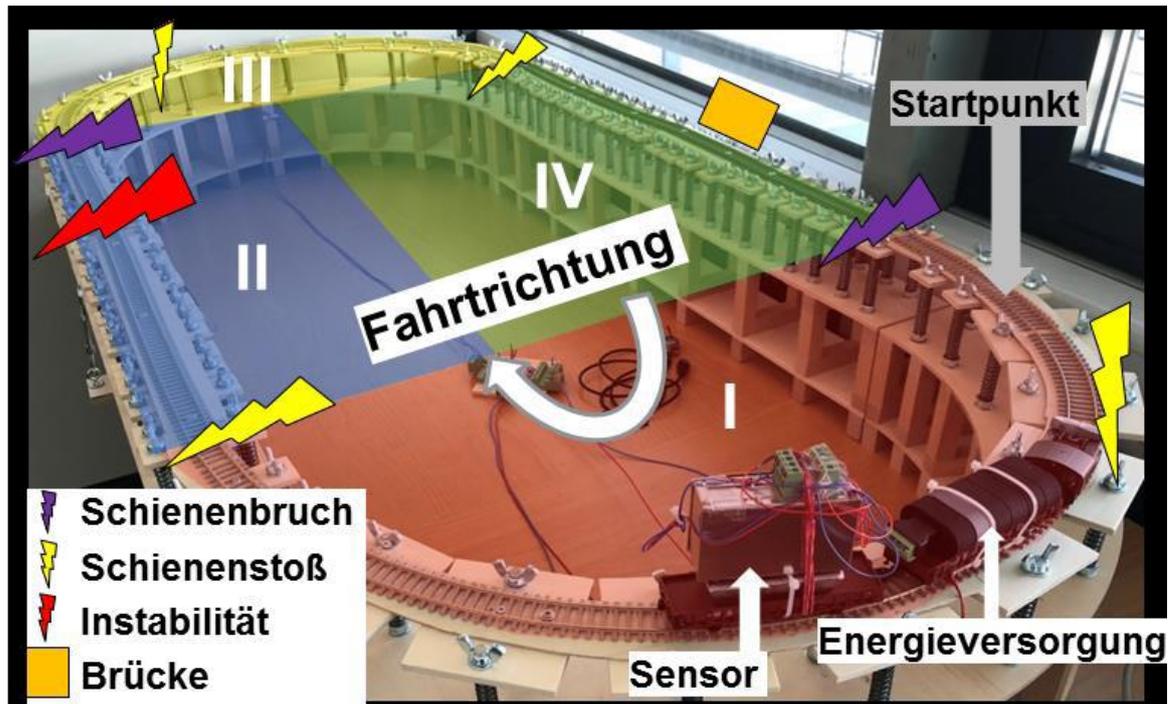


Abbildung 26: Eingebaute Fehler und deren Position im Modell [24]

5.3 Software

Es wurde eine Software für die Erfassung der Daten programmiert, die eine schnelle und kontinuierliche Datenübertragung garantiert. Die erzeugten Daten vom Beschleunigungssensor können leicht in die Software Matrix Laboratory (MATLAB) importiert werden [24].

5.3.1 Software zur Erfassung der Messdaten

Zur Bedienung des Messsystems werden folgende Befehle benötigt:

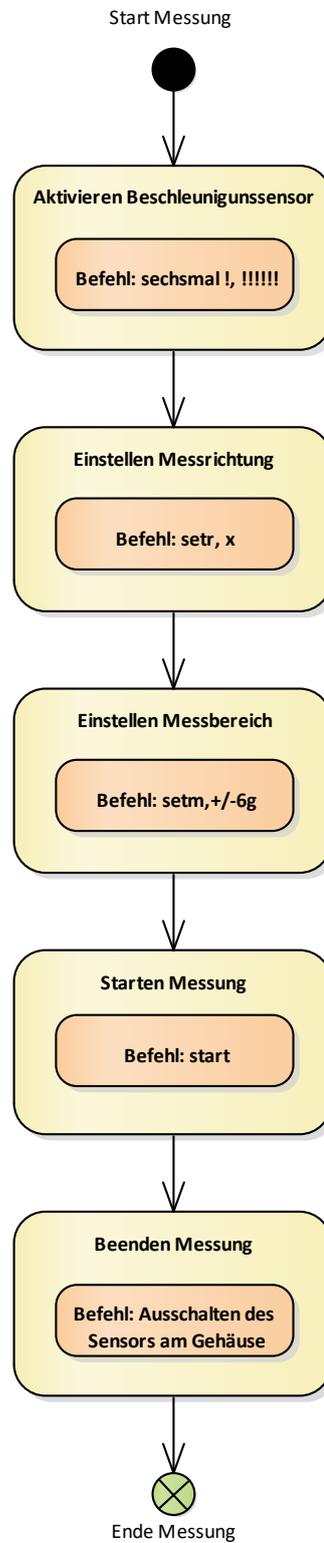


Abbildung 27: Befehle zur Bedienung des Messsystems

Der Beschleunigungssensor kann in der jetzigen Konfiguration Daten mit einer Abtastrate von $t_s = 2 \text{ ms}$ bzw. einer Abtastfrequenz von $f_s = \frac{1}{t_s} = \frac{1}{2 \text{ ms}} = \frac{1}{2 \times 10^{-3}} = 500 \text{ Hz}$ aufzeichnen [24].

5.3.2 Messdaten Import mit MATLAB

Die im Messprotokoll aufgezeichneten Daten werden mit einer dafür selbstprogrammierten Funktion in MATLAB in Vektoren umgewandelt. Jede Beschleunigungsrichtung (x.y.z) ergibt einen Vektor. Da für einen Controller die Division mit rationalen Zahlen einen höheren Zeitaufwand erfordert und damit laut Hersteller Messungen mit vergleichsweise kurzen Zeitabständen nicht mehr umsetzbar wären, muss jeder Eintrag des Vektors mit $\frac{1}{1365,3125} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ multipliziert werden, um die Beschleunigung in $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ zu erhalten. Anschließend können die erzeugten Daten für eine Weiterverarbeitung genutzt werden [24].

6 Gleisfehler

Die Gleisfehler werden durch die Wellenlängen λ in kurz-, mittel- oder langwellige Fehler unterteilt. Die kurzwelligen ($4\text{m} \leq \lambda \leq 25\text{m}$) und mittelwelligen ($25\text{m} \leq \lambda \leq 70\text{m}$) Gleisfehler deuten auf einen Fehler in der Bettung hin, während langwellige Fehler auf einen Fehler im Untergrund oder im Unterbau hinweisen. Wellenlänge mit einer Länge von $\lambda < 0,3\text{ m}$ weisen auf einen Schienenoberflächenfehler hin, wie beispielsweise einen Schienenbruch oder einen Schienenstoß. Die Wellenlänge der Gleisfehler und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs v beeinflussen die Fahrzeugfrequenz f (in Hertz, Hz). Wenn ein Zug über einen mittelwelligen Gleisfehler mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fährt, beträgt die Frequenz bei der Überfahrt ca. $1,1\text{ Hz}$. Da die Frequenz direkt proportional zu der Geschwindigkeit steht, verdoppelt sie sich auf $2,2\text{ Hz}$, wenn sich die Geschwindigkeit auf 200 km/h erhöht.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (6.1)$$

f = Eigenfrequenz des Fahrzeugs

v = Geschwindigkeit des Fahrzeugs [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]

λ = Wellenlänge [m]

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ist der entscheidende Parameter für die Intensität der dynamischen Beanspruchung. Gleisfehler $F(x)$ können vereinfacht als eine sinusförmige Anregung angenommen werden.

$$F(x) = F_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \quad (6.2)$$

mit

F_0 = Fehleramplitude

λ = Wellenlänge

x = zurückgelegter Weg

Aus der Geschwindigkeit des Fahrzeugs für den mit der Zeit t zurückgelegten Weg x des Rades ergibt sich:

$$x = v \cdot t \quad (6.3)$$

Durch Einsetzen von (6.3) in (6.2) folgt:

$$F(x) = F_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot v \cdot t\right) \quad (6.4)$$

Durch zweimaliges Ableiten von (6.4) nach der Zeit t ergibt sich:

$$\frac{\partial^2 F(x)}{\partial t^2} = -F_0 \left(\frac{2\pi v}{\lambda}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi v}{\lambda} \cdot t\right) \quad (6.5)$$

Aus der zweiten Ableitung des Ortes x nach der Zeit t ergibt sich die Beschleunigung $a(x)$. Nach Umstellen von (6.4) nach F_0 und durch das Einsetzen in (6.5), folgt:

$$a(x) = -F(x) \cdot \left(\frac{2\pi v}{\lambda}\right)^2 \quad (6.6)$$

In Gleichung 6.6 ist erkennbar, dass die vertikale Beschleunigung direkt proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit v ist. Zudem ist die Beschleunigung indirekt proportional zur quadratischen Fehlerwellenlänge λ . Je größer die Unebenheit des Längshöhenfehler ist, desto größer ist die maximale Beschleunigung. Die Beschleunigungssensoren am Fahrzeug reagieren auf vertikale Fehler im Gleis, wie beispielsweise bei einem Schienenbruch. Hierbei wird bei der Überfahrt der Schiene diese nach unten gedrückt, wodurch sich das Rad mit dem Achslager nach unten absenkt. Anschließend wird das Rad durch einen Impuls, verursacht durch das Auflaufen auf den Schienenquerschnitt, angehoben.

Um die Gleisfehler klassifizieren zu können, wird die vertikale Beschleunigung am Fahrweg-Fahrzeug-Modell mit dem Beschleunigungssensor gemessen. Die Beschleunigungen werden als Vektoren in z-Richtung in der Software gespeichert und in MATLAB importiert. Ein Messschrieb mit den unterschiedlichen Beschleunigungen kann dann als Signal dargestellt werden (Abb.28). Die Fehler im Messschrieb können als kurzzeitiger positiver oder negativer Ausschlag mit großer Amplitude erkannt werden. Die X-Achse im Messschrieb stellt den Messpunkt dar, die Y-Achse den Betrag der Vertikalbeschleunigung. Es wurden zwölf Runden mit der Geschwindigkeit von 0,37 m/s gemessen und ein Stopp von ca. 3 Sekunden zwischen jeder Runde für eine bessere Orientierung im Messschrieb eingelegt. In jeder Runde sind acht Fehlern am Gleis abgebildet, die dann 8 verschiedene Ausschläge besitzen. Die Y-Achse musste anschließend auf die 0-Koordinate gebracht werden. Dafür wurde folgende Gleichung verwendet:

$$z_Richtung = \frac{x_z_Richtung_2.}{1365.3125.*9.81+10} \quad (6.7)$$

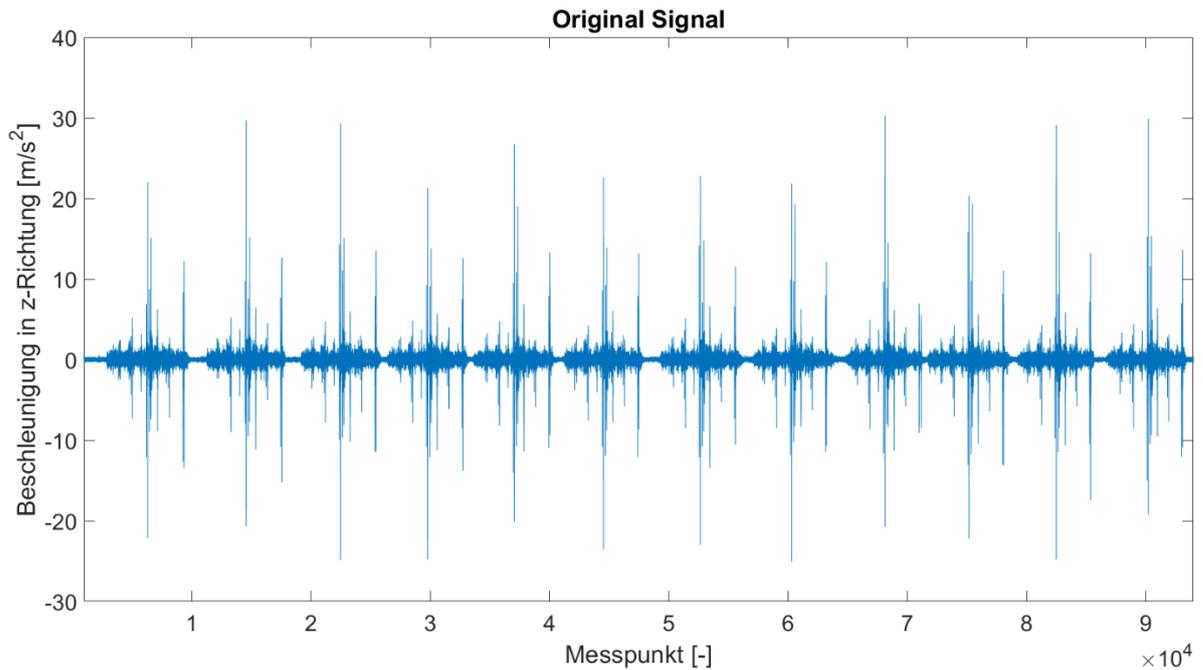


Abbildung 28: Messschrieb der Vertikalbeschleunigung

Die frühzeitige Erkennung der Fehler am Gleis ermöglicht die Vermeidung einer kostenintensiven Instandhaltungsmaßnahme und im schlimmsten Fall die Entgleisung von Fahrzeugen. Die Beschleunigungswerte in x und y Richtung werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

6.1.1 Datenbearbeitung

In einem ersten Schritt mussten die Messdaten bearbeitet werden. Mit Hilfe der bekannten Reihenfolge und Position der Fehler wurden die Fehlerbereiche im Messschrieb bestimmt. In Abbildung 28 ist der gesamte Messschrieb für 12 Runden dargestellt. Man kann gut erkennen, dass bei den Maxima der Kurvenverlauf spitz zuläuft. Für die bestmögliche Betrachtung der einzelnen Fehler wurde ein Intervall von +/- 250 Messpunkten gewählt. Dies ermöglicht die Betrachtung des Verhaltens des Messwagens kurz vor, während und kurz nach dem Fehler.

6.2 Zuordnung der Gleisfehler im Messschrieb

In Abbildung 29 ist die Reihenfolge der Fehler im Verlauf der Vertikalbeschleunigung dargestellt. Der Messschrieb wurde visuell Stückweise betrachtet und mittels des Data Cursors in MATLAB die jeweiligen Positionen des Fehlermaximums für jede Runde bestimmt.

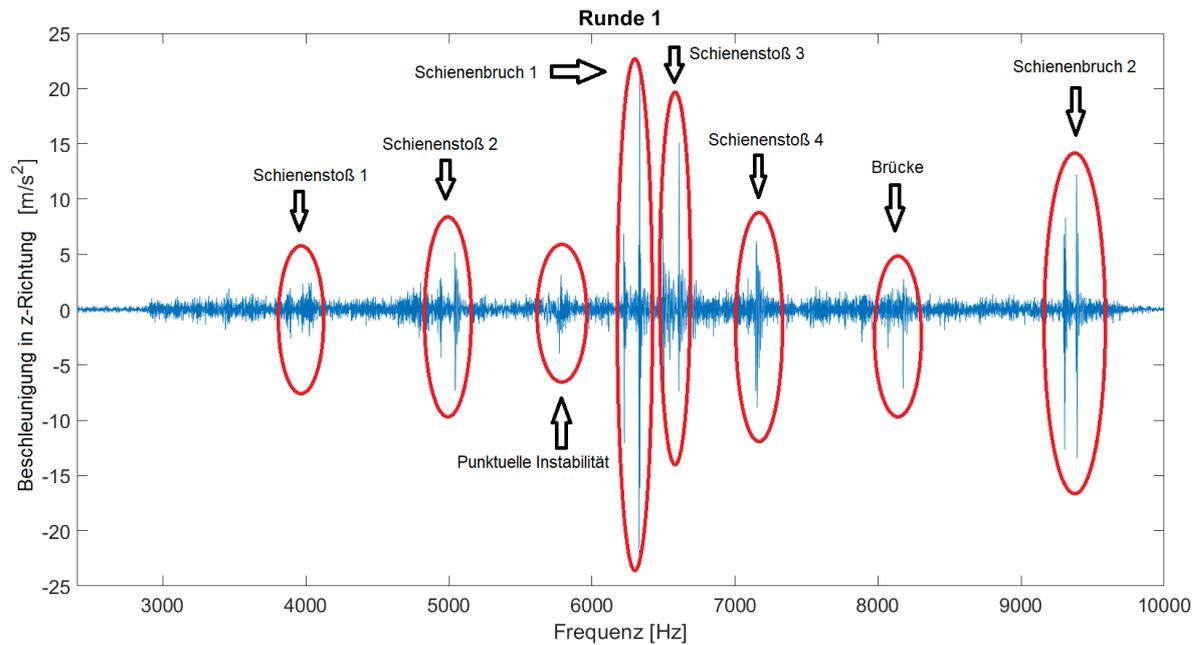


Abbildung 29: Position der Fehler im Messschrieb

Anschließend wurden 8 Vektoren mit je 12 Spalten erstellt, in denen alle Positionen des Maximums mit +/- 250 Messwerte eingetragen wurden. Der Vektor kennzeichnet den Fehlertypen, wobei die Spalten den Bereich des Fehlers für die jeweilige Runde enthalten. Die 8 Vektoren bilden eine 3D-Matrix die alle Gleisfehler mit ihren jeweiligen Messwerten beinhaltet. Innerhalb der Matrix ermittelt ein Algorithmus im angegebenen Bereich das Maximum des Ausschlags. Um das Maximum zu erkennen, wird nach dem ersten gefundenen Wert überprüft, ob der darauffolgende Wert größer oder kleiner ist. Ist der Nachfolgende größer, wird dieser als neues Maximum definiert, bis der komplette Bereich untersucht wurde. Matlab gibt dann den Wert des Maximums mit deren Position posmax an. Das Ergebnis wird geplottet und im Workspace gespeichert. Die Positionen und die Maxima werden in einer 8x12-Matrix gespeichert. Damit die Rechenlaufzeit und der Speicherplatz reduziert werden, wurde eine For-Schleife erzeugt. Die For-Schleife lässt sich in Matlab folgendermaßen umsetzen:

```
for j=1:size(M,3) %M beinhaltet die Intervalle aller Fehlertypen
    R=M(:, :, j); %R beinhaltet alle Vektoren der Matrix
    for i=1:size(R,2)
        figure
        v = R(:, i);
        % ausgewählte Intervalle plotten
        plot([x_lim(j,i):x_lim(j,i)+500],v)
        hold on
        plot(posmax(j,i), (maximum(j,i)), 'ko', 'LineWidth', 5,
            'MarkerSize', 5) % Maximum mit Position posmax plotten
        strmax = ['Maximum = ', num2str(maximum(j,i))];
        text(posmax(j,i), maximum(j,i), strmax,
```

```

'HorizontalAlignment','right');
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('vertikale Beschleunigung [m/s^2]')
title(sprintf('%s Runde %d',titlematrix(j), i));
end
end
    
```

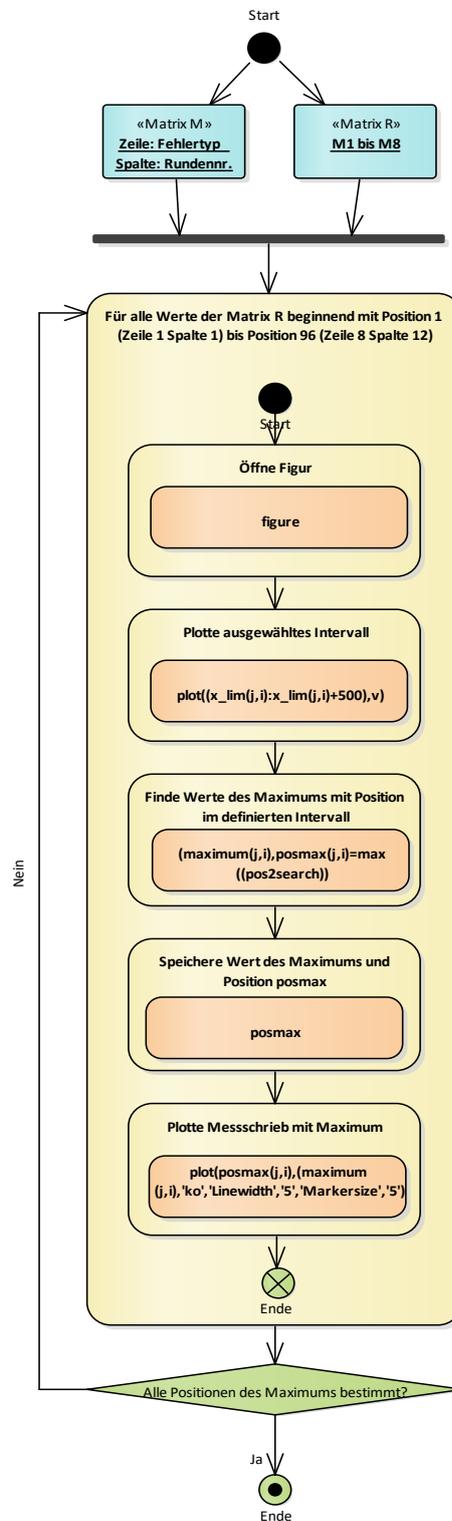


Abbildung 30: Logik der For-Schleife zur Detektion des Maximums für ein definiertes Messintervall

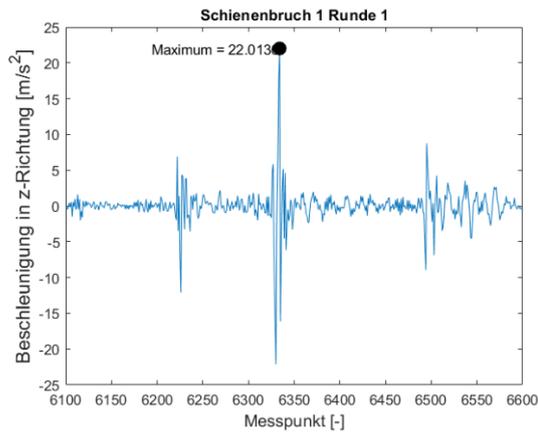


Abbildung 31: Schienenbruch 1 mit Angabe des Maximums

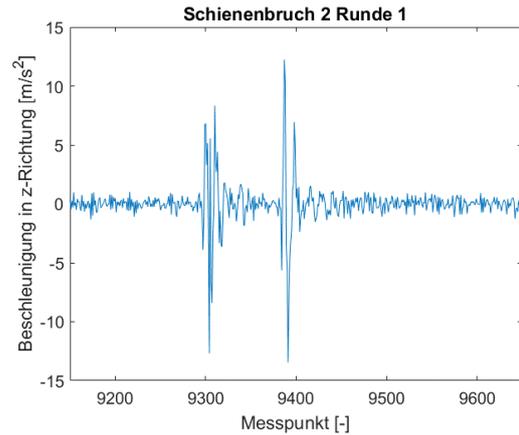


Abbildung 32: Schienenbruch 2 mit Angabe des Maximums

Bei jedem Fehler bilden sich zwei typische Ausschläge, wobei der zweite immer größer ist als der erste. Dies ist auf die zwei Achsen des Messfahrzeugs zurückzuführen, durch die der Beschleunigungssensor zweimal durch den gleichen Fehler angeregt wird.

Die gemessenen Daten wurden mit einer Abtastfrequenz von $f_s = 500 \text{ Hz}$ ermittelt. Der Abstand der einzelnen Messpunkte bei den Überfahrten der Fehler ist durch die Abtastfrequenz der Messsignale definiert und entspricht 2 ms . Um zu überprüfen, ob die Abtastfrequenz 500 Hz beträgt, wurde die Anzahl der Messpunkte zwischen zwei Ausschlägen berechnet. Es lagen durchschnittlich 115 Messwerte zwischen zwei ausgewählten Fehlern vor. Die 115 Messwerte entsprechen einer Zeit von ca. $0,23 \text{ s}$. Der zurückgelegte Weg s kann mit der Gleichung $s = v \cdot t$ beschrieben werden. Durch das Einsetzen der bekannten Geschwindigkeit von $0,37 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich ein Weg von ca. $85,1 \text{ mm}$. Nach der rechnerischen Ermittlung des zurückgelegten Weges wurde der Abstand der zwei Achslager am Fahrzeugmodell gemessen, was der Länge des berechneten Weges entsprach. Somit konnte nachgewiesen werden, weshalb sich zwei Ausschläge im Messschrieb pro Fehler bilden. Für die Klassifizierung der Fehler wird vereinfachend der größte Ausschlag betrachtet.

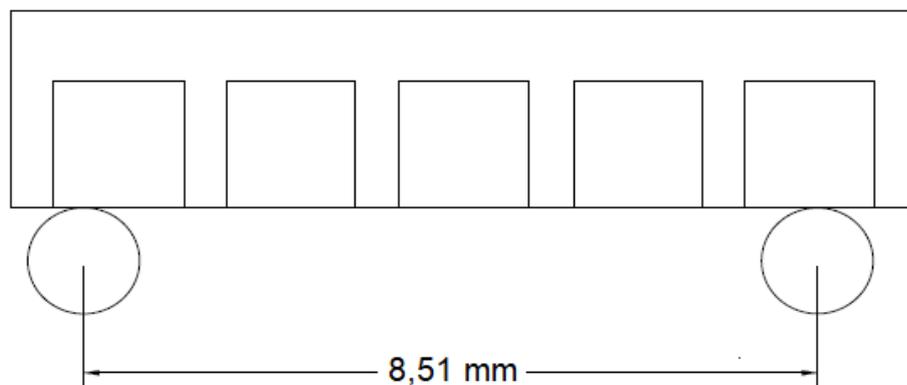


Abbildung 33: Achsabstand am Fahrzeugmodell

Vergleicht man die Messschriebe in Abb. 31 und 32 ist zu erkennen, dass beim ersten Schienenbruch im Vergleich zum zweiten Schienenbruch deutlich größere vertikale Beschleunigungen erzeugt werden. Das Fahrzeug erfährt nur einen Sprung beim Befahren des Fehlers und kehrt relativ zeitnah zum normalen Zustand zurück. Beim Befahren des ersten Schienenbruchs erfährt das Fahrzeug eine vertikale Beschleunigung von ca. $22.013 \frac{m}{s^2}$. Beim zweiten Bruch beträgt die Beschleunigung nur $12.241 \frac{m}{s^2}$.

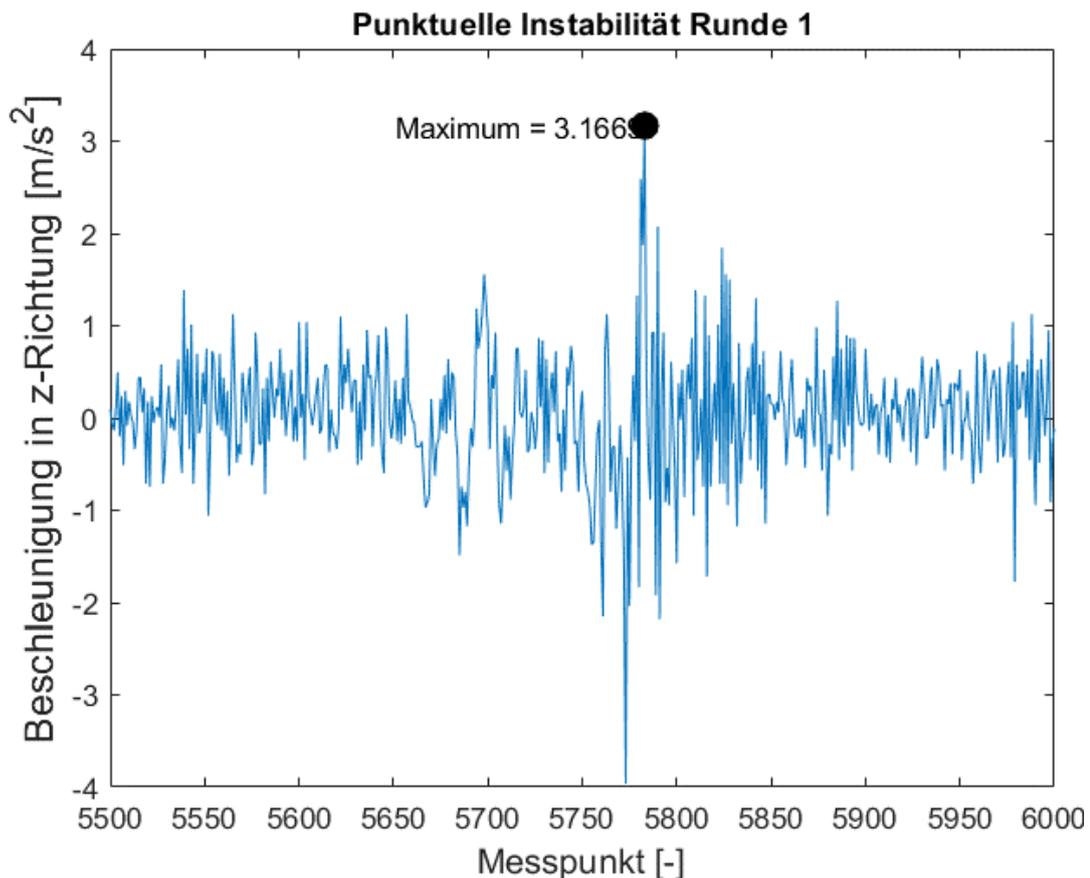


Abbildung 34: Punktuelle Instabilität mit Angabe des Maximums

Bei der Überfahrt der punktuellen Instabilität reagiert das Fahrzeug mehrmals mit niedrigen Ausschlägen zwischen $1 \frac{m}{s^2}$ und $1,5 \frac{m}{s^2}$. Es wird festgelegt, dass die Position des Maximums in der Mitte der Unstetigkeitsstelle liegt. Dort erfährt das Fahrzeug aufgrund der negativen Längsneigung die stärkste Beschleunigung mit einem Wert von ca. $3,1669 \frac{m}{s^2}$. An der gleichen Stelle wird das Fahrzeug aufgrund der positiven Längsneigung abgebremst. Man kann im Messschrieb erkennen, dass die Verzögerung fast bei $4,0 \frac{m}{s^2}$ liegt. Die maximale vertikale Beschleunigung bei einer punktuellen Instabilität weist im Vergleich zu Beschleunigungswerten bei Schienenbrüchen keine solche hohe Werte auf.

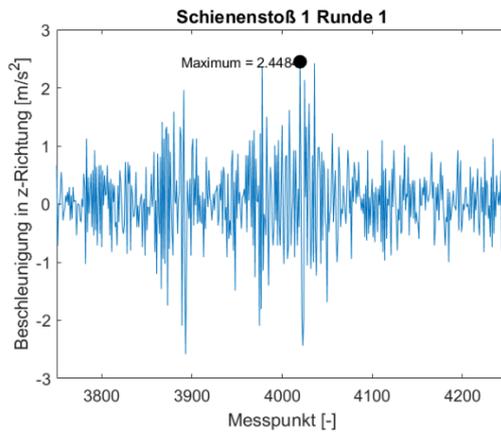


Abbildung 35: Schienenstoß 1 mit Angabe des Maximums

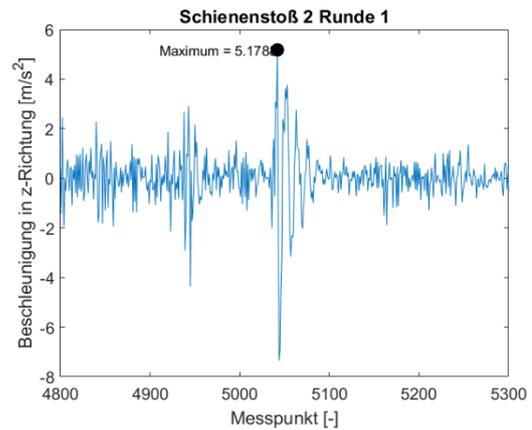


Abbildung 36: Schienenstoß 2 mit Angabe des Maximums

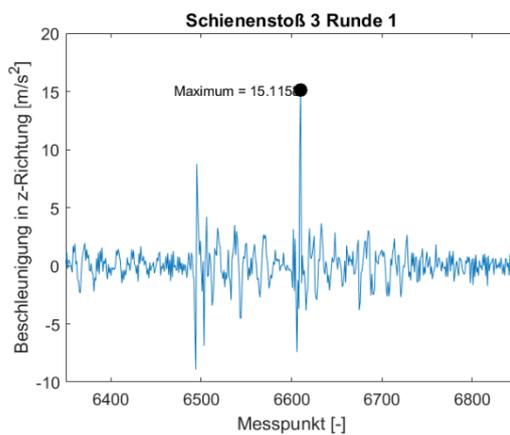


Abbildung 37: Schienenstoß 3 mit Angabe des Maximums

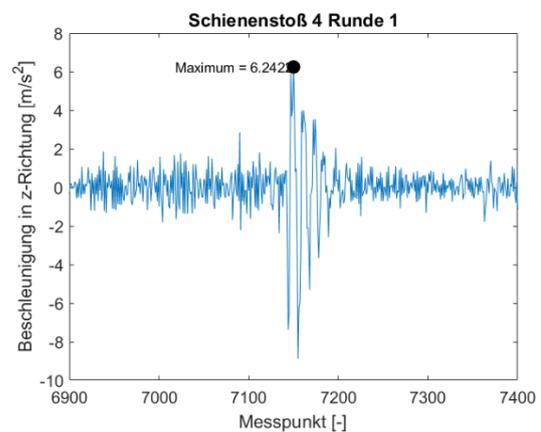


Abbildung 38: Schienenstoß 4 mit Angabe des Maximums

Der erste Schienenstoß erfährt wiederholende kleine Änderungen in der Beschleunigung. Das Verhalten der Beschleunigung gleicht der einer punktuellen Instabilität, wobei der Ausschlag kleiner ist. Der maximale Wert beträgt $2,448 \frac{m}{s^2}$. Da das Fahrzeug im ersten Kreisbogen nach dem Stopp von 0 m/s an beschleunigt, erreicht das Messfahrzeug nicht immer die maximale Geschwindigkeit am Schienenstoß 1, weshalb die Beschleunigung für einen Schienenstoß relativ niedrig ausfällt. Der zweite und der vierte Schienenstoß besitzen einen Wert von $5,178 \frac{m}{s^2}$ und $6,242 \frac{m}{s^2}$. Vor und nach diese Unstetigkeitsstellen erfährt das Fahrzeug eine kleine Beschleunigung, die nicht mehr als $2 \frac{m}{s^2}$ beträgt, wobei auch hier starke negative Beschleunigungswerte erreicht werden. Der dritte Schienenstoß gleicht dem zweiten Schienenbruch im Beschleunigungsverlauf. Hier werden im Vergleich zum Schienenbruch mehrere Schwingungen mit größeren Beschleunigungswerten erzeugt.

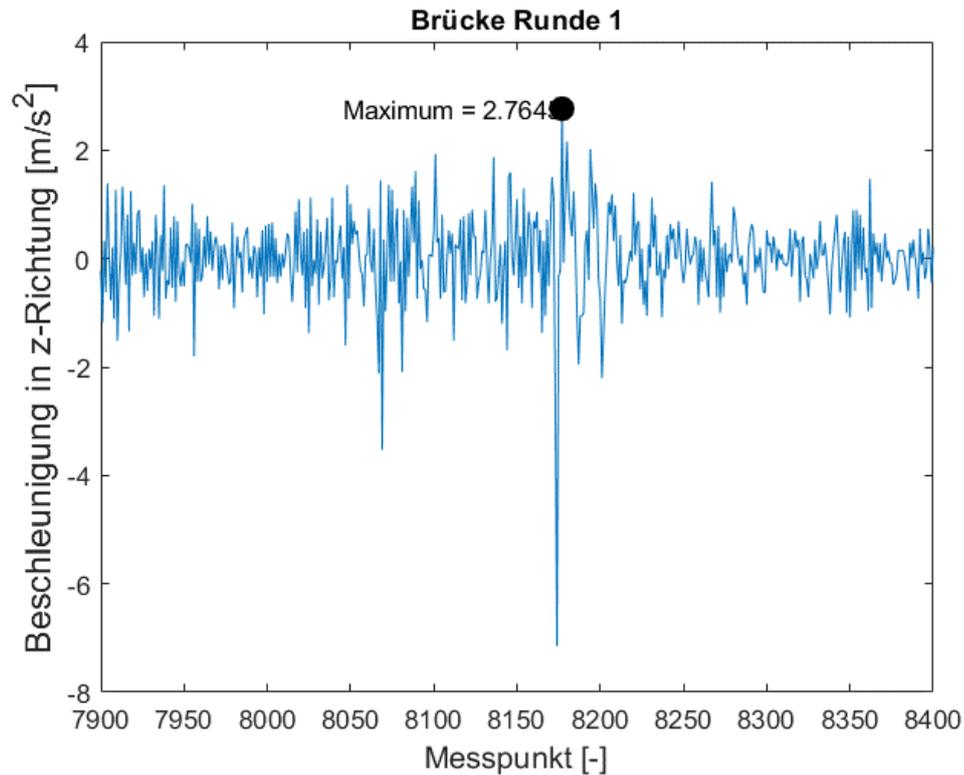


Abbildung 39: Steifigkeitswechsel an Brückenanfang und -ende mit Angabe des Maximums

In Abb. 39 ist zu erkennen, dass die vertikale Beschleunigung im positiven und negativen Bereich gleichmäßig schwankt, wodurch das Fahrzeug eine starke Verzögerung der Geschwindigkeit erfährt. Es wird angenommen, dass die starke Schwankung von zirka $-7 \frac{m}{s^2}$ die Steifigkeitsdifferenz bei der Auffahrt der Brücke repräsentiert. Der positive Maximalwert beträgt $2.764 \frac{m}{s^2}$ und ist im Vergleich zum Minimum deutlich geringer.

6.3 Gleisfehler Darstellung

Da nun alle Fehler im Messschrieb identifiziert wurden, konnte eine For-Schleife programmiert werden, sodass die 8 unterschiedlichen Fehlerbereiche jeweils mit den 12 gemessenen Runden geplottet werden konnten. Mit dem Plotten der Fehler wurde die Untersuchung der Fahrzeugreaktion an den Fehlern ermöglicht. Dies ist für die Ausarbeitung der unterschiedlichen Fehlermerkmale notwendig, um diese später klassifizieren und detektieren zu können.

Die berechneten Positionen der Maximalwerte posmax wurden für die Darstellung des Fehlerbereiches in einem Intervall von +/- 50 Messpunkten vom Maximum ausgehend wie folgt verwendet:

```
for j=1:size(posmax,1) %posmax ist die Position des Maximums
    figure
    for i=1:size(posmax,2)
        plot(posMax(:,j,i),'--','linewidth',1.5) %posMax ist der
            Bereich +/-150 Messpunkte ab posmax
        hold on
    end
end
```

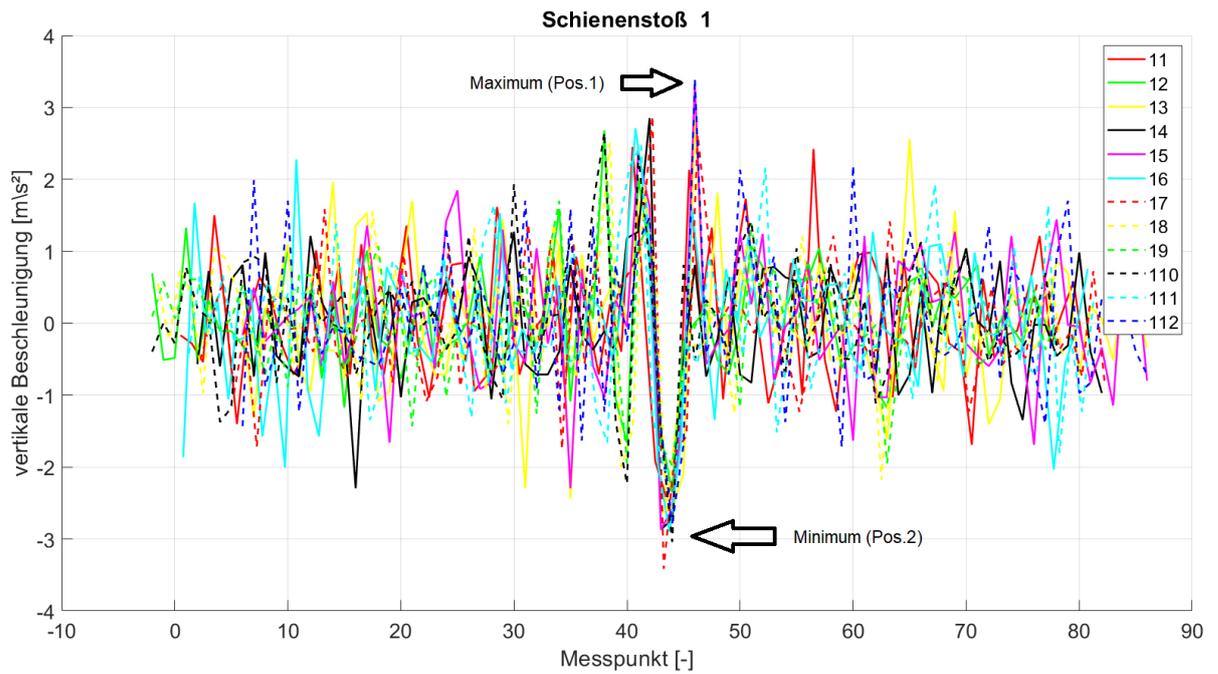


Abbildung 40: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 1.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Maximum	Global	3,397
2	Minimum	Global	-3,415

Tabelle 3: Typische Extrema des 1.Schienenstoßes

	1	2
1	-	0,2 ms
2	0,2 ms	-

Tabelle 4: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenstoß 1

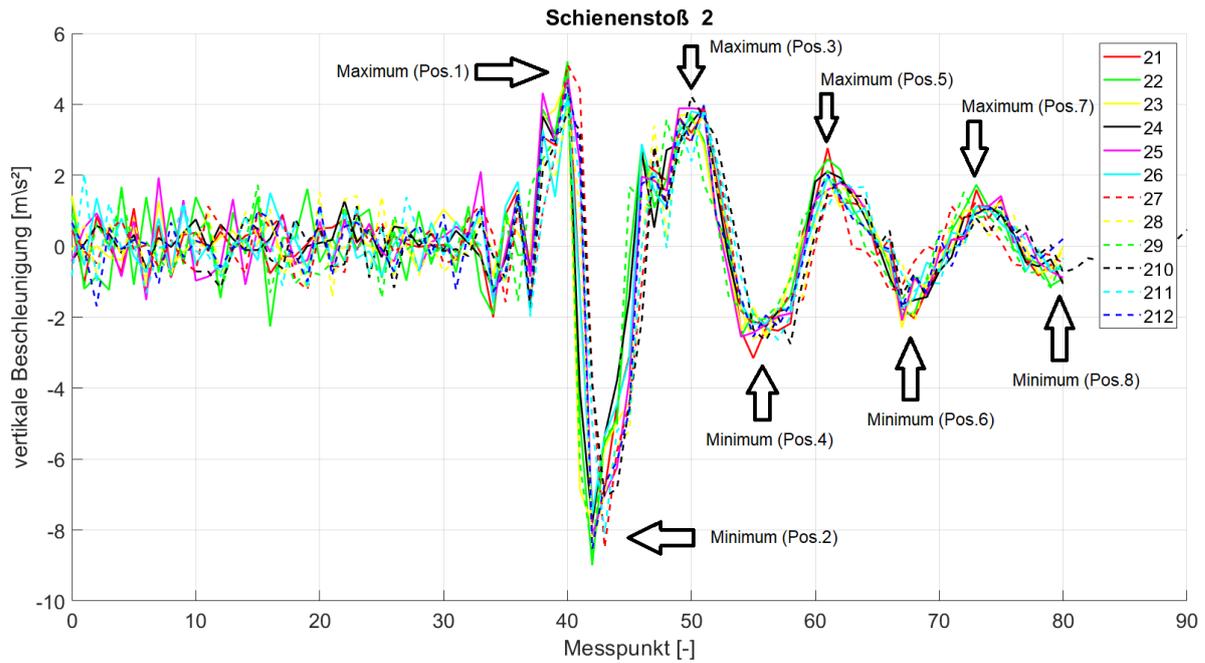


Abbildung 41: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 2.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Maximum	Global	5,207
2	Minimum	Global	-8,990
3	Maximum	Lokal	3,972
4	Minimum	Lokal	-3,156
5	Maximum	Lokal	2,765
6	Minimum	Lokal	-2,093
7	Maximum	Lokal	1,730
8	Minimum	Lokal	-1,173

Tabelle 5: Typische Extrema des 2.Schienenstoßes

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0,4 ms	2,2 ms	3,0 ms	4,2 ms	5,6 ms	6,6 ms	8,0 ms
2	0,4 ms	-	1,8 ms	2,6 ms	3,8 ms	5,2 ms	6,2 ms	7,6 ms
3	2,2 ms	1,8 ms	-	0,8 ms	2,0 ms	3,4 ms	4,4 ms	5,8 ms
4	3,0 ms	2,6 ms	0,8 ms	-	1,2 ms	2,6 ms	3,6 ms	5,0 ms
5	4,2 ms	3,8 ms	2,0 ms	1,2 ms	-	1,4 ms	2,4 ms	3,8 ms
6	5,6 ms	5,2 ms	3,4 ms	2,6 ms	1,4 ms	-	1,0 ms	2,0 ms
7	6,6 ms	6,2 ms	4,4 ms	3,6 ms	2,4 ms	1,0 ms	-	1,4 ms
8	8,0 ms	7,6 ms	5,8 ms	5,0 ms	3,8 ms	2,0 ms	1,4 ms	-

Tabelle 6: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenstoß 2

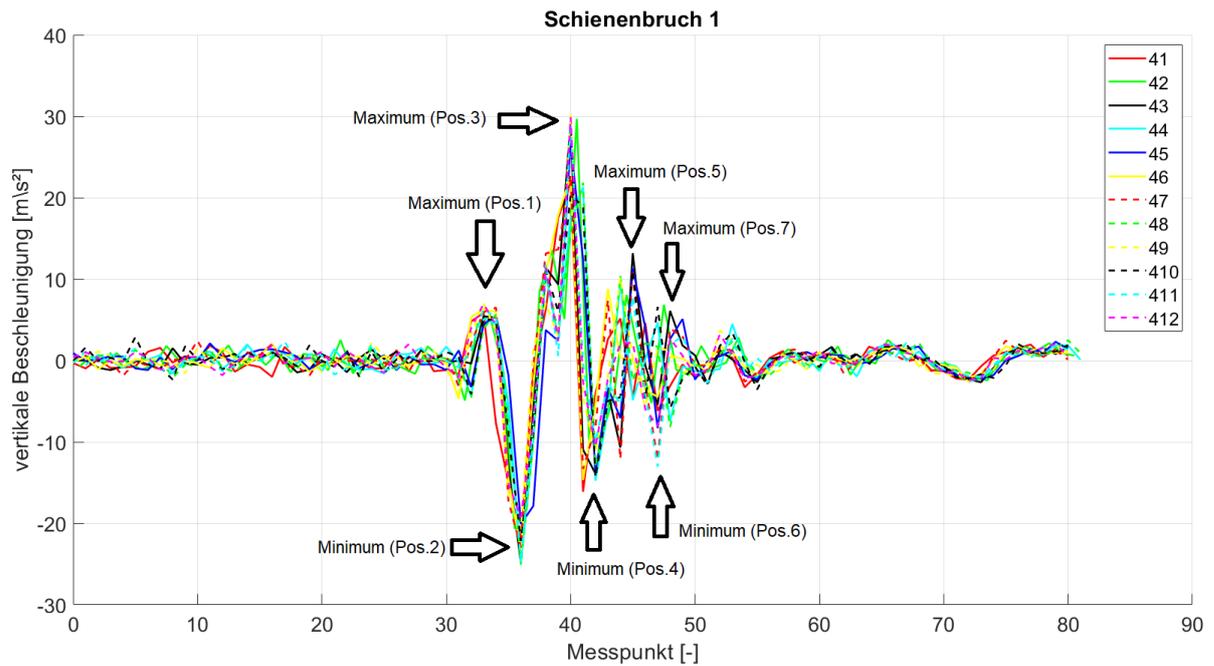


Abbildung 42: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 1.Schienenbruchs für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Maximum	Lokal	6,961
2	Minimum	Global	-25,09
3	Maximum	Global	29,89
4	Minimum	Lokal	-16,12
5	Maximum	Lokal	13,19
6	Minimum	Lokal	-13,19
7	Maximum	Lokal	3,224

Tabelle 7: Typische Extrema des 1.Schienenbruchs

	1	2	3	4	5	6	7
1	-	0,6 ms	1,4 ms	1,6 ms	2,4 ms	2,8 ms	3,0 ms
2	0,6 ms	-	0,8 ms	1,0 ms	1,8 ms	2,4 ms	2,6 ms
3	1,4 ms	0,8 ms	-	0,2 ms	1,0 ms	1,6 ms	1,8 ms
4	1,6 ms	1,0 ms	0,2 ms	-	0,8 ms	1,2 ms	1,4 ms
5	2,4 ms	1,8 ms	1,0 ms	0,8 ms	-	0,4 ms	0,6 ms
6	2,8 ms	2,4 ms	1,6 ms	1,2 ms	0,4 ms	-	0,2 ms
7	3,0 ms	2,6 ms	1,8 ms	1,4 ms	0,6 ms	0,2 ms	-

Tabelle 8: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für Schienenbruch 1

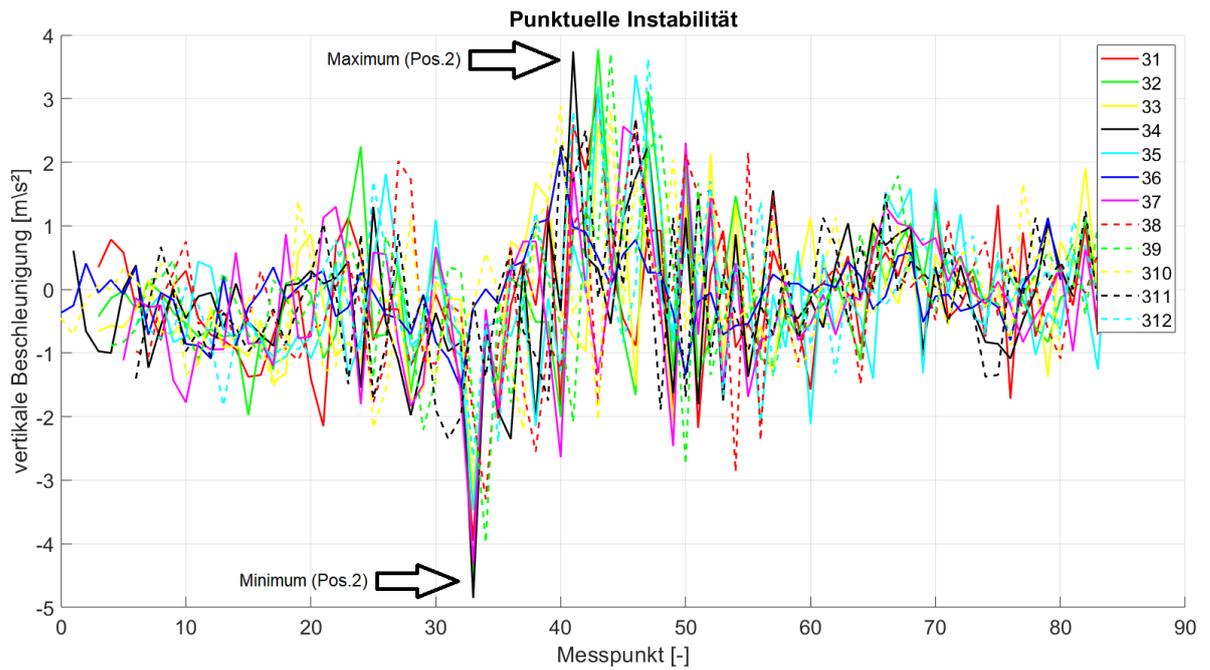


Abbildung 43: Vertikale Beschleunigung in Bereich der punktuellen Instabilität für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Minimum	Global	-4,852
2	Maximum	Global	3,713

Tabelle 9: Typische Extrema der punktuellen Instabilität

	1	2
1	1,6 ms	-
2	-	1,6 ms

Tabelle 10: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für die punktuelle Instabilität

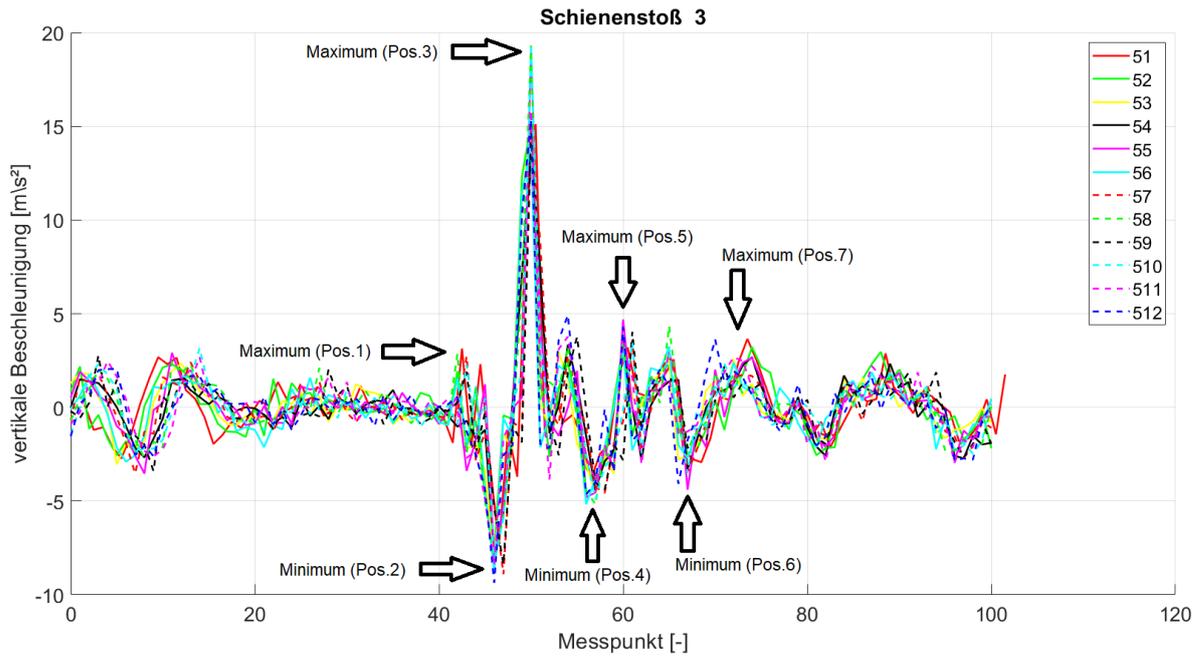


Abbildung 44: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 3.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Maximum	Lokal	3,138
2	Minimum	Global	-9,364
3	Maximum	Global	19,37
4	Minimum	Lokal	-4,909
5	Maximum	Lokal	4,920
6	Minimum	Lokal	-3,846
7	Maximum	Lokal	4,690

Tabelle 11: Typische Extrema des 3.Schienenstoßes

	1	2	3	4	5	6	7
1	-	0,8 ms	1,6 ms	2,0 ms	2,6 ms	3,2 ms	3,6 ms
2	0,8 ms	-	0,8 ms	1,2 ms	1,8 ms	2,4 ms	2,8 ms
3	1,6 ms	0,8 ms	-	0,4 ms	1,0 ms	1,6 ms	2,0 ms
4	2,0 ms	1,2 ms	0,4 ms	-	0,6 ms	1,2 ms	1,6 ms
5	2,6 ms	1,8 ms	1,0 ms	0,6 ms	-	0,6 ms	1,0 ms
6	3,2 ms	2,4 ms	1,6 ms	1,2 ms	0,6 ms	-	0,4 ms
7	3,6 ms	2,8 ms	2,0 ms	1,6 ms	1,0 ms	0,4 ms	-

Tabelle 12: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für den 3.Schienenstoß

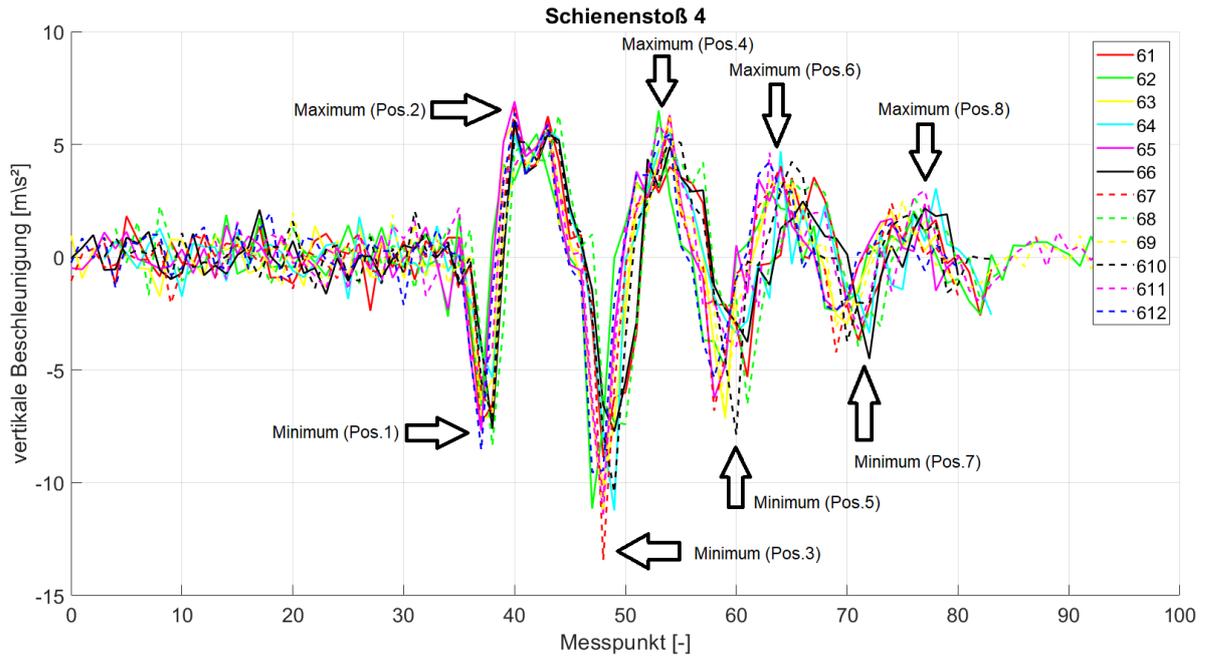


Abbildung 45: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 4.Schienenstoßes für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Maximum	Global	6,645
2	Minimum	Lokal	-11,29
3	Maximum	Lokal	6,328
4	Minimum	Global	-13,42
5	Maximum	Lokal	4,690
6	Minimum	Lokal	-7,870
7	Maximum	Lokal	3,052
8	Minimum	Lokal	-4,219

Tabelle 13: Typische Extrema des 4.Schienenstoßes

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1,2 ms	2,8 ms	4,0 ms	4,6 ms	5,4 ms	7,0 ms	8,2 ms
2	1,2 ms	-	1,6 ms	2,8 ms	3,4 ms	4,2 ms	5,8 ms	7,0 ms
3	2,8 ms	1,6 ms	-	1,2 ms	1,8 ms	2,6 ms	4,2 ms	5,4 ms
4	4,0 ms	2,8 ms	1,2 ms	-	0,6 ms	1,8 ms	3,4 ms	4,6 ms
5	4,6 ms	3,4 ms	1,8 ms	0,6 ms	-	1,2 ms	2,8 ms	4,0 ms
6	5,4 ms	4,2 ms	2,6 ms	1,8 ms	1,2 ms	-	1,6 ms	2,8 ms
7	7,0 ms	5,8 ms	4,2 ms	3,4 ms	2,8 ms	1,6 ms	-	1,2 ms
8	8,2 ms	7,0 ms	5,4 ms	4,6 ms	4,0 ms	2,8 ms	1,2 ms	-

Tabelle 14: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für den Schienenstoß 4

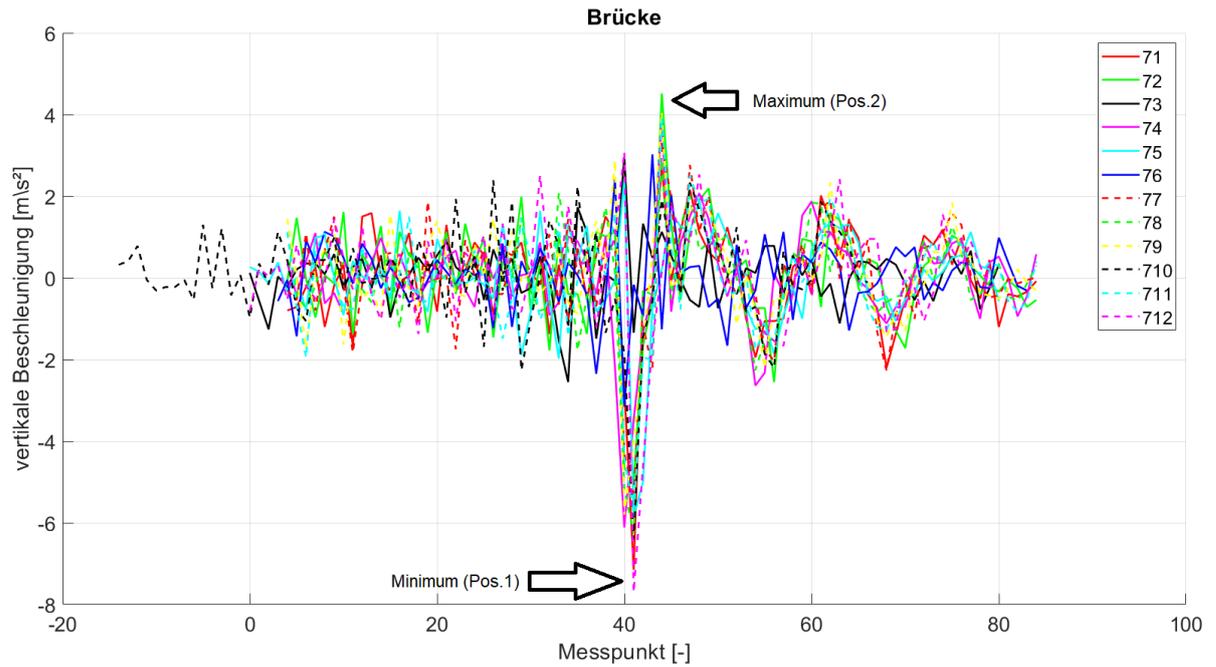


Abbildung 46: Vertikale Beschleunigung im Bereich der Brücke für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Minimum	Global	-7,697
2	Maximum	Global	4,518

Tabelle 15: Typische Extrema der Brücke

	1	2
1	-	0,6 ms
2	0,6 ms	-

Tabelle 16: Zeitliche Distanzen zwischen den Extrema für die Brücke

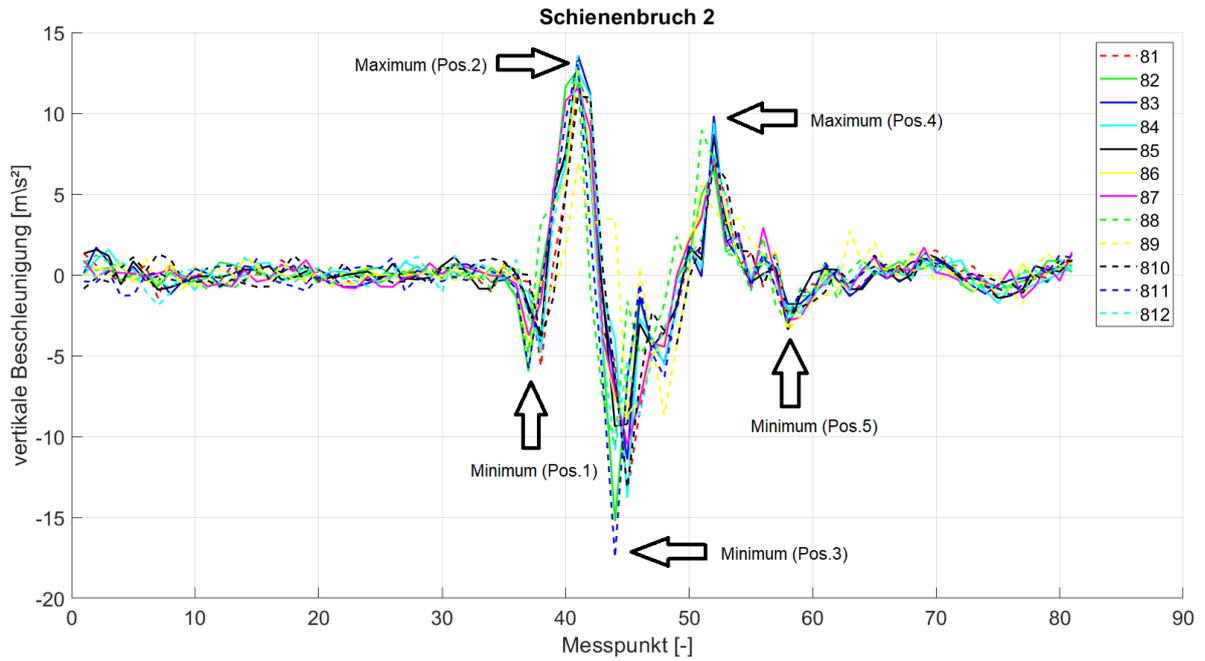


Abbildung 47: Vertikale Beschleunigung im Bereich des 2.Schienenbruchs für zwölf Fahrtrunden

Position	Typ	Bereich	Vertikale Beschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
1	Minimum	Lokal	-5,800
2	Maximum	Global	13,59
3	Minimum	Global	-17,47
4	Maximum	Lokal	9,835
5	Minimum	Lokal	-2,840

Tabelle 17: Typische Extrema des 2.Schienenbruchs

	1	2	3	4	5
1	-	0,8 ms	1,4 ms	3,0 ms	4,2 ms
2	0,8 ms	-	0,6 ms	2,2 ms	3,4 ms
3	1,4 ms	0,6 ms	-	1,6 ms	2,8 ms
4	3,0 ms	2,2 ms	1,6 ms	-	1,2 ms
5	4,2 ms	3,4 ms	2,8 ms	1,2 ms	-

Tabelle 18: Zeitliche Distanzen zwischen die Extrema für den Schienenbruch 2

Durch die genaue Betrachtung der Muster konnten kleinere Abweichungen für jeden Fehler erkannt werden. Wie in Kapitel 6.2 verursacht der erste Schienenstoß aufgrund der Anfangsgeschwindigkeit nicht immer die gleiche Beschleunigung. In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der Vertikalbeschleunigung für die einzelnen Fehler zusammengefasst.

Fehlertyp	max. positive vertikale Beschleunigung [m/s ²]	max. negative vertikale Beschleunigung [m/s ²]
Schienenbruch 1	22-30,2	-25,09
Schienenbruch 2	11,0-13,5	-17,47
Schienenstoß 1	2,4-3,3	-3,15
Schienenstoß 2	4,0-5,2	-8,99
Schienenstoß 3	13,0-19,0	-9,36
Schienenstoß 4	5,6-6,8	-13,42
Punktuelle Instabilität	2,8-3,7	-4,85
Steifigkeitswechsel (Brücke)	2,4-4,0	-7,69

Tabelle 19: Vertikale Beschleunigungswerte des Maximums und des Minimums für die einzelnen Fehler

Um die Bereiche der Fehler besser analysieren zu können, wurde der Mittelwert für jeden Messpunkt berechnet. Damit war es möglich, die Fehler anhand ihrer Mittelwerte zu analysieren. Um den Mittelwert zu berechnen wird die untenstehende Formel verwendet:

$$X_{\text{Mittel}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N}$$

mit

x_n = Werte der Messpunkte

N = Anzahl der Messpunkte

In Matlab musste die Maximum-Matrix folgend transponiert werden, um den Mittelwert der Fehler berechnen zu können:

```
posMax = permute(posMax, [3 1 2]); %transponierte Matrix
```

-For-Schleife. Hier wird D als 3-dimensionale Matrix der jeweiligen Position definiert.

```
for j= 1:8
    figure (1)
    subplot(2,4,j)
    D= posMax(:, :, j);
    g= mean(D);
    plot(g)
    hold on
    [H,I] = max(g);
    plot(I, H, 'ko', 'Linewidth',5, 'MarkerSize', 5)
    strmax = ['Maximum = ', num2str(H)];
end
```

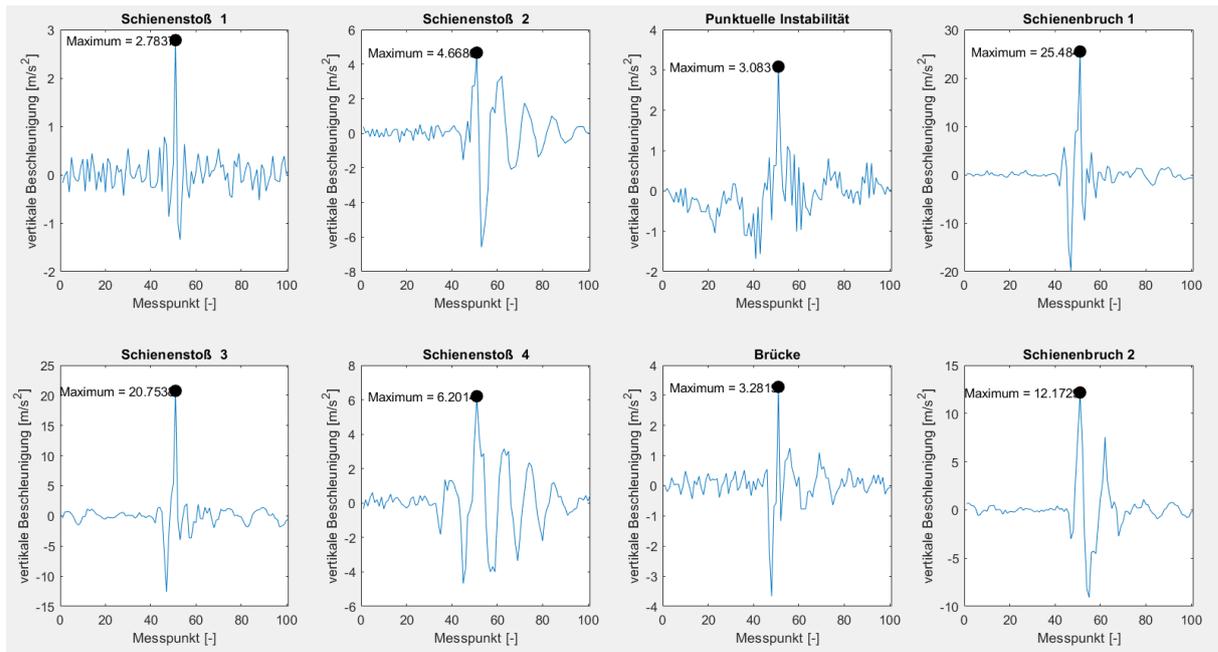


Abbildung 48: Mittelwert für die einzelnen Fehler im Modell

Alle Schienenstöße bilden unterschiedliche Muster. Die Schienenbrüche weisen zuerst einen negativen Ausschlag und anschließend einen positiven Ausschlag mit ähnlichem Betrag auf. Hier ist der positive Betrag deutlich größer als der negative.

Die Logik zur Erkennung von Fehlern am Gleis wurde innerhalb der Software Enterprise Architect entwickelt. Nachfolgend ist in Abb. 49 die Logik für die Einstellung der Messung dargestellt. In Abb. 50 ist die Logik für die Sortierung und Detektion der Fehler innerhalb des Messschriebs beschrieben. Die Gleisfehler werden anhand der unterschiedlichen Maximalwerte und Amplituden mit der in Abb. 51 erzeugten Logik erkannt.

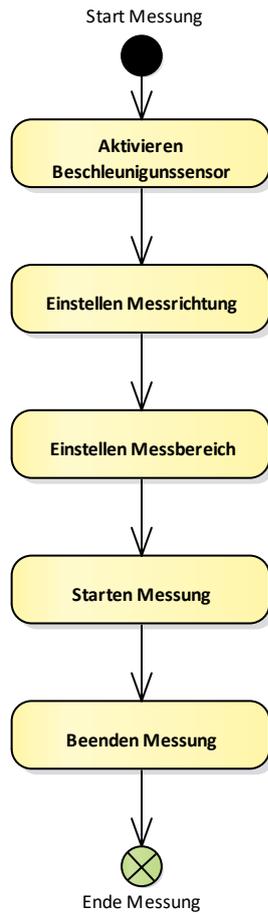


Abbildung 49: Logik für die Einstellung und Messung

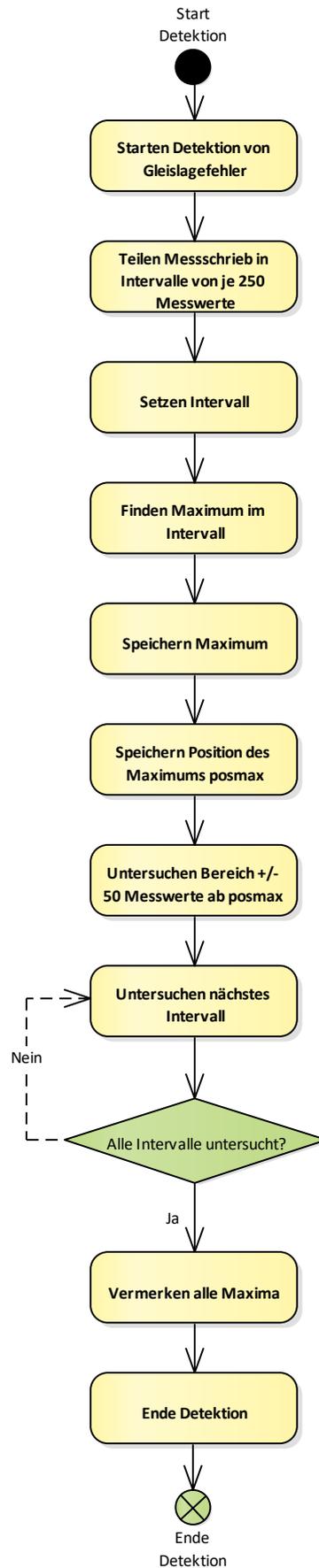


Abbildung 50: Logik für die Detektion des Maximums

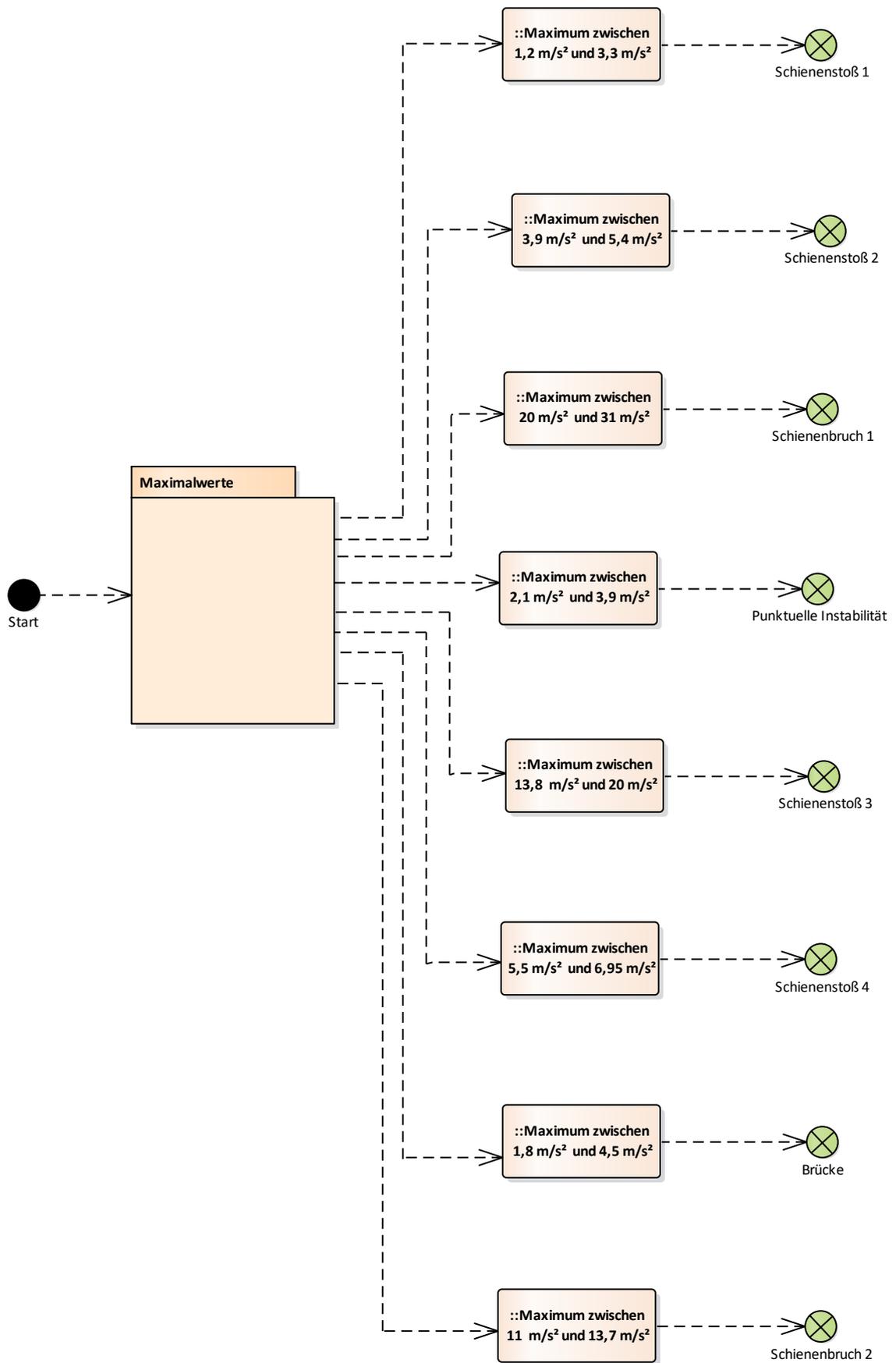


Abbildung 51: Logik für die Zuordnung der Gleisfehlern anhand ihrer maximalen Beschleunigungswerte

Die Peaks und die Amplituden im Messschrieb sind für die Fehlerklassifizierung sinnvoll, jedoch kann man durch das Analysieren des Signals mehrere Informationen gewinnen. Um eine bessere Zuordnung der Fehler zu erreichen, werden die Beschleunigungssignale entlang der Fehler mit der Fast-Fourier-Transformation und der spektralen Beschleunigungsdichte untersucht. Die unterschiedlichen Fehler sollen anschließend anhand ihrem Frequenzverhalten charakterisiert werden. Die Fehlererkennung über die charakteristischen Frequenzbereiche der jeweiligen Gleisfehler wird im folgenden Kapitel erläutert.

7 Frequenzanalyse

7.1 Diskrete Fourier Transformation

Die Fourier Transformation (FT) wird für die Signalfilterung verwendet. Sie repräsentiert die Frequenz eines Signals. Das Signal der gemessenen vertikalen Beschleunigungen gibt keine Auskunft über die Stärke der Schwingungen. Die FT nutzt alle verfügbaren Informationen, wie z.B. in unserem Fall die gemessenen Werte der vertikalen Beschleunigung für die Erzeugung der höchstmöglichen definierten Auflösung der Frequenzkomponente des Systems mit deren unterschiedlichen Amplituden und Wellenlängen. Die Auflösung ist durch die Signallage begrenzt. Aufgrund der Redundanz in der FT, werden die Signale nicht immer exakt dargestellt, weshalb die Diskrete Fourier Transformation (DFT) notwendig wird. Ein endlicher Vektor f wird mit Hilfe der komplexen Fourier-Reihe

$$f(x) = \sum_{n=l}^{\infty} (c_k \times e^{ikx_l}) \quad (7.1)$$

dargestellt. Der Ausgangsvektor f wird nach der Transformation als Linearkombination von Vektoren des Typs: $\vec{w}_k := (e^{ikx_l})_{l=0}^N = 1 = (e^{ikx_0}, e^{ikx_1}, \dots, e^{ikx_{N-1}})$ in komplexen Einheitswurzeln dargestellt. Der transformierte Vektor stellt spezifische Merkmale wie z.B. Störsignale der Ausgangsdaten dar. Der Vektor $f := (f_0, \dots, f_{N-1}) \in \mathbb{C}$ bildet N Stützstellen einer periodischen Funktion auf dem Intervall $[0, 2\pi]$ an den Punkten $x_l = l \times \left(\frac{2\pi}{N}\right) \times l = \{0, \dots, N-1\}$ $N \in \mathbb{N}$. Also drückt $f = (f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_{N-1}))$ als Linearkombination der Einheitswurzeln an den Punkten x_l aus [29]:

$$(\overline{w_k}) := (e^{ik0 \times 2\pi/N}, e^{ik1 \times 2\pi/N}, e^{ik(N-1) \times 2\pi/N})$$

folgt:
$$(\overline{w_k}) = (e^{i2\pi/N})^{kl} = (w_N^{kl}) \quad (7.2)$$

Für alle $N \in \mathbb{N}$ ist die Fourier Matrix ${}^N_F\Omega$ definiert, sodass die l -te Spalte von ${}^N_F\Omega \cdot \overline{w_l}$ enthält:

$${}^N_F\Omega_{k,l} := (\overline{w_k})_l = e^{ikl2\pi/N} = w_N^{kl} \quad (7.3)$$

Die Diskrete Fourier Transformation kann als Skalarprodukt dargestellt werden:

$$\langle \vec{z}, \vec{w} \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} z_m \cdot \overline{w_m} \quad (7.4)$$

durch

$$f_k = \langle \vec{f}, \vec{w}_k \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} f_l \cdot e^{-ikl \frac{2\pi}{N}} \quad (7.5)$$

Beispiel DFT und FFT [28]:

Hier wird die Diskrete Fourier Transformation der Folge $\vec{s} = \langle 1,2,3,4,5,6,7,8 \rangle$ mittels der FFT berechnet. Das dazugehörige Polynom ist:

$$P(x) = 1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + 5x^4 + 6x^5 + 7x^6 + 8x^7$$

Die DFT (\vec{s}) ist die Reihe der Werte

$$DFT(\vec{s}) = \langle P(w_8^0), P(w_8^1), P(w_8^2), P(w_8^3), P(w_8^4), P(w_8^5), P(w_8^6), P(w_8^7) \rangle$$

Wobei:

$$\begin{aligned} w_8^0 &= 1; & w_8^1 &= \frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2} & w_8^2 &= i; & w_8^3 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2} \\ w_8^4 &= -1; & w_8^5 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} - i \frac{\sqrt{2}}{2} & w_8^6 &= -i; & w_8^7 &= \frac{\sqrt{2}}{2} - i \frac{\sqrt{2}}{2} \end{aligned}$$

Also:

$$\begin{aligned} w_4^0 &= 1; & w_4^1 &= i; & w_4^2 &= -1 & w_4^3 &= -i \\ w_2^0 &= 1; & w_2^1 &= -1 \end{aligned}$$

Wir wenden jetzt das „Divide-And-Conquer“-Prinzip mit $y = x^2$:

$$\begin{aligned} P(x) &= 1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + 5x^4 + 6x^5 + 7x^6 + 8x^7 \\ &= (1 + 3x^2 + 5x^4 + 7x^6) + x(2 + 4x^2 + 6x^4 + 8x^6) \\ &= (1 + 3y + 5y^2 + 7y^3) + x(2 + 4y + 6y^2 + 8y^3). \end{aligned}$$

Mit

$$P_e(y) = 1 + 3y + 5y^2 + 7y^3; \quad P_o(y) = 2 + 4y + 6y^2 + 8y^3;$$

Anschließend wird das „Divide-And-Conquer“-Prinzip wieder verwendet mit $z = y^2$

$$\begin{aligned} P_e(y) &= (1 + 5y^2) + y(3 + 7y^2); & P_o(y) &= 2 + 6y^2 + y(4 + 8y^2); \\ &= (1 + 5z) + y(3 + 7z); & &= 2 + 6z + y(4 + 8z). \end{aligned}$$

folgt:

$$\begin{aligned} P_{ee}(z) &= 1 + 5z; & P_{eo}(z) &= 3 + 7z; \\ P_{oe}(z) &= 2 + 6z; & P_{oo}(z) &= 4 + 8z. \end{aligned}$$

Jetzt haben wir

$$\begin{aligned} DFT(\langle 1,5 \rangle) &= \langle P_{ee}(w_2^0), P_{ee}(w_2^1) \rangle = \langle P_{ee}(1), P_{ee}(-1) \rangle \\ &= \langle 1 + 5 \cdot 1, 1 + 5 \cdot (-1) \rangle = \langle 6, -4 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DFT(\langle 3,7 \rangle) &= \langle P_{e0}(w_2^0), P_{e0}(w_2^1) \rangle = \langle P_{e0}(1), P_{e0}(-1) \rangle \\ &= \langle 3 + 7 \cdot 1, 3 + 7 \cdot (-1) \rangle = \langle 10, -4 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DFT(\langle 2,6 \rangle) &= \langle P_{0e}(w_2^0), P_{0e}(w_2^1) \rangle = \langle P_{0e}(1), P_{0e}(-1) \rangle \\ &= \langle 2 + 6 \cdot 1, 2 + 6 \cdot (-1) \rangle = \langle 8, -4 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DFT(\langle 4,8 \rangle) &= \langle P_{00}(w_2^0), P_{00}(w_2^1) \rangle = \langle P_{00}(1), P_{00}(-1) \rangle \\ &= \langle 4 + 8 \cdot 1, 4 + 8 \cdot (-1) \rangle = \langle 12, -4 \rangle \end{aligned}$$

Mit der Verwendung von Gleichung 7.5 mit $n = 4$ erhalten wir:

$$\begin{aligned} DFT(\langle 1,3,5,7 \rangle) &= \langle 6 + w_4^0 \cdot 10, -4 + w_4^1(-4), 6 - w_4^0 \cdot 10, -4 - w_4^1(-4) \rangle \\ &= \langle 6 + 10, -4 + i(-4), 6 - 10, -4 - i(-4) \rangle \\ &= \langle 16, -4 - 4i, -4, -4 + 4i \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DFT(\langle 2,4,6,8 \rangle) &= \langle 8 + w_4^0 \cdot 12, -4 + w_4^1(-4), 8 - w_4^0 \cdot 12, -4 - w_4^1(-4) \rangle \\ &= \langle 8 + 12, -4 + i(-4), 8 - 12, -4 - i(-4) \rangle \\ &= \langle 20, -4 - 4i, -4, -4 + 4i \rangle \end{aligned}$$

Und als letzter Schritt erhalten wir aus 7.5 mit $n = 8$:

$$\begin{aligned} DFT(\langle 1,2,3,4,5,6,7,8 \rangle) &= \langle 36, -4 - 4i(1 + \sqrt{2}), -4 - 4i, -4 + 4i(1 - \sqrt{2}), -4, -4 - 4i(1 - \sqrt{2}), -4 \\ &\quad + 4i, -4 + 4i(1 + \sqrt{2}) \rangle \end{aligned}$$

7.1.1 Fast-Fourier-Transformation

Der Algorithmus der Fast Fourier Transformation (FFT) wurde erstmals 1965 von James W. Cooley und John W. Tukey veröffentlicht und ist einer der wichtigsten Algorithmen der Welt. Er stellt die schnelle Variante der Diskreten Fourier Transformation dar. Es ist sehr aufwendig, wenn zum Beispiel $N=1000 \Rightarrow 1000000$ viele Multiplikationen und Einträge in w_N notwendig werden. Die FFT ist für größere Zahlen nicht praktisch. Die Hauptidee der FFT ist „Divide and Conquer“; zerlege das Problem der Größe N rekursiv in zwei Teilprobleme der Größe $\frac{N}{2}$. Anschließend werden die Zwischenergebnisse zusammengefügt und man erhält die Gesamtlösung [29].

Beispielsweise sei: $N = 2^k, k \in \mathbb{N}, x = (x_i)_{i=0}^{N-1} \in \mathbb{C}^N$ (7.6)

$$P_N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots \end{bmatrix} \text{ Permutationsmatrix}$$

also
$$P_{N,x} = \begin{matrix} x_0 \\ x_2 \\ x_4 \\ \vdots \\ x_{N-2} \\ \hline x_1 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{matrix} =: \begin{pmatrix} x_{even} \\ x_{odd} \end{pmatrix}, x_{even}, x_{odd} \in \mathbb{C}^{\frac{N}{2}}, \text{ Teilvektor von } x$$

Die FFT lässt sich für $N = 2^k$ rekursiv berechnen: schnelle FFT.

$$F_N(y) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I & I \\ I & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{\frac{N}{2}}(y_{even}) \\ F_{\frac{N}{2}}(y_{odd}) \end{pmatrix} \text{ mit } D_{N/2} = \text{diag} \left(w^0, w^{-1}, \dots, w^{-\left(\frac{N}{2}-1\right)} \right) \quad (7.7)$$

Beispiel: $N = 8$

$$F_8 = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_7 \end{pmatrix}$$

folgt

$$F_4 = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \end{pmatrix} \text{ und } F_4 = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_3 \\ y_5 \\ y_7 \end{pmatrix}$$

aus

$$F_4 = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \end{pmatrix} \text{ folgt } F_2 = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_4 \end{pmatrix} \text{ und } F_2 = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_6 \end{pmatrix}$$

und aus

$$F_2 = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_4 \end{pmatrix} \text{ ergibt sich } y_0 \text{ und } y_4.$$

Das Verfahren der FFT beschleunigt die Berechnung erheblich aufgrund des geringeren Speicheraufwands gegenüber der Matrixvariante der DFT. Für $N = 2^k, k \in \mathbb{N}$ lässt sich die Berechnung auf $\sigma(N \log_k N)$ beschleunigen, z.B. $N = 1024 = 2^{10}, \log_2 N = 10 \Rightarrow N \log_2 N = 10240$ wesentlich kleiner als 1024^2 [29, 30].

7.2 Spektrale Beschleunigungsdichte

Alternativ zu der FFT wurden die erzeugten Messschriebe mittels der spektralen Beschleunigungsdichte untersucht. Die spektrale Beschleunigungsdichte zeigt die Stärke der Energie als eine Funktion der Frequenz an. In anderen Worten gibt sie an, bei welchen Frequenzen die Beschleunigungen stark und bei welchen diese schwach sind. Die Einheit der spektralen Beschleunigungsdichte ist die Energie pro Frequenzbreite. Die Energie innerhalb eines bestimmten Bereichs kann erhalten werden, indem die spektrale Beschleunigungsdichte innerhalb dieses Frequenzbereichs integriert wird [31, 32].

Die spektrale Beschleunigungsdichte wird wie folgt berechnet:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f) = |X(f)|^2 \quad (7.8)$$

Nach der Formel von Plancherel gilt:

$$\frac{1}{2T} \int_{/R} |f_T(t)|^2 dt = \frac{1}{2T} \int_{/R} |F(f_T)(w)|^2 dw \quad (7.9)$$

Falls die mittlere Signalleistung

$$r_{xx}(0) := \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |f(t)|^2 dt \quad (7.10)$$

existiert, existiert auch die rechte Seite obiger Formel und als spektrale Beschreibung der Leistung man kann die spektrale Leistungsdichte definieren als

$$S_{xx}(w) := \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |F(f_T)(w)|^2 \quad (7.11)$$

Für jedes endliche T heißt die Größe $P_{erT}(w) := |F(f_T)(w)|^2$ das Periodogramm von f . Es stellt einen Schätzwert der spektralen Leistungsdichte dar, dessen Erwartungswert aber nicht $S_{xx}(w)$ entspricht und dessen Varianz auch für beliebig große T nicht verschwindet [31, 32]. Zur Bestimmung der spektralen Leistungsdichte $S_{xx}(w)$ wird oft das Wiener-Chintschin-Theorem herangezogen [31]:

$$S_{xx}(w) = F(r_{xx})(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r_{xx}(t) e^{-iwt} dt \quad (7.12)$$

Dabei ist

$$r_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f(\tau) \overline{f(t + \tau)} d\tau \quad (7.13)$$

die Autokorrelationsfunktion des zeitlichen Signals $f(t)$. Wird ein Signal mit dem Leistungsdichtespektrum $S_{xx}(w)$ über ein lineares, zeitvariantes System mit Übertragungsfunktion $H(w)$ übertragen, so ergibt sich am Ausgang ein Leistungsdichtespektrum von

$$S_{yy}(w) = |H(w)|^2 \cdot S_{xx}(w) . \quad (7.14)$$

Die Übertragungsfunktion geht quadratisch in die Formel ein, da das Spektrum eine Leistungsgröße ist. Das Autoleistungsspektrum kann als einseitiges Spektrum $G_{xx}(f)$ ($f > 0$) dargestellt werden. Es gilt dann [31]:

$$G_{xx} = S_{xx}(f) \quad \text{für } f = 0 \quad (7.15)$$

und

$$G_{xx} = 2S_{xx}(f) \quad \text{für } f > 0. \quad (7.16)$$

7.3 Wavelet-Analyse

Die Wavelet-Analyse kann die Zeit-Frequenz eines Signals repräsentieren, während die Fourier Transformation nur die Frequenz eines Signals ohne Angabe des zeitlichen Aspekts angeben kann. [9] Die Mathematische Funktion zur Erzeugung der Zeitfrequenz wird Wavelet-Transformation genannt. Der Unterschied zwischen den beiden Transformationen ist, dass im Gegensatz zur Fourier Transformation alle verfügbaren Informationen zu der Erzeugung der bestmöglichen Auflösung der Frequenz angegeben werden. Sie ist durch die Signallänge begrenzt. Bei der Wavelet-Transformation wird ein Kompromiss zwischen der Zeit und dem Frequenzbereich gebildet. Es werden zeitlich lokalisierte Wellen bzw. Funktionen als Basis genutzt. Das originale Wavelet (Mother Wavelet) wird für die Bildung der Basis skaliert und verschoben [33].

Das Wavelet $\Psi(t)$ ist eine Welle mit endlicher Reihe, die wie folgt definiert ist:

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (7.17)$$

mit

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (7.18)$$

wobei $\Psi(w)$ die Fourier Transformation von $\Psi(t)$ ist. Gleichung 7.18 weist darauf hin, dass ein Wavelet einen Null-Mittelwert haben soll.

Die Wavelet-Transformation kann als Diskrete Wavelet-Transformation oder als Kontinuierliche Wavelet-Transformation dargestellt werden. In dieser Arbeit wird die Kontinuierliche Wavelet-Transformation betrachtet [33].

Die kontinuierliche Wavelet-Transformation einer Funktion ist wie folgt definiert:

$$Wf(s, u) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (7.19)$$

wobei $\Psi^*(t)$ die komplex konjugierte Wavelet-Funktion ist. s ist der kontinuierliche Intervallindex, u der kontinuierliche Position Index und $Wf(s, u)$ sind die Wavelet-Koeffizienten. Der kontinuierliche Intervallindex ist eine ganze Zahl im Intervall von Null bis zum Maximalwert des anstrebenden Bereichs. Der kontinuierliche Position Index ist eine Zahl im Intervall von Minimum zu dem Maximalwert des anstrebenden Bereichs. Es existieren unterschiedliche Wavelet-Familien, die für bestimmte Anwendungen günstig sind [9, 33].

Der Ablauf der Wavelet-Transformation kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden [33]:

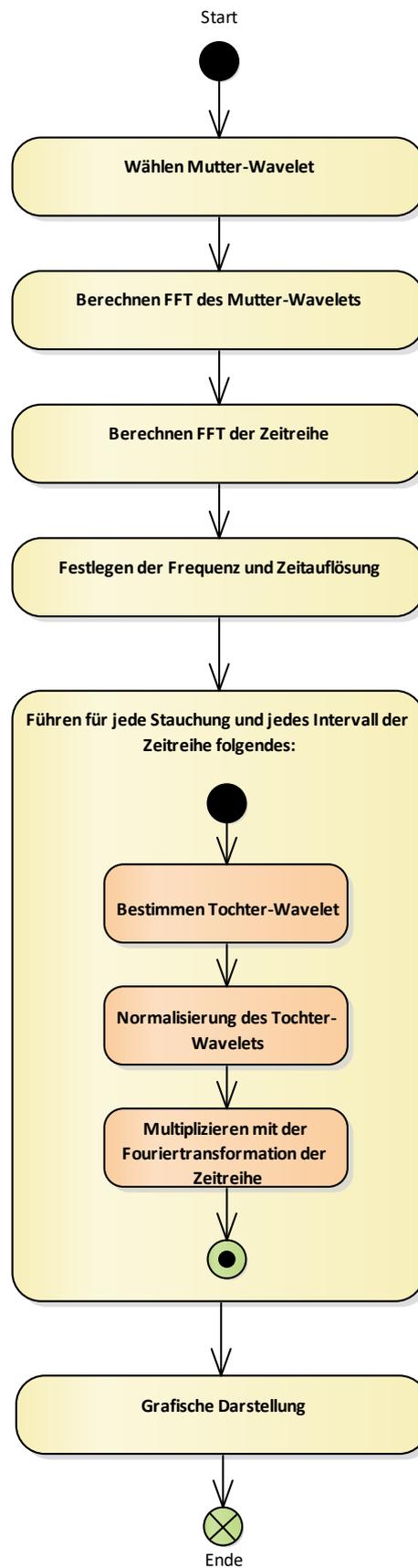


Abbildung 52: Ablauf Wavelet Transformation

8 Auswertung der Beschleunigungsdaten

8.1 Vermeidung des Alias-Effekts

Der Alias-Effekt ist ein Fehler, bei dem das Originalsignal-Frequenzanteil höher als die halbe Abtastfrequenz ist. Der Fehler bildet sich dann, wenn die Abtastung durch den Sensor nicht schnell genug erfolgt. Solche Frequenzanteile werden als die Nyquist-Frequenz bezeichnet. Der Alias-Effekt entsteht beim Nichteinhalten des Abtasttheorems, z.B. bei einer Unterabtastung, was dann zu einer falschen Wiederherstellung des Ursprungssignals führt. Auch wenn das Abtasttheorem eingehalten wird, kann es zu Aliasing kommen, wenn das Abtastsignal von einem Rauschsignal überlagert ist und Frequenzanteile hat, die höher sind, als die Nyquist-Frequenz. Die Abtastfrequenz muss mindestens zweimal so groß sein, wie die gemessene Frequenz [34].

Um den Einfluss des Aliaseffekts ausschließen zu können, wurde zunächst der Verlauf der Vertikalbeschleunigung mittels Butterworth-Filter um die halbe Abtastfrequenz (250 Hz) tiefpassgefiltert. Der Tiefpassfilter lässt alle Signalanteile unterhalb einer Grenzfrequenz durch und dämpft die Signale oberhalb der Grenzfrequenz. Durch die Entfernung einiger Frequenzen wird im ein Glättungseffekt erzeugt [32, 34].

Um äußere Einflüsse auf die Beschleunigung bei der Messung zu vermeiden, wurde ein Butterworth-Bandpass-Filter auf die Ausgangsdaten angewendet und mit den Originaldaten verglichen.

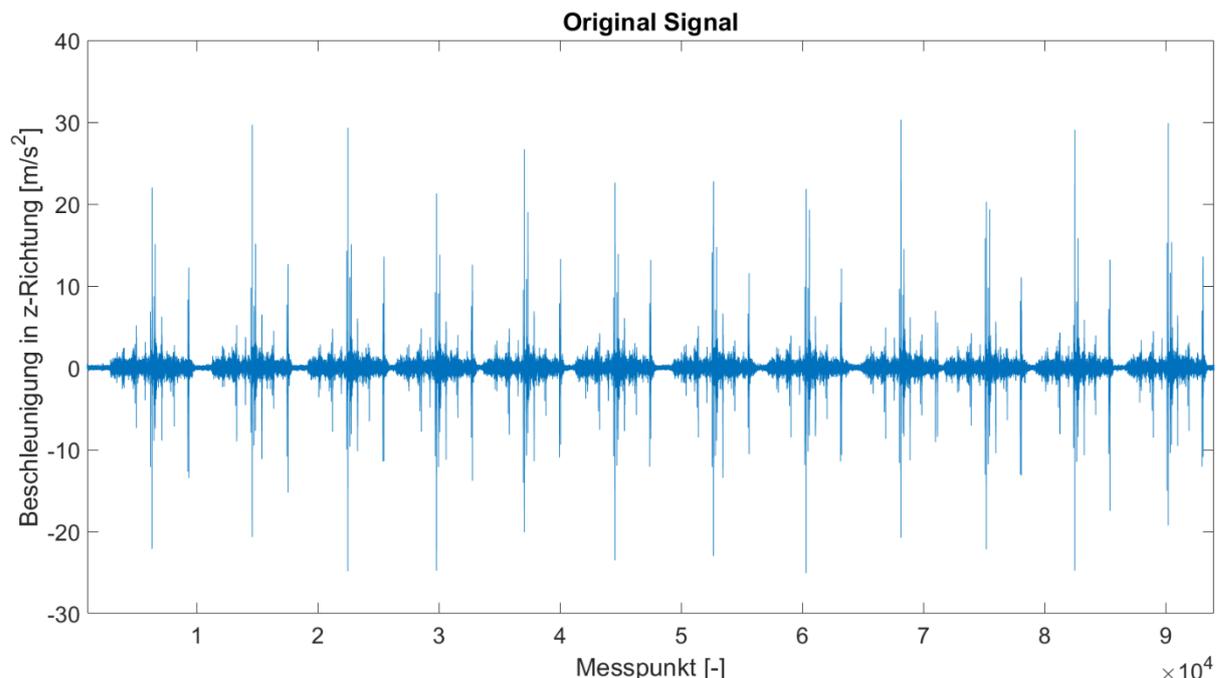


Abbildung 53: Original Signal

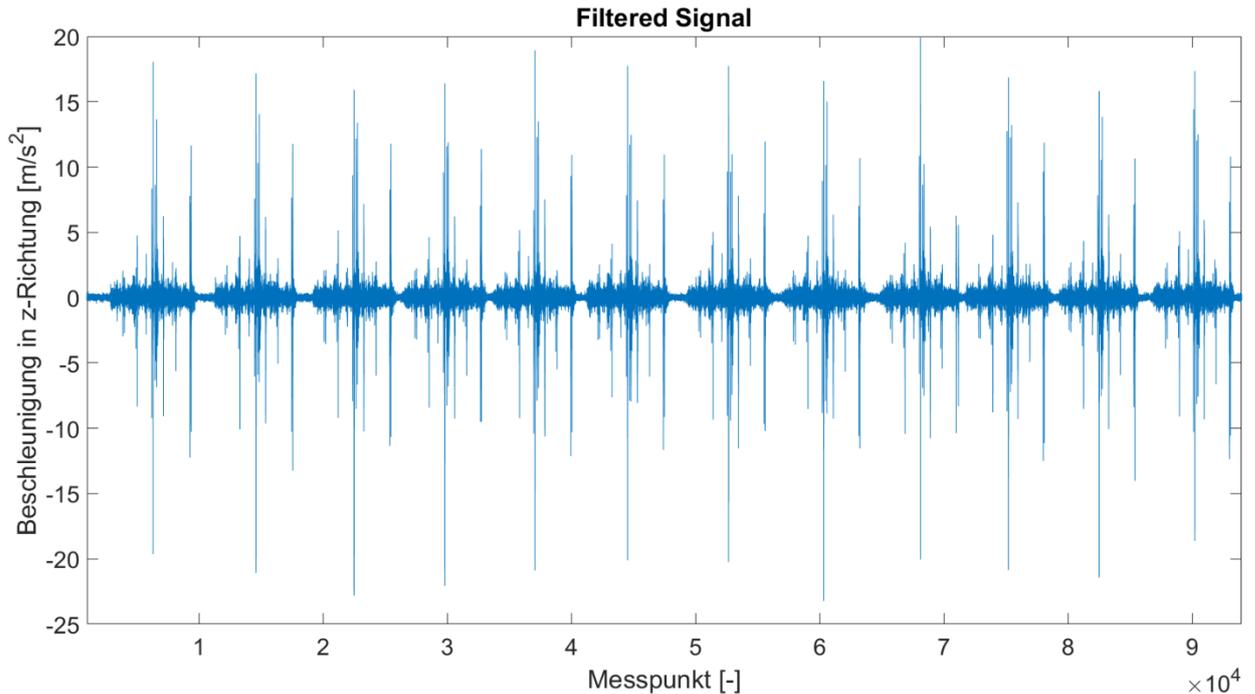


Abbildung 54: Gefiltertes Signal

Die Eigenfrequenz eines Systems ist die Frequenz, mit der sich ein Massensystem und ein Freiheitsgrad bewegt. Das System schwingt in charakteristischen Eigenfrequenzen. Wenn z.B. das Fahrzeug durch das Überfahren von periodischen Fehlern Eigenfrequenzen erzeugt, reagiert das Massensystem mit großen Amplituden, die bei jeder Schwingung anwachsen. Dieser Vorgang wird als Resonanz bezeichnet. Die Resonanz soll unbedingt vermieden werden, um eine Entgleisung des Zuges zu verhindern.

- Butterworth-Filter-Anwendung in MATLAB

```

abtastrfrequenz = 500;
untere_grenzfrequenz = 250;
nyquistfrequenz = 0.5 * abtastrfrequenz;
Wn = untere_grenzfrequenz/nyquistfrequenz;
order = 6; %maximale Verzögerung, die bei der Berechnung verwendet wird
[b1,a1] = butter(order,Wn,'low');
z_Richtung_gefiltert = filter(b1,a1, z_Richtung);

```

8.1.1 Auswertung der FFT

Nach Anwendung der FFT-Funktion und der Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich lassen sich die stärksten auftretenden Frequenzen im Signal erkennen.

Hier wurde das Intervall von posMax untersucht. Dazu wurde für eine bessere Veranschaulichung eine For-Schleife entwickelt.

```

for j=1:size(posMax,2)
    for i=1:size(posMax,3)
        figure
        hold on
        Fs= 500; %Abtastfrequenz
        L= length(posMax(:,j,i)); %Länge Frequenzauflösung
        NFFT = 2^nextpow2(L);
        Y= fft(posMax(:,j,i),NFFT)/L; %Diskrete Fourier-Trans-
fotmation
        f= Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
        plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
        hold on
        stem(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceCol-
or','red','MarkerEdgeColor','blue') %Beschriftung
    end
end
end

```

Die Abtastfrequenz FS beträgt konstant 500 Hz. Die NFFT ist die Länge des Signals für die Anwendung der Fourier-Transformation.

Die Verwendung der NFFT ist sehr hilfreich, wenn Signale mit unterschiedlichen Längen verglichen werden und alle die gleiche Frequenzauflösung aufweisen sollen. Da die Einstellung der NFFT für alle Signale gleich ist, ist ein direkter Vergleich der Frequenzen möglich.

Durch die Frequenzanalyse mittels FFT werden die unterschiedlichen Merkmale der Frequenzen bestimmt. Dies hilft bei der konkreten Unterscheidung zwischen den Fehlertypen.

Abbildung 55 zeigt die wichtigsten Merkmale des 3. Schienenstoßes. Man kann erkennen, dass zwei globale und ein lokales Maximum vorliegen. Die größte erzeugte Energie für das

erste globale Maximum besitzt eine Amplitude von $2,133 \frac{m}{s^2}$ und $2,856 \frac{m}{s^2}$. Die Energie verläuft

zwischen den Frequenzen 39,06 Hz und 46,88 Hz konstant. Das zweite Peak liegt zwischen

93,75 Hz und 101,6 Hz, wobei dort die Energie auch zwischen $1,805 \frac{m}{s^2}$ und $2,526 \frac{m}{s^2}$ konstant

verläuft. Für eine bessere Klassifizierung kann zusätzlich festgestellt werden, dass ein lokales

Maximum bei 70,31 Hz vorhanden ist. Direkt vor und nach den lokalen Maxima befinden sich

zwei lokale Minima bei 62,5 Hz und 78,13 Hz. Bemerkenswerterweise weist die Energie bei

den beiden Minima trotz der kleinen Abweichungen den gleichen Wert auf. Ab 0 Hz bis zum

ersten globalen Maximum weist die Energie einen quadratischen Verlauf auf.

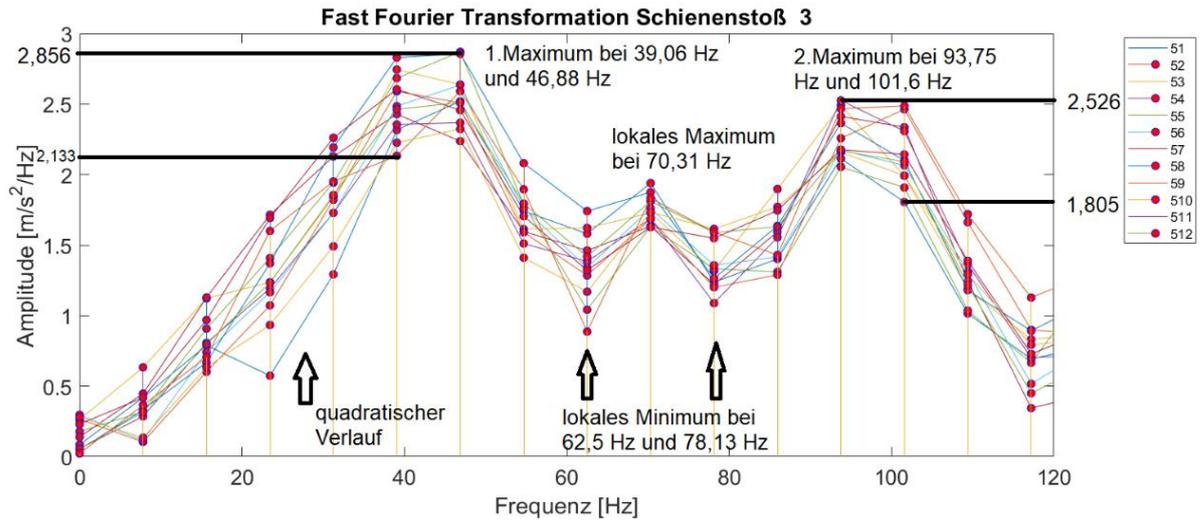


Abbildung 55: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 3

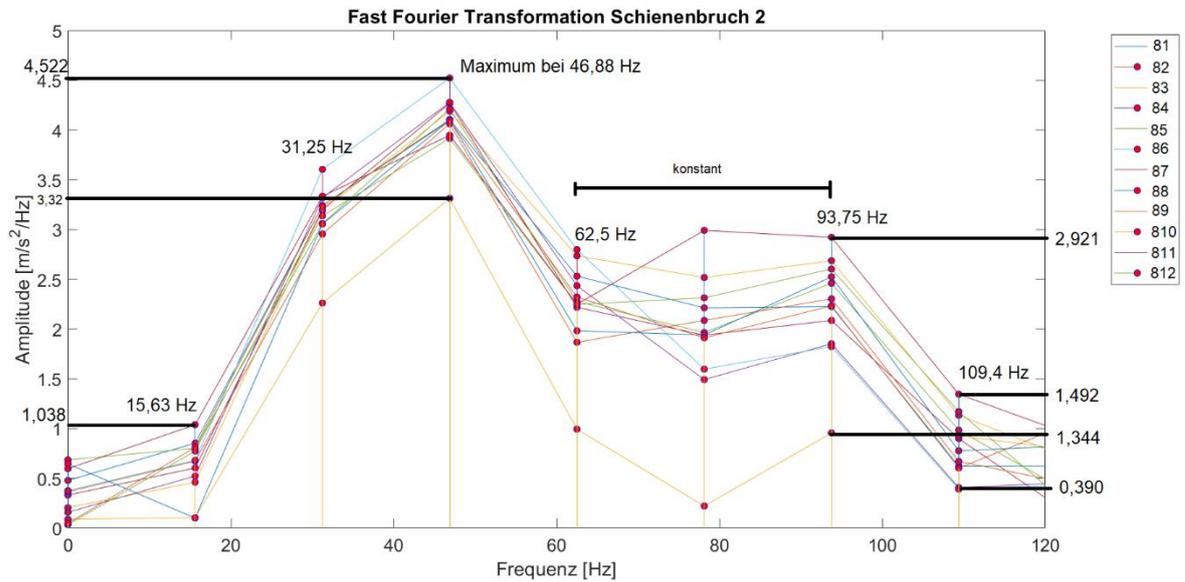


Abbildung 56: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenbruch 2

Die FFT des zweiten Schienenbruchs (Abb. 56) weist ein ähnliches Verhalten im Vergleich zum dritten Schienenstoß auf. Hier liegt die am stärksten vertretene Frequenz bei 46,88 Hz mit einer Amplitude zwischen $3,313 \frac{m}{s^2/Hz}$ und $4,522 \frac{m}{s^2/Hz}$. Zwischen den Frequenzen 62,5 Hz und 93,75 Hz besitzt die Energie einen konstanten Verlauf. Ab 15,63 Hz bis 31,25 Hz verläuft die Energie stark monoton steigend mit einem linearen Verlauf. Es ist zu erkennen, dass die Amplituden vor und nach 109,4 Hz in etwa den gleichen Wert aufweisen.

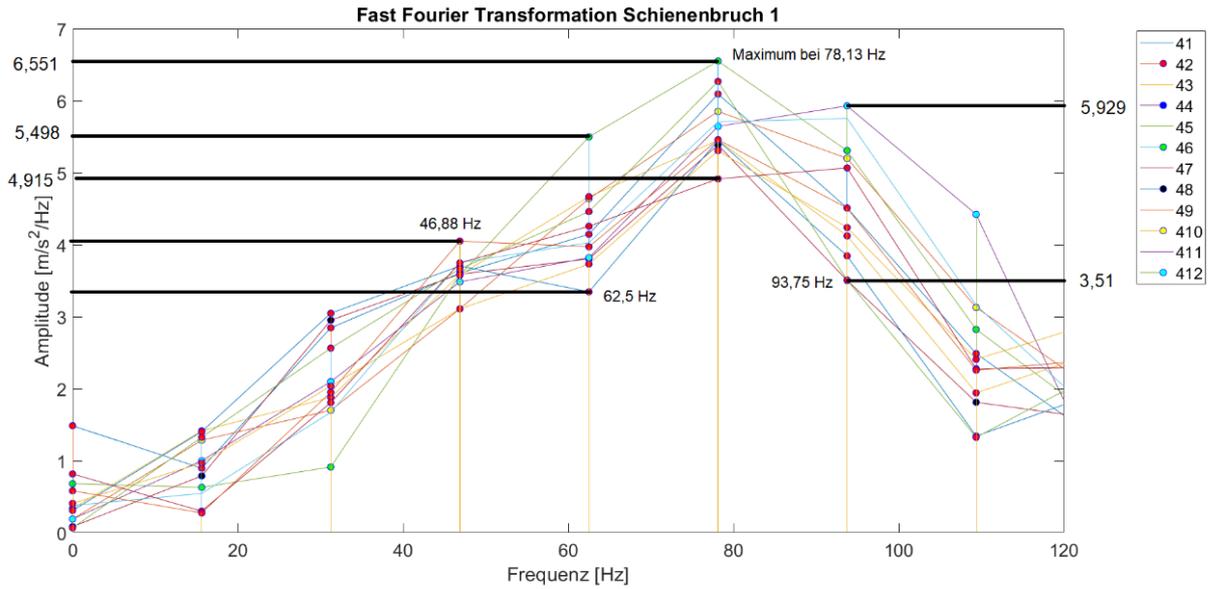


Abbildung 57: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenbruch 1

Die am stärksten vertretene Frequenz im Bereich des ersten Schienenbruchs ist 78,13 Hz, wobei die Amplitude im Vergleich zum zweiten Schienenbruch größer ist. Die Frequenzen vor und nach dem Maximum sind für beide Schienebrüche gleichermaßen vertreten. Die Amplituden befinden sich zwischen $3,51 \frac{m}{s^2/Hz}$ und $5,929 \frac{m}{s^2/Hz}$. Auch hier tritt die Frequenz von 46,88 Hz mit großer Amplitude auf. Im Vergleich zum ersten Schienenbruch treten die Amplituden an den gleichen Frequenzen auf. Hier ist der Verlauf der Amplituden bezüglich der Frequenzen linear. Er steigt bis zum Maximum und fällt dann ab.

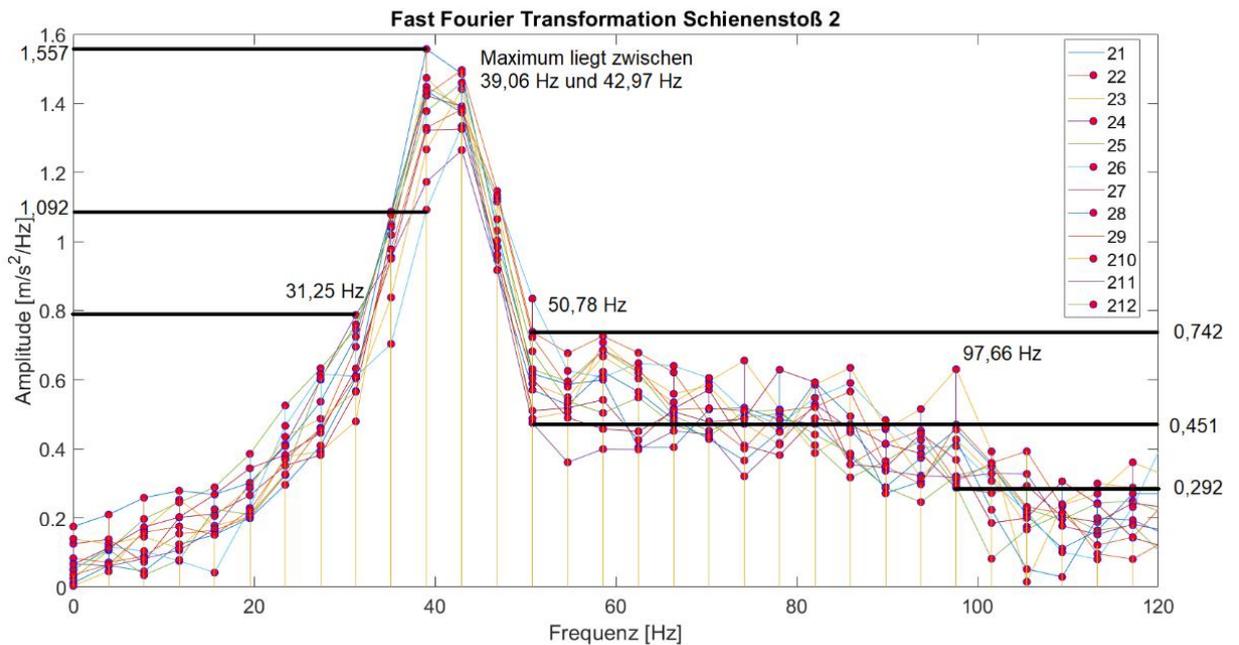


Abbildung 58: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 2

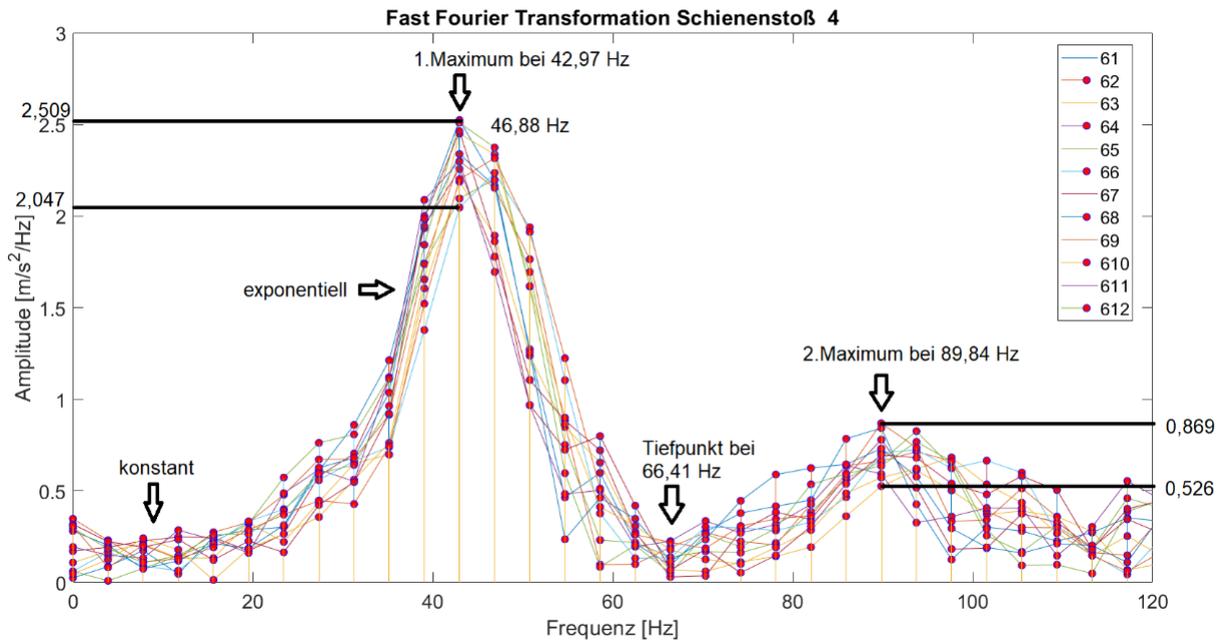


Abbildung 59: Verlauf der Fast Fourier Transformation Schienenstoß 4

Die Ergebnisse der FFT des zweiten und vierten Schienenstoßes sind ähnlich, da sie viele gemeinsame Merkmale aufweisen. Beide weisen ein globales Maximum bei 42,97 Hz auf, wobei die Amplituden einen unterschiedlichen Wert besitzen. Dies kann an den unterschiedlichen Geometrien der Fehler im Modell liegen. Beim zweiten Schienenstoß sind die Amplituden zwischen 39,06 Hz und 42,97 Hz konstant. Der gesamte Verlauf der beiden Schienenstöße bis zum Peak, kann als annähernd exponentiell betrachtet werden. Ein weiteres Merkmal ist beim zweiten Schienenstoß, dass die Frequenz von 50,78 Hz, statt eines negativen exponentiellen Verlaufs, zwischen $0,38 \frac{m}{s^2/Hz}$ und $0,742 \frac{m}{s^2/Hz}$ bis 97,66 Hz annähernd konstant bleibt. Beim vierten Schienenstoß ist die größte Amplitude bei 46,88 Hz. Ein sehr wichtiges Merkmal für die Fehlerklassifizierung ist der Tiefpunkt bei 66,41 Hz. Dort ist die Energie am geringsten und beträgt nicht mehr als $0,25 \frac{m}{s^2/Hz}$. Es existiert ein zweites Maximum bei 89,84 Hz, das als ein „gedämpfter“ Verlauf des ersten Maximums bezeichnet werden kann.

Bei der Überfahrt der Brücke schwingt das Fahrzeug mehrmals mit unterschiedlichen Frequenzen. Es existieren mehrere Ausschläge in den Amplituden, wobei die Werte unter $1 \frac{m}{s^2/Hz}$ bleiben. Das Maximum liegt hier zwischen 31,25 Hz und 39,06 Hz. Das gleiche Phänomen tritt bei der Abfahrt auf. Es treten kleine Unebenheiten im Gleis auf, die das Fahrzeug zu Schwingungen anregt. Es ist zu erkennen, dass nach jedem Hochpunkt ein Tiefpunkt folgt.

Für die Zuordnung der Ausschläge zum Typ „Brückenfahrt“ können die Frequenzen 54,69 Hz, 70,31 Hz, 83,94 Hz, 101,60 Hz und 109,4 Hz als lokale Maxima gewählt werden.

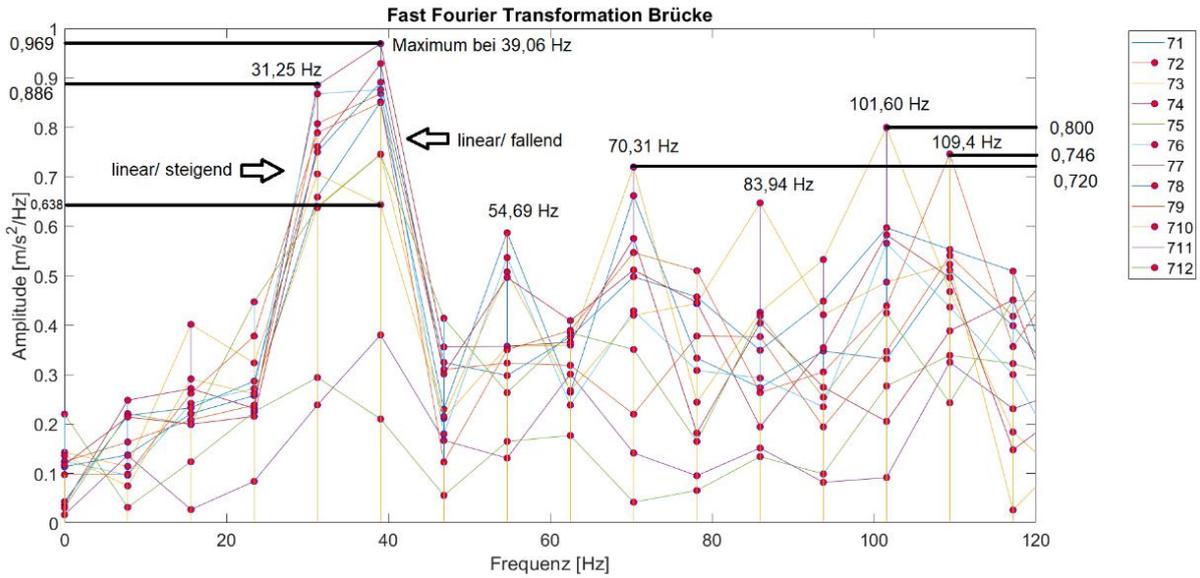


Abbildung 60: Verlauf der Fast Fourier Transformation Brücke

Die Hauptmerkmale für die Klassifizierung der punktuellen Instabilität sind die Maxima bei 23,44 Hz und 82,03 Hz. Es liegt ein Tiefbereich ab einer Frequenz von 39,06 Hz bis 50,78 Hz vor. Im Tiefbereich betragen die Amplituden maximal $0,146 \frac{m}{s^2 \cdot Hz}$. Das Fahrzeug reagiert infolge der Absenkung der einzelnen Schienenstränge mit mehreren Schwingungen. Für die Klassifizierung kann die Frequenz von 3,90 Hz als Maximum angesetzt werden, da dies in den anderen Fehlern nicht auftaucht. Im Gegenteil zu allen anderen Gleisfehlern sind die Amplituden bei der Frequenz von 46,88 Hz relativ klein.

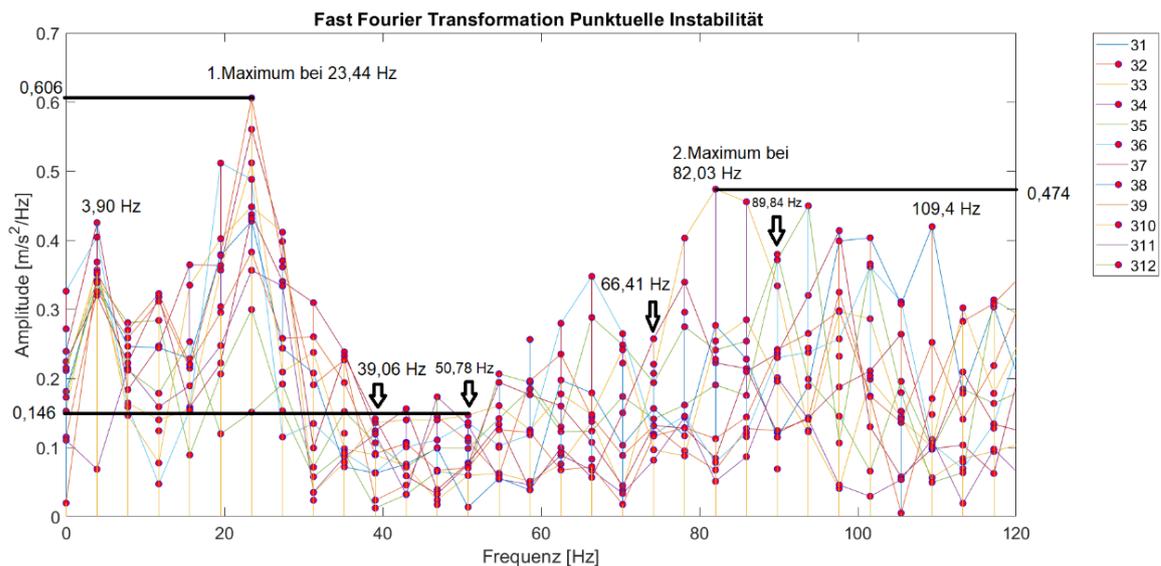


Abbildung 61: Verlauf der Fast Fourier Transformation punktuelle Instabilität

Für eine bessere Veranschaulichung sind alle besonderen Merkmale der einzelnen Fehler in Tabelle 20 zusammengefasst.

Fehlertyp	maximale Amplitude $\left[\frac{m}{\frac{s^2}{Hz}} \right]$	zweit-stärkste Amplitude $\left[\frac{m}{\frac{s^2}{Hz}} \right]$	Amplituden Verlauf	minimale Amplituden $\left[\frac{m}{\frac{s^2}{Hz}} \right]$
Schienenbruch 1	6,551 bei 78,13 Hz	5,929 bei 93,75 Hz	linear	0,254 bei 18,3 Hz
Schienenbruch 2	4,522 bei 46,88 Hz	2,921 bei 62,5 Hz und 93,75 Hz	linear/ konstant	0,390 bei 15,63 Hz und 109,4 Hz
Schienenstoß 1	0,920 bei 78 Hz und 95 Hz	78 und 95	linear	0,12 bei 18,4 Hz
Schienenstoß 2	1,557 bei 39,06 Hz und 42,97 Hz	1,092 bei 35,16 Hz und 46,88 Hz	exponentiell/ konstant	0,062 bei 0-18 Hz und 103-120 Hz
Schienenstoß 3	2,856 bei 39,06 Hz und 46,88 Hz	2,526 bei 93,75 Hz und 101,6 Hz	quadratisch/	0,92 bei 62,5 Hz und 78,13 Hz
Schienenstoß 4	2,509 bei 42,97 Hz und 46,88 Hz	0,869 bei 89,84 Hz	exponentiell/ konstant	0,145 bei 66,41 Hz und 116,31 Hz
Punktuelle Instabilität	0,606 bei 23,44 Hz	0,474 bei 82,03 Hz	abgedämpft	0,0135 bei 39,06 Hz und 50,78 Hz
Steifigkeitswechsel (Brücke)	0,969 bei 39,06 Hz	0,886 bei 31,25 Hz	linear/ periodisch	0,0324 bei 12,06 Hz

Tabelle 20: Fehlermerkmale bei Fast Fourier Transformation zur Fehlerklassifizierung

Die unterschiedlichen Fehler regen das Fahrzeug verschieden an. Die vertikalen Beschleunigungen werden in einem bewegten FFT-Fenster bearbeitet.

Nach der Zuordnung der Fehler anhand der ermittelnden Maximalwerte erfolgt die weitere Zuordnung mit der Fast-Fourier-Transformation oder der spektralen Beschleunigungsdichte. In Abb. 63 ist die Logik der Fast-Fourier-Transformation für die Zuordnung der Gleisfehlern dargestellt. Die Zuordnung wird anhand der stärksten Frequenzen und deren Amplituden bestimmt.

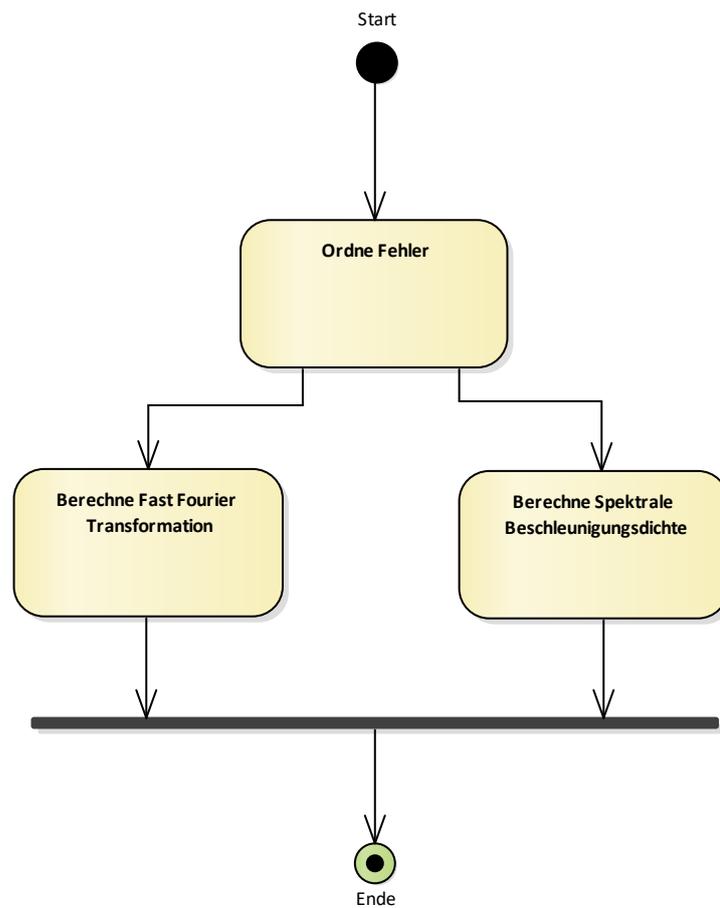


Abbildung 62: Logik für den Ablauf der Fehlerklassifizierung

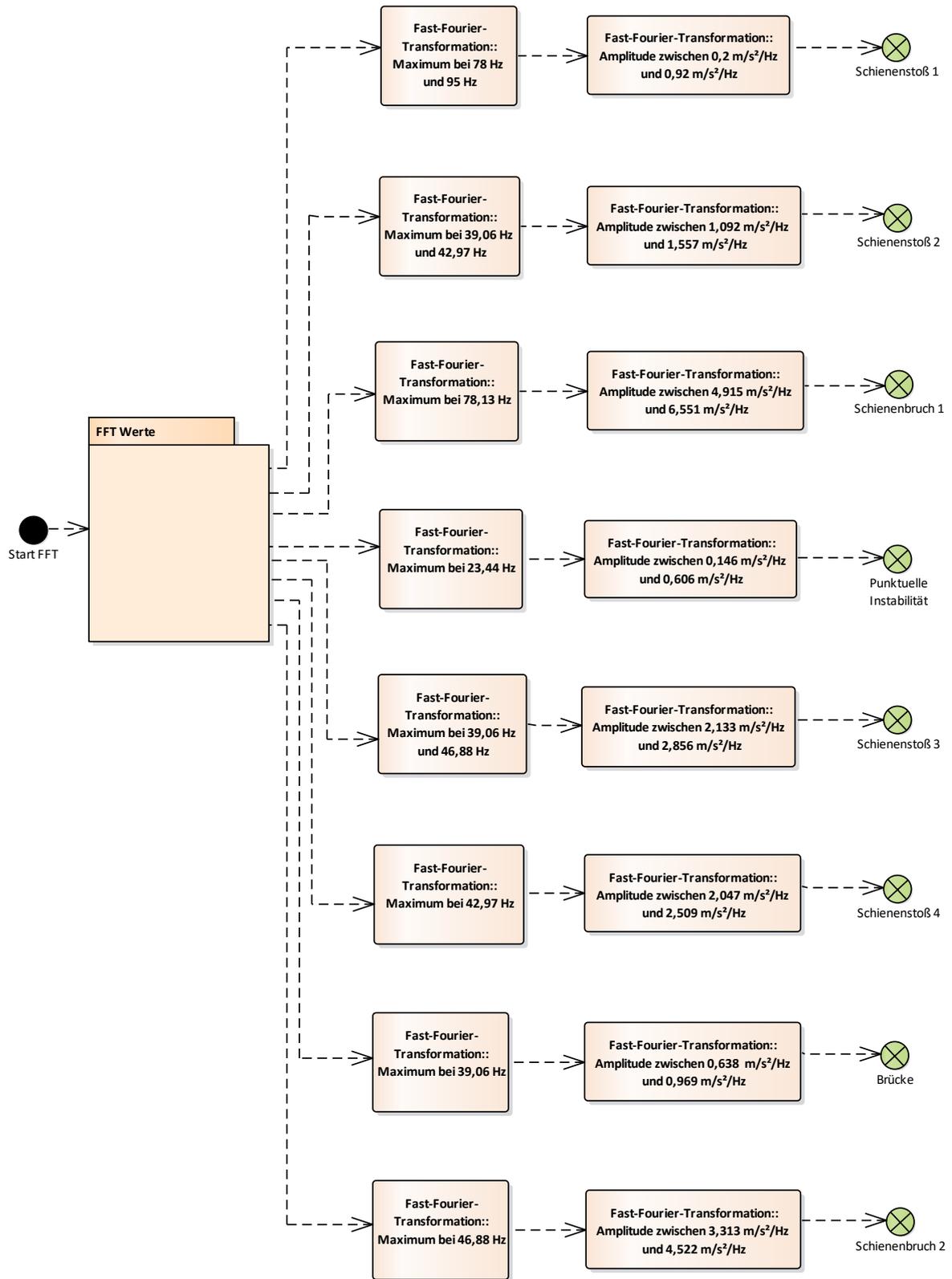


Abbildung 63: Logik für die Zuordnung der Gleisfehlern anhand der Fast Fourier Transformation

8.2 Auswertung der spektralen Beschleunigungsdichte

Im Abschnitt 8.2 wird ein Vergleich der Ergebnisse der FFT und der spektralen Beschleunigungsdichte getroffen. Ebenfalls wird die Rechenzeit und die Übereinstimmung der Frequenzbereiche mit Positionsangabe untersucht. Die spektrale Beschleunigungsdichte eignet sich besonders, um Signale aus nichtperiodischen Komponenten zu analysieren [32, 33]. Die Frequenzanalyse mittels FFT ist bei zufälligen Schwingungen nicht unbedingt zweckmäßig, da die FFT davon ausgeht, dass das Signal aus periodischen Anteilen besteht. Mehrere Schwingungen im Real-System werden als stochastische Schwingungen betrachtet, da die Bewegung mit unterschiedlichen Frequenzen zum gleichen Zeitpunkt erfolgt. Die spektrale Beschleunigungsdichte ist dagegen bei stochastischen Schwingungen recht gut geeignet [32, 33, 35]. Die Funktion der SBD wurde in Matlab wie unten beschrieben angewandt, um die unterschiedlichen Frequenzen zu untersuchen:

%Berechnung der spektralen Beschleunigungsdichte

```
for j=1:size(M,3) %M beinhaltet die Bereiche aller
Fehlertypen
    R=M(:, :, j);
    for i=1:size(R,2)
        FS= 500; %Abtastfrequenz
        x= R(:, i);
        p= pwelch(x, [], [], [], FS); %Leistungsdichtespektrum
        figure
        plot(p)
        xlabel('Frequenz (Hz)', 'FontSize', 16)
        ylabel('Amplitude', 'FontSize', 16)
        title(sprintf('%s Runde %d', titlematrix(j), i));
    end
```

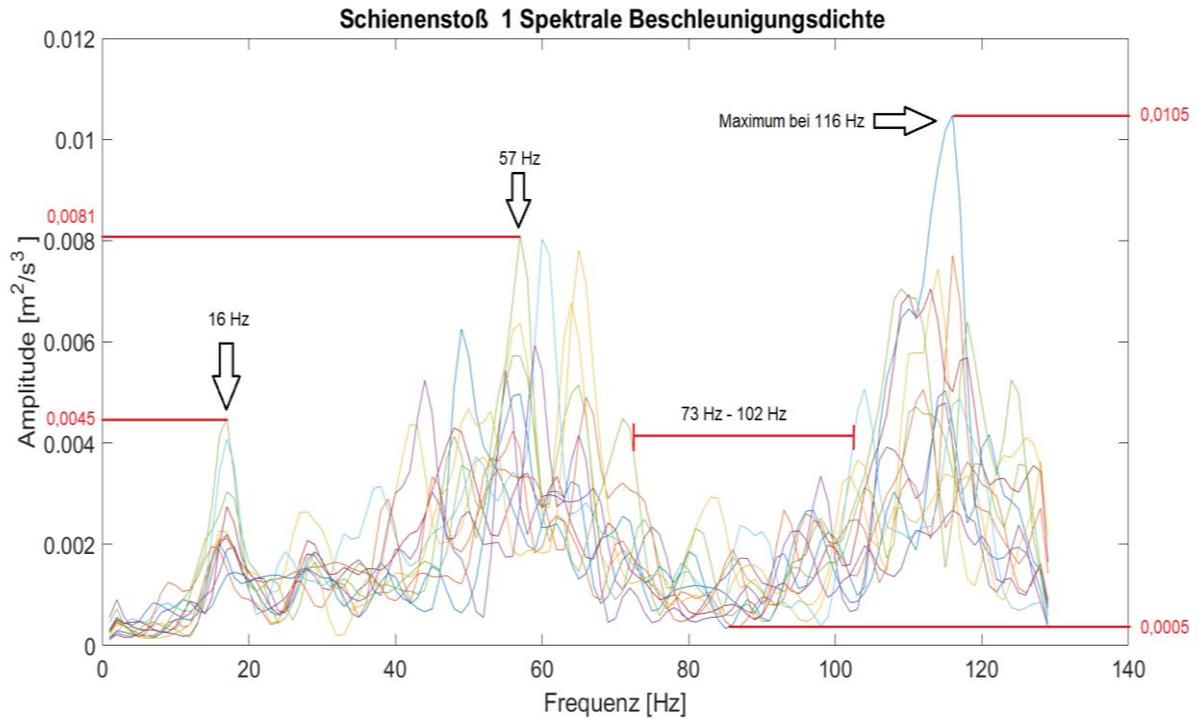


Abbildung 64: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 1

In Abbildung 64 sind die wichtigsten Merkmale des ersten Schienenstoßes gekennzeichnet. Es gibt mehrere Peaks in den Amplituden. Der erste Peak befindet sich bei 16 Hz mit einer Amplitude von $0,0045 \frac{m^2}{s^3}$. Die Energie erhöht sich tendenziell bei den höheren Frequenzen, wobei der zweite Peak bei 57 Hz liegt. Die Amplitude beträgt hier $0,0081 \frac{m^2}{s^3}$. Zwischen dem zweiten und dem dritten Peak reduziert sich die Energie mit einer maximalen Amplitude von $0,002 \frac{m^2}{s^3}$ und einem lokalen Minimum von $0,0005 \frac{m^2}{s^3}$. Der Tiefbereich beginnt bei ca. 73 Hz und endet bei 102 Hz. Der dritte und letzte Peak befindet sich bei 116 Hz mit einer Amplitude von $0,0105 \frac{m^2}{s^3}$ und ist somit das globale Maximum.

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Lokales Maximum	16	0,002-0,0045
Tiefbereich	17-40	0,0010-0,0020
Lokales Maximum	57	0,004-0,0081
Tiefbereich	73-102	0,0005-0,002
Globales Maximum	116	0,006-0,0105

Tabelle 21: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 1

Beim zweiten Schienenstoß befindet sich ein starker Peak bei 22 Hz mit einer Amplitude von $0,043 \frac{m^2}{s^3}$. Die Amplituden fallen dann stark ab, bis sie ihren Tiefpunkt bei 84 Hz erreichen. Weiter nimmt der Verlauf bei 117 Hz mit einer maximalen Amplitude von $0,012 \frac{m^2}{s^3}$ zu.

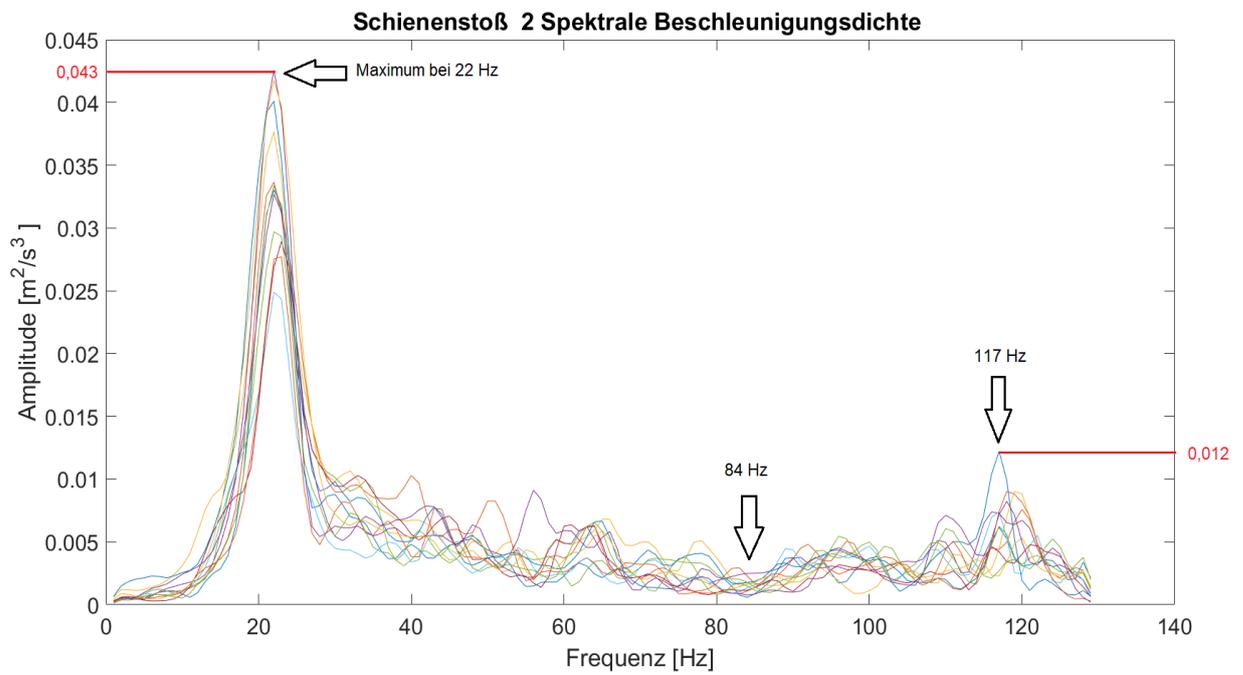


Abbildung 65: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 2

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Globales Maximum	22	0,025-0,043
Globales Minimum	84	0,001
Lokales Maximum	117	0,012

Tabelle 22: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 2

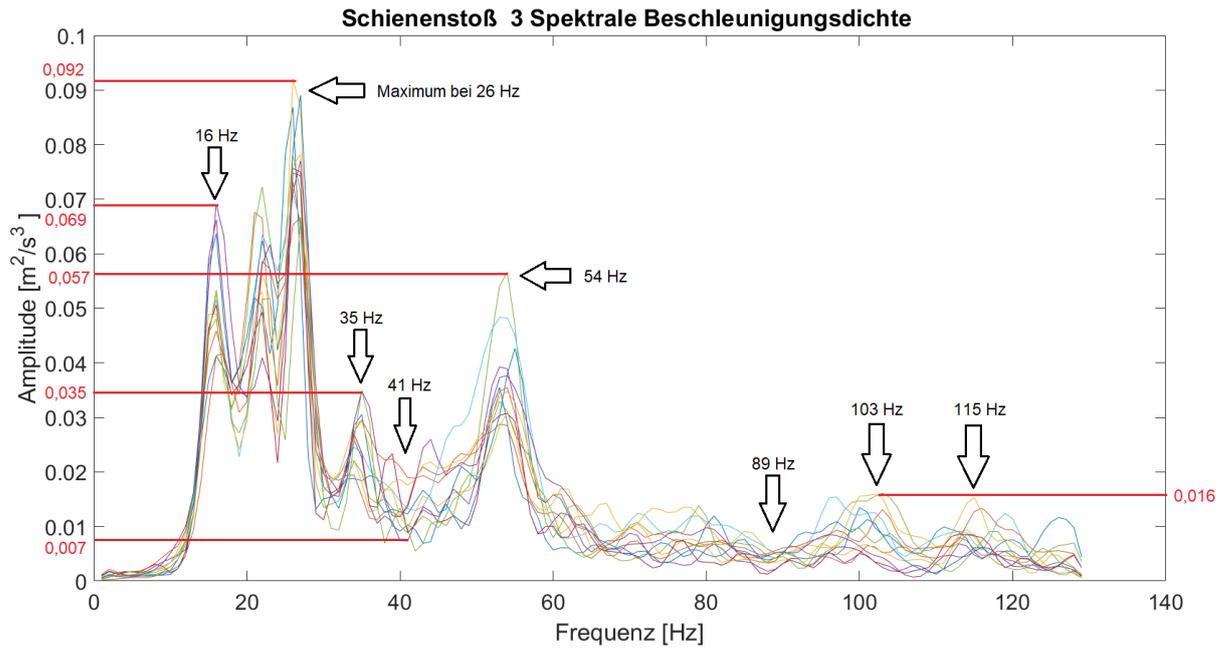


Abbildung 66: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 3

In Abbildung 66 ist zu erkennen, dass sich bei der spektralen Beschleunigungsdichte des dritten Schienenstoßes im Bereich von 1 Hz bis 60 Hz sich die größten Frequenzen ergeben. Ab 60 Hz wird der Verlauf gedämpft. Das globale Maximum liegt hier bei 26 Hz mit einer Amplitude von $0,092 \frac{m^2}{s^3}$. Die maximale Amplitude im Bereich ab 60 Hz liegt bei $0,016 \frac{m^2}{s^3}$. Die Amplitude fällt ab 26 Hz stark ab bis sie wieder bei 54 Hz stark zunimmt. Im Tiefbereich befindet sich ein Maximum von 35 Hz mit einer Amplitude von $0,035 \frac{m^2}{s^3}$. Es existiert ein zweites lokales Maximum bei ca. 16 Hz mit einer Amplitude von $0,069 \frac{m^2}{s^3}$.

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Lokales Maximum	16	0,069
Globales Maximum	26	0,092
Lokales Maximum	35	0,035
Globales Minimum	41	0,007
Lokales Maximum	54	0,057
Lokales Minimum	89	0,05

Tabelle 23: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 3

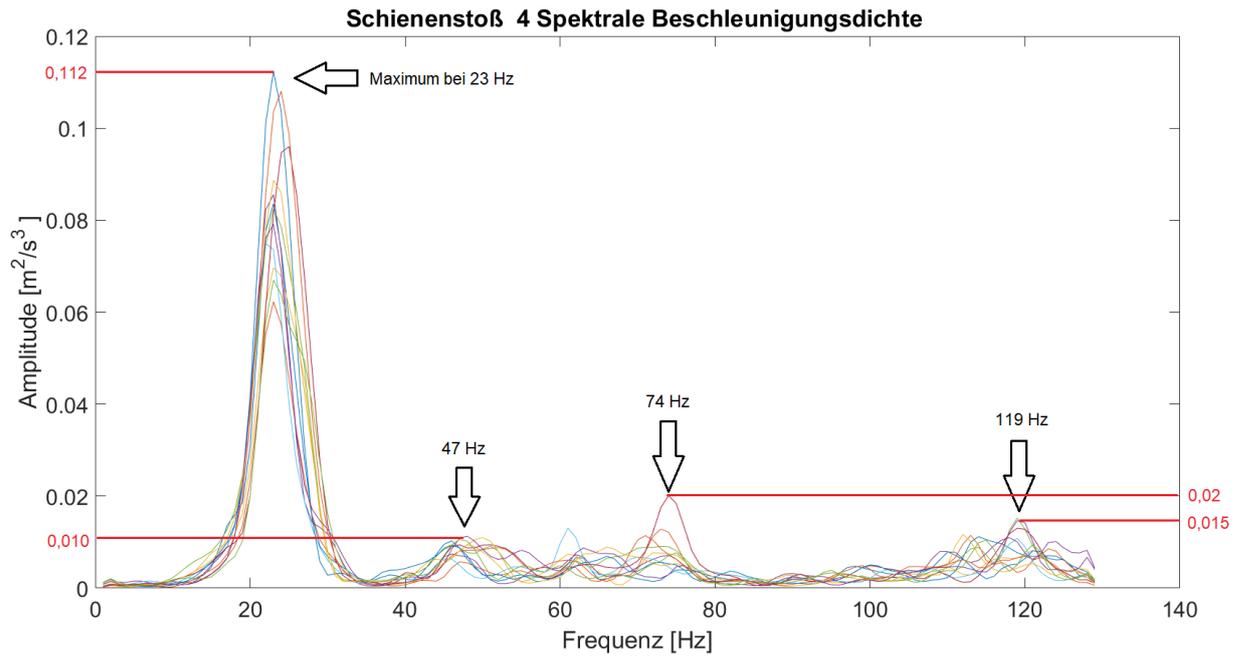


Abbildung 67: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 4

Das wichtigste Merkmal beim vierten Schienenstoß (Abb. 67) ist das Maximum bei 23 Hz. Die größte Amplitude beträgt $0,112 \frac{m^2}{s^3}$. Es existieren zudem drei kleine lokale Maxima bei 47 Hz, 74 Hz und 119 Hz. Bemerkenswerterweise strebt die Amplitude bei allen anderen Bereichen außerhalb des Maximums gegen $0 \frac{m^2}{s^3}$. Alle Ausschläge sind immer nur über einen kleinen Frequenzbereich vertreten.

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Globales Maximum	23	0,112
Lokales Maximum	47	0,010
Lokales Maximum	74	0,02
Lokales Maximum	119	0,015

Tabelle 24: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenstoß 4

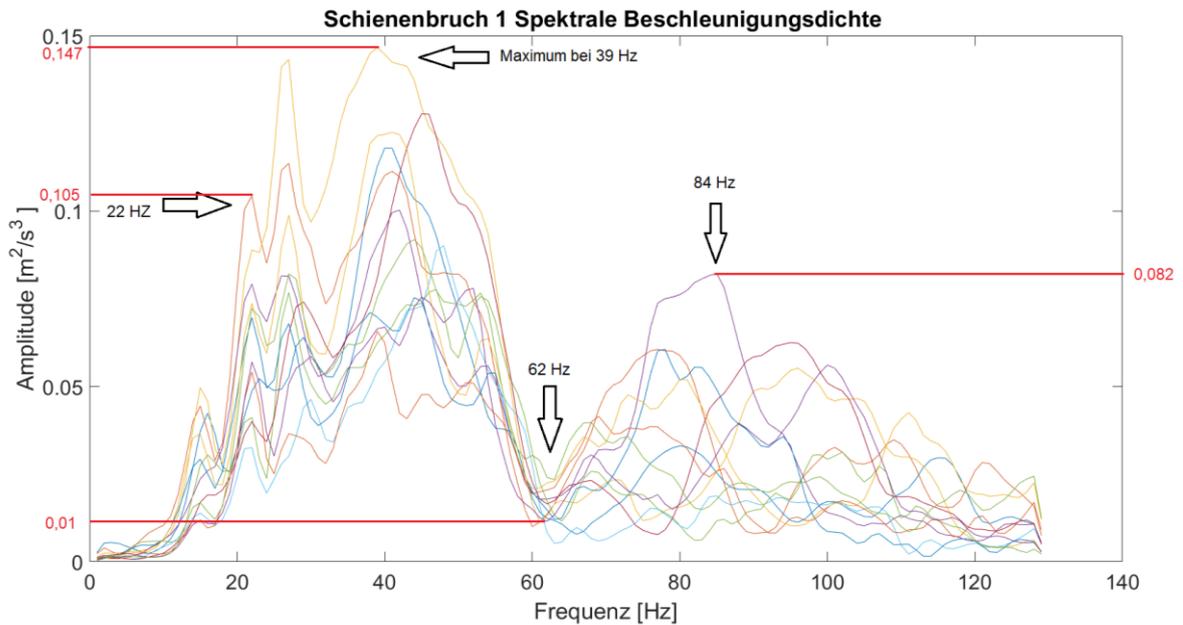


Abbildung 68: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte Schienenbruch 1

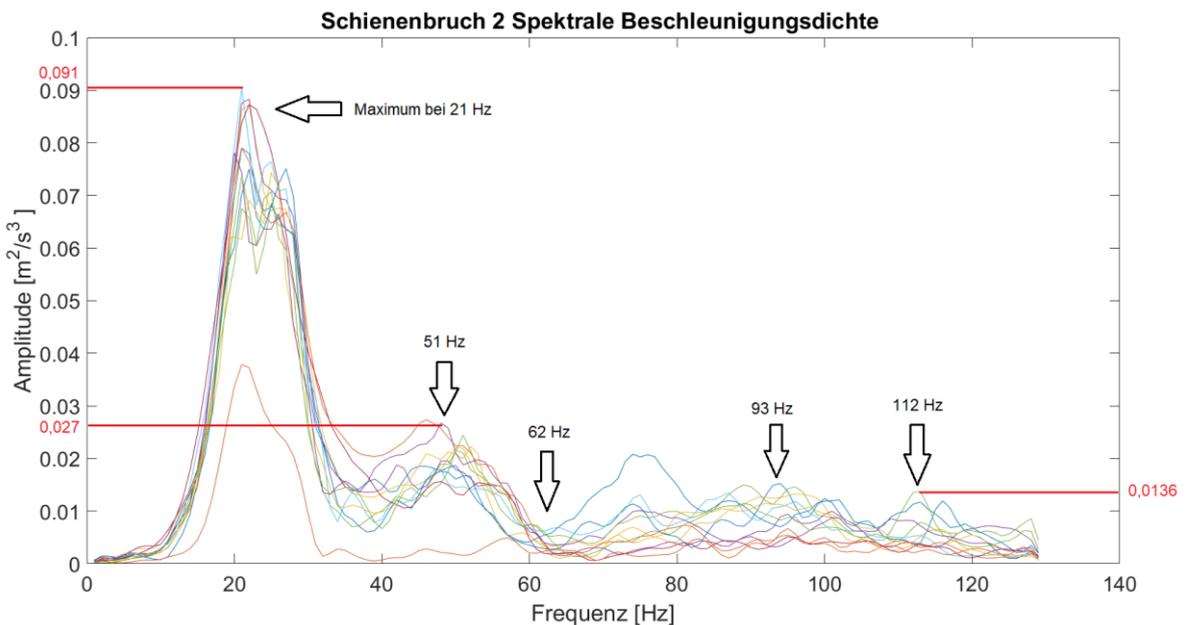


Abbildung 69: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte Schienenbruch 2

Die spektrale Beschleunigungsdichte der zwei Schienenbrüche besitzt trotz des gleichen Fehlertyps unterschiedliche Merkmale. Der zweite Schienenbruch weist lediglich einen großen Ausschlag bei 21 Hz auf. Dieser Ausschlag besitzt einen Wert von $0,091 \frac{m^2}{s^3}$. Im Vergleich zum ersten Schienenbruch ist die Energie aufgrund der Geometrie und der erweiterten Phase des Fehlers bei dem zweiten Schienenbruch deutlich höher. Bei dem ersten Schienenbruch erfährt das Fahrzeug die höchste Amplitude, welche zwischen den Frequenzen 22 Hz und 62 Hz liegt. Die größte Amplitude beträgt dort $0,147 \frac{m^2}{s^3}$. Sie fällt dann bei 62 Hz stark ab, bis sie einen

Wert von $0,01 \frac{m^2}{s^3}$ erreicht und dann wieder zunimmt, bis sie ein lokales Maximum mit 84 Hz erreicht ist.

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $[\frac{m^2}{s^3}]$
Globales Maximum	39	0,147
Globales Minimum	62	0,01
Lokales Maximum	84	0,082

Tabelle 25: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenbruch 1

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $[\frac{m^2}{s^3}]$
Globales Maximum	21	0,091
Globales Minimum	62	0,005
Lokales Maximum	93 und 112	0,014

Tabelle 26: Spektrale Beschleunigungsdichte Schienenbruch 2

Bei der punktuellen Instabilität gibt es zwei starke Ausschläge bei den Frequenzen 13 Hz und 114 Hz. Im Vergleich zu den anderen Gleisfehlern sind die Amplituden bei der punktuellen Instabilität deutlich kleiner. Die Energie erhöht sich ab 1 Hz und schwankt stark bei 7 Hz. Hier gibt es auch zwei erkennbare Tiefbereiche zwischen 20 Hz und 32 Hz und zwischen 70 Hz und 91 Hz. Dort sind die Amplituden maximal $0,0017 \frac{m^2}{s^3}$ groß.

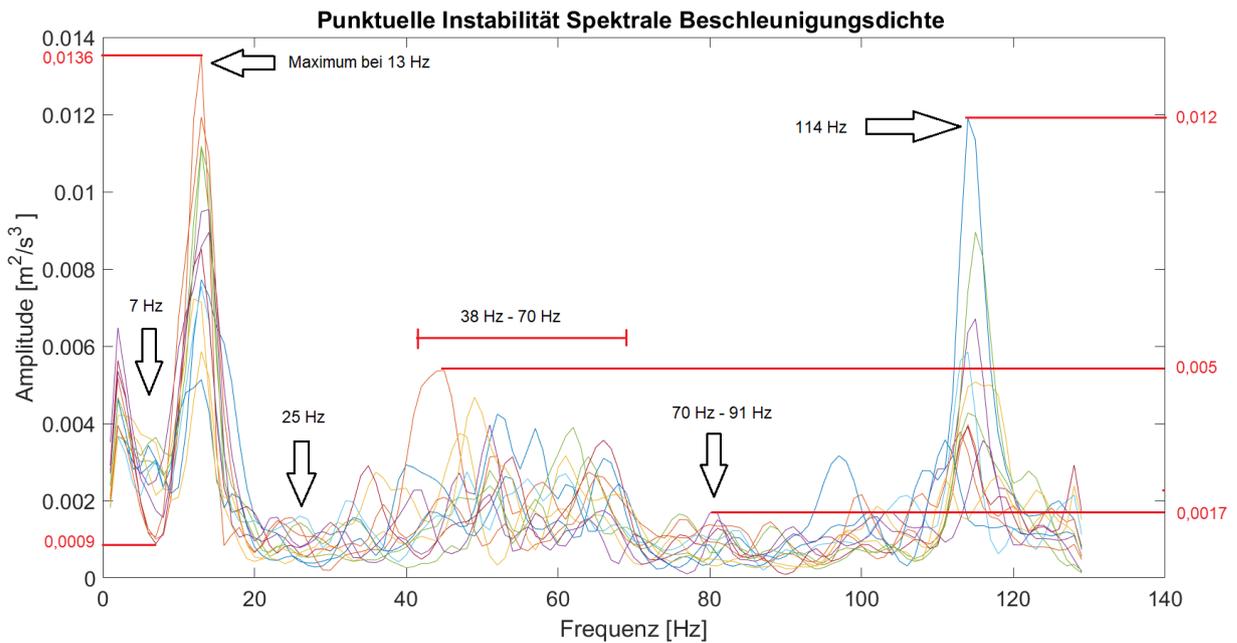


Abbildung 70: Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte punktueller Instabilität

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Globales Maximum	13	0,0136
Globales Minimum	7	0,0009
Lokales Maximum	114	0,012

Tabelle 27: Spektrale Beschleunigungsdichte punktuelle Instabilität

Die spektrale Beschleunigungsdichte der Brücke (Abb. 71) weist im Vergleich zur punktuellen Instabilität ein ähnliches Verhalten auf (Abb. 70). Es gibt zwei globale Maxima bei 20 Hz und 113 Hz. Die Amplituden betragen $0,0142 \frac{m^2}{s^3}$ und $0,0093 \frac{m^2}{s^3}$. Im Vergleich zu der punktuellen Instabilität hat der Gleisfehlertyp „Brücke“ ein Maximum bei 53 Hz. Der Tiefbereich liegt hier bei 92 Hz.

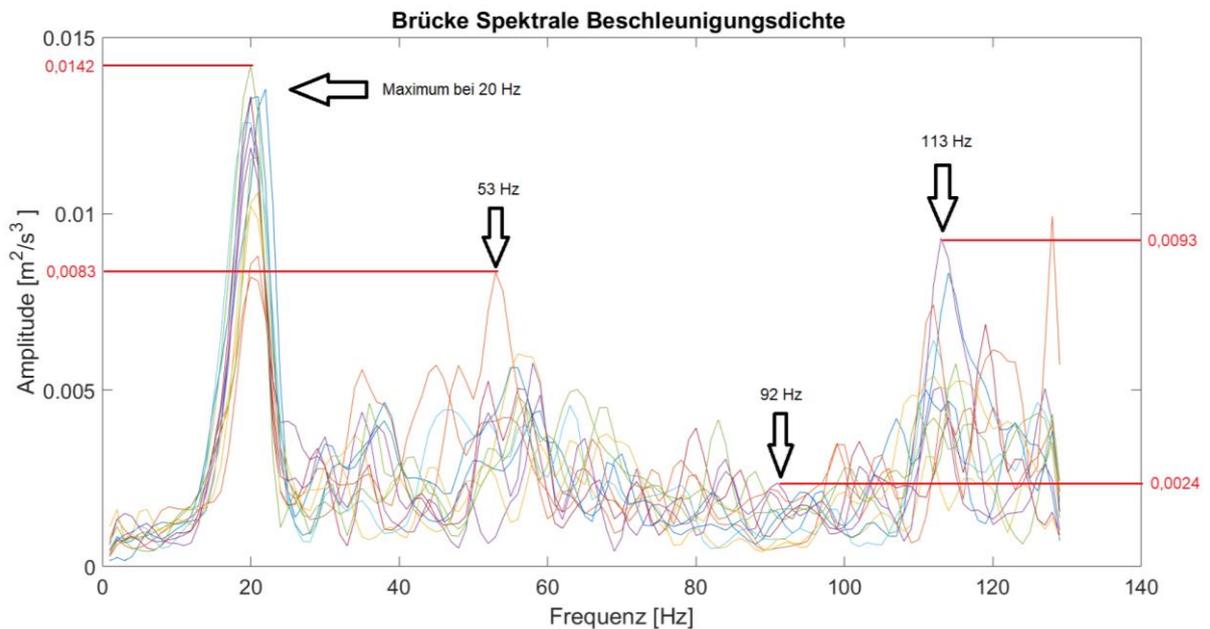


Abbildung 71: Verlauf spektrale Beschleunigungsdichte Brücke

Typ	Frequenzbereich [Hz]	Amplitude SBD Spektrum $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Globales Maximum	20	0,0142
Lokales Maximum	53	0,0083
Globales Minimum	92	0,0024
Lokales Maximum	113	0,0093

Tabelle 28: Spektrale Beschleunigungsdichte Brücke

Tabelle 29 zeigt, die wichtigsten Merkmale der spektralen Beschleunigungsdichte aller Gleisfehler.

Fehlertyp	maximale Amplitude $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$	Zweitstärkste Amplitude $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$	kleinste Amplitude $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$
Schienenbruch 1	0,1470 bei 39 Hz	0,082 bei 84 Hz	0,01 bei 62 Hz
Schienenbruch 2	0,0910 bei 21 Hz	0,014 bei 93 Hz und 112 Hz	0,005 bei 62 Hz
Schienenstoß 1	0,0105 bei 116 Hz	0,0081 bei 57 Hz	0,0002 zwischen 73 Hz und 102 Hz
Schienenstoß 2	0,0430 bei 22 Hz	0,012 bei 117 Hz	0,001 bei 84 Hz
Schienenstoß 3	0,0920 bei 26 Hz	0,069 bei 16 Hz	0,007 bei 41 Hz
Schienenstoß 4	0,1120 bei 23 Hz	0,015 bei 119 Hz	0,0001 zwischen 80 Hz und 115 Hz
Punktuelle Instabilität	0,0136 bei 13 Hz	0,012 bei 114 Hz	0,0009 bei 7 Hz
Steifigkeitswechsel (Brücke)	0,0142 bei 20 Hz	0,0093 bei 113 Hz	0,0024 bei 92 Hz

Tabelle 29: Merkmale der Fehler für die spektrale Beschleunigungsdichte

8.3 Vergleich Fast Fourier Transformation und Spektrale Beschleunigungsdichte

In Abschnitt 8.3 erfolgt ein Vergleich zwischen der spektralen Beschleunigungsdichte und der Fast Fourier Transformation. Die Kurven besitzen einen ähnlichen Verlauf. Im Vergleich zu der spektralen Beschleunigungsdichte liegen die Maxima der FFT um 22 Hz bis 25 Hz höher. Die Dominante Frequenz mittels FFT ermittelt, liegt bei dem ersten Schienenbruch (Abb. 72) bei 78 Hz und im Verlauf der spektralen Beschleunigungsdichte bei 55 Hz. Beim zweiten Schienenbruch liegt die dominante Frequenz der FFT bei 44 Hz und beim Verlauf der SBD bei 22 Hz. Ein zusätzlicher Unterschied ist, dass bei der SBD die Amplituden ab 60 Hz gegen 0 streben. Bei der FFT verlaufen die Amplituden bis zu 97 Hz konstant mit einem Wert von $3 \frac{m}{s^2 \cdot Hz}$. Die spektrale Beschleunigungsdichte beschreibt wie stark die Leistung des Signals über die Frequenz verteilt wird, während die Fast Fourier Transformation die häufigsten tretende Frequenzen mit deren Amplituden und Phasen zeigt. Die spektrale Beschleunigungsdichte berechnet das Signal mit der Verwendung von der DFT, daher gibt sie die zu jeder Frequenzeinheit gehörigen Leistung an. Sie wird als die quadratische Größe der FFT bezeichnet.

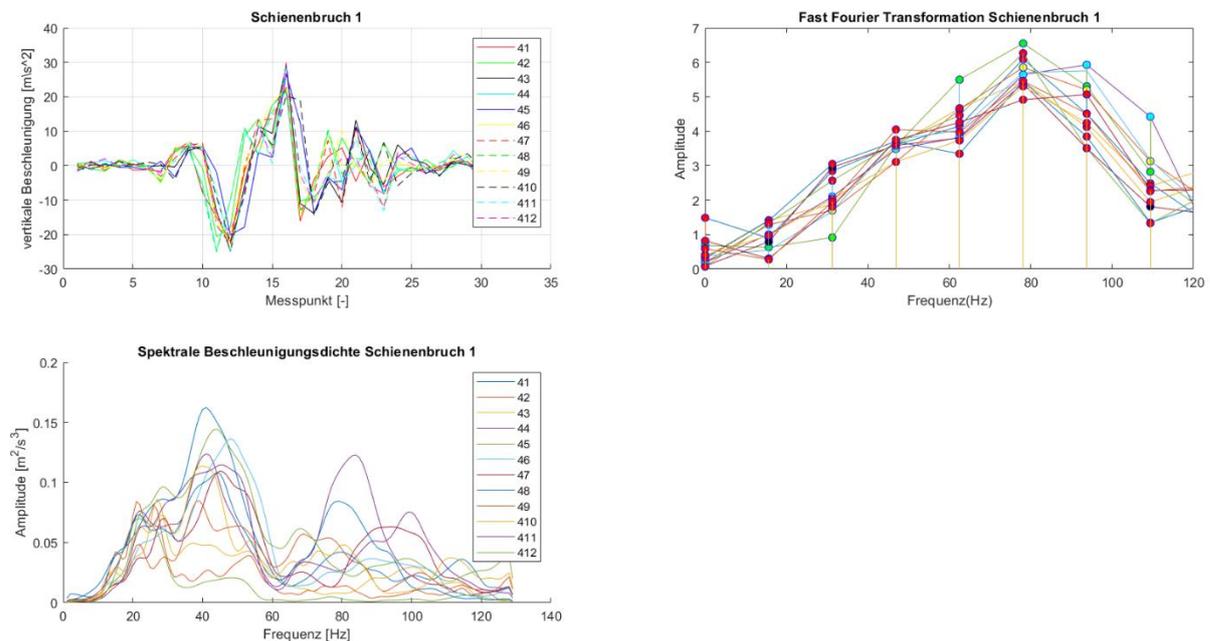


Abbildung 72: Vergleich FFT und SBD Schienenbruch 1

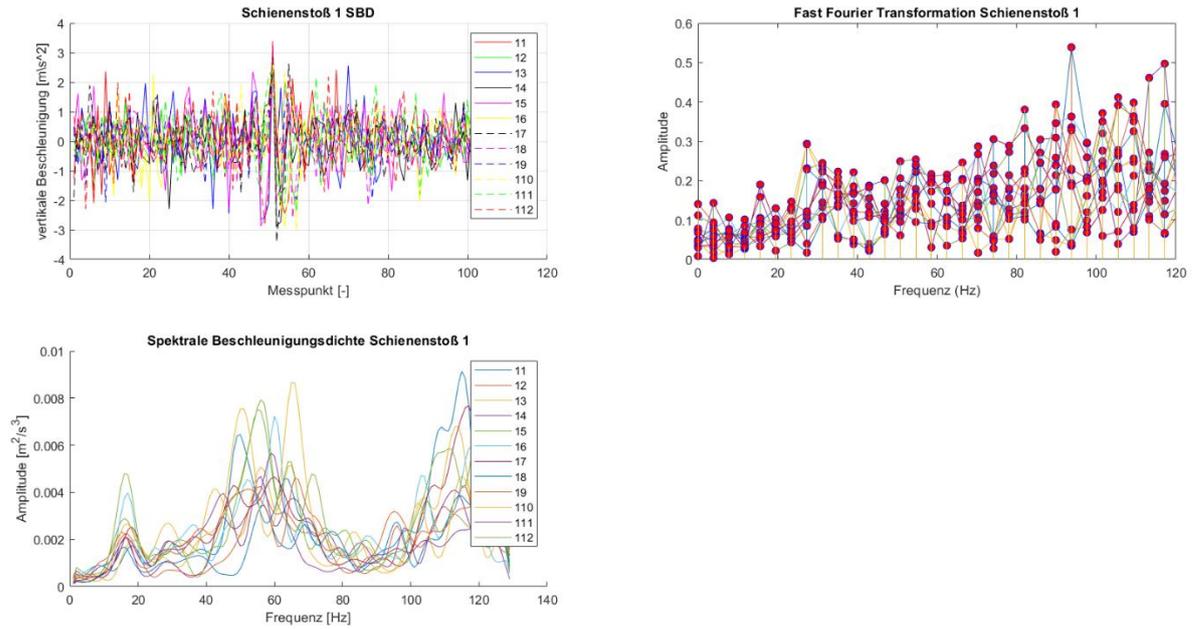


Abbildung 73: Vergleich FFT und SBD Schienenstoß 1

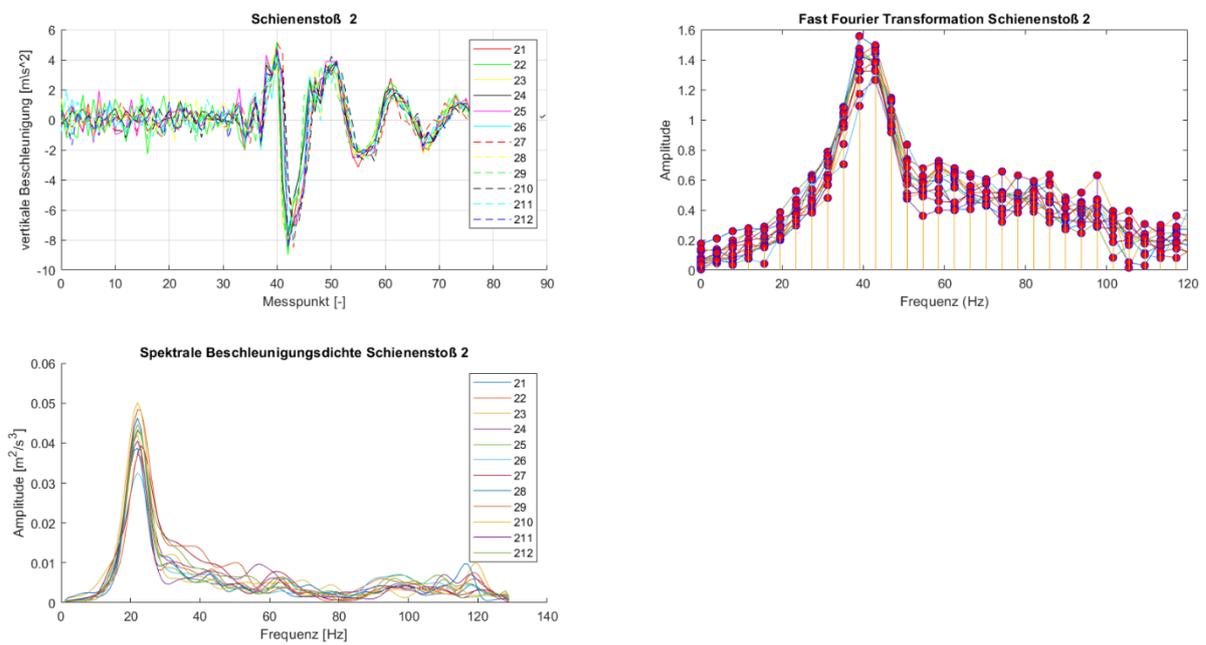


Abbildung 74: Vergleich FFT und SBD Schienenstoß 2

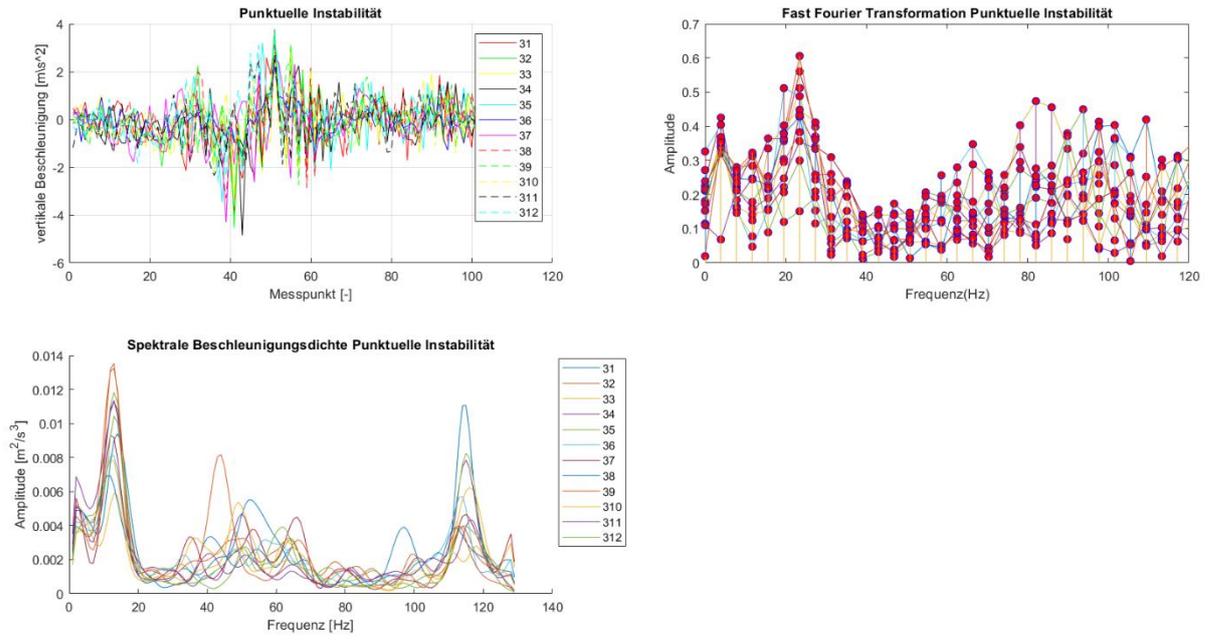


Abbildung 75: Vergleich FFT und SBD punktuelle Instabilität

8.4 Logik zur Erkennung der Fehler im Modell

In Abbildung 76 ist die Logik der spektralen Beschleunigungsdichte für die Zuordnung der Fehler dargestellt. Die Zuordnung wird anhand der stärksten Frequenzen und deren Amplituden bestimmt.

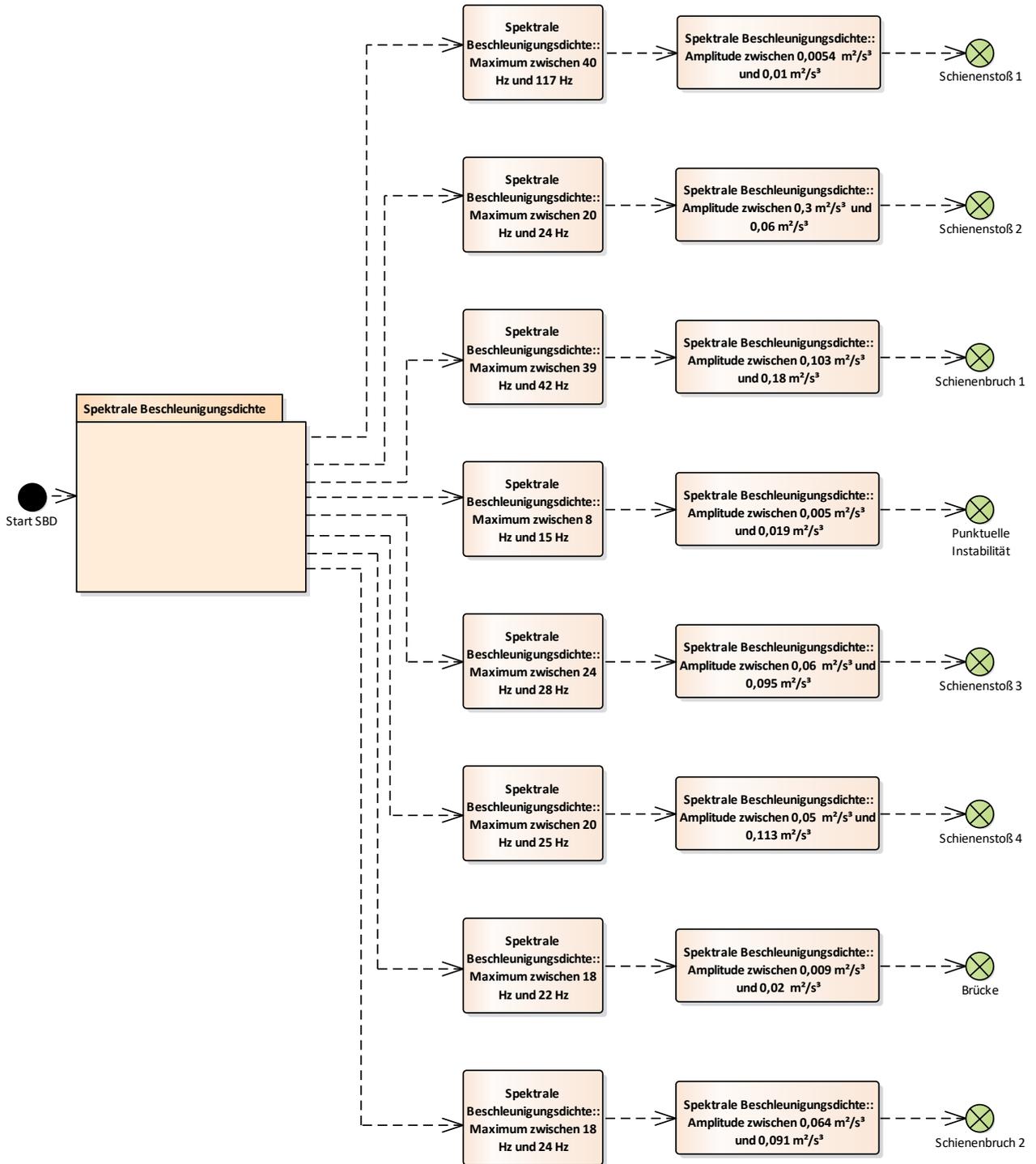


Abbildung 76: Logik für die Zuordnung der Fehler anhand der spektralen Beschleunigungsdichte

Die oben dargestellte Logik wurde wie folgt in Matlab umgesetzt:

```

%% find the signal Schienenstoß 3

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    %Spektralbeschleunigungsdichte
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500),[],[],[],Fs);
    %Maximale Amplitude der Spektralen Beschleunigungsdichte
    pmax=max(p);
    %Maximale vertikale Beschleunigung
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500));
    pmaxes(k) = pmax
    %Maximalbereiche
    if pmax>0.06 && pmax<0.095 && wmax>13.8 && wmax<20
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenstoß 3 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca,'FontSize',16)
hold off

```

Durch das Festlegen eines typischen Frequenz-und Amplitudenbereichs und die Werte der unterschiedlichen Maxima der vertikalen Beschleunigung für alle Fehler, konnten die Schienenbrüche und alle Schienenstöße sehr zuverlässig erkannt werden (Abb. 77 bis Abb. 84).

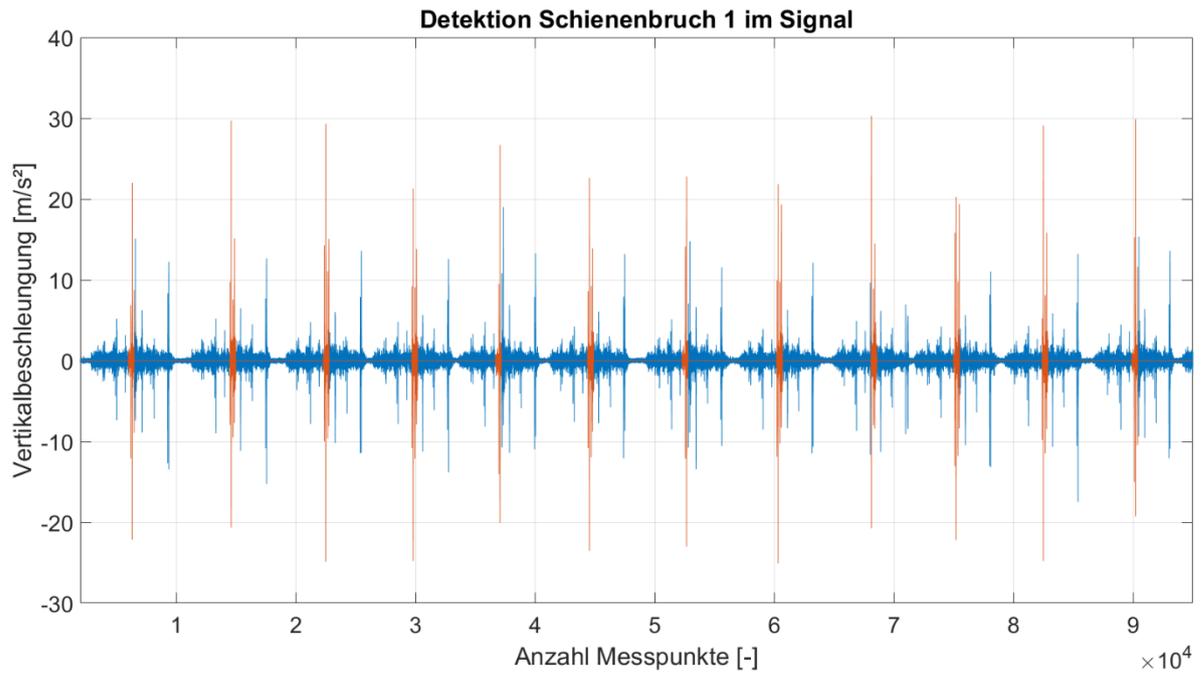


Abbildung 77: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenbruch 1 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

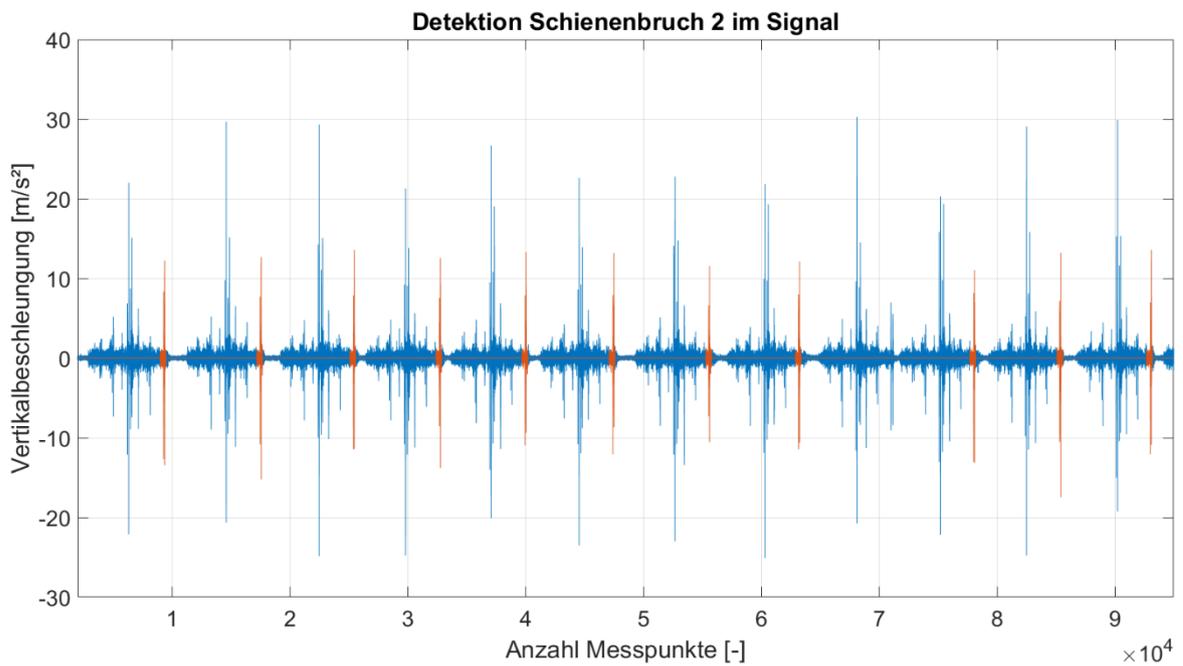


Abbildung 78: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenbruch 2 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

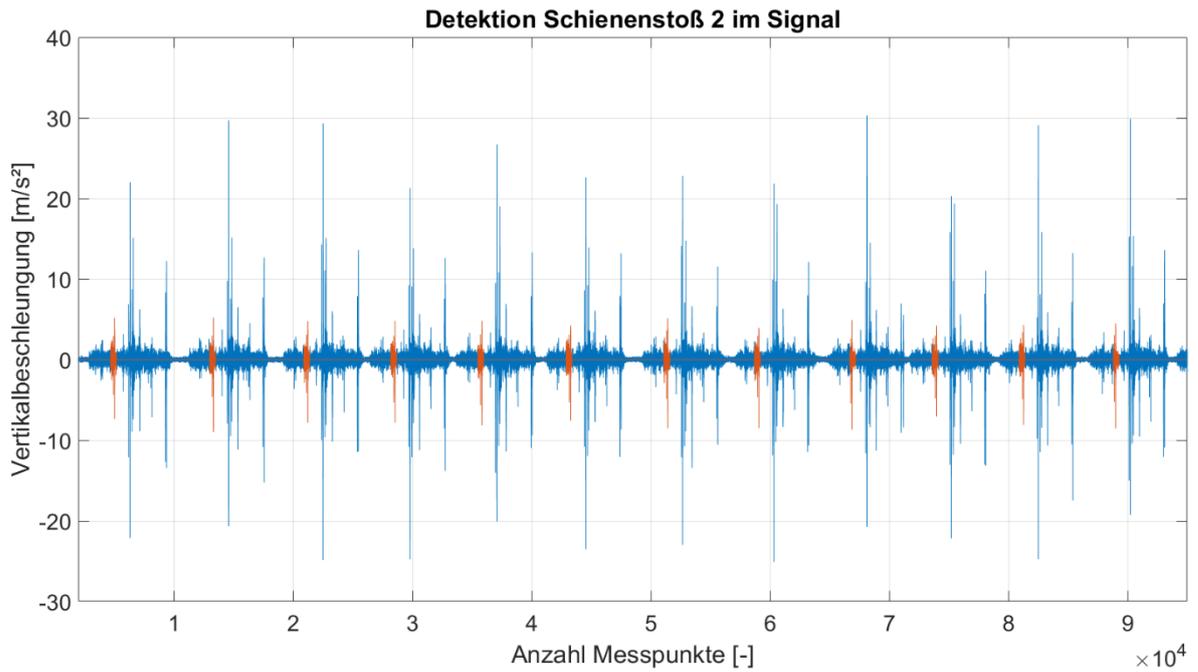


Abbildung 79: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 2 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

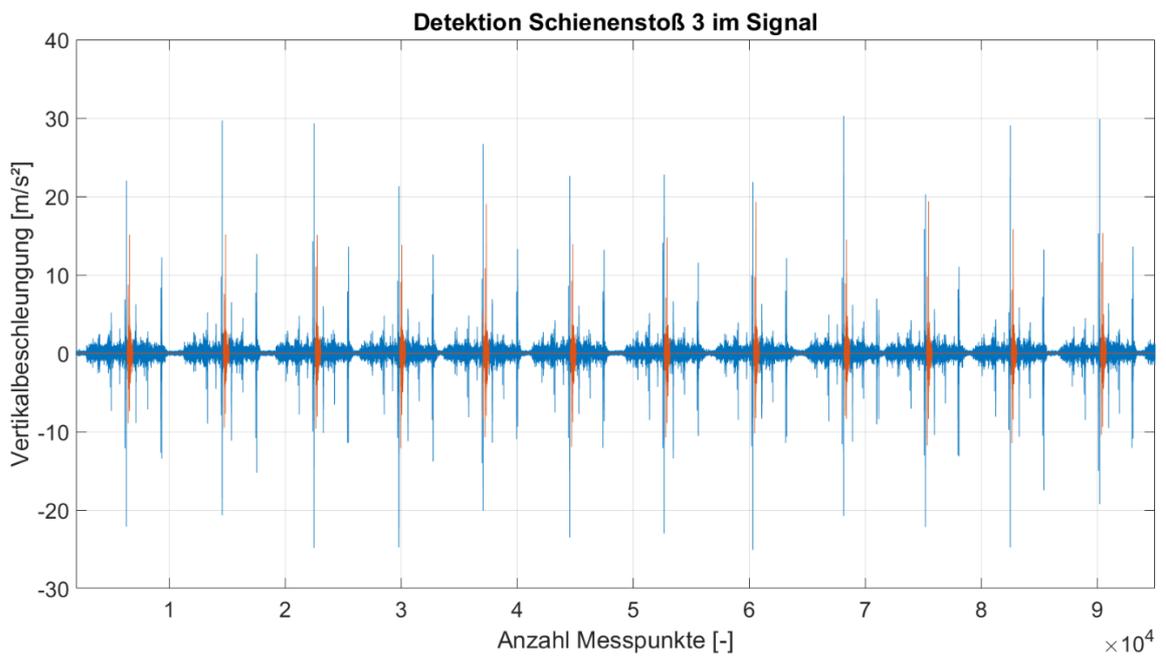


Abbildung 80: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 3 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

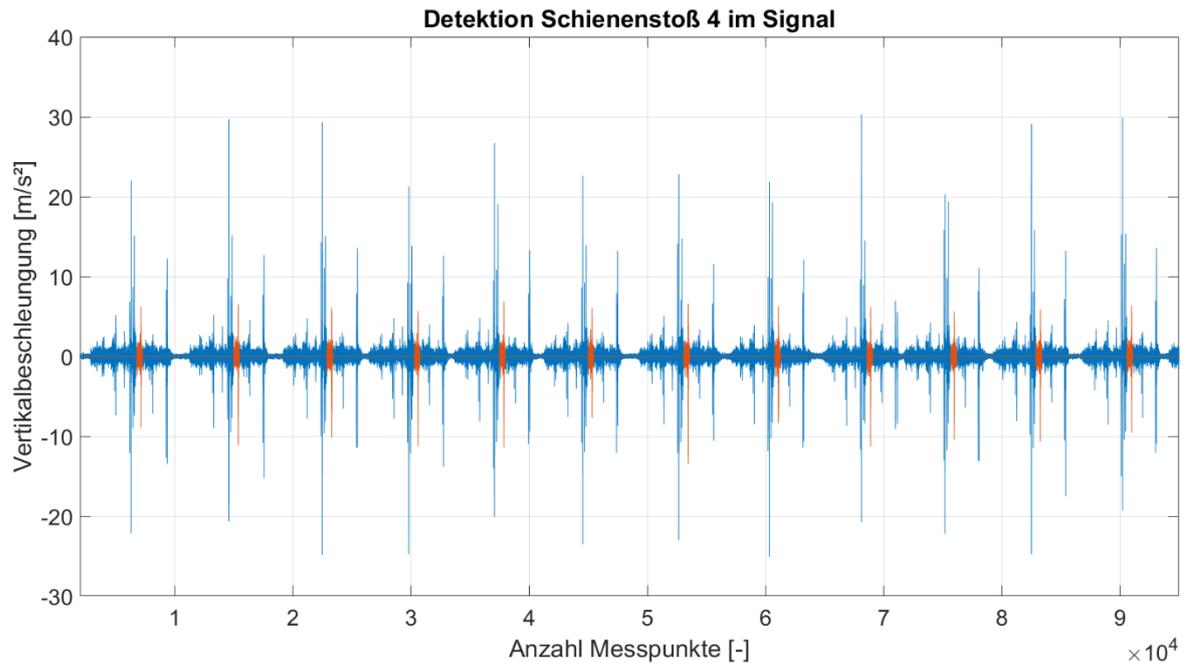


Abbildung 81: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 4 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

Bei den Fehlertyp „Punktuelle Instabilität“ wurden 11 aus 12 Punktuelle Instabilitäten richtig erkannt (Abb. 82). Die nicht erkannte Punktuelle Instabilität in der ersten Runde kann aufgrund eines Fehlers in der Messung liegen, da die Spektrale Beschleunigungsdichte dieses Bereichs auch anders aussieht (Vergleich Abb. 63).

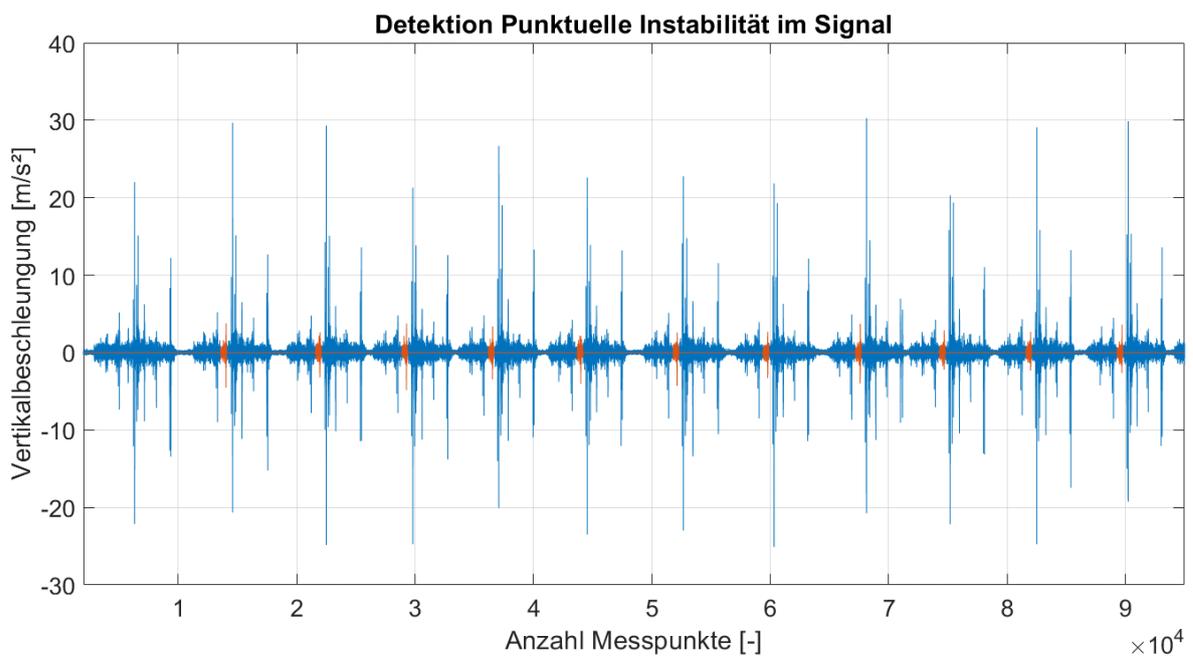


Abbildung 82: Mittels Frequenzanalyse erkannte punktuelle Instabilität in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

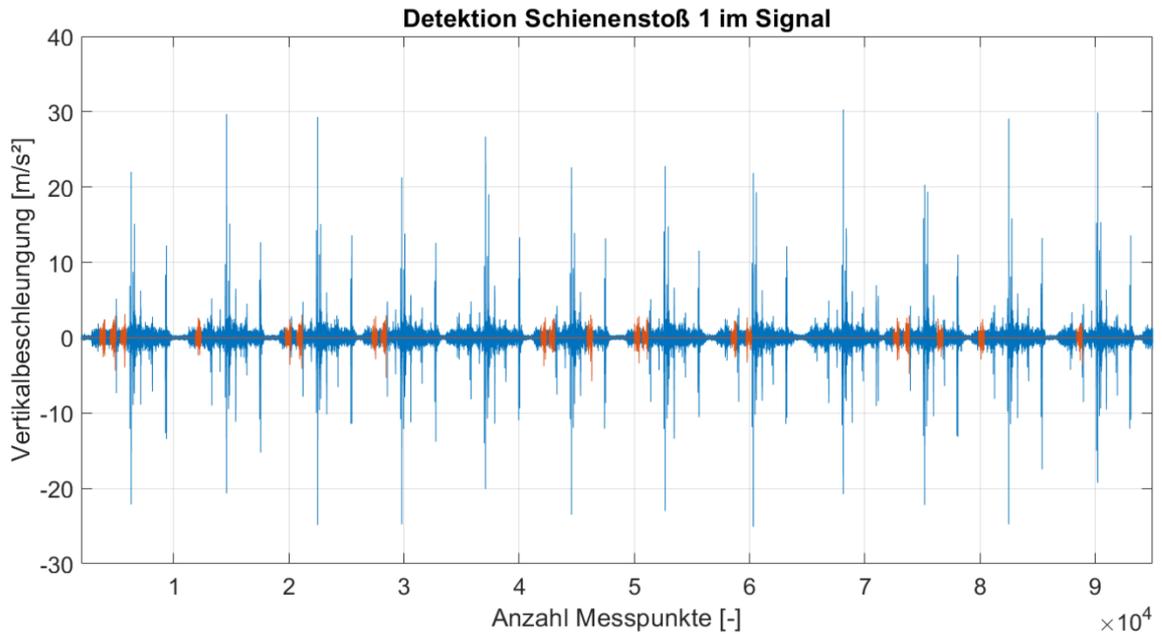


Abbildung 83: Mittels Frequenzanalyse erkannter Schienenstoß 1 in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

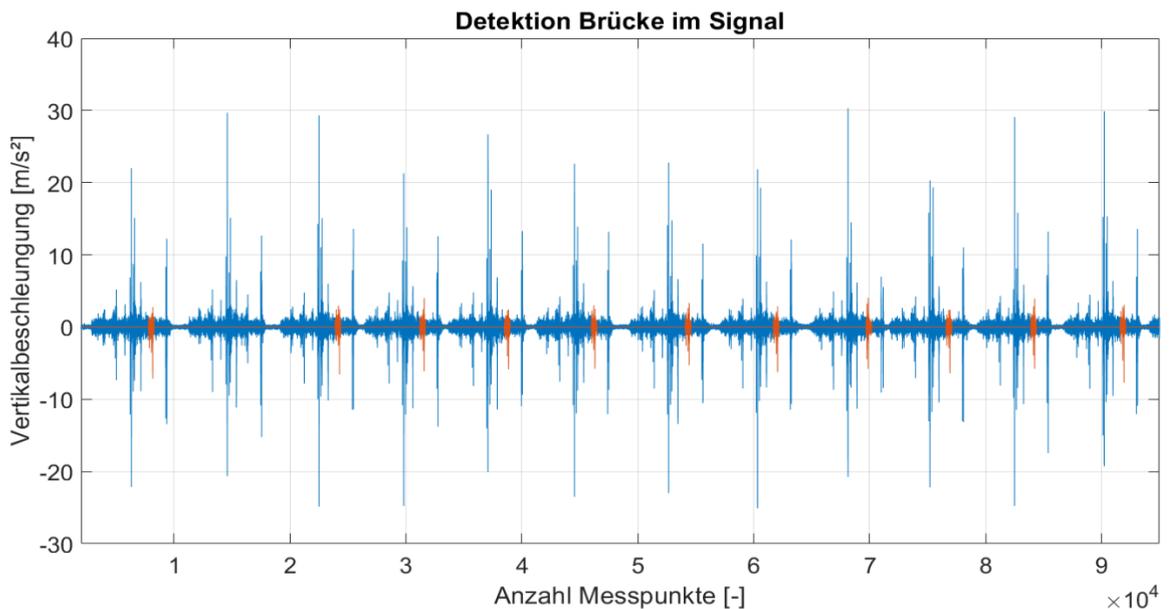
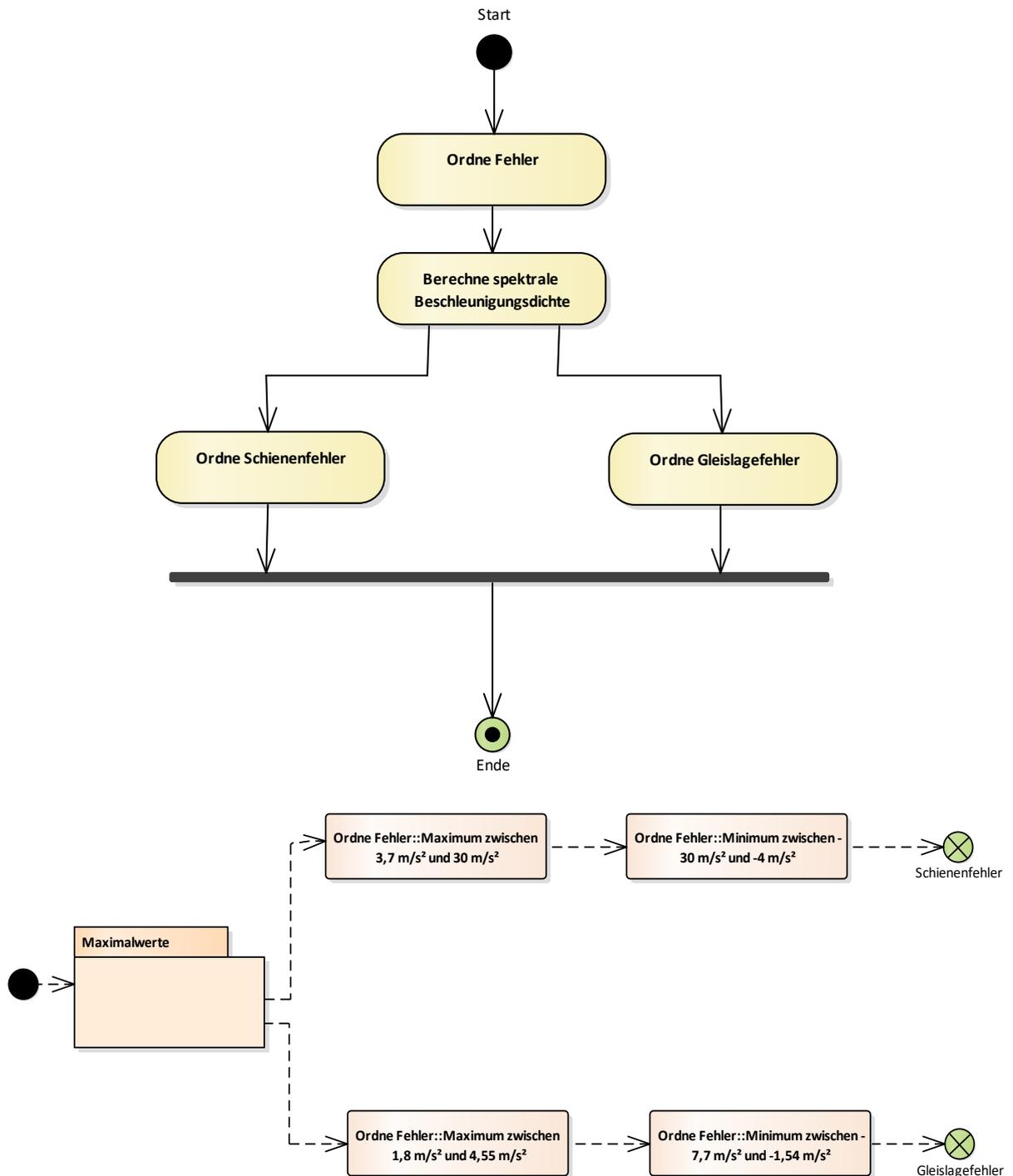


Abbildung 84: Mittels Frequenzanalyse erkannte Brücke in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

Bei dem ersten Schienenstoß wurden die Fehler nur zum Teil richtig erkannt (Abb. 83). Das kann aufgrund der Position des Fehlers im Modell liegen. Da der Schienenstoß 1 am Anfang der Messung überfahren wird, werden aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten verschiedene vertikale Beschleunigungen gemessen. Die vertikale Beschleunigung wird durch die Anfangsbeschleunigung bis zum Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit beeinflusst. Ändert man die Position des Startpunkts für die Rundenmessung ergeben sich Beschleunigungen im Bereich der anderen im Modell enthaltenen Schienenstößen.

Auch bei dem Fehlertyp „Brücke“ wurden 11 aus 12 Fehlern richtig erkannt (Abb. 84).
 Zusätzlich wurde eine Logik (Abb.85) in Matlab erstellt, die zwischen Gleislagefehler und Schienenfehler unterscheidet. Die Gleislagefehler beinhalten die Fehlertypen „punktuelle Instabilität“ und „Brücke“. Die Schienenfehler beinhalten die Fehlertypen Schienenbrüche und die Schienenstöße.



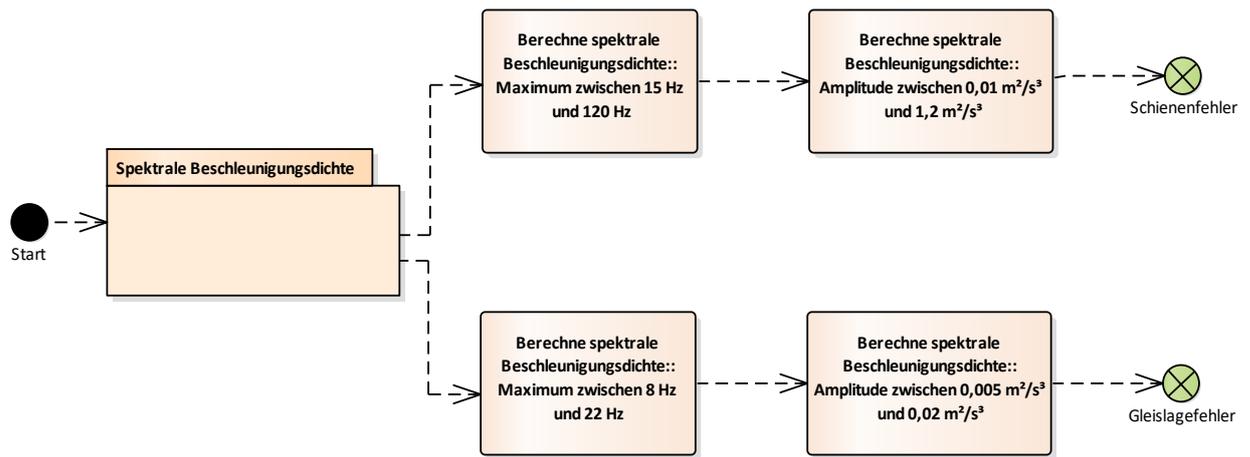


Abbildung 85: Logik für die Zuordnung der Fehler anhand der spektralen Beschleunigungsdichte und der Vertikalbeschleunigung

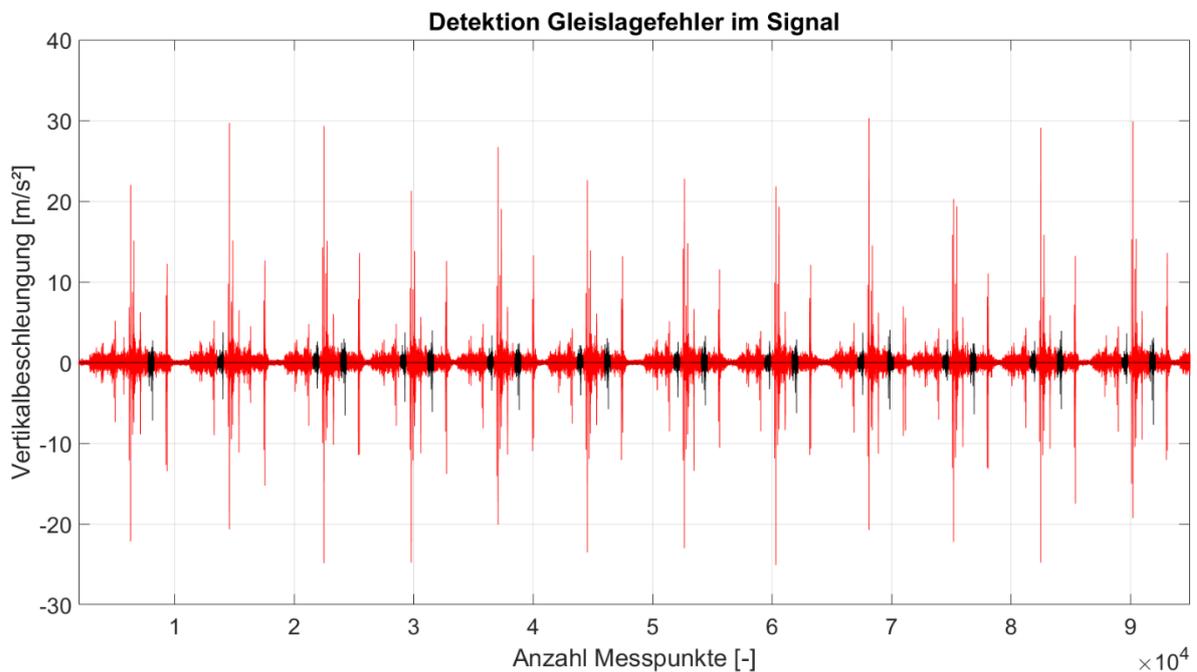


Abbildung 86: Mittels Frequenzanalyse erkannte Gleislagefehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

Man kann in Abbildung 86 gut erkennen, dass 22 aus 24 Gleislagefehler richtig erkannt wurden. Es wurden 11 aus 12 „Brücken“ und 11 aus 12 „punktuelle Instabilitäten“ erkannt. Bei der Detektion von Schienenfehler wurden 56 aus 60 richtig erkannt. Jeder Fehlertyp befindet sich zwölf Mal im Signal. Es wurde zusätzlich der Gleislagefehler „Brücke“ in Runde 2,4 und 9 als einen Schienenfehler falsch erkannt. Es wurden 24 aus 24 Schienenbrüche und 31 aus 36 Schienenstöße richtig erkannt. Der erste Schienenstoß wurde für die Detektion nicht betrachtet, da dieser Fehler eher ein Verhalten eines Gleisfehlers aufweist. Dies kann aufgrund des Einflusses der Anfangsbeschleunigung während der Messung zurückgeführt werden.

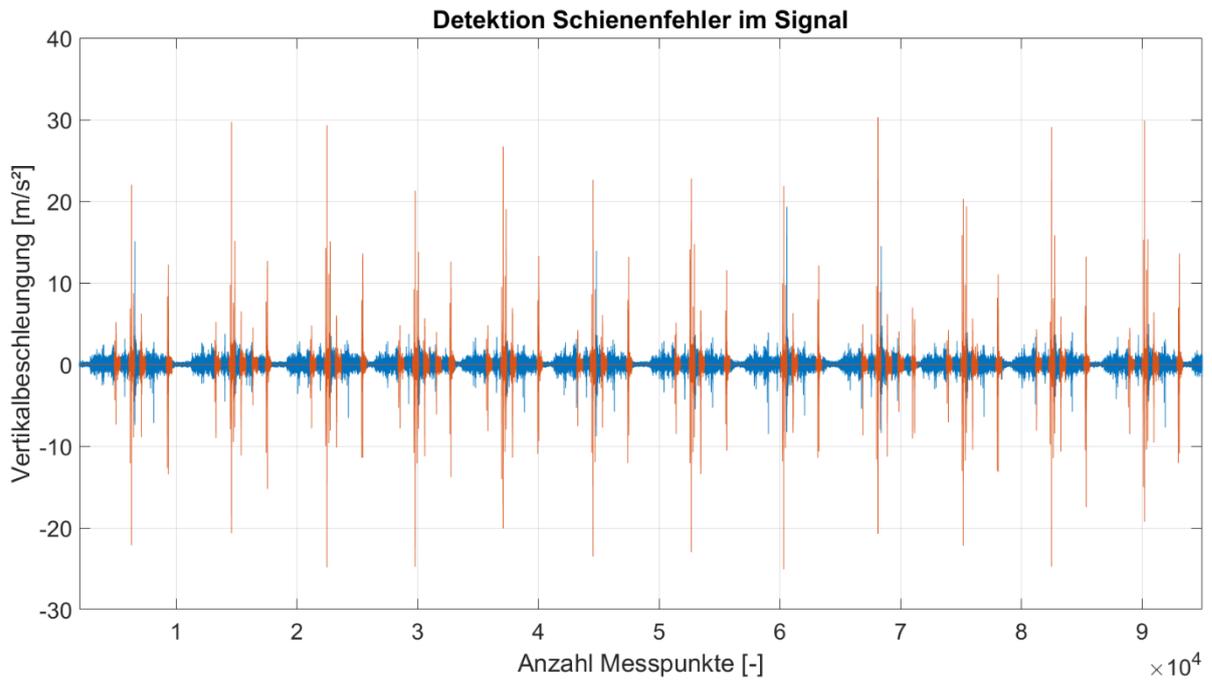


Abbildung 87: Mittels Frequenzanalyse erkannte Schienenfehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

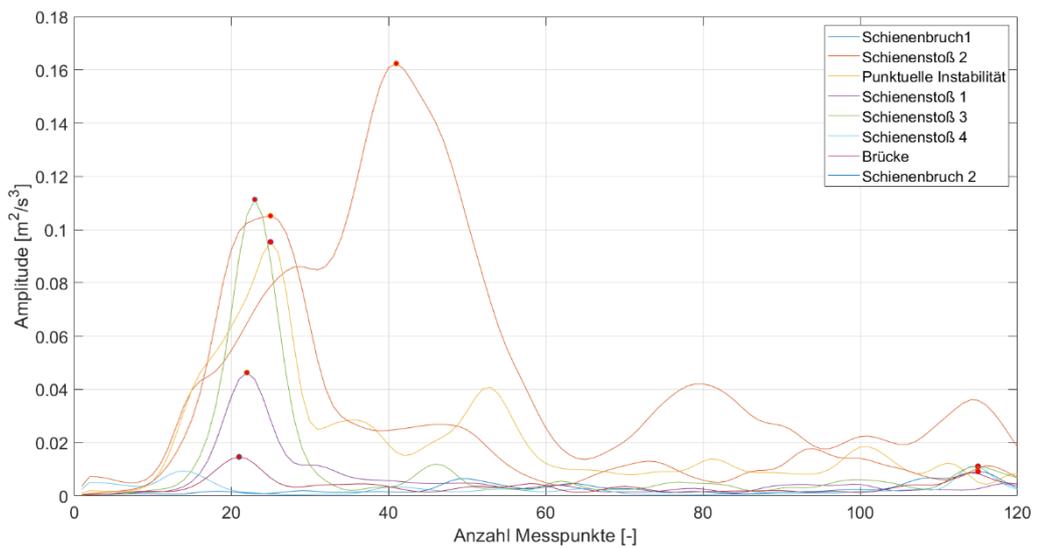


Abbildung 88: Mittels spektrale Beschleunigungsdichte erkannte Gleisfehler

8.5 Fehlertyp Längshöhenfehler

Zusätzlich wurden die Einwirkungen auf das Fahrzeug beim Überfahren eines Längshöhenfehlers untersucht und mit den Beschleunigungsverläufen im Bereich der punktuellen Instabilität verglichen. Es wurde eine Holzplatte an der tiefsten Stelle der punktuellen Instabilität im Modell mit einem Stahldraht befestigt (Abb.89). Im Vergleich zur punktuellen Instabilität ändert sich lediglich die Steifigkeit des Unterbaus. Die Geometrie bleibt jedoch gleich.



Abbildung 89: Längshöhenfehler mit Holzplatte im Modell

Man kann erkennen, dass hier statt wiederholender Instabilitäten ein Abbrems- Effekt erfolgt (Abb. 90). Beim Überfahren des Längshöhenfehlers wurde eine maximale positive Beschleunigung von $2.075 \frac{m}{s^2}$ und eine maximale negative Beschleunigung von $-3.7 \frac{m}{s^2}$ gemessen. Kurz vor dem starken Ausschlag erfährt das Fahrzeug eine kleine negative Beschleunigung von $-2.926 \frac{m}{s^2}$. Im Vergleich zu der punktuellen Instabilität (Abb. 91) erfolgen bei dem Längshöhenfehler nur zwei Ausschläge in der Beschleunigung, statt wiederholende Schwingungen, wie bei der punktuellen Instabilität. Bei der punktuellen Instabilität sind die vertikalen Beschleunigungen dem Längshöhenfehler sehr ähnlich. Das Messfahrzeug weist, im Vergleich zur Überfahrt der punktuellen Instabilität, vor und nach dem Überfahren des Längshöhenfehlers einen deutlich stabileren Fahrzeuglauf auf. Im Bereich der punktuellen Instabilität schwingt das Fahrzeug vor, während und nach dem Überfahren dieser deutlich stärker.

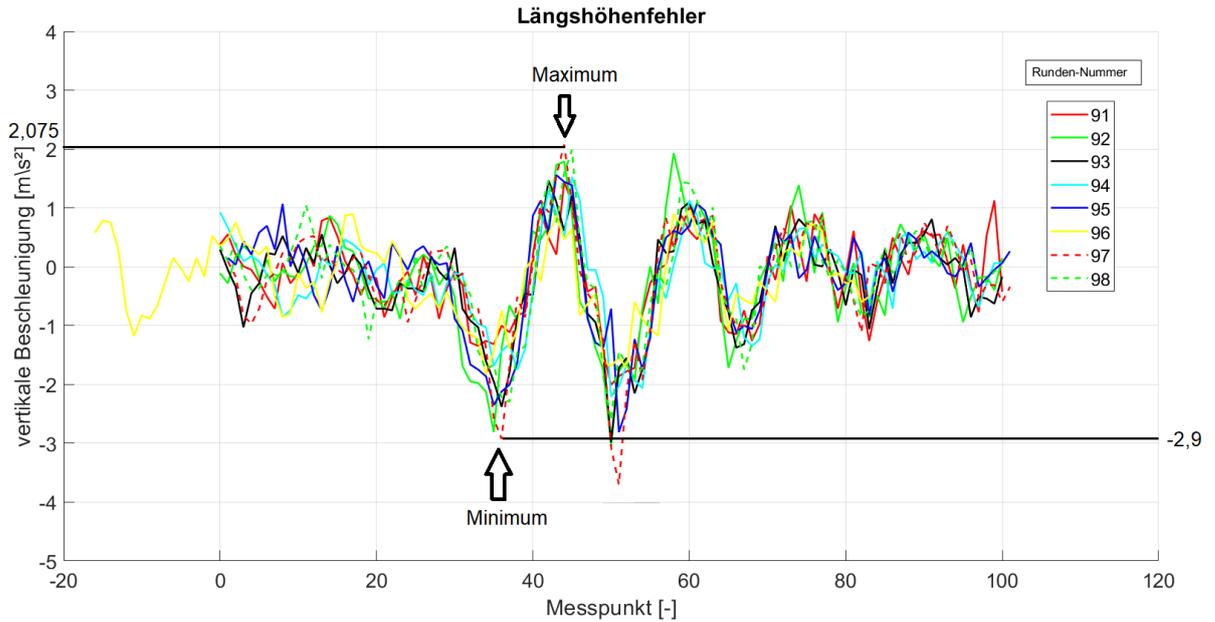


Abbildung 90: Fehlertyp Längshöhenfehler

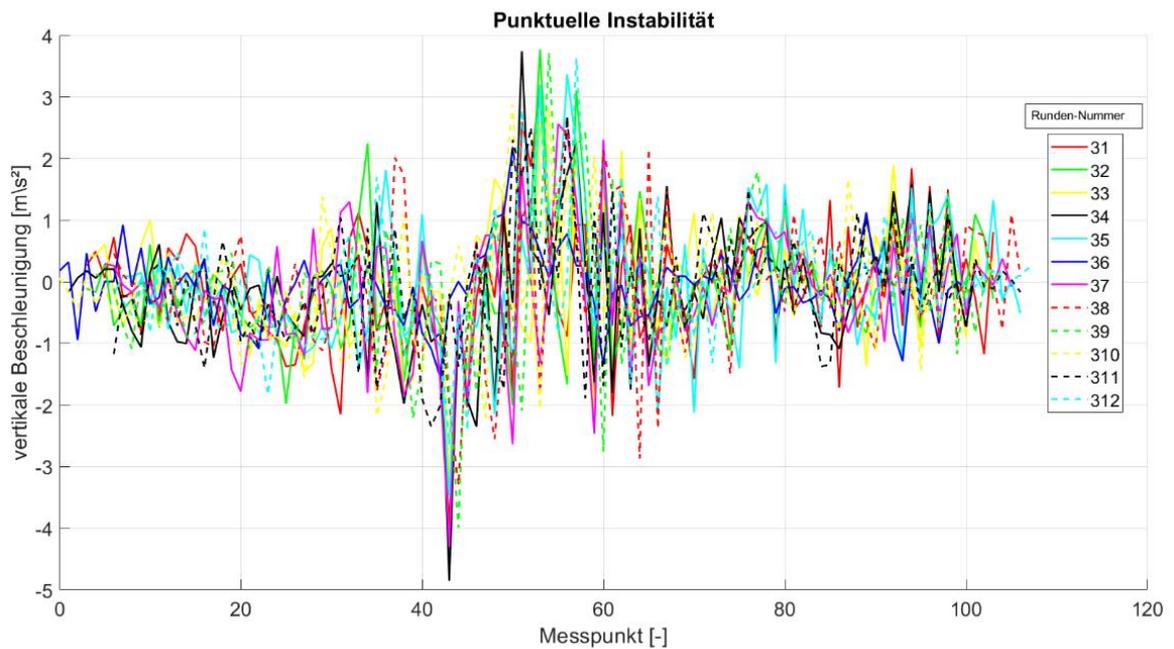


Abbildung 91: Fehlertyp punktueller Instabilität

Durch die Untersuchung des Längshöhenfehlers mittels der Fast-Fourier-Transformation (Abb. 92) kann erkannt werden, dass die Reaktion des Fahrzeugs beim Überfahren der Längshöhenfehler ähnlich ist zum Verhalten im Bereich der punktuellen Instabilität (Abb. 93). Die stärkste Frequenz des Längshöhenfehlers liegt bei 31,25 Hz. Die Amplitude beträgt $0,9337 \frac{m}{s^2 \cdot Hz}$. Das Maximum bei der punktuellen Instabilität liegt bei 23,44 Hz. Zwischen den Frequenzen 7,81 Hz und 19,5 Hz des Längshöhenfehlers befindet sich ein Tiefbereich mit

einer Amplitude von $0,1486 \frac{m}{s^2/Hz}$. Bei der punktuellen Instabilität befindet sich der Tiefbereich zwischen 39,06 Hz und 54,69 Hz. Man kann zudem erkennen, dass ab 39,06 Hz bis 120 Hz die Amplituden im Bereich des Längshöhenfehler einen Maximalwert von $0,1437 \frac{m}{s^2/Hz}$ erreichen. Im Gegensatz zum Längshöhenfehler erhöhen sich die Amplituden bei der punktuellen Instabilität ab dem Tiefbereich, statt einen konstanten Verlauf. Im Allgemeinen sind die Amplituden der punktuellen Instabilität kleiner als bei den Längshöhenfehler.

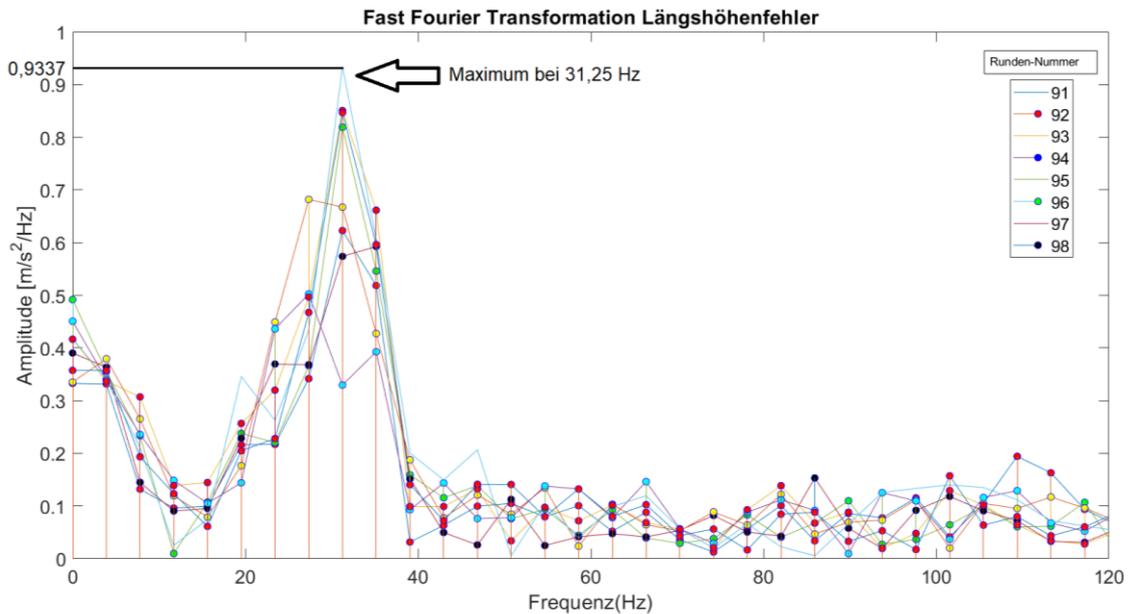


Abbildung 92: Fast Fourier Transformation Längshöhenfehler

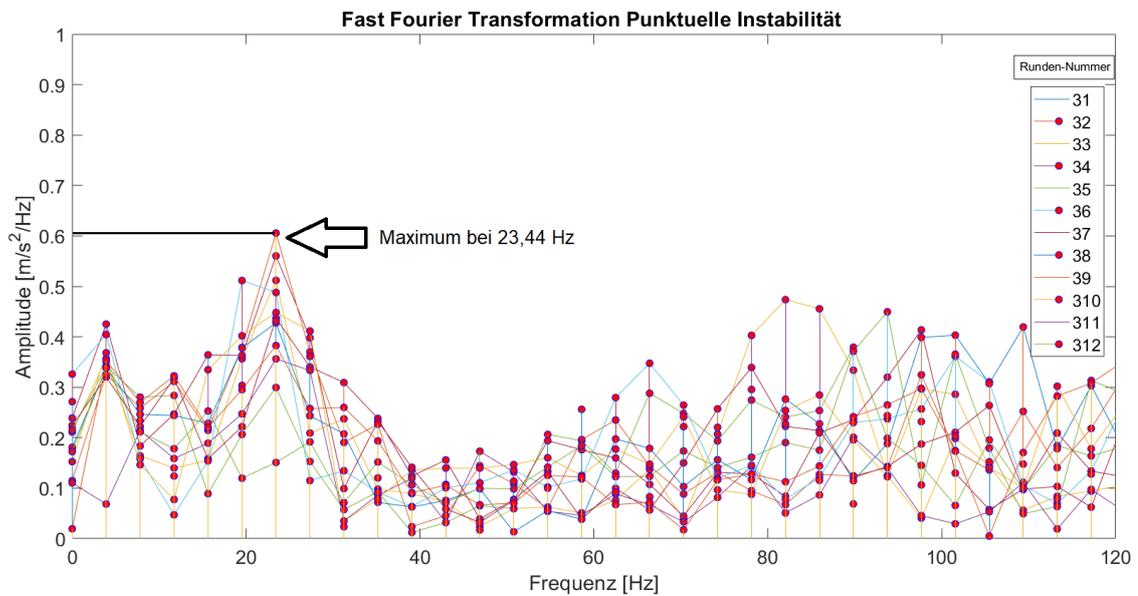


Abbildung 93: Fast Fourier Transformation Punktuelle Instabilität

Die spektrale Beschleunigungsdichte des Längshöhenfehlers (Abb. 94) zeigt einen großen Sprung in der Energie bei 18 Hz. Dort ist die maximale Amplitude $0,021 \frac{m^2}{s^3}$ hoch. Ab 27 Hz strebt die Energie gegen 0 Hz. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug nur mit tiefen Frequenzen bei der Überfahrt des Längshöhenfehlers angeregt wird. Bei der punktuellen Instabilität befindet sich das Maximum bei 13 Hz. Die Amplitude beträgt dort $0,014 \frac{m^2}{s^3}$. Ein weiterer Peak wäre bei 117 Hz, wobei im Vergleich zum Längshöhenfehler die Amplituden im gleichen Bereich gegen 0 streben.

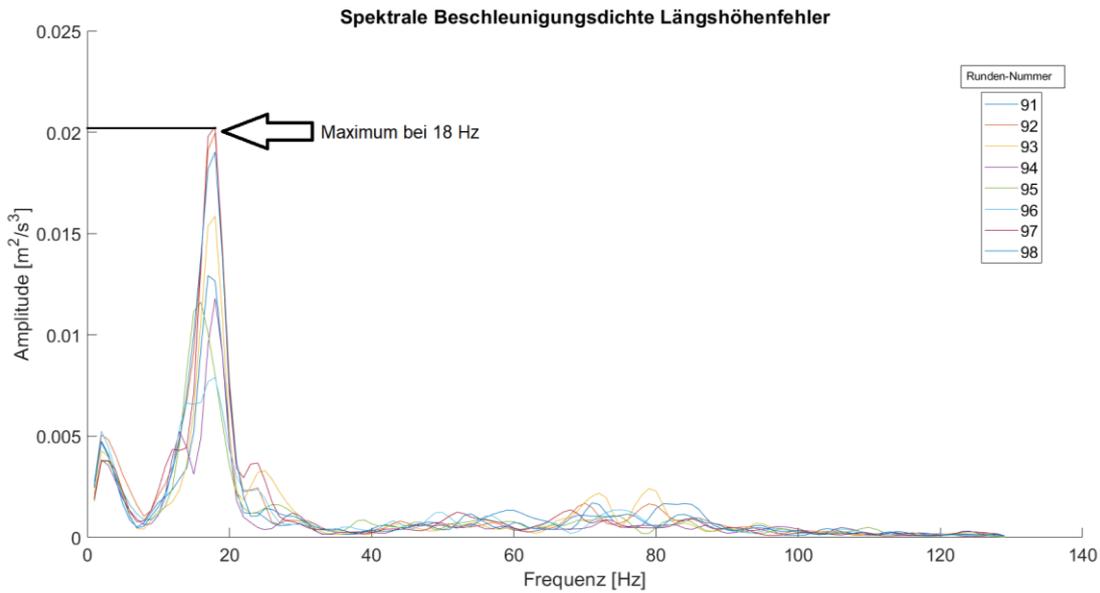


Abbildung 94: Spektrale Beschleunigungsdichte Längshöhenfehler

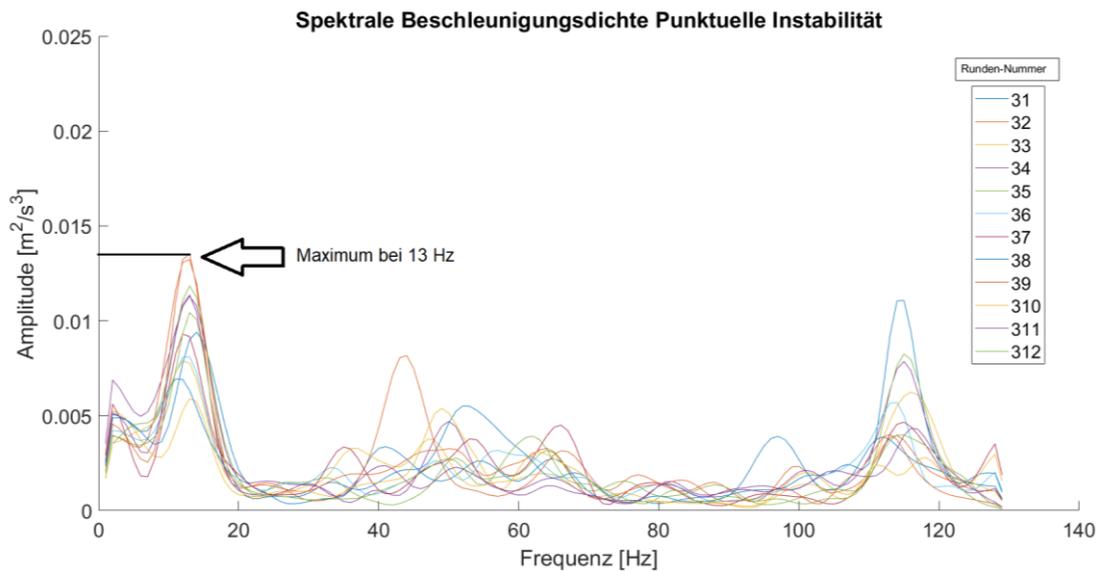


Abbildung 95: Spektrale Beschleunigungsdichte Punktuelle Instabilität

Hier wurde auch die Logik zur Detektion der Fehler für den Fehlertyp „Längshöhenfehler“ in Matlab umgesetzt. Das Fehlertyp „Längshöhenfehler“ wurde in allen Runden richtig erkannt (Abb. 96). Im Vergleich zu die frühere Punktuelle Instabilität an der gleichen Stelle, wurden 8 aus 8 Längshöhenfehler erkannt, statt 11 aus 12 bei der punktuellen Instabilität.

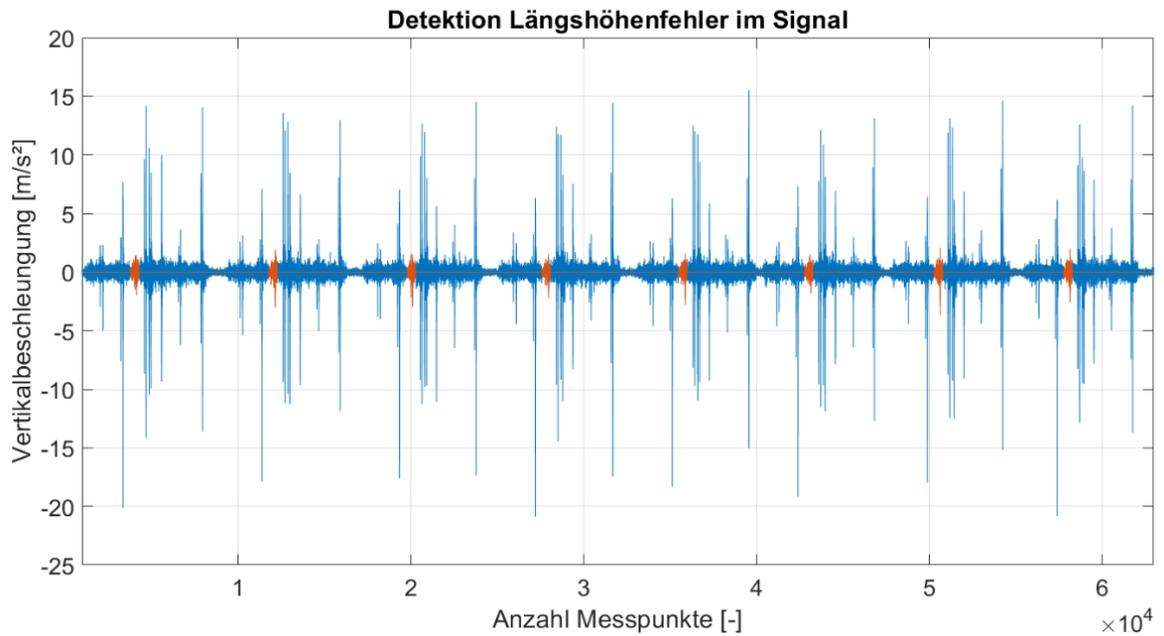


Abbildung 96: Mittels Frequenzanalyse erkannte Längshöhenfehler in der gemessenen Vertikalbeschleunigung

8.6 Auswertung der Wavelet-Analyse

Die Wavelet-Toolbox in Matlab bietet Funktionen und Anwendungen zur Durchführung der Zeit-Frequenz-Analyse mittels der kontinuierlichen Wavelet-Transformation (CWT) an. Dies ermöglicht die Analyse der Signale hinsichtlich der Frequenzinhalt und deren Änderung in Abhängigkeit von der Zeit. Zunächst wurde das passende Wavelet festgelegt. Dabei wurde sich an dem Referenzmuster in Abbildung 97 orientiert und ein „sym4“ Wavelet ausgewählt. Die Größe des Waveletkoeffizienten gibt die Stärke der Übereinstimmung zwischen dem Messschrieb und dem festgelegten Wavelet an.

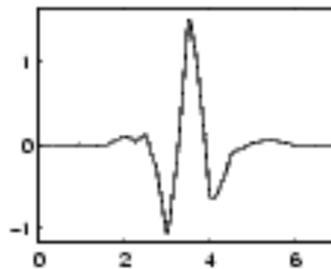


Abbildung 97: Sym4 Motherwavelet [33]

Es wurde zunächst ein Savitzky-Golay Filter mit einer Länge von 11 angewandt, um einen Glättungseffekt zu erzeugen (Abb. 98). Hierfür wurde folgender Code in Matlab angewendet:

```
figure
plot(z_Richtung, 'b')
s_goaly_wert_z = 11; %Savitzky Golay Filter
z_Richtung_filtered = sgolayfilt((z_Richtung), 5, s_goaly_wert_z);
hold on
plot(z_Richtung_filtered, 'r')
grid on
xlabel('Zeit [s]');
ylabel('Beschleunigung in vertikaler Richtung [m/s²]')
```

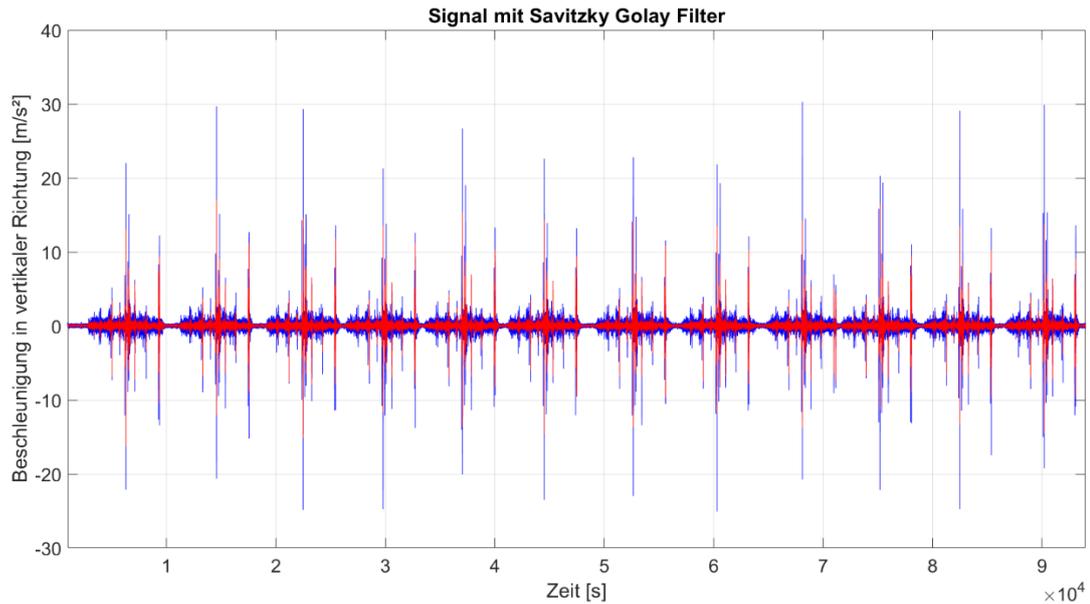
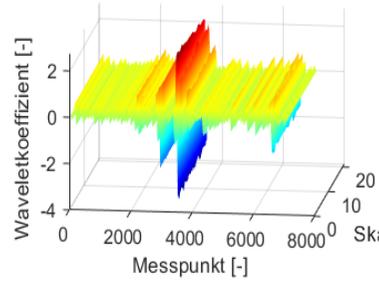


Abbildung 98: Messschrieb mit Savitzky-Golay Filter

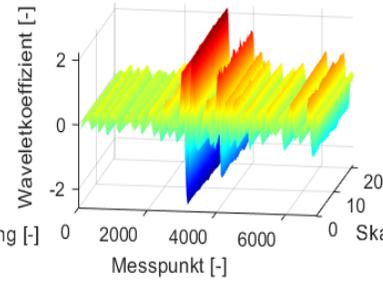
Es wurde eine Skalierung der Wavelets zwischen 200 und 220 vorgenommen. Darauf aufbauend wurde der Waveletkoeffizient für zwölf Messrunden berechnet. Folgender Code wurde für die Wavelet-Analyse für jede Runde angewendet und in einer Figur geplottet.

```
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered,200:220,'sym4','plot'); colormap
jet;          % kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT)
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
```

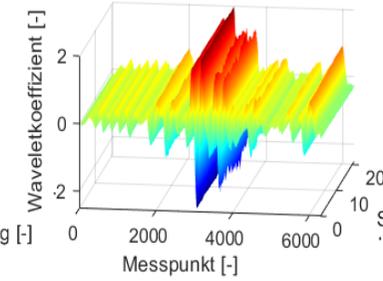
Wavelet Analyse Runde 1



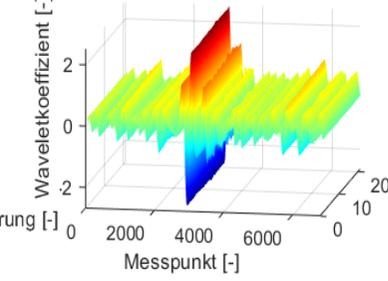
Wavelet Analyse Runde 2



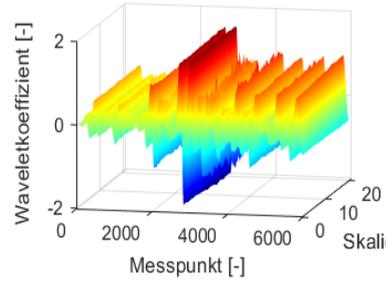
Wavelet Analyse Runde 3



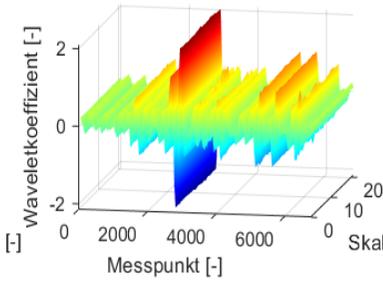
Wavelet Analyse Runde 4



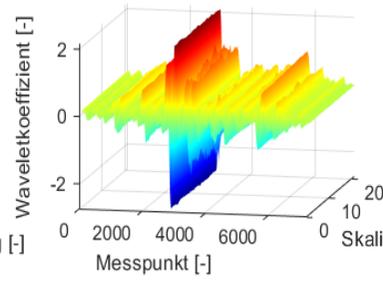
Wavelet Analyse Runde 5



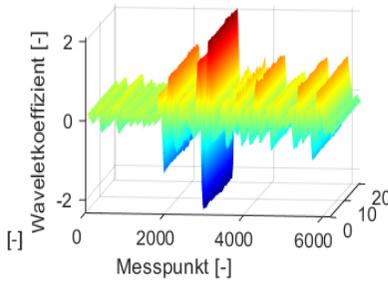
Wavelet Analyse Runde 6



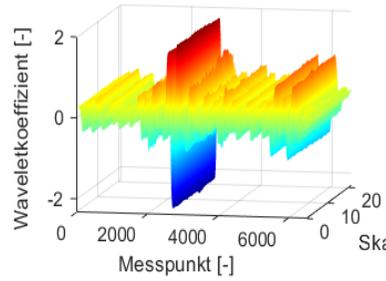
Wavelet Analyse Runde 7



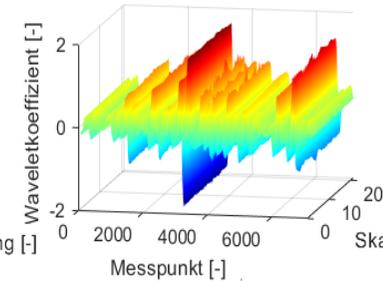
Wavelet Analyse Runde 8



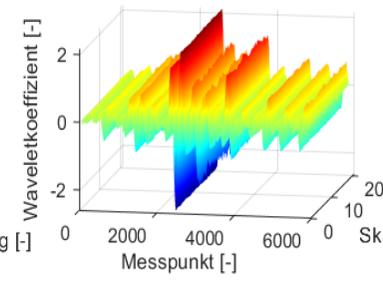
Wavelet Analyse Runde 9



Wavelet Analyse Runde 10



Wavelet Analyse Runde 11



Wavelet Analyse Runde 12

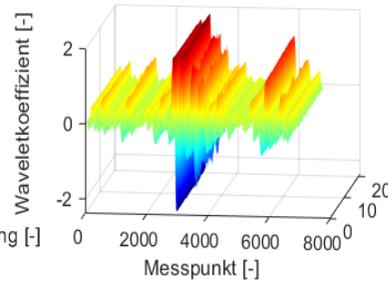


Abbildung 99: Wavelet-Analyse mit sym4 für zwölf Runden

Eine starke Übereinstimmung zwischen dem Wavelet und dem Messschrieb wird in Abbildung 99 durch einen stark rot gefärbten Bereich des Waveletkoeffizienten gekennzeichnet. Die berechneten Ergebnisse in Abbildung 99 zeigen die mittels Wavelet-Analyse erkannten punktuellen Instabilitäten für zwölf Fahrtrunden. Alle Runden zeigen gute Übereinstimmungen bei einem Waveletkoeffizienten von 2. Es ist zu erkennen, dass in den Runden 5,10 und 12 sich eine zweite Übereinstimmung am Ende der jeweiligen Runde befindet. Die Positionen der Übereinstimmungen wurden mit den originalen Positionen im Messschrieb verglichen. Es ergab sich, dass die Stellen mit dem Gleisfehler Brücke übereinstimmen. Der Gleisfehler Brücke weist, analog zur punktuellen Instabilität, ein ähnliches Verhalten in der vertikalen Beschleunigung auf. Der Waveletkoeffizient beträgt bei der Brücke ca. 1. Mit der Wavelet-Analyse konnte die punktuellen Instabilitäten im Messschrieb gut erkannt werden, aber im Vergleich zur der Fast Fourier Transformation und die spektrale Beschleunigungsdichte, kann es zur falschen Detektion/ Klassifizierung von Fehler kommen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine Logik zu entwickeln die zur Detektion von Fehlern am Gleis verwendet werden kann. Die Fehler wurden in einem Fahrweg-Fahrzeug-Modell erzeugt. Zur Fehlererkennung wurde die vertikale Beschleunigung kontinuierlich mit einem Sensor gemessen. Die Messschriebe wurden dann in die Software Matlab importiert, sodass ein Gesamtverlauf der Beschleunigungsdaten der zwölf gemessenen Runden als Messschrieb angegeben wird. In einem ersten Schritt wurden die Bereiche der einzelnen Fehler im Messschrieb durch die bekannten Positionen im Modell betrachtet. Die Merkmale jedes Fehlertyps wurde anhand der Vertikalbeschleunigung im Frequenzbereich untersucht. Für eine effiziente Analyse wurden in den entsprechenden Abbildungen die zwölf Runden jedes Fehlertyps dargestellt. Hierbei wurden jeweils die Positionen und Maxima sowie Minima mit dem entsprechenden Wert der vertikalen Beschleunigung im Frequenzbereich ermittelt.

Schienenbrüchen verursachen starke Ausschläge in der Beschleunigung. Beim ersten Schienenbruch wurde eine Beschleunigung von $29,4 \frac{m}{s^2}$ erreicht. Im Gegensatz dazu erfährt das Fahrzeug beim Überfahren der punktuellen Instabilität mehrere, kleine periodische Veränderungen in der Beschleunigung. Hier liegt das Maximum bei $3,7 \frac{m}{s^2}$. Bei den Schienenstößen verhält sich das Fahrzeug aufgrund der unterschiedlichen Fehlergeometrien, trotz des gleichen Fehlertyps, unterschiedlich. Beispielsweise erfährt das Fahrzeug beim Überfahren des ersten Schienenstoßes eine maximale vertikale Beschleunigung von $3,4 \frac{m}{s^2}$ und beim dritten Schienenstoß eine Beschleunigung von $19,4 \frac{m}{s^2}$. Für eine zusätzlich Klassifizierungsmöglichkeit der Fehler wurde deshalb das Frequenzverhalten mit der Fast Fourier Transformation und der spektralen Beschleunigungsdichte untersucht.

In einem nächsten Schritt wurde statt der punktuellen Instabilität ein Längshöhenfehler im Modell installiert und die Messungen erneut durchgeführt. Es erfolgte ein Vergleich zwischen den beiden Fehlern Längshöhenfehler und punktueller Instabilität. Es konnte ein Unterschied in der Beschleunigung und somit auch im Frequenzverhalten festgestellt werden. Die Untersuchung der Beschleunigungssignale zeigt, dass beim Längshöhenfehler ein Abbremsungseffekt, statt wiederholende kleine Ausschläge, wie bei der punktuellen Instabilität, entsteht. Die Beschleunigung beträgt dort $-21 \frac{m}{s^2}$.

Ergänzend zur FFT und SBD wurde eine Wavelet-Analyse mit der Software Matlab für jede gemessene Runde durchgeführt. Die punktuellen Instabilitäten für die zwölf Fahrtrunden wurden mit einem stark rot gekennzeichneten Waveletkoeffizienten erfolgreich erkannt.

In einem letzten Schritt wurde die Logik für die Erkennung und Klassifizierung der Fehler anhand ihres Frequenzverhaltes mit der Software Enterprise entwickelt (Abb. 50 Abb.51, Abb.

63 und Abb. 77). Die Logik wurde anschließend in der Software Matlab implementiert. Die unterschiedlichen Fehler wurden mit der Logik erfolgreich im Messschrieb erkannt und können unterscheiden werden. Gegebenenfalls kann die Logik im Real System mit an Regelzügen angebrachte Beschleunigungssensoren Anwendung finden. Dabei muss eine Anpassung der in dieser Arbeit definierten Grenzen zur Erkennung der Fehler erfolgen. Zusätzlich kann man in der Zukunft das Verhalten des Fahrzeugs beim Überfahren andersartige Fehler wie z.B. Squats (Einsenkung auf dem Schienenkopf) oder Schlupfwellen untersuchen. Weiteren ist eine Untersuchung, falls sich zwei Fehlertypen überlagern, interessant. Es könnte einen Schienenbruch auf einer Punktuellen Instabilität liegen. Die Frage wäre halt, ob man trotz des starken Ausschlags aufgrund des Schienenbruchs die Merkmale der punktuellen Instabilität immer noch identifizieren kann.

10 Literaturverzeichnis

- [1] ThomasHSB, *Schienenstoß*. [Online] Verfügbar unter: https://www.google.de/search?biw=1536&bih=674&tbm=isch&sa=1&ei=iw2kW8LVCMXhkgXB4YKgDA&q=schienensto%C3%9F&oq=schiene&gs_l=img.3.1.35i39k1I2j0I8.141972.142999.0.144352.6.6.0.0.0.260.722.0j4j1.5.0...0...1c.1.64.img.1.5.721...0i19k1.0._sWzPWJsKLQ#img-grc=9qMNTtpjirOuPM:. Zugriff am: Sep. 20 2018.
- [2] Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, „Eisenbahn-Unfalluntersuchungsstelle Jahresbericht 2014“, https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/Shared-Docs/Downloads/EUB/Jahresberichte/Jahresbericht_2014.pdf?__blob=publication-File&v=3, 2014.
- [3] Bundesstelle für Eisenbahnunfalluntersuchung, *Eisenbahnunfalluntersuchung*. [Online] Verfügbar unter: https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/EUB/DE/home_node.html. Zugriff am: Okt. 22 2018.
- [4] S. Rapp, „Modell zur Identifizierung von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper in konventioneller Schotterbauweise“. Dissertation, Institut für Eisenbahn und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart Deutschland, 2017.
- [5] H. Freystein, „Wartung und Instandhaltung des Eisenbahnfahrweges“, *Deine Bahn*, 2009, S. 16–19, 2009, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/322429/>.
- [6] M. Allweil, *Veranstaltung DMG Bezirksgruppe Mitte Fahrwegmessung bei der DB Netz AG*, 2014.
- [7] R. Kipper und U. Gerber, *Gleislagefehler-Ursachen, Messung und Bewertung*, 2013.
- [8] R. Kipper, U. Gerber und J. Schmeister, „Bestimmung langweiliger Gleisverformungen und deren Bewertung“, *El-Eisenbahningenieur*, Februar 2013, 2013, <https://docplayer.org/56351774-Bestimmung-langweiliger-gleisverformungen.html>.
- [9] B. M. Hopkins, „A Wavelet-Based Rail Surface Defect Prediction and Detection Algorithm“. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, 2012.
- [10] B. An, P. Wang, J. Xu, R. Chen und D. Cui, „Observation and Simulation of Axle Box Acceleration in the Presence of Rail Weld in High-Speed Railway“, 2017.
- [11] Z. Wei, A. Núñez, Z. Li und R. Dollevoet, *Evaluating Degradation at Railway Crossings Using Axle Box Acceleration Measurements*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5676618/>. Zugriff am: Sep. 19 2018.
- [12] M. Molodova, „Detection of early squats by axle box acceleration“. Dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Niederlande, 2012.

- [13] K. Göbel, G. Staccone, J. Niessen, R. Hellman und H. Petzold, „Fahrbahnerkundung mit dem Georadar-Verfahren- Teil 1“, http://www.gicon.de/uploads/tx_qdveroeffentlichungen/Fahrbahnerkundung_mit_Georadar_Teil_1_EI_08-2016_S_38_41.pdf, 2016.
- [14] K. Göbel, G. Staccone, J. Niessen, R. Hellman und H. Petzold, „Fahrbahnerkundung mit dem Georadar-Verfahren-Teil 2“, https://www.gicon.de/uploads/tx_qdveroeffentlichungen/Fahrbahnerkundung_mit_Georadar_Teil_2_EI_09-2016_S_108_113_01.pdf, 2016.
- [15] R. Menius und V. Matthews, *Bahnbau und Bahninfrastruktur : Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen*, 92017. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [16] § 17 BOStrab - Einzelnorm. [Online] Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/_17.html. Zugriff am: Sep. 05 2018.
- [17] Gleisbau-Welt, *Schiene*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/schiene/>. Zugriff am: Sep. 05 2018.
- [18] V. Matthews, *Bahnbau*, 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2011.
- [19] Feine Module, *Gleise*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.feine-module.de/vorbild/gleise.html>. Zugriff am: Sep. 20 2018.
- [20] Informacje SIMODRAIN® | Simona AG, *Wassereinwirkungen und Druckverhältnisse*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.uhmw-pe.de/pl/service/news/simodrain.html>. Zugriff am: Sep. 05 2018.
- [21] K.-O. Edel, Hg., *Internationales Symposium „Schienenfehler“*, 2000.
- [22] A. Oehler, „Entwicklung einer Methode zur Einzelfehlererkennung und -klassifikation im Gleisoberbau“. Masterarbeit, Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik, University of Applied Sciences, Mittweida, 2014.
- [23] Wikimedia Commons, *Schienenbruch*. [Online] Verfügbar unter: https://www.google.de/search?q=schienenbruch&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiRstH7v8rdAhVDy-hoKHTuiCzsQ_AUIDigB&biw=1536&bih=674#imgrc=qV6aZ_IgWhmRZM:. Zugriff am: Sep. 20 2018.
- [24] M. Scheffbuch, „Erkennung von Schienen- und Gleislagefehlern anhand der kontinuierlich gemessenen Beschleunigung im Modell“. Bericht, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart Deutschland, 2018.
- [25] Gleisbau-Welt, *Schlammstelle*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/unterbau/>. Zugriff am: Sep. 17 2018.
- [26] S. Sack, „Ausarbeitung der Charakteristik und Maßnahmen für die Instandsetzung Ausarbeitung der Charakteristik und Maßnahmen für die Instandsetzung von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper in Schotterbauweise“. Masterarbeit, Institut für Eisenbahn und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart Deutschland, 2017.

- [27] H. Freystein und K. Geißler, „Interaktion Gleis/Brücke bei Stahlbrücken mit Beispielen“, *Stahlbau*, Jg. 82, Nr. 2, S. 78–86, 2013.
- [28] UNSW Sydney, „FFT Example“.
- [29] Prof Dr Jürgen Pöschel, „Vorlesungsunterlagen Höhere Mathematik III für el, phys, kyb, mecha“, 2016.
- [30] P. Arenz, *Diskrete und Schnelle Fourier Transformation*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.math.uni-trier.de/~schulz/Prosem-0405/Arenz.pdf?id=13814>. Zugriff am: Sep. 07 2018.
- [31] K.-D. Kammeyer und K. Kroschel, *Digitale Signalverarbeitung: Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen ; mit 33 Tabellen*, 6. Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [32] Alan V. Oppenheim and George C. Verghese, *Signals, Systems and Inference, Chapter 10: Power Spectral Density*, 2010.
- [33] Universität Bayreuth, „Zeitreihenanalyse“.
- [34] *Butterworth-Filter*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.itwissen.info/Butterworth-Filter-Butterworth-filter.html>. Zugriff am: Sep. 16 2018.
- [35] B. M. Hopkins, „A Wavelet-Based Rail Surface Defect Prediction and Detection Algorithm“. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, 2012.

Anhang A Berechnungen

Gesamtcode wird als eine Funktion in Matlab umgesetzt:

```
function Bacherlorarbeit_2018()

close all
clc

%Datei

load x_z_Richtung_2.mat x_z_Richtung_2

%um Beschleunigung in m/s^2 zu erhalten

z_Richtung = x_z_Richtung_2./1365.3125.*9.81+10;

%Matrix x_lim (Intervall der Maxima)

x_lim =
[3750,11900,20000,27300,34550,42000,50150,57650,65500,72600,79850,87
750;

4800,13100,20900,28300,35600,43050,51200,58800,66650,73750,81000,887
50;

5500,13800,21750,29050,36300,43700,51900,59550,67350,74450,81750,895
00;

6000,14500,22400,29600,36900,44200,52400,60100,67900,75000,82250,900
00;

6350,14700,22600,29850,37100,44600,52700,60350,68190,75250,82550,902
50;

6900,15150,23050,30350,37650,45100,53200,60850,68700,75750,83050,907
50;

7900,16150,24050,31350,38600,46050,54200,61800,69650,76700,84000,917
00;

9150,17350,25250,32500,39800,47250,55400,63000,70750,77850,85150,928
50];

%Bereich der 8 Fehlertypen mit den jeweiligen 12 Runden werden in 8
unterschiedliche Vektoren dargestellt

x1= [z_Richtung(3850:4150),z_Richtung(12000:12300),z_Rich-
tung(20100:20400),z_Richtung(27400:27700),z_Rich-
tung(34650:34950),z_Richtung(42100:42400),z_Rich-
tung(50250:50550),z_Richtung(57750:58050),z_Rich-
tung(65600:65900),z_Richtung(72700:73000),z_Rich-
tung(79950:80250),z_Richtung(87850:88150)];
```

```

x2= [z_Richtung(4900:5200), z_Richtung(13200:13500), z_Rich-
tung(21000:21300), z_Richtung(28400:28700), z_Rich-
tung(35700:36000), z_Richtung(43150:43450), z_Rich-
tung(51300:51600), z_Richtung(58900:59200), z_Rich-
tung(66750:67050), z_Richtung(73850:74150), z_Rich-
tung(81100:81400), z_Richtung(88850:89150)];
x3= [z_Richtung(5600:5900), z_Richtung(13900:14200), z_Rich-
tung(21850:22150), z_Richtung(29150:29450), z_Rich-
tung(36400:36700), z_Richtung(43800:44100), z_Rich-
tung(52000:52300), z_Richtung(59650:59950), z_Rich-
tung(67450:67750), z_Richtung(74550:74850), z_Rich-
tung(81850:82150), z_Richtung(89600:89900)];
x4= [z_Richtung(6100:6400), z_Richtung(14400:14700), z_Rich-
tung(22500:22800), z_Richtung(29700:30000), z_Rich-
tung(40000:40300), z_Richtung(44300:44600), z_Rich-
tung(52500:52800), z_Richtung(60200:60500), z_Rich-
tung(68000:68300), z_Richtung(75100:75400), z_Rich-
tung(82350:82650), z_Richtung(90100:90400)];
x5= [z_Richtung(6450:6750), z_Richtung(14750:15050), z_Rich-
tung(22640:22940), z_Richtung(29950:30250), z_Rich-
tung(37200:37500), z_Richtung(44700:45000), z_Rich-
tung(52800:53100), z_Richtung(60450:60750), z_Rich-
tung(68350:68650), z_Richtung(75350:75650), z_Rich-
tung(82650:82950), z_Richtung(90350:90650)];
x6= [z_Richtung(7000:7300), z_Richtung(15250:15550), z_Rich-
tung(23150:23450), z_Richtung(30450:30750), z_Rich-
tung(37750:38050), z_Richtung(45200:45500), z_Rich-
tung(53300:53600), z_Richtung(60950:61250), z_Rich-
tung(68800:69100), z_Richtung(75850:76150), z_Rich-
tung(83150:83450), z_Richtung(90850:91150)];
x7= [z_Richtung(8000:8300), z_Richtung(16250:16550), z_Rich-
tung(24150:24450), z_Richtung(31450:31750), z_Rich-
tung(38700:39000), z_Richtung(46150:46450), z_Rich-
tung(54300:54600), z_Richtung(61900:62200), z_Rich-
tung(69750:70050), z_Richtung(76800:77100), z_Rich-
tung(84100:84400), z_Richtung(91800:92100)];
x8= [z_Richtung(9250:9550), z_Richtung(17450:17750), z_Rich-
tung(24650:24950), z_Richtung(32600:32900), z_Rich-
tung(39900:40200), z_Richtung(47350:47650), z_Rich-
tung(55500:55800), z_Richtung(63100:63400), z_Rich-
tung(70850:71150), z_Richtung(77950:78250), z_Rich-
tung(85250:85550), z_Richtung(92950:93250)];

```

```
%Matrix M (beinhaltet alle 8 Vektoren)
```

```

M(:, :, 1) = x1;      %Schienenstoß 1
M(:, :, 2) = x2;      %Schienenstoß 2
M(:, :, 3) = x3;      %Punktuelle Instabilität
M(:, :, 4) = x4;      %Schienenbruch 1
M(:, :, 5) = x5;      %Schienenstoß 3
M(:, :, 6) = x6;      %Schienenstoß 4
M(:, :, 7) = x7;      %Brücke
M(:, :, 8) = x8;      %Schienenbruch 2

```

```
M = zeros(501, 12, 8);
```

```

for j = 1:12      %12 Runden
    for k = 1:8  %8 Fehlertypen
        M(:,j,k) = z_Richtung(x_lim(k,j):x_lim(k,j)+500);
    end
end

%Titel Matrix für die Beschriftung der Typ des Fehlers

titlematrix= ["Schienenstoß 1","Schienenstoß 2","Punktuelle Insta-
bilität","Schienenbruch 1","Schienenstoß 3","Schienenstoß 4","Brü-
cke","Schienenbruch 2"];

%Butterworth Filter
abtastrfrequenz = 500;
untere_grenzfrequenz = 200;
nyquistfrequenz = 0.5 * abtastrfrequenz;
Wn = untere_grenzfrequenz/nyquistfrequenz;
order = 6;
[b1,a1] = butter(order,Wn,'low');
z_Richtung_gefiltert_gefiltert = filter(b1,a1, z_Richtung_gefil-
tert);

%Code für die Detektion des Maximums innerhalb des Intervalls

posmax = zeros(8, 12);
maximum = zeros(8, 12);
for j=1:size(M,3)      %For-Schleife für alle 8 Fehlern
    R=M(:, :, j);
    for i=1:size(R,2)  %For-Schleife für jeden einzelnen Fehler
        xlim([x_lim(j,i) x_lim(j,i)+500])      %ausgewaehlter Inter-
vall
        idx_z = 1:length(z_Richtung); % Maximum der ersten 3 Stellen
        pos2search = idx_z(x_lim(j,i):x_lim(j,i)+500);
        [maximum(j,i),posmax(j,i)] = max(z_Richtung(pos2search));
        posmax(j,i) = pos2search(posmax(j,i));
    end
end

%alles plotten für jeden Fehlertyp

posMax = zeros(101,8,12);
for j=1:size(posmax,1)
    for i=1:size(posmax,2)
        bb = 50;
        posMax(:,j,i) = z_Richtung((posmax(j,i)-
bb):(posmax(j,i)+bb));
    end
end

plot_Fehlern_mit_Maximum(M, x_lim, maximum, posmax, titlematrix)
plot_Fehlern_alle(posmax, posMax, titlematrix)
subplot_Fehlern_mit_Maximum(M, x_lim, posmax, maximum, titlematrix)
subplot_alle_Fehlern(posmax, posMax, titlematrix)

```

```
plot_FFT(posMax,titlematrix)
subplot_FFT(posMax,titlematrix)
subplot_FFT_alles(posMax,titlematrix)
plot_SBD(M,titlematrix)
subplot_SBD(M,titlematrix)
subplot_SBD_alles(M,titlematrix)
plot_mean_Fehler(posMax,titlematrix)
plot_mean_FFT(posMax,titlematrix)
plot_mean_SBD(posMax,titlematrix)
end
```

Fehlern mit Maximumangabe:

```
function plot_Fehlern_mit_Maximum(M, x_lim, maximum, posmax, title-
matrix)
%PLOT_FEHLERN_MIT_MAXIMUM

for j=1:size(M,3)
    R=M(:, :, j);
    for i=1:size(R,2)
        figure
        v = R(:, i);
        plot([x_lim(j,i):x_lim(j,i)+100],v)
        hold on
        %Maximum
        plot(posmax(j,i), (maximum(j,i)), 'ko', 'LineWidth', 5, 'Mark-
erSize', 5)
        strmax = ['Maximum = ', num2str(maximum(j,i))];
        text(posmax(j,i), maximum(j,i), strmax, 'HorizontalAlign-
ment', 'right')
        xlabel('Messpunkt [-]')
        ylabel('vertikale Beschleunigung [m/s^2]')
        title(sprintf('%s Runde %d', titlematrix(j), i));
    end
end
end
end
```

Vergleich für jeden Fehlertyp:

```
function plot_Fehlern_alles(posmax, posMax, titlematrix)
%PLOT_FEHLERN_ALLES

for j=1:size(posmax,1)
    figure
    for i=1:size(posmax,2)
        plot(posMax(:,j,i),'--','linewidth',1.5) %Bereich des Maximums
        hold on
    end
    xlabel('Messpunkt [-]','FontSize',18)
    ylabel('vertikale Beschleunigung [m\s^2]','FontSize',18)
    set(gca,'fontsize',18)
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
    leg-
end(sprintf('%d1',j),sprintf('%d2',j),sprintf('%d3',j),sprintf('%d4',
,j),sprintf('%d5',j),sprintf('%d6',j),sprintf('%d7',j),sprintf('%d8',
,j),sprintf('%d9',j),sprintf('%d10',j),sprintf('%d11',j),sprintf('%d
12',j))
end
end
```

Gesamtvergleich aller Fehlertypen:

```
function subplot_alle_Fehlern(posmax, posMax, titlematrix)
%SUBPLOT_ALLE_FEHLERN

for j=1:size(posmax,1)
    figure (1)
    subplot(2,4,j)
    hold on
    for i=1:size(posmax,2)
        plot(posMax(:,j,i),'--','linewidth',1.5)
        hold on
    end
    xlabel('Messpunkt [-]')
    ylabel('vertikale Beschleunigung [m\s^2]')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
    %leg-
end(sprintf('%d1',j),sprintf('%d2',j),sprintf('%d3',j),sprintf('%d4',
,j),sprintf('%d5',j),sprintf('%d6',j),sprintf('%d7',j),sprintf('%d8',
,j),sprintf('%d9',j),sprintf('%d10',j),sprintf('%d11',j),sprintf('%d
12',j))
end
end
```

Mittelwert Fehlertyp:

```
function plot_mean_Fehler(posMax,titlematrix)
%PLOT_MEAN

posMax = permute(posMax,[3 1 2]);

for j= 1:8
    figure
    D= posMax(:, :, j);
    g= mean(D);
    plot(g)
    hold on
    [H,I] = max(g);
    plot(I, H, 'ko', 'Linewidth',5, 'MarkerSize', 5)
    strmax = ['Maximum = ', num2str(H)];
    text(I,H,strmax, 'HorizontalAlignment', 'right');
    xlabel('Messpunkt [-]')
    ylabel('vertikale Beschleunigung [m/s^2]')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
end

for j= 1:8
    figure (1)
    subplot(2,4,j)
    D= posMax(:, :, j);
    g= mean(D);
    plot(g)
    hold on
    [H,I] = max(g);
    plot(I, H, 'ko', 'Linewidth',5, 'MarkerSize', 5)
    strmax = ['Maximum = ', num2str(H)];
    text(I,H,strmax, 'HorizontalAlignment', 'right');
    xlabel('Messpunkt [-]')
    ylabel('vertikale Beschleunigung [m/s^2]')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
end
```

Fast Fourier Transformation:

```

function plot_FFT(posMax,titlematrix)
%PLOT_FFT

for j=1:size(posMax,2)
    for i=1:size(posMax,3)
        figure
        hold on
        Fs= 500;
        L= length(posMax(:,j,i));
        NFFT = 2^nextpow2(L);
        Y= fft(posMax(:,j,i),NFFT)/L;
        f= Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
        plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
        hold on
        stem(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red','MarkerEdgeColor','blue')
        title(sprintf('%s Runde %d',titlematrix(j), i))
        xlabel('Frequenz (Hz)')
        ylabel('Amplitude')
        xlim([0 120]);
    end
end
end
end

```

Gesamtvergleich Fast Fourier Transformation aller Fehlertypen:

```

function subplot_FFT_alles(posMax,titlematrix)
%SUBPLOT_FFT_ALLES

for j=1:size(posMax,2)
    for i=1:size(posMax,3)
        figure (1)
        subplot(2,4,j)
        hold on
        Fs= 500;
        L= length(posMax(:,j,i));
        NFFT = 2^nextpow2(L);
        Y= fft(posMax(:,j,i),NFFT)/L;
        f= Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
        plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
        hold on
        stem(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red','MarkerEdgeColor','blue')
        title(sprintf('%s',titlematrix(j)))
        xlabel('Frequenz (Hz)')
        ylabel('Amplitude')
        xlim([0 120]);
    end
end
end
end

```

Mittelwert Fast Fourier Transformation:

```
function plot_mean_FFT(posMax,titlematrix)
%PLOT_MEAN_FFT

posMax = permute(posMax,[3 1 2]);

for j=1:8
    figure
    hold on
    D= posMax(:,:,j);
    g= mean(D);
    Fs= 500;
    L= length(g);
    NFFT = 2^nextpow2(L);
    Y= fft(g,NFFT)/L;
    f= Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
    plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
    hold on
    stem(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red','MarkerEdgeColor','blue')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)))
    xlabel('Frequenz (Hz)')
    ylabel('Amplitude')
    xlim([0 120]);
end
for j=1:8
    figure (1)
    subplot(2,4,j)
    D= posMax(:,:,j);
    g= mean(D);
    Fs= 500;
    L= length(g);
    NFFT = 2^nextpow2(L);
    Y= fft(g,NFFT)/L;
    f= Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
    plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
    hold on
    stem(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red','MarkerEdgeColor','blue')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)))
    xlabel('Frequenz (Hz)')
    ylabel('Amplitude')
    xlim([0 120]);
end
```

Spektrale Beschleunigungsdichte:

```

function plot_SBD(M,titlematrix)
%PLOT_SBD

for j=1:size(M,3)
    R=M(:, :, j);
    for i=1:size(R,2)
        FS= 500;
        x= R(:, i);
        p= pwelch(x, [], [], [], FS);
        figure
        plot(p)
        xlabel('Frequenz (Hz)', 'FontSize', 18)
        ylabel('Amplitude', 'FontSize', 18)
        title(sprintf('%s Runde %d', titlematrix(j), i));
    end
end

for j=1:size(M,3)
    R=M(:, :, j);
    for ii=1:size(R,2)
        FS= 500;
        x= R(:, ii);
        p= pwelch(x, [], [], [], FS);
        figure(j)
        plot(p)
        xlabel('Frequenz [Hz]', 'FontSize', 18)
        ylabel('Amplitude [m^2/s^3 ]', 'FontSize', 18)
        set(gca, 'fontsize', 18)
        title(sprintf('%s Spektrale Beschleunigungsdichte %d', title-
matrix(j)));
        hold on
    end
end
end
end

```

Gesamtvergleich Spektrale Beschleunigungsdichte aller Fehlertypen:

```

function subplot_SBD_alles(M,titlematrix)
%SUBPLOT_SBD_ALLES

for j=1:size(M,3)
    R=M(:, :, j);
    for ii=1:size(R,2)
        FS= 500;
        x= R(:, ii);
        p= pwelch(x, [], [], [], FS);
        figure(1)
        subplot(2,4,j)
        hold on
        plot(p)
        xlabel('Frequenz (Hz)')
    end
end

```

```

        ylabel('Amplitude')
        title(sprintf('%s SBD %d',titlematrix(j)));
        hold on
end
end
end

```

Mittelwert Spektrale Beschleunigungsdichte:

```

function plot_mean_SBD(posMax,titlematrix)
%PLOT_MEAN_

posMax = permute(posMax,[3 1 2]);

for j=1:8
    figure
    D= posMax(:,:,j);
    g= mean(D);
    FS= 500;
    p= pwelch(g,[],[],[],FS);
    plot(p)
    xlabel('Frequenz (Hz)')
    ylabel('Amplitude')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
end
for
    j=1:8
    figure (1)
    subplot(2,4,j)
    D= posMax(:,:,j);
    g= mean(D);
    FS= 500;
    p= pwelch(g,[],[],[],FS);
    plot(p,'r','Linewidth',2)
    xlabel('Frequenz (Hz)')
    ylabel('Amplitude')
    title(sprintf('%s',titlematrix(j)));
end
end

```

Längshöhenfehler

```

z_Richtung_Laengshoehenfehler= z_Richtungneu/1365.3125.*9.81+10;

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)

clc

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([3150 3650])
xlabel('Messpunkt [-]')

```

```
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 1')
hold on
idx_z91 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z91(3150:3650);
[minimum91,pos91] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos91 = pos2search(pos91);
plot((pos91), (minimum91), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum91)];
text(pos91, minimum91, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([11150 11650])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 2')
hold on
idx_z92 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z92(11150:11650);
[minimum92,pos92] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos92 = pos2search(pos92);
plot((pos92), (minimum92), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum92)];
text(pos92, minimum92, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([19150 19650])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 3')
hold on
idx_z93 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z93(19150:19650);
[minimum93,pos93] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos93 = pos2search(pos93);
plot((pos93), (minimum93), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum93)];
text(pos93, minimum93, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([27000 27500])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
```

```
title('Längshöhenfehler Runde 4')
hold on
idx_z94 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z94(27000:27500);
[minimum94,pos94] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos94 = pos2search(pos94);
plot((pos94), (minimum94), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum94)];
text(pos94, minimum94, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([34900 35400])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 5')
hold on
idx_z95 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z95(34900:35400);
[minimum95,pos95] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos95 = pos2search(pos95);
plot((pos95), (minimum95), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum95)];
text(pos95, minimum95, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([42200 42700])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 6')
hold on
idx_z96 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z96(42200:42700);
[minimum96,pos96] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos96 = pos2search(pos96);
plot((pos96), (minimum96), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum96)];
text(pos96, minimum96, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([49650 50150])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 7')
```

```
hold on
idx_z97 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z97(49650:50150);
[minimum97,pos97] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos97 = pos2search(pos97);
plot((pos97), (minimum97), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum97)];
text(pos97, minimum97, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

figure
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
hold on
plot(z_Richtung_Laengshoehenfehler)
xlim([57200 57700])
xlabel('Messpunkt [-]')
ylabel('Vertikale Beschleunigung [m/s^2 ]')
title('Längshöhenfehler Runde 8')
hold on
idx_z98 = 1:length(z_Richtung_Laengshoehenfehler); % minimum der
ersten 3 Stellen
pos2search = idx_z98(57200:57700);
[minimum98,pos98] = min(z_Richtung_Laengshoehenfehler(pos2search));
pos98 = pos2search(pos98);
plot((pos98), (minimum98), 'ko', 'LineWidth', 5, 'MarkerSize', 5)
strmin = ['minimum = ', num2str(minimum98)];
text(pos98, minimum98, strmin, 'HorizontalAlignment', 'right');

%% alles plotten

figure
title('Längshöhenfehler');
hold on
bb=15;
posmin91 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos91-bb):(pos91+bb));
plot(posmin91, 'r')
hold on
posmin92 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos92-bb):(pos92+bb));
plot(posmin92, 'g')
hold on
posmin93 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos93-bb):(pos93+bb));
plot(posmin93, 'k')
hold on
posmin94 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos94-bb):(pos94+bb));
plot(posmin94, 'c')
hold on
posmin95 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos95-bb):(pos95+bb));
plot(posmin95, 'b')
hold on
posmin96 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos96-bb):(pos96+bb));
plot(posmin96, 'y')
hold on
posmin97 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos97-bb):(pos97+bb));
plot(posmin97, 'r--')
```

```
hold on
posmin98 = z_Richtung_Laengshoehenfehler((pos98-bb):(pos98+bb));
plot(posmin98, 'g--')
hold on
legend('91', '92', '93', '94', '95', '96', '97', '98')
grid on
xlabel('Messpunkt [-]', 'FontSize', 18)
ylabel('vertikale Beschleunigung [m\s^2]', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontsize', 18)

%% FFT

figure
Fs = 500; % Sampling Frequenz

L91 = length(posmin91); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L91); % Next power of 2 from length of y
Y91 = fft(posmin91, NFFT)/L91;
f91 = Fs/2*linspace(0, 1, NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f91, 2*abs(Y91(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f91, 2*abs(Y91(1:NFFT/2+1)), 'filled', 'MarkerFaceColor', 'red',
'MarkerEdgeColor', 'blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L92 = length(posmin92); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L92); % Next power of 2 from length of y
Y92 = fft(posmin92, NFFT)/L92;
f92 = Fs/2*linspace(0, 1, NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f92, 2*abs(Y92(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f92, 2*abs(Y92(1:NFFT/2+1)), 'filled', 'MarkerFaceColor', 'blue',
'MarkerEdgeColor', 'blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L93 = length(posmin93); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L93); % Next power of 2 from length of y
Y93 = fft(posmin93, NFFT)/L93;
f93 = Fs/2*linspace(0, 1, NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f93, 2*abs(Y93(1:NFFT/2+1)))
hold on
```

```
stem(f93,2*abs(Y93(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','green',
'MarkerEdgeColor','blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L94 = length(posmin94); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L94); % Next power of 2 from length of y
Y94 = fft(posmin94,NFFT)/L94;
f94 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f94,2*abs(Y94(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f94,2*abs(Y94(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','black',
'MarkerEdgeColor','blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L95 = length(posmin95); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L95); % Next power of 2 from length of y
Y95 = fft(posmin95,NFFT)/L95;
f95 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f95,2*abs(Y95(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f95,2*abs(Y95(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','yellow',
'MarkerEdgeColor','blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L96 = length(posmin96); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L96); % Next power of 2 from length of y
Y96 = fft(posmin96,NFFT)/L96;
f96 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f96,2*abs(Y96(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f96,2*abs(Y96(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','c',
'MarkerEdgeColor','blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L97 = length(posmin97); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L97); % Next power of 2 from length of y
Y97 = fft(posmin97,NFFT)/L97;
```

```
f97 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f97,2*abs(Y97(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f97,2*abs(Y92(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red',
'MarkerEdgeColor','blue')
xlim([0 120]);

Fs = 500; % Sampling Frequenz

L98 = length(posmin98); % Length of signal

NFFT = 2^nextpow2(L98); % Next power of 2 from length of y
Y98 = fft(posmin98,NFFT)/L98;
f98 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum
plot(f98,2*abs(Y98(1:NFFT/2+1)))
hold on
stem(f98,2*abs(Y98(1:NFFT/2+1)),'filled','MarkerFaceColor','red',
'MarkerEdgeColor','blue')
title('Fast Fourier Transformation Längshöhenfehler')
xlabel('Frequenz (Hz)', 'FontSize',18)
ylabel('Amplitude', 'FontSize',18)
set(gca, 'fontsize',18)
xlim([0 120]);

legend('91','92','93','94','95','96','97','98')

%% SBD

figure

FS1 = 500;
x91 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(3150:3650);
p91=pwelch(x91,[],[],[],FS1);
hold on
plot(p91)

hold on
FS2 = 500;
x92 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(11150:11650);
p92=pwelch(x92,[],[],[],FS2);
hold on
plot(p92)

hold on
FS3 = 500;
x93 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(19150:19650);
p93=pwelch(x93,[],[],[],FS3);
hold on
plot(p93)

hold on
```

```
FS4 = 500;
x94 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(27000:27500);
p94=pwelch(x94,[],[],[],FS4);
hold on
plot(p94)

hold on
FS5 = 500;
x95 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(34900:35400);
p95=pwelch(x95,[],[],[],FS5);
hold on
plot(p95)

hold on
FS6 = 500;
x96 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(42200:42700);
p96=pwelch(x96,[],[],[],FS6);
hold on
plot(p96)

hold on
FS7 = 500;
x97 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(49650:50150);
p97=pwelch(x97,[],[],[],FS7);
hold on
plot(p97)

hold on
FS8 = 500;
x98 = z_Richtung_Laengshoehenfehler(57200:57700);
p98=pwelch(x98,[],[],[],FS8);
hold on
xlabel('Frequenz [Hz]','FontSize',18)
ylabel('Amplitude [m^2/s^3]','FontSize',18)
set(gca,'fontsize',18)
title('Spektrale Beschleunigungsdichte Längshöhenfehler')
plot(p98)

legend('91','92','93','94','95','96','97','98')
```

Wavelet Analyse:

```
clc
close all

z_Richtung = x_z_Richtung_2./1365.3125.*9.81+10;

figure
plot(z_Richtung, 'b')
xlim([1000 94000]);
s_goaly_wert_z = 11; %Savitzky Golay Filter
z_Richtung_filtered = sgolayfilt((z_Richtung), 5, s_goaly_wert_z);
hold on
plot(z_Richtung_filtered, 'r')
xlim([1000 94000]);
grid on
title('Signal mit Savitzky Golay Filter')
xlabel('Zeit [s]');
ylabel('Beschleunigung in vertikaler Richtung [m/s2]')
set(gca, 'FontSize', 16)

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered, 200:220, 'sym4', 'plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse', 'FontSize', 18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(2830:9900), 200:220, 'sym4', 'plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 1', 'FontSize', 18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(10900:17800), 200:220, 'sym4', 'plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 2', 'FontSize', 18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(18900:25200), 200:220, 'sym4', 'plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
```

```
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 3','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(26360:33190),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 4','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(33700:39620),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 5','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(41190:47970),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 6','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(49260:56500),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 7','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')

figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(56800:63000),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 8','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')
```

```
figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(64890:71430),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 9','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')
```

```
figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(71430:78570),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 10','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')
```

```
figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(79310:85560),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 11','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')
```

```
figure
CWTcoeffs = cwt(z_Richtung_filtered
(86700:93490),200:220,'sym4','plot'); colormap jet;
surf(CWTcoeffs); colormap jet;
shading('interp'); view(0,12);
title('Wavelet Analyse Runde 12','FontSize',18)
xlabel('Messpunkt [-]');
ylabel('Waveletkoeffizient [-]')
zlabel('Skalierung [-]')
```

Signaldetektion:

```

clc
close all
z_1 = x_z_Richtung_2./1365.3125*9.81+10;
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(z_1)
xlim([1000 94000]);
ylabel('Beschleunigung in z-Richtung [m/s^2]')
xlabel('Messpunkt [-]')
set(gca, 'FontSize', 14)
title('Original Signal')
%% Butterworth Filter
abtastfrequenz = 500;
untere_grenzfrequenz = 200;
nyquistfrequenz = 0.5 * abtastfrequenz;
Wn = untere_grenzfrequenz/nyquistfrequenz;
order = 6;
[b1,a1] = butter(order,Wn, 'low');
z_1_filtered = filter(b1,a1,z_1);
subplot(2,1,2)
plot(z_1_filtered)
xlim([1000 94000]);
ylabel('Beschleunigung in z-Richtung [m/s^2]')
xlabel('Messpunkt [-]')
set(gca, 'FontSize', 16)
title('Filtered Signal')

%% find the signal Schienenstoß 1
result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.0045 && pmax<0.0097 && wmax>1.415 && wmax<2.7
%Maximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result

```

```

z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenstoß 1 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca, 'FontSize',16)
hold off
% find the signal Schienenbruch 1
result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500),[],[],[],Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.103 && pmax<0.18 && wmax>20 && wmax<31 %Maxi-
malbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenbruch 1 im Signal')
grid on

```

```

xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s2]')
set(gca, 'FontSize', 16)
hold off
%% find the signal Schienenbruch 2
result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.064 && pmax<0.091 && wmax>11 && wmax<13.7 %Ma-
ximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenbruch 2 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s2]')
set(gca, 'FontSize', 16)
hold off
%% find the signal Schienenstoß 2
result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);

```

```

    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.03 && pmax<0.06 && wmax>3.9 && wmax<5.4 %Maxi-
malbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenstoß 2 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca, 'FontSize',16)
hold off
%% find the signal Schienenstoß 3

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.06 && pmax<0.095 && wmax>13.8 && wmax<20 %Ma-
ximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
    end
end

```

```

        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenstoß 3 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca,'FontSize',16)
hold off
% find the signal Schienenstoß 4
result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500),[],[],[],Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.05 && pmax<0.113 && wmax>5.5 && wmax<6.95 %Ma-
ximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)

```

```

plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenstoß 4 im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca, 'FontSize', 16)
hold off
%% find the signal Punnktuelle Instabilität

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.0061 && pmax<0.0134 && wmax>2.16 && wmax<3.78
%Maximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Punktuelle Instabilität im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca, 'FontSize', 16)
hold off
%% find the signal Brücke

```

```

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500),[],[],[],Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500)); %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.0101 && pmax<0.017 && wmax>2.38 && wmax<4.52
%Maximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Brücke im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s^2]')
set(gca,'FontSize',16)
hold off

```

Detektion Fehlertyp „Längshöhenfehler“

```

% find the signal Längshöhenfehler
result=zeros(63000,1);
k=1;
pmaxes = zeros(630,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<630)
    p=pwelch(z_Richtungneu_1(100*k:(100*k)+500),[],[],[],Fs);
    pmax=max(p); %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte

```

```

        wmax=max(z_Richtungneu_1(100*k:(100*k)+500));    %Maximale verti-
kale Beschleunigung
        pmaxes(k) = pmax;
        %pthrees(k) = p(3);
        if pmax>0.061 && pmax<0.095 && wmax>6.15 && wmax<7.66    %Ma-
ximalbereiche
            result(100*k:100*k+500)=1;
            k=k+6;
        else
            result(100*k:100*k+500)=0;
            k=k+1;
        end
    end
end

% plot result
z_temp1=z_Richtungneu_1;
z_temp2=z_Richtungneu_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Längshöhenfehler im Signal')
grid on
xlim([1000 63000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca,'FontSize',16)
hold off

```

Detektion Gleisfehler im Signal

```

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+500), [], [], [], Fs);
    [pmax,pos_loc]=max(p);    %Maximale Amplitude der
Spektralen Beschleunigungsdichte mit Positionsangabe
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+500));    %Maximale vertikale Be-
schleunigung
    posmin=min(-z_1(100*k:(100*k)+500));    %Maximale negative verti-
kale Beschleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.005 && pmax<0.02 && wmax>1.8 && wmax<4.55 &&
posmin>-7.7 && posmin<-1.54 && pos_loc>8 && pos_loc<22    %Maximal-
bereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    end
end

```

```

    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Gleisfehler im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca, 'FontSize', 18)
hold off

```

Detektion Schienenfehler im Signal

```

result=zeros(94500,1);
k=1;
pmaxes = zeros(940,1);
%pthrees = zeros(940,1);
while(k<940)
    p=pwelch(z_1(100*k:(100*k)+180),[],[],[],Fs);
    [pmax,pos_loc]=max(p); %Maximale Amplitude der
    Spektralen Beschleunigungsdichte mit Positionsangabe
    wmax=max(z_1(100*k:(100*k)+180)); %Maximale vertikale Be-
    schleunigung
    posmin=min(-z_1(100*k:(100*k)+180)); %Maximale negative verti-
    kale Beschleunigung
    pmaxes(k) = pmax;
    %pthrees(k) = p(3);
    if pmax>0.01 && pmax<1.2 && wmax>3.7 && wmax<33 && posmin>-30
    && posmin<-4 && pos_loc>15 && pos_loc<120 %Maximalbereiche
        result(100*k:100*k+500)=1;
        k=k+6;
    else
        result(100*k:100*k+500)=0;
        k=k+1;
    end
end

% plot result
z_temp1=z_1;
z_temp2=z_1;
[I,J]=find(result);

```

```
z_temp1(I)=0;
[R,C]=find(z_temp1);
z_temp2(R)=0;

figure(5)
plot(z_temp1)
hold on
plot(z_temp2)
title('Detektion Schienenfehler im Signal')
grid on
xlim([2000 95000]);
xlabel('Anzahl Messpunkte [-]')
ylabel('Vertikalbeschleunigung [m/s²]')
set(gca,'FontSize',18)
hold off
```

Anhang B Weitere Angaben

Gesamte Logik zur Detektion der Gleisfehler im Messschrieb:

