Diploma Thesis

Findings from measurments on the dynamic track stabilizer

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Erkenntnisse aus Messungen am dynamischen Gleisstabilisator

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Manuel Dafert, BSc

Matr.Nr.: 01326006

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes Pistrol**, BSc

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/220-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2019 _____

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Jede hinreichend fortgeschrittene Technologie ist von Magie nicht mehr zu unterscheiden. - Arthur Clarke

In diesem Sinne hoffe ich mit dieser Arbeit einen kleinen Beitrag zur Entwicklung einer Technologie leisten zu können, die die Welt (oder zumindest den Bahnbau) ein Stück weit fortschrittlicher und damit magischer macht. Dies wäre nicht möglich ohne die Fa. *Plasser & Theurer*, die das Forschungsprojekt, in dessen Rahmen die Diplomarbeit entstanden ist, initiiert und die Finanzierung übernommen hat. Hier möchte ich mich besonders bei Dipl.-Ing. Bernhard Antony, David Buchbauer und Dipl.-Ing. Dr.techn. Florian Auer für ihre Arbeit und Unterstützung bedanken. Des Weiteren möchte ich an dieser Stelle denjenigen danken, die mich für diese Diplomarbeit begeistert und während der Entstehung dieser Arbeit durchgehend betreut, beraten und unterstützt haben. Mein besonderer Dank geht hierbei an Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol, BSc und Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf.

Da die Diplomarbeit nur die letzte Teilleistung des Studiums darstellt, möchte ich mich auch bei meinen Studienkollegen und Freunden Alex, Christoph, Clemens, Edi, Franz, Nadine, Raphael und Wolfgang, die mich durch das gesamte Studium begleitet haben, für das gemeinsame Lernen, Arbeiten und auch Feiern bedanken.

Ich möchte mich auch bei meinen Eltern Hermann und Elisabeth für die jahrelange Unterstützung und Motivation bedanken. Meiner Schwester Kerstin danke ich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen während des Studiums. Ein weiterer Dank gebührt meinen Schwiegereltern Bernhard und Christine, die mich ebenfalls während des gesamten Studiums unterstützt haben und immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatten. Mein größter Dank gilt allerdings dem wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner Frau Vera. Ihr danke ich für den Rückhalt während meines Studiums und für die tatkräftige Unterstützung beim Schreiben dieser Arbeit durch sprachliche Korrekturen und ihre Expertise beim Verfassen und Recherchieren wissenschaftlicher Texte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Der dynamische Gleisstabilisator (DGS) ist fester Bestandteil des Gleisinstandhaltungsprozesses vieler Eisenbahninfrastrukturbetreiber weltweit und wird zur Schotterverdichtung eingesetzt. Durch diesen ist nach der Gleislagekorrektur mit kombinierten Hebe-, Richt- und Stopfmaschinen die Verwerfungssicherheit des Gleises erneut gegeben und es können Langsamfahrstellen aufgrund eines reduzierten Querverschiebewiderstands vermieden werden. Da es sich beim Querverschiebewiderstand um eine Größe handelt, die stark vom Verdichtungszustand des Schotters abhängt, soll ein System zur kontinuierlichen, dynamischen Verdichtungskontrolle mit dem DGS entwickelt werden. Dies hat den Zweck, den Verdichtungserfolg und somit einen ausreichenden Querverschiebewiderstand nach dem Einsatz des DGS dokumentieren zu können.

Die Verdichtungsabhängigkeit des Bewegungsverhaltens des DGS und der Schwelle wurde mithilfe eines eigens entwickelten Mess- und Versuchskonzeptes von *Plasser & Theurer* in Kooperation mit der *TU Wien* untersucht. Die aufgezeichneten Messdaten wurden unter Verwendung der Software MATLAB aufbereitet und weiter analysiert. Dabei wurden verschiedene verdichtungsabhängige Kenngrößen identifiziert; konkret scheinen die horizontalen Verschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle, die vertikalen Beschleunigungsamplituden des DGS sowie die vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrum der Schwelle und die Bewegungsfigur des DGS in der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen stark vom Verdichtungszustand des Schotters beeinflusst zu werden.

Mithilfe der Phasendifferenz zwischen Unwuchterregung und der gemessenen Horizontalbeschleunigungen der Schwelle wird eine Möglichkeit zur Bestimmung der Transversalwellengeschwindigkeit des Gleisrostes vorgestellt, die das Potential für einen Wert zur kontinuierlichen dynamischen Verdichtungskontrolle hat. Aufgrund dieser Ergebnisse ist ersichtlich, dass das Bewegungsverhalten des DGS und der Schwelle vom Verdichtungszustand des Schotters abhängt. Weitere Forschungsarbeiten zur kontinuierlichen dynamischen Verdichtungskontrolle mit dem DGS scheinen daher erfolgversprechend.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abstract

The dynamic track stabilizer (DTS) is an integral part of the track maintenance process of many railway infrastructure operators worldwide and is used for ballast compaction. After the track position has been corrected by tamping machines, the following ballast compaction prevents the occurence of track-buckling and ensures that speed-restrictions after tamping can be avoided, because ballast compaction increases the resistance to lateral displacement of the track, which is usually determined by the single tie push test. Since the lateral resistance is a parameter that depends strongly on the compaction state of the ballast, the development of a system for continuous compaction control (CCC) with the DTS is intended. The purpose of this is to document the compaction process and thus to provide a sufficient lateral displacement resistance after the use of the DTS.

The compaction dependence of the motion behaviour of the DTS and the sleeper was investigated by *Plasser & Theurer* in cooperation with the *TU Wien* using a specially developed measuring and test concept. The recorded measurement data were processed and further analysed using the MATLAB software. Various compaction-dependent parameters were identified; in particular, the horizontal displacement amplitudes of the DTS and the sleeper, the vertical acceleration amplitudes of the DTS, as well as the vertical position of the dynamic centre of rotation of the sleeper and the motion behaviour of the DTS in the plane of the dominant directions of motion appear to be strongly influenced by the compaction state of the ballast.

Using the phase difference between unbalance excitation and the measured horizontal accelerations of the sleeper, a possibility for determining the transverse wave velocity of the track is presented, which has the potential to be an indicator for dynamic continuous compaction control. Based on these results, it can be seen that the motion behaviour of the DTS and the sleeper depends on the compaction state of the ballast. Further research on continuous dynamic compaction control with the DTS therefore seems promising.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **9**

2 Grundlagen zur Instandhaltung der Gleisgeometrie und der Schotterverdichtung **11**
2.1 Zur Entwicklung des DGS . . . 11
2.2 Gleislagekorrekturen . . . 12
2.2.1 Allgemeines zur Gleisinstandhaltung . . . 12
2.2.2 Indikatoren für die Initiierung von Gleislagekorrekturen . . . 14
2.2.3 Möglichkeiten für die Durchführung von Gleislagekorrekturen . . . 16
2.2.4 Dauerhaftigkeit von Gleislagekorrekturen . . . 18
2.3 Schotterverdichtung . . . 23
2.3.1 Der Querverschiebewiderstand des Gleises . . . 24
2.3.2 Verdichtung mit dem dynamischen Gleisstabilisator . . . 29
2.3.3 Verdichtung mit Vorkopf- und Zwischenfachverdichter . . . 32
2.4 Verfahren zur Verdichtungskontrolle im Gleisbau . . . 33

3 Experimentelle Untersuchungen am DGS **39**
3.1 Versuchskonzept . . . 39
3.2 Messkonzept . . . 40
3.3 Versuchsdurchführung . . . 41

4 Mechanische und mathematische Grundlagen für die Versuchsauswertung **45**
4.1 Integration von Beschleunigungen zu Verschiebungen . . . 45
4.1.1 Numerische Integrationsverfahren . . . 45
4.1.2 Signalfilterung mit digitalen Filtern . . . 49
4.2 Fast Fourier Transformation – FFT . . . 55
4.3 Dynamisches Rotationszentrum von Starrkörpern . . . 59
4.3.1 Analytische Berechnung des dynamischen Rotationszentrums . . . 59
4.3.2 Berechnung des dynamischen Rotationszentrums aus Beschleunigungsmessungen . . . 61

5 Aufbereitung und Auswertung der Messdaten **65**
5.1 Aufbereitung der Messdaten . . . 65
5.2 Auswertungen auf Basis der aufbereiteten Messdaten . . . 69
5.2.1 Frequenzverlauf der Unwuchtanregung . . . 69
5.2.2 Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden . . . 70
5.2.3 Darstellung der Bewegungen in der y-z-Ebene . . . 72
5.2.4 Lage des dynamischen Rotationszentrums . . . 74
5.2.5 Phasendifferenz der Horizontalschwingungen . . . 80

6 Interpretation der Messdatenauswertung **83**
6.1 Untersuchung der Erregerfrequenz . . . 83
6.2 Analyse der Bewegungsgrößen . . . 85
6.2.1 Analyse der Frequenzspektren . . . 85

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.2.2 Analyse der Bewegungsamplituden 90
6.2.3 Entwicklung der Schwingschnellen im Nahfeld 95
6.3 Analyse des dynamischen Rotationszentrums 98
6.4 Analyse der Frequenzrampe 103

7 Zusammenfassung und Ausblick 113

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Durchführung, Auswertung und Interpretation von dynamischen Messungen am dynamischen Gleisstabilisator (DGS), welche im Rahmen eines Vorversuchs am 01.03.2019 in Linz durchgeführt wurden. Der DGS wurde seit seiner Entwicklung in den 1970er Jahren in den Gleisinstandhaltungsprozess vieler Eisenbahninfrastrukturbetreiber weltweit integriert. Dabei hat der DGS die Aufgabe, Auflockerungen des Oberbauschotters die im Zuge der Gleislagekorrektur durch Stopfmaschinen entstehen, durch einen kontrollierten Verdichtungsprozess zu reduzieren. Durch die Verdichtung des Schotters wird der Querverschiebewiderstand erhöht [41] und Langsamfahrstellen, die ansonsten nach einem Stopfvorgang für die Betriebssicherheit der Bahn unumgänglich wären, werden vermieden. Der DGS ist also ein dynamisches Verdichtungsgerät, das vornehmlich der Verdichtung des Oberbauschotters dient. Das Bewegungsverhalten von derartigen, dynamischen Verdichtungsgeräten wird in der Regel durch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Wechselwirkung zwischen dem Verdichtungsgerät und dem Untergrund geprägt (siehe zum Beispiel: [1, 57]). Diese Wechselwirkung, die auch als Maschinen-Boden-Interaktion bezeichnet werden kann, hängt zumeist stark von der Steifigkeit des Untergrunds ab, welche sich idealerweise im Laufe der Verdichtung erhöht. Im Rahmen eines Forschungsprojekts der TU Wien, aus dem die vorliegende Diplomarbeit hervorgegangen ist, soll in Kooperation mit der Firma *Plasser & Theurer* diese Maschinen-Boden-Interaktion zwischen DGS, Gleis und Oberbauschotter untersucht werden.

Zahlreiche Forschungsarbeiten konnten in den letzten 40 Jahren zeigen, dass die Einsatzmöglichkeiten von dynamischen Verdichtungsgeräten im Allgemeinen nicht auf die Verdichtungsarbeit alleine beschränkt sind (zum Beispiel: [1, 7, 57, 78]). Die systematische Untersuchung der Maschinen-Boden-Interaktion hat zur Entwicklung des ersten Systems zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) für dynamisch angeregte Vibrationswalzen im Jahr 1978 geführt [78]. Diese Entwicklung hat gezeigt, dass Verdichtungsgeräte durch die Nutzung einer geeigneten messtechnischen Instrumentierung auch als Messgeräte zur Beurteilung des erzielten Verdichtungserfolgs genutzt werden können. Während die FDVK bei Vibrationswalzen mittlerweile ein etabliertes System zur Verdichtungskontrolle im Erdbau darstellt, existiert ein derartiges System für die flächige Verifizierung des Verdichtungserfolgs für den Oberbauschotter im Gleisbau noch nicht. Ein Messsystem, das in der Lage ist, den initialen Verdichtungszustand nach dem Verdichten mit dem DGS zu dokumentieren, könnte allerdings dabei helfen, den Ablauf der Gleisinstandhaltungsarbeiten zu optimieren. Die Untersuchung der bisher unerforschten Maschinen-Boden-Interaktion des DGS soll hierbei die Grundlagen für die Entwicklung eines derartigen Systems liefern.

Der Zweck dieser Arbeit ist dementsprechend zu untersuchen, ob der DGS durch geeignete messtechnische Instrumentierung auch als Messgerät für den Verdichtungserfolg eingesetzt werden kann. Dafür wird ein Versuchskonzept vorgestellt, mit dem analysiert werden kann, wie das Bewegungsverhalten des gekoppelten dynamischen Systems DGS-Gleisrost-Schotter auf Veränderungen der Steifigkeit des Verdichtungszustands des Gleisschotters reagiert. Dieses

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Versuchskonzept wird durch ein Messkonzept ergänzt, um die Änderungen im Bewegungsverhalten sichtbar zu machen und damit erforschen zu können. Hierbei kommen dreidimensionale, auf Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) basierende Beschleunigungssensoren zur Identifikation des Bewegungsverhaltens, sowie Hall-Sensoren zur Bestimmung der Position der exzentrischen Unwuchten des DGS, wodurch in weiterer Folge die Anregungsfrequenz ermittelt werden kann, zum Einsatz. Die beschriebenen Konzepte wurden am 01.03.2019 in Linz versuchsweise umgesetzt. Die dabei gewonnenen Messdaten werden mittels MATLAB weiterverarbeitet und physikalische Grundgrößen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens (Geschwindigkeiten, Verschiebungen, Anregungsfrequenz) ermittelt. Diese Größen bilden wiederum die Basis für eine detailliertere Betrachtung des zeitabhängigen Bewegungsverhaltens von Maschine und Schwelle, sowie für die Berechnung des Rotationszentrums in der dominanten Bewegungsebene. Durch Gegenüberstellung dieser Auswertung für einzelne Phasen des Versuchs, sind erste Rückschlüsse auf die Maschinen-Boden-Interaktion möglich.

Um den Beitrag dieser Arbeit von der bisherigen Forschungstätigkeit im Bereich der Gleisinstandhaltung und insbesondere der Schotterverdichtung des Oberbaus abgrenzen zu können, wird in Kapitel 2 dieser Arbeit der derzeitige Forschungsstand erhoben. Dabei wird zunächst allgemein der Prozess der Gleislagekorrektur aufgearbeitet, da der DGS ursprünglich hierfür entwickelt wurde und er auch hauptsächlich in diesem Bereich Anwendung findet. Danach wird ein Überblick über die derzeit gebräuchlichen Methoden zur Schotterverdichtung gegeben, wobei auch auf die Bedeutung des Querverschiebewiderstands eingegangen wird. Der Forschungsstand schließt mit einer Aufstellung der zurzeit bereits vorhandenen Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle. In Kapitel 3 der Arbeit wird im Anschluss an den Forschungsstand ein Versuchskonzept zur Identifikation der Maschinen-Boden-Interaktion vorgestellt und die bei der Versuchsdurchführung vorherrschenden Verhältnisse werden beschrieben. Neben dem Versuchskonzept ist in diesem Kapitel auch eine Beschreibung des verwendeten Messkonzepts enthalten. Kapitel 4 beschäftigt sich mit den im Zuge der Auswertung verwendeten mechanischen und mathematischen Grundlagen. Aufbauend auf diesem Kapitel werden dann im Anschluss in Kapitel 5 die aus dem Versuch gewonnenen Messdaten ausgewertet. Neben der üblichen Vorgehensweise bei der Veranschaulichung von dynamischen Messdaten, wie zum Beispiel dem Verlauf der Beschleunigungen über die Zeit, werden auch daraus abgeleitete Größen, wie das dynamische Rotationszentrum der dominanten Bewegungsebene, in eigenen Abbildungen dargestellt. Kapitel 6 ist der Analyse und Interpretation der erstellten Grafiken gewidmet. Die beobachteten Effekte werden mit bisherigen Forschungsergebnissen verglichen. Außerdem wird untersucht, ob das verwendete Messkonzept geeignet ist, die Maschinen-Gleisschotter-Interaktion zu erforschen und ob der DGS das Potential hat, vom reinen Verdichtungsgerät zum Verdichtungs- und Messgerät weiterentwickelt zu werden. Schlussendlich werden in Kapitel 7 die wesentlichen Punkte der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte an die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit gegeben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 2

Grundlagen zur Instandhaltung der Gleisgeometrie und der Schotterverdichtung

2.1 Zur Entwicklung des DGS

Zahlreiche technische Errungenschaften haben das Eisenbahnwesen seit Inbetriebnahme der ersten Eisenbahnlinie 1825 zwischen Stockton und Darlington stark verändert [46] . Die dampfbetriebenen Lokomotiven wurden zunächst durch Diesellokomotiven und schlussendlich großteils durch die heute üblichen elektrifizierten Triebwägen ersetzt. Dadurch sind mittlerweile Geschwindigkeiten über 200 km/h problemlos realisierbar. Die leistungsfähigeren Bahnfahrzeuge machten aber auch Weiterentwicklungen im Bahnbau erforderlich; einerseits um eine sichere Fahrt der Bahnfahrzeug mit erhöhter Geschwindigkeit zu ermöglichen und andererseits um den Erhaltungsaufwand des Oberbaus sukzessive reduzieren zu können. Es wurden zu diesem Zweck beispielsweise die Gleise mit Schienenstößen durch durchgehend verschweißte Gleise und die lange Zeit verwendeten Holz- und Stahlschwellen weitgehend durch Betonschwellen ersetzt. Weiters wurden alternative Schwellenformen entwickelt und der Instandhaltungsprozess, bestehend aus Heben, Richten, Stopfen und Verdichten, automatisiert [41, 63].

Im Zuge dieser Automatisierung des Instandhaltungsprozesses wurden einerseits leistungsfähige Maschinen entwickelt (zum Beispiel: [69]) und andererseits die Auswirkungen dieses Prozesses wissenschaftlich untersucht(zum Beispiel: [18, 35, 71]). Es konnte festgestellt werden, dass das Stopfen die Dichte und Steifigkeit des Schotters im Bereich zwischen den Schwellen reduziert [71]. Die Reduktion der Steifigkeit des Schotters im Zwischenfach kann auch als Reduktion der horizontalen Spannungen aufgefasst werden [71]. Damit einhergehend wird auch der Querverschiebewiderstand des Gleises durch das Stopfen reduziert [41], was aus Sicherheitsgründen wiederum die temporäre Einführung von Langsamfahrstellen erforderlich machte.

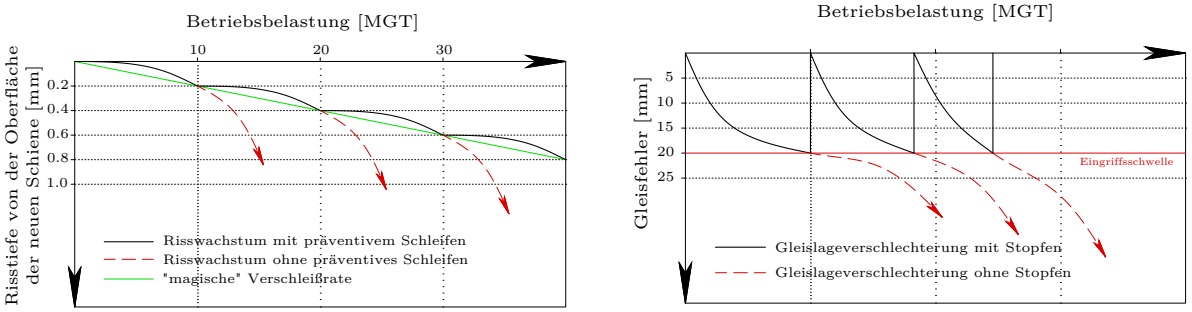
Um diese Langsamfahrstellen vermeiden zu können, wurde von der Firma *Plasser & Theurer* in den 1970er Jahren der DGS entwickelt [63]. Mit diesem ist es seither möglich, über horizontale Schwingungen, bei gleichzeitiger Wirkung einer statischen Auflast, den Gleisschotter gezielt zu verdichten und somit einen Teil der Setzungen vorwegzunehmen. Die damit einhergehende Erhöhung des Querverschiebewiderstands, welche die Freigabe des Zugverkehrs ohne Geschwindigkeitseinschränkung ermöglicht, kann aber nur durch zeitaufwändige Prüfverfahren zum Beispiel an einzelnen Schwellen oder Schwellenpaketen [15, 41] nachgewiesen werden (siehe Kapitel 2.3.1). Eine ebenfalls von *Plasser & Theurer* entwickelte, auf einer Leistungsbilanzbetrachtung basierende Möglichkeit der Verdichtungskontrolle, ist aus verschiedenen Gründen nicht mehr in den Maschinen von *Plasser & Theurer* integriert. Der Bedarf für eine kontinuierliche *on-board*-Verdichtungskontrolle, bei der der DGS auch als Messgerät dient, bleibt daher bestehen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.2 Gleislagekorrekturen

2.2.1 Allgemeines zur Gleisinstandhaltung

Ein Messsystem zur kontinuierlichen Verdichtungskontrolle würde einen Beitrag zur Optimierung der präventiven Instandhaltung der Gleise leisten. Bei dieser Art der Gleisinstandhaltung werden Abweichungen von der geplanten Situation (zum Beispiel.: Verschlechterungen der Gleislage im Laufe der Zeit) bereits vor dem Eintreten eines Fehlers, der den planmäßigen Betrieb der Eisenbahn gefährdet (zum Beispiel: Gleisverwerfung), korrigiert. *Auer* [3] gibt eine Übersicht der möglichen Instandhaltungsarten. Die aus betriebswirtschaftlicher Sicht anzustrebende Variante der präventiven Instandhaltung ist eine zustands- und prognosebasierte, voraussagende Instandhaltung. Auf Basis von langjährigen Messungen können hierbei Aussagen über die „Verschlechterungsrate“ eines spezifischen Teilbereichs getroffen und so der Zeitpunkt für die notwendige Durchführung einer konkreten Instandhaltungsmaßnahme bestimmt werden [3]. Ein Beispiel dafür ist der geplante Austausch von Schienen auf Basis von Daten des Oberbaumesswagens, aus denen eine beinahe lineare Entwicklung der Abnutzung ableitbar ist [3]. Im Falle der Instandhaltungsarbeiten zur Wiederherstellung der ursprünglichen Gleislage handelt es sich hingegen nicht um ein lineares Problem. In diesem Fall könnte die Kenntnis des ursprünglichen Verdichtungszustandes nach erfolgten Hebe-, Richt-, Stopf- und Stabilisierungsarbeiten einen wichtigen Beitrag zur Prognose von neuerlich notwendigen Korrekturmaßnahmen leisten. Eine Gegenüberstellung der linearen Verschleißrate der Schienen mit jener der nichtlinearen Gleisverschlechterung ist in Abb. 2.1 dargestellt.



(a) Lineare Verschleißrate der Schiene, adaptiert nach [41]

(b) Nichtlineare Gleisverschlechterungsrate, adaptiert nach [40]

Abb. 2.1: Gegenüberstellung der linearen Verschleißrate der Schiene mit der nichtlinearen Gleisverschlechterungsrate

Die Instandhaltung wird gemäß der EN 13306:2010 als *„die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen [...] die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustandes dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“* [52] definiert. Eine mögliche Interpretation des Normentextes von [52] in [3] führt zur Einteilung der Instandhaltungstätigkeiten in folgende Teilbereiche:

- Zustandsüberwachung
- Routine-Instandhaltung
- Wiederherstellung nach Ausfall

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 2.1 beinhaltet eine Aufstellung mit Beispielen für die Zustandsüberwachung und Routine-Instandhaltung verschiedener Gleiskomponenten. Die Wiederherstellung nach Ausfall beschreibt Ereignisse unterschiedlichster Natur, die den Schienenverkehr beeinträchtigen und daher so schnell wie möglich korrigiert werden müssen (Beispiele hierfür wären etwa Gleisverwerfungen, ein spontaner Zusammensturz eines Hohlraums unter dem Gleis oder das Kappen der Oberleitung durch einen Mobilkran).

Tab. 2.1: Beispiele für die Zustandsüberwachung und Routine-Instandhaltung bei verschiedenen Gleiskomponenten basierend auf [7, 8, 28, 40–42, 44, 71]

Gleis-komponente	**Fehlerart**	**Verfahren zur Zustandsüberwachung**	**Routine-Instandhaltung**
Schiene	Riffel	Riffelmessung (zum Beispiel: inertiales Riffelmessgerät)	Schienenschleifen
	Head checks	Ultraschallprüfung/ Wirbelstrommessung	Schienenschleifen
Schienen-befestigung	Mangelnde Kraftübertragung von Schiene auf Schwelle	Messung mit Gleismesswagen (GRMS)	Zwischenlagen erneuern, Klemmen nachspannen
Schwelle	Bruch (Beton), Fäule (Holz)	augenscheinliche Überprüfung, (GRMS)	Schwellentausch
Oberbau-schotter	starke „Verwitterung“	GPR, Messung des Schotterzustands im Zuge des Stopfens	Schottertausch
Planums-schutzschicht	Aufweichung durch fehlerhafte Wasserableitung	GPR, (dynamische Steifigkeitsmessung mit zum Beispiel: RSMV)	Drainage einbauen
Untergrund	geringe Untergrundsteifigkeit	dynamische/statische Steifigkeitsmessung, geotechnische Untergrunderkundung, GPR	Bodenverbesserung
(Gleislage)	ungleichmäßige Setzungen (Veränderung der Solllage, höhere Überhöhungsfehlbeträge, Änderung der Verwindung, ...)	Manuelle Messung (Gleissehne), Messfahrzeuge	Gleislagekorrektur zum Beispiel mit MDZ

Aus Tab. 2.1 ist ersichtlich, dass für jeden Teil des Oberbaus Routine-Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sind. Für die verschiedenen Maßnahmen gelten in der Regel verschiedene Durcharbeitungszyklen. *Lichtberger* gibt in [41] durchschnittliche Durcharbeitungszyklen für Hauptgleise an. Besonders häufig sind demnach Schienenkorrekturen wie das Schienenschleifen (Durcharbeitungszyklen von 1 – 3 Jahren) und Maßnahmen zur Gleislagekorrektur (Durcharbeitungszyklen von 4 – 5 Jahren) erforderlich. Bei regelmäßig durchgeführten Schleifarbeiten ergibt sich ein lineares Verschleißverhalten der Schienen (siehe zum Beispiel: [3, 41, 44]. Bei der Gleislagekorrektur mittels Heben-Richten-Stopfen-Stabilisieren ergibt sich hingegen kein linearer Verschleißtrend. Vielmehr werden immer kürzere Intervalle für die Gleislagekorrektur notwendig, um diese in-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

nerhalb der vorgegebenen Toleranzen zu halten [3, 41, 71]. Da der DGS Teil des Vorgangs der Gleislagekorrektur ist, wird im Weiteren näher auf diesen Teilbereich der Routine-Instandhaltung eingegangen.

2.2.2 Indikatoren für die Initiierung von Gleislagekorrekturen

Wesentlich für eine prognosebasierte Instandhaltung der Gleise ist die regelmäßige, möglichst lückenlose Erhebung von Messdaten im gesamten Streckennetz. Im Falle der Gleislage werden dabei Abweichungen von der Soll-Lage gemessen, wobei diese gemäß EN 13848-1:2019[1] bei einem Bestandsgleis über folgende Parameter definiert wird [53]:

- Spurweite
- Überhöhung
- Verwindung
- Richtung (Lage im Grundriss)
- Längshöhe

Eine grafische Veranschaulichung der hier aufgelisteten Parameter findet sich in Abb. 2.2. Die Spurweite bei einem Bestandsgleis ist dabei als horizontaler Innenabstand, gemessen in einer Höhe von Z_p=14 mm unterhalb der Laufoberfläche, definiert. In Österreich wird die sogenannte „Normalspur“ von 1435 mm verwendet, welche daher die Soll-Größe darstellt. Die Überhöhung ist der vertikale Abstand der Mittelpunkte der Schienenköpfe. Im Bestand werden Einzelfehler der Überhöhung durch die Differenz zwischen Spitzenwerten und tiefpassgefilterten Werten (in Form eines gleitenden Mittelwerts über jeweils 40 m Strecke) an der entsprechenden Stelle bestimmt. Der Vergleich zwischen gemessenen Werten (Abstand von Nullwert zu Spitzenwert) und Trassierungswerten darf zusätzlich zur Beurteilung des Fehlers herangezogen werden. Basierend auf den Ergebnissen der Überhöhungsmessungen werden auch Werte für die Verwindung in folgender Form ermittelt [53]:

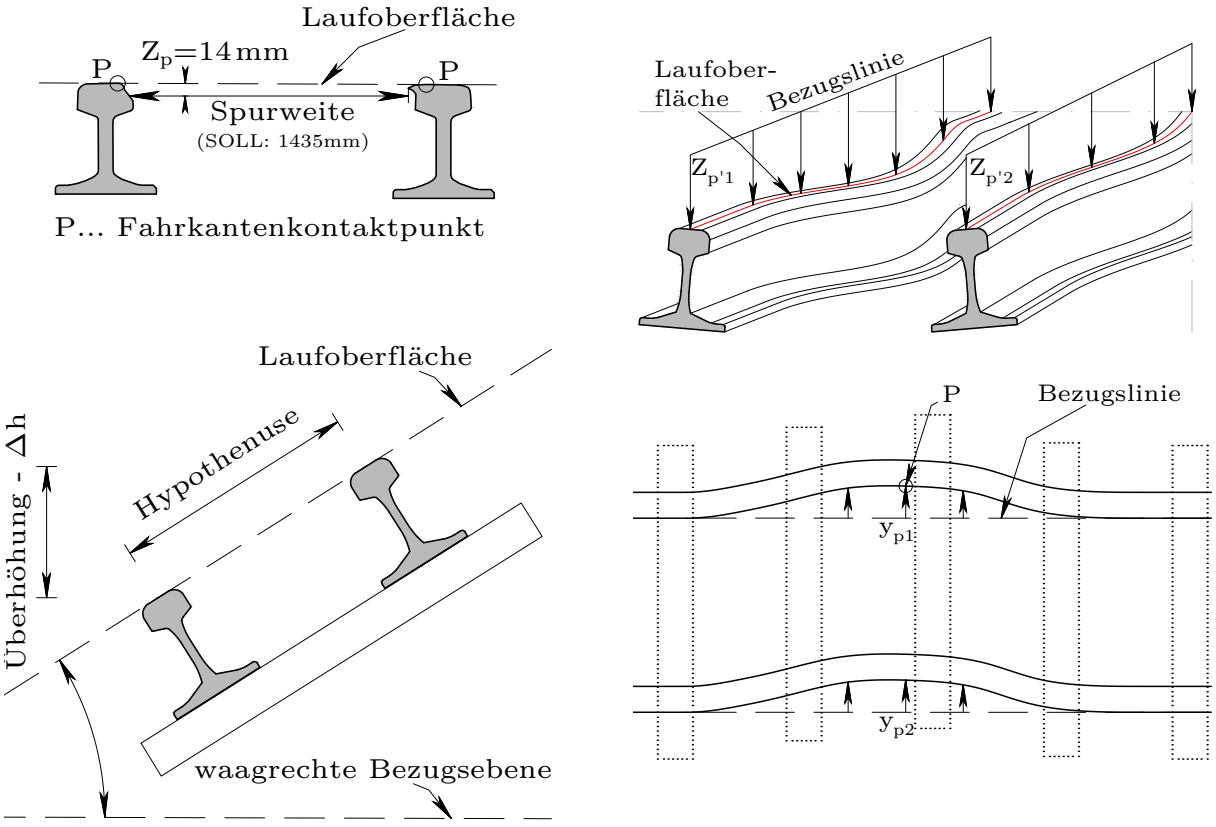
$$V_i = \frac{\Delta h_2 - \Delta h_1}{l} \tag{2.1}$$

Dabei beschreibt l die Länge des betrachteten Messabschnitts (Basislänge) und Δh_i die Überhöhung am Anfang und am Ende dieses Messabschnitts. Die Basislänge ist dabei gemäß [54] zwischen 1,3 m und 20 m zu betrachten. Bei der Betrachtung der Abweichung der einzelnen Schienenstränge von deren Soll-Lage wird hinsichtlich Abweichungen in der horizontalen Ebene (Richtung) und Abweichungen in vertikaler Ebene (Längshöhe) unterschieden. Für die Analyse dieser Gleislagefehler wird die, durch die einzelnen Längshöhen- beziehungsweise Richtungsfehler, veränderte Gleisform als Überlagerung verschiedener Sinuswellen (mit entsprechender Phasenverschiebung) betrachtet. Diese Einzelwellen werden wiederum durch eine spezifische Wellenlänge und Amplitude charakterisiert. Durch Anwendung von entsprechenden Filtern können die Gleislängen- und Richtungsfehler hinsichtlich ihrer Wellenlänge in Gruppen zusammengefasst werden. Die Gruppen werden dabei in folgende vier Wellenbereiche unterteilt [53]:

1. $D0:\quad 1\,\text{m} < \lambda \leq 5\,\text{m}$ (Optional. Fehler im Bereich dieser Wellenlängen induzieren aber große dynamische Kräfte und wirken sich daher negativ auf die Haltbarkeit von Gleis und Gleisfahrzeugen aus.)

[1] Die EN 13848-5:2008 wird in der EU-Verordnung Nr. 1299/2014 (TSI) beziehungsweise in der dazugehörigen Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 zur Definition der Soforteingriffsschwelle angeführt und ist somit Bestandteil geltenden europäischen Rechts. Die EN 13848-5 verweist ihrerseits wieder auf die EN 13848-1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Definition der Spurweite und der Überhöhung im Bestandsgleis, adaptiert nach [53]

(b) Definition der Längshöhe und der Richtung im Bestandsgleis, adaptiert nach [53]

Abb. 2.2: Parameter zur Definition der Gleisgeometrie nach [53]

2. $D1$: $3\,\mathrm{m} < \lambda \leq 25\,\mathrm{m}$
3. $D2$: $25\,\mathrm{m} < \lambda \leq 70\,\mathrm{m}$
4. $D3$: $70\,\mathrm{m} < \lambda \leq 150\,\mathrm{m}$ (nur für Strecken mit $v \geq 250\,\mathrm{km/h}$ relevant)

Die beschriebenen Parameter können dabei auf unterschiedliche Weise erhoben werden. Am häufigsten kommen Multifunktionsmessfahrzeuge, die innerhalb einer Messfahrt alle wesentlichen Geometrieparameter erfassen können, zum Einsatz. Es sind aber auch „Handmessungen“ möglich [41]. Für jeden der beschriebenen Parameter werden in EN 13848-5:2017 [54] Eingriffsschwellen definiert, die dazu dienen, die Notwendigkeit von Gleislagekorrekturen zu beurteilen beziehungsweise die Toleranzgrenzen für eine akzeptable Gleislage darzustellen. Diese Grenzwerte werden unter Bezugnahme auf drei statistische Kenngrößen eingeteilt:

1. Extremwerte der Einzelfehler
2. Standardabweichung über eine definierte Länge (zum Beispiel: 200 m)
3. Mittelwert

Weiters wird hinsichtlich der Dringlichkeit der Korrekturmaßnahmen zwischen folgenden Ebenen unterschieden [54]:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Soforteingriffsschwelle Ein Entgleisungsrisiko ist gegeben. Um das Entgleisungsrisiko auf ein akzeptables Maß reduzieren zu können werden Maßnahmen wie zum Beispiel eine Gleissperre, örtliche Geschwindigkeitsreduktionen oder Korrekturen der Gleislage erforderlich.

Eingriffsschwelle Gleislagekorrekturen sollten noch vor der nächsten Überwachungsmaßnahme (Inspektion) durchgeführt werden.

Aufmerksamkeitsschwelle Im Zuge der regulär geplanten Instandhaltungsmaßnahmen ist eine Analyse der geometrischen Gleislage erforderlich.

Im Anhang der EN 13848-5:2017 [54] werden geschwindigkeitsabhängige Vorschläge für die Definition von Eingriffsschwellen angegeben, wobei es sich bei der Aufmerksamkeits- und Eingriffsschwelle lediglich um Empfehlungen handelt und nur die Soforteingriffsschwelle normativ festgelegt ist. Die Eingriffsschwelle und die Aufmerksamkeitsschwelle dürfen vom jeweiligen Infrastrukturbetreiber individuell festgelegt werden. Die Definition der Eingriffsschwellen hinsichtlich der Standardabweichung (von zum Beispiel der Längshöhe) innerhalb einer gewählten Bezugslänge betrifft vorrangig die Aufmerksamkeitsschwelle und obliegt somit ebenfalls dem Infrastrukturbetreiber.

2.2.3 Möglichkeiten für die Durchführung von Gleislagekorrekturen

Wenn eine der beschriebenen Eingriffsschwellen überschritten wird und dadurch Gleislagekorrekturen erforderlich werden, können diese durch folgende maschinelle Verfahren realisiert werden:

- Heben – Richten –Stopfen (– Stabilisieren)
- Unterblasen (Stone-blowing)
- (Schienenschleifen)

Am häufigsten wird die Gleislagekorrektur mit kombinierten Nivellier-, Hebe-, Richt- und Stopfmaschinen durchgeführt, wobei in diese Maschinen auch Schotterverdichtungsgeräte wie der DGS oder Zwischenfach- und Vorkopfverdichter integriert sein können [44]. Diese Maschinen werden anhand ihres Einsatzgebiets in folgende Kategorien unterschieden [6]:

- Reine Gleisbearbeitung
- Universelle Anwendbarkeit
  - Maschinen mit Split-Head-Aggregaten
  - Maschinen mit universellen Stopfaggregaten mit Schwenkpickel
- Vorwiegende Weichenbearbeitung

Eine weitere Unterscheidung ist anhand der verwendeten Stopftechnologie möglich:

- Asynchron-Gleichdruck-Stopfung (System *Plasser & Theurer*) [41]
- Hochfrequenz-Elliptik-Stopfung (System *MATISA*) [45]
- Vollhydraulische Stopfung (System der Fa. *System 7*) [42]

Diese Systeme unterscheiden sich dabei durch das Bewegungsverhalten der Stopfpickel (zum Beispiel: Horizontalschwingung bei der Asynchron-Gleichdruck-Stopfung und elliptische Bewegung bei der Hochfrequenz-Elliptik Stopfung) sowie die Wahl der Arbeitsparameter. Wesentliche Parameter sind hierbei [41]:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

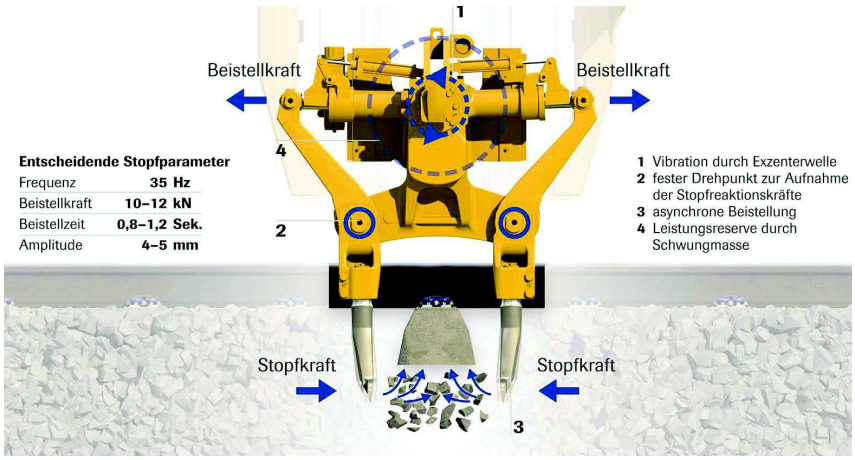


Abb. 2.3: Stopfaggregat zur Asynchron-Gleichdruck-Stopfung [6]

- Frequenz der Pickelschwingung
- Amplitude der Pickelschwingung
- Beistellgeschwindigkeit
- Beistellzeit
- Beistellkraft

Beispielhaft ist in Abb. 2.3 das System der Asynchron-Gleichdruck-Stopfung zur Veranschaulichung der Parameter dargestellt. Vor dem Unterstopfen der Schwellen muss, unabhängig von der verwendeten Stopftechnologie, das Gleis gehoben werden, sodass ein Hohlraum unter der Schwelle entsteht. Die Vorgangsweise für die Ermittlung der geometrischen Spezifikationen dieses Vorgangs unterscheidet sich dabei je nachdem ob die Soll-Geometrie des Gleises bekannt ist oder nicht. Wenn die Soll-Lage des Gleises bekannt ist, was den Regelfall darstellt, können moderne Hebe- und Richtaggregate das verformte Gleis wieder in seine ursprüngliche Position bringen. Hierfür wird der Gleisrost zunächst hydraulisch gehoben (*Heben*) und danach in die gewünschte Horizontallage gebracht (*Richten*), wobei beide Vorgänge über ein in die Maschine integriertes Nivelliersystem kontrolliert beziehungsweise gesteuert werden. Der darauffolgende Stopfvorgang dient dazu, ein Auflager für das korrigierte Gleis zu schaffen und es somit in der definierten Soll-Lage zu fixieren. Ergibt sich dabei die Notwendigkeit größerer Hebungen (>40 mm), so ist die gewünschte Hebung in Teilschritten mit jeweils anschließender Unterstopfung und Nachschotterung durchzuführen [41]. Bei diesem Verfahren muss das Gleis vor Beginn der Gleislagekorrektur vermessen werden, um auf Basis dieser Daten und der gewünschten, im Trassierungsplan definierten Soll-Lage den notwendigen Höhen- und Richtungsausgleich zu ermitteln. Ein für diesen Zweck konzipiertes Messfahrzeug ist zum Beispiel der von den *ÖBB* und der *DB* verwendete Gleisvormesswagen EM-SAT [41, 44]. Ist die Soll-Lage nicht bekannt, kann eine Soll-Geometrie mittels Pfeilhöhenausgleich durch zum Beispiel das Vier-Punkt-Richtverfahren errechnet werden. Bei dieser Art der Gleiskorrektur werden Fehler im Gleis, im Gegensatz zum Verfahren mit vorgegebener Soll-Geometrie, aber nicht zur Gänze behoben, sondern nur verkleinert [40, 71].

Allgemein können mittels Gleisstopfen nicht alle Geometriefehler behoben werden. Während Fehler mit Amplituden von mehr als 25 mm beziehungsweise Wellenlängen von $\lambda \geq 5\,\mathrm{m}$ gut korrigiert werden können, gilt dies nicht für Fehler mit kleineren Amplituden und Wellenlängen [16, 40, 71]. Fehler mit Wellenlängen $\lambda < 3\,\mathrm{m}$ werden mit großen dynamischen Kräften und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dadurch mit einer verstärkten Verschleißbeanspruchung des Oberbaus in Verbindung gebracht [53]. Eine wirkungsvolle Korrektur kurzwelliger Fehler kann mittels Unterblasen (Stone blowing) erfolgen [16, 40, 71]. Dieses Verfahren ist aber nur bedingt für die Behebung von Fehlern größerer Amplitude und Wellenlänge geeignet, womit die zwei Verfahren als komplementär angesehen werden können [16, 40, 71].

Beim Unterblasen der Schwellen wird analog zum Stopfen das Gleis zunächst gehoben und gerichtet, bevor die Auffüllung des Hohlraums beginnt. Im Gegensatz zum Stopfen dient dabei allerdings nicht der bereits vorhandene Oberbauschotter als Hinterfüllmaterial, sondern es wird über ein Blasrohr Schotter kleinerer Körnung (Durchmesser circa 12,5 – 17 mm) als jener des Bestandsschotters (in Österreich üblicherweise Lieferkörnung K1 31,5/63 mm für Hauptstrecken beziehungsweise K2 16/31,5 mmfür Nebenstrecken) mit Druckluft in den Hohlraum eingeblasen. Der dabei verwendete Schotter ist aufgrund seiner Lage, direkt unter der Schwelle, besonders hohen Kräften ausgesetzt und muss daher von hoher Qualität sein [40]. Da bei diesem Verfahren der bestehende Gleisschotter wenig beeinflusst wird, ergibt sich ein langsameres Setzungsverhalten als beim Stopfen, wobei allerdings die Arbeitsgeschwindigkeit mit ca 440 m/h [24] auch geringer ist als bei modernen Stopfmaschinen (circa 2000 m/h) [41]. Durch diesen Nachteil und aufgrund der langen Tradition der Stopftechnologie kommt das Unterblasen weltweit nur selten zur Anwendung. Bei den British Railways hat sich das „Stone blowing“ aber erfolgreich etabliert und wird dort vor allem für Nebenstrecken mit schlechter Schotterqualität eingesetzt. Hier wird von einer Ausdehnung der notwendigen Durcharbeitungszyklen auf bis zu drei Jahre berichtet, wobei zuvor im Extremfall alle neun Wochen gestopft werden musste [14].

Besonders kurzwellige Gleisfehler (< 300 mm) mit kleiner Amplitude (< 1 mm), sogenannte „Riffel“, können im Zuge des Schienenschleifens behoben werden. Hierbei wird die oberste Schicht der Schiene entfernt und eine ebene Oberfläche geschaffen. Durch diese Instandhaltungsmaßnahme werden einerseits die Schallemissionen des Schienenverkehrs reduziert sowie die Gleislagebeständigkeit verbessert (durch Reduktion der dynamischen Kräfte infolge der kurzwelligen Fehler) und andererseits auch sogenannte „Head Checks“ entfernt. Dabei handelt es sich um feine Oberflächenrisse, die zu einem sprödbruchartigen Versagen der Schiene führen können und daher eine gefährliche Form von Gleisfehlern darstellen [41].

2.2.4 Dauerhaftigkeit von Gleislagekorrekturen

Bei allen Verfahren zur Gleislagekorrektur handelt es sich nur um temporär wirksame Maßnahmen; sie müssen also im Laufe der Zeit erneut durchgeführt werden. Um die mit diesen Arbeiten verbundenen Instandhaltungskosten zu minimieren, gibt es laufend Bestrebungen die Abstände zwischen den einzelnen Durcharbeitungszyklen beziehungsweise die Dauerhaftigkeit der Gleislagekorrekturen zu verlängern. Folgende Faktoren haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Gleislagebeständigkeit [41]:

- Untergrundbeschaffenheit
- Aufbau der Planumsschutzschicht
- Ausgangsgestein des Gleisschotters
- Korngrößenverteilung des Gleisschotters
- Vorhandensein einer Schwellenbesohlung
- Schwellenform
- Schwellenmaterial

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Verfahren zur Gleislagekorrektur (Stopfen oder Unterblasen)
- Verfahren zur Schotterverdichtung
- Art und Intensität der Belastung durch den Schienenverkehr

Gleisverformungen sind oft die Folge von Verformungen des Untergrunds [40]. Die Gründe für diese Untergrundverformungen sind vielfältig. Die meisten der mit Gleisverformungen assoziierten, untergrundbedingten Probleme betreffen dabei feinkörnige, bindige Böden. Das bodenmechanische Verhalten dieser Böden ist stark von deren Konsistenz und damit vom Wassergehalt abhängig, wobei sich dieses Verhalten aus gleisbautechnischer Sicht mit zunehmendem Wassergehalt verschlechtert. Beispielweise kann es bei einem plötzlichen Wasserzutritt zur Ausbildung von Gleitflächen kommen, durch die abrupte Verformungen im Untergrund und damit in der Gleisgeometrie ausgelöst werden [40]. In [40] werden noch weitere Beispiele für häufige Untergrundprobleme in Abhängigkeit von der Art der Belastung beschrieben (siehe Tab. 2.2).

Häufig sind Streckenabschnitte mit problematischen Untergrundbedingungen durch eine schlechte Gleislagebeständigkeit mit kurzen erforderlichen Durcharbeitungszyklen gekennzeichnet. Ohne eine Verbesserung dieser Untergrundbedingungen durch entsprechende, auf das spezifische Problem abgestimmte Maßnahmen (Injektionen, Drainagen, ...), kann in diesen Fällen keine dauerhaft stabile Gleislage erzielt werden. Die Identifikation von Schwachstellen im Untergrund kann daher einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit von Streckenabschnitten leisten. Möglichkeiten zur Identifikation derartiger Schwachstellen werden zum Beispiel in [10, 28, 40] beschrieben, wobei am häufigsten das GPR (Ground Penetrating Radar) eingesetzt wird. Je nach Untergrundverhältnissen wird zwischen dem Unterbauplanum und dem Schotteroberbau eine Planumsschutzschicht zur Entspannung von allfälligen Porenwasserüberdrücken im Untergrund sowie als Filterschicht zwischen einem feinkörnigen Boden und dem grobkörnigen Oberbauschotter angeordnet [28]. Kann die Planumsschutzschicht eine dieser Funktionen nicht ausreichend erfüllen, sind Gleislageverschlechterungen die Folge. Ein Beispiel hierfür stellt die Entwicklung von Schlammstellen dar. Hierbei wird feinkörniges, wassergesättigtes Untergrundmaterial vom Unterbauplanum über den Oberbauschotter bis an die Oberfläche gefördert [28]. Dieser Prozess basiert auf einem unzureichenden Abbau von dynamisch induzierten Porenwasserüberdrücken im Untergrund, welche wiederum die feinkörnigen Partikel in den (reichlich vorhandenen) Hohlraum im Oberbauschotter „drücken“ und so im Laufe der Zeit den Schotter verunreinigen und damit Gleislageverschlechterungen verursachen [28]. Die Wahl des Ausgangsgesteins beeinflusst das Verwitterungs- und damit das Setzungsverhalten des Schotters wesentlich [28, 38]. In Österreich kommen daher nur Gesteine mit geeigneten mechanischen beziehungsweise chemischen Eigenschaften als Ausgangsmaterial für den Gleisschotter zum Einsatz. Konkret werden in Österreich folgende Gesteine verwendet [38]:

- Granit
- Granitporphyr
- Granulit
- Diabas
- Basalt
- Dunit, Peridodit, Bronzit
- (Kalkstein und Dolomit)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 2.2: Mögliche Versagensformen des Untegrunds und deren Ursachen, adaptiert nach [40]

Beanspruchung	Schaden	Ursache/Einflussfaktoren	Kennzeichen
Eigengewicht	Scherversagen	Eigengewicht Schienenfahrzeuge, Gleis, Untergrund; Unzureichende Untergrundfestigkeit	Hohe Dammkonstruktionen, Hoher Wassergehalt
	Setzungen	Gewicht der Dammkonstruktion; Wassergesättigter, feinkörniger Untergrund	Erhöhung der Spannungen im Untergrund
Nutzlast	Untergrundverwitterung	Zyklische Belastung des Untergrunds; Kontaktfläche zwischen Schotter und Untergrund; Wasser	Schlammstellen, Disfunktionale Planumsschutzschicht
	Bodenverflüssigung	Zyklische Belastung; Wassergesättigte Schluffe bzw. Feinsande	Große Verformungen bei dynamischer Last; Eventuell Planumsschutzschicht betroffen
	Progressives Scherversagen	Wiederholte Überbeanspruchung; Feinkörnige Böden; Wassergehalt	Verformungen am Dammfuß; Hebungen der Schulter oder des Zwischenfachs;
	Progressive plastische Verformungen	Zyklische Belastungen; Weicher/Lockerer Untergrund	Setzungsdifferenzen; „Ballast pockets“
Umwelteinflüsse	Frosthebungen	Temperatur; Wasserzutritt; Frostempfindlicher Untergrund	Wellige Gleisoberfläche
	Schwellen/Quellen/ Schrumpfen des Untergrunds	Hochplastische Tone; Wassergehalt	Wellige Gleisoberfläche
	Böschungserosion	Strömendes Wasser (Oberfläche oder im Untergrund)	Auswaschungen
	Sackungen des Untergrunds	Sackungsgefährdete Böden; Wasserzutritt	Setzungen

Für Oberbauschotter aus diesen Ausgangsgesteinen wurden in Österreich vonseiten der ÖBB Lieferbedingungen festgelegt, um eine definierte Anfangsqualität für den neu verbauten Gleisschotter sicherstellen zu können. Hierbei wird hinsichtlich physikalischer, geometrischer und chemischer Anforderungen unterschieden. Die physikalische Eignung des Materials erfolgt über den Nachweis folgender Eigenschaften [38] :

- Schlag-Abrieb-Festigkeit (Los-Angeles-Koeffizient: $LA_{RB} < 22$)
- Schlagfestigkeit (Schlagzertrümmerungswert: $SZ_{RB} < 22\%$)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

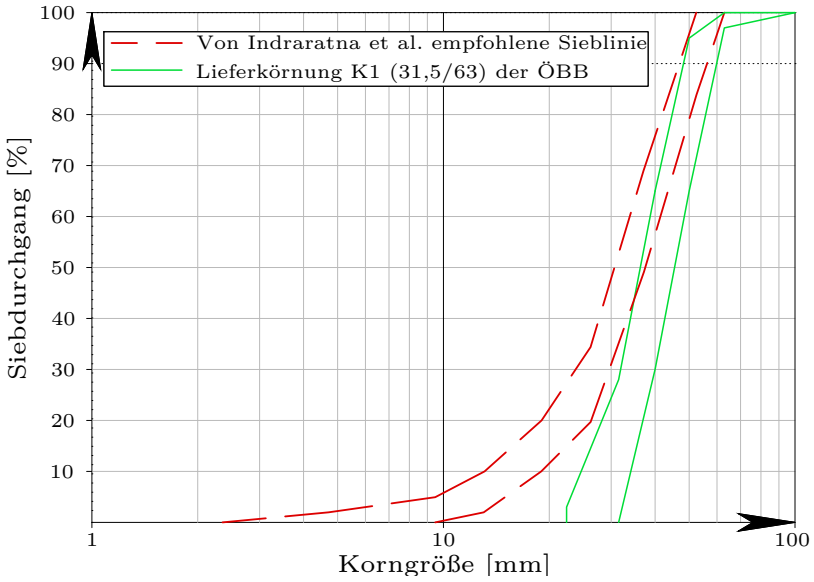


Abb. 2.4: Vergleich der Sieblinie der Lieferkörnung K1 (ÖBB) [34] mit der von Indraratna et al. empfohlenen Sieblinie [28]

- Widerstand gegen Verschleiß (Micro-Deval-Koeffizient: $M_{DE}RB < 16$)
- Rohdichte der Einzelkörner (Anforderung abhängig von der jeweiligen Gesteinsart)
- Verwitterungsbeständigkeit (Nachweis abhängig von der jeweiligen Gesteinsart und Beanspruchung)

Die geometrischen Anforderungen werden wiederum durch die Angabe einer Korngrößenverteilung (unterteilt in Lieferkörnung *K1:* 31,5/63 mm und Lieferkörnung *K2:* 16/31,5 mm), sowie durch Einschränkung der Kornform und der Kornlänge definiert [38]. Die Wahl der Sieblinie beeinflusst wesentlich das Verhalten des Haufwerks (Oberbauschotter), welches durch die Einzelkörner gebildet wird [28]. Die Sieblinie hat dabei sowohl Einfluss auf bodenmechanische Parameter des Schotters (wie zum Beispiel den Elastizitätsmodul, die Durchlässigkeit, die Trockendichte und in eingeschränkter Form auch auf den Winkel der inneren Reibung), als auch auf sein Verwitterungsverhalten [28, 40, 80]. Um die Sieblinie von Gleisschotter zu optimieren, ist es erforderlich, eine Sieblinie zu finden, die die Durchlässigkeit des Schotters gewährleistet (dies trifft eher auf enggestufte Sieblinien zu) und eine hohe Scherfestigkeit und Steifigkeit desselben bewirkt (dies ist bei weitgestuften Sieblinien der Fall). Um einen Kompromiss zwischen diesen beiden Anforderungen zu finden, wurde in [27] die Auswirkung von verschiedenen Sieblinien auf das Setzungsverhalten von Gleisschotter untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine moderat gestufte (engl. ‚moderatly graded') Sieblinie zu geringeren Setzungen führt als eine enggestufte Sieblinie. Aus diesen Testergebnissen wurden Empfehlungen für eine „optimale" Sieblinie abgeleitet, welche zum Beispiel in [28] beschrieben werden. Weiters wurde in derselben Arbeit auch eine positive Auswirkung von Geotextilien auf das Setzungsverhalten von gereinigtem Schotter festgestellt (bei neuem Schotter können Geotextilien das Setzungsverhalten nicht positiv verändern). Ein Vergleich der empfohlenen Sieblinie aus [28] mit jener der Lieferkörnung K1 [34] ist in Abb. 2.4 dargestellt.

Auch die Wahl der Schwellenform, des Schwellenmaterials und des Schwellenabstands haben Einfluss auf die Gleislagebeständigkeit [41]. In Österreich werden sowohl Beton- als auch Holzschwellen verwendet, wobei für höherrangige Gleise (Gleisrang a und b) in höherrangigen Strecken

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

(Streckenrang S uns S+) nur Betonschwellen verwendet werden dürfen [50]. Folgende alternative Betonschwellenformen versprechen eine Verbesserung der Gleislagebeständigkeit im Vergleich zu den üblichen Monoblock Spannbetonschwellen [41]:

- Rahmenschwellen
- Leiterschwellen
- Besohlte Schwellen

Da eine Schwellenbesohlung auch nachträglich auf die Schwelle aufgebracht werden kann, handelt es sich hierbei um eine Möglichkeit, die Gleislagebeständigkeit auch bei Bestandsgleisen positiv zu beeinflussen [26]. Die Lagebeständigkeit kann durch den Einsatz einer Schwellenbesohlung um den Faktor 3-4 gegenüber unbesohlten Schwellen verbessert werden [41]. Diese Verbesserung ist aber von der Steifigkeit der Schwellenbesohlung in Relation zu jener der Zwischenlage (zwischen Schiene und Schwelle) abhängig. In der Praxis haben sich dabei Kombinationen aus steiferer Besohlung ($C \approx 0{,}1 - 0{,}3\,\mathrm{N/mm^3}$)[2] mit weicheren Zwischenlagen als zielführend erwiesen [41].

In [72] wurde die Auswirkung von verschiedenen Besohlungsvarianten auf die Gleislagebeständigkeit bei Gleislagekorrekturen mit Stopfen und mit Unterblasen anhand eines standardisierten Laborversuchs getestet. Die Untersuchung ergab, dass eine Schwellenbesohlung die Gleislagebeständigkeit in jedem Fall erhöht und weichere Besohlungen ($0{,}2\,\mathrm{N/mm^3}$), zumindest unter Laborbedingungen, bessere Ergebnisse hinsichtlich der Gleislagebeständigkeit liefern als etwas härtere Besohlungen ($0{,}4\,\mathrm{N/mm^3}$). Dieselbe Studie kommt auch zum Ergebnis, dass mit dem Unterblasen eine dauerhaftere Gleislage erreicht werden kann als mit dem klassischen Stopfverfahren [72]. Auch andere Autoren berichten über beständige Gleislageberichtigungen durch das Unterblasen (zum Beispiel: [17]), vor allem bei Fehlern mit kurzer Wellenlänge und kleiner Amplitude [40, 71]. Dies wird dadurch erklärt, dass beim Unterblasen eine geringere Störung des bereits durch den Schienenverkehr verdichteten Oberbauschotters erfolgt. Beim Stopfen werden durch die dynamisch schwingenden Stopfpickel die einzelnen Schotterkörner zerstört, womit der Anteil feinerer Körner erhöht wird. Zusätzlich werden die effektiven Horizontalspannungen unter der Schwelle reduziert (der Schotter wird „aufgelockert“) [71]. Beides wirkt sich ungünstig auf die Gleislagebeständigkeit aus [28, 29]. Beim Unterblasen wird der bestehende Schotter weniger beeinflusst. Es entsteht aber ein „zweischichtiger Aufbau“ mit speziellen Eigenschaften. Die Ergebnisse in [72] gelten nur in eingeschränkter Form für das moderne Gleisstopfen, da wesentliche Änderungen bei dem Prozess der Gleislagekorrektur durch das Stopfen nicht berücksichtigt wurden: Das gezielte Überheben des Gleises und die dynamische Schotterverdichtung im Anschluss an das Stopfen.

Lange Zeit konnte die Lage des Gleises durch Stopfen nämlich nur kurzzeitig korrigiert werden. Obwohl die gewünschte Lage durch die Stopfmaschinen hergestellt wurde, nahm das Gleis bereits wenige Monate nach dem Stopfvorgang eine zur Ausgangssituation affine Form an. Dieser Prozess wird allgemein als das „Gedächtnis des Gleises“ bezeichnet [41]. Forschungsarbeiten der British Railways ergaben, dass ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Hebung und der aus dieser Hebung resultierenden, kurzfristigen Gleissetzung (Differenz zwischen aufgebrachter und verbleibender Hebung) besteht [40]. Dabei ähnelt die Form dieser nichtlinearen Kurve bis zu einer Setzung von circa 20 mm der 1. Mediane (Gerade mit einer Steigung von 45°). Nach Überschreitung dieses Punktes flacht die Kurve stark ab und eine aufgebrachte Hebung wird nicht im selben Ausmaß innerhalb kurzer Zeit wieder aufgehoben. Auf Basis dieses Ergebnisses wurde das

[2] Die Einheit $\mathrm{N/mm^3}$ wird üblicherweise für flächenhafte Federlagerungen verwendet. Dabei wird im vorliegenden Fall die vertikale Steifigkeit auf eine bestimmte Grundfläche bezogen. In der Geotechnik findet diese Einheit zum Beispiel beim Bettungsmodul Anwendung [2]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

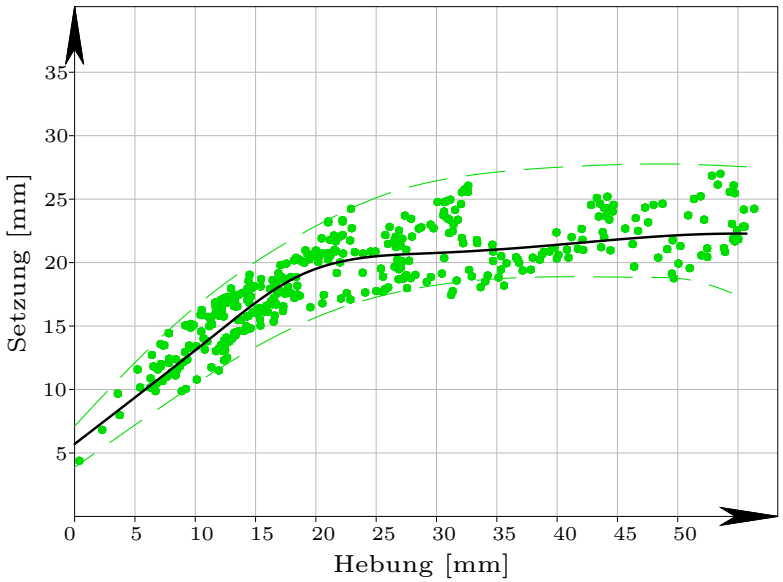


Abb. 2.5: Zusammenhang zwischen aufgebrachter Hebung und daraus resultierender Setzung, adaptiert nach [40]

Verfahren des „gezielten Überhebens“ (engl.: ‚design over-lift tamping‘) entwickelt. Dabei wird die notwendige Hebung zur Wiederherstellung der Soll-Lage um den Betrag der voraussichtlichen Setzung vergrößert, sodass sich das Gleis nach Abklingen der kurzzeitigen Setzungen in der gewünschten Soll-Lage befindet. Die Implementierung des „gezielten Überhebens“ in den Instandhaltungsprozess führte in Amerika zu einer signifikanten Verbesserung der Gleislagebeständigkeit. Die Abstände zwischen den Gleislagekorrekturen konnten durchschnittlich auf das Dreifache des zuvor üblichen Zeitraums verlängert werden [40]. Das Konzept wurde 2004 auch von den ÖBB verifiziert und wird seither angewendet [4]. In Abb. 2.5 ist der Zusammenhang zwischen der Hebung des Gleises beim Stopfen und den daraus resultierenden Setzungen dargestellt.

Manche Autoren berichten von einer weiteren Verbesserung der Gleislagebeständigkeit durch den Einsatz von Verdichtungsgeräten im Zuge der Gleislagekorrektur [41, 70], wobei es auch gegenteilige Beobachtungen gibt, die keine Auswirkungen der Schotterverdichtung auf die Gleislagebeständigkeit feststellen konnten [56]. Numerische Untersuchungen deuten darauf hin, dass eine hohe Steifigkeit des Schotters meist vorteilhaft für die Gleislagebeständigkeit ist [68]. Da jede Art der Verdichtung die Steifigkeit des verdichteten Mediums erhöht, wäre dies ein Indiz dafür, dass die Verdichtung vorteilhaft für die Gleislagebeständigkeit ist. Der Einfluss der Verdichtung auf die Gleislagestabilität ist jedenfalls noch nicht vollständig geklärt und bedarf weiterer Untersuchungen.

2.3 Schotterverdichtung

Wenngleich der Effekt der Schotterverdichtung auf die Gleislagestabilität noch nicht ausreichend geklärt ist, so wurde doch eine positive Auswirkung der Verdichtung auf die Stabilität des Gleises festgestellt. Die Stabilität des Gleises beschreibt dabei den Widerstand des Gleises gegen eine Verschiebung [41]. Dabei wird grob unterschieden in [33]:

- Längsverschiebewiderstand
- Torsionswiderstand

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

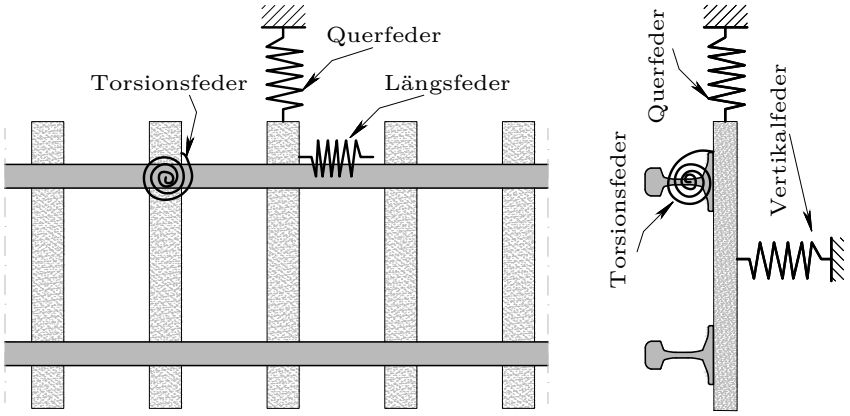


Abb. 2.6: Darstellung der Widerstandsgrößen des Gleises anhand von Federn, adaptiert nach [33]

- Vertikalverschiebewiderstand
- Querverschiebewiderstand

Diese Einteilung der Widerstandsgrößen ist in Abb. 2.6 anhand von Dreh- und Wegfedern verdeutlicht.

Die Verdichtung des Schotters hat dabei – mit Ausnahme des Torsionswiderstands, der nur von der Schienenbefestigung abhängig ist – Einfluss auf alle Widerstandsgrößen. Der Längsverschiebewiderstand wird nur geringfügig durch die Schotterverdichtung beeinflusst (durch die Verdichtung mit dem dynamischen Gleisstabilisator wird dieser beispielsweise leicht reduziert) [41]. Die Auswirkungen des Verdichtungsvorgangs auf den Vertikalverschiebewiderstand können wiederum schwer bestimmt werden, da dieser sehr stark vom gesamten Aufbau, inklusive den Untergrundeigenschaften abhängig ist [8]. Der Querverschiebewiderstand wird allerdings von der Schotterverdichtung stark erhöht, welches das wesentliche Argument für den Einsatz der Schotterverdichtung nach Gleislagekorrekturen und Gleisneulagen, also in jenen Phasen in denen die Schwellen „locker“ im Schotter eingebettet sind, darstellt [40, 71]. Da der Querverschiebewiderstand eine wesentliche Größe im Zusammenhang mit der Schotterverdichtung und insbesondere mit dem dynamischen Gleisstabilisator darstellt, wird im Weiteren detailliert auf diesen eingegangen.

2.3.1 Der Querverschiebewiderstand des Gleises

Wie bereits zuvor erwähnt, beschreibt der Querverschiebewiderstand den Widerstand einer Gleiskonstruktion (bestehend aus Schienen, Schwellen und Schotter) gegen eine horizontale Verschiebung quer zur Gleisachse [41]. Dieser Widerstand ist bei zwei Beanspruchungsarten von besonderer Bedeutung: bei hohen Temperaturbeanspruchungen und bei Horizontallasten aus dem Schienenfahrzeug [41]. Bei hohen Temperaturen entstehen im endlos verschweißten Gleis, aufgrund der behinderten Verformung in Gleislängsrichtung, hohe Druckspannungen. Daraus resultiert eine Stabilitätsgefährdung im Sinne eines seitlichen Ausweichens beziehungsweise Ausknickens (das Resultat dieses Prozesses wird im Bahnbau als „Gleisverwerfung“ bezeichnet). Dies trifft insbesondere auf Gleise in Bogenlage zu, wobei für Gleise der ÖBB in [48] folgende Berechnung für Radien R<700 m vorgeschlagen wird:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$\begin{aligned} \Delta T_{krit} &= -\frac{8 \cdot I_{ers}}{\alpha_T \cdot A_{(2)} \cdot R \cdot f} + \sqrt{\left(\frac{8 \cdot I_{ers}}{\alpha_T \cdot A_{(2)} \cdot R \cdot f}\right)^2 + \frac{16 \cdot I_{ers} \cdot w_Q}{\alpha_T^2 \cdot A_{(2)}^2 \cdot E \cdot f}} \\ f^* &= \left(w_Q - \frac{P_{krit}}{R}\right) \cdot \frac{16 \cdot E \cdot I_{ers}}{P_{krit}^2} \\ P_{krit} &= E \cdot A_{(2)} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_{krit} \end{aligned} \tag{2.2}$$

In der Gleichung (2.2) werden die kritische Temperaturerhöhung (ΔT_{ref}), bezogen zur Schweißtemperatur, sowie der kritische Gleisrichtungsfehler (f^*) angegeben. Dabei beschreibt $A_{(2)}$ die Fläche der beiden Schienen, f eine angenommene Verformung, I_{ers} das Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes, P_{krit} die kritische Gleisdruckkraft bei der kritischen Temperatur, E den Elastizitätsmodul der Schiene, R den Radius des Gleisbogens, α_T den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Schiene und w_Q den Querverschiebewiderstand. Bei Betrachtung dieser Gleichung fällt auf, dass die einzige Größe die im Zuge der Gleisinstandhaltung beeinflusst wird, der Querverschiebewiderstand ist, der bei der Gleislagekorrektur mittels Stopfen deutlich reduziert wird [41]. Eine Schotterverdichtung erhöht dementsprechend durch die Erhöhung des Querverschiebewiderstands und die Reduktion von Längsspannungen im Gleis die Verwerfungssicherheit nach Stopfarbeiten [41]. Problematisch ist die Reduktion des Querverschiebewiderstands durch Stopfarbeiten auch in Bögen mit großen Überhöhungsfehlbeträgen, bei schweren Lastzügen und bei Strecken mit hohen Zuggeschwindigkeiten. Hier wirken große Horizontalkräfte auf das Gleis. Können diese aufgrund eines zu geringen Querverschiebewiderstandes nicht vom Gleis aufgenommen werden, kommt es im schlimmsten Fall zu Entgleisungen [19]. Um dem entgegenzuwirken, können nach erfolgten Stopfarbeiten entweder Langsamfahrstellen (bis ca 100,000 Lt) eingerichtet werden, oder der Schotter wird ausreichend verdichtet.
Der Querverschiebewiderstand eines Gleises ist aber nicht nur von der Verdichtung des Schotters abhängig. *Klugar* verwendet in [35] Ergebnisse aus theoretischen Überlegungen und Ergebnisse aus Experimenten, um den Einfluss verschiedener Aspekte auf den Querverschiebewiderstand eines durch eine einzige Achslast belasteten Gleises zu analysieren. Folgende Widerstände haben dabei maßgebenden Einfluss auf den Gesamtquerverschiebewiderstand des Gleises [35]:

- Belastungsabhängige Sohlreibung zwischen Schwelle und Schotter
- Unbelasteter Querverschiebewiderstand einer Einzelschwelle
- Querverschiebewiderstand der Schiene

Der Beitrag des Widerstands der Schiene ist dabei als gering zu bewerten, wird aber umso größer, je weniger Schwellen aktiviert werden (Einfluss der Biegelinie der Schiene). Genau umgekehrt verhält es sich bei den Widerständen aus den Schwellen, welche umso größer werden, je mehr Schwellen aktiviert werden. Ein Vergleich der Widerstände, die sich bei der Aktivierung von einer, drei und fünf Schwellen ergeben ist in Abb. 2.7 dargestellt. Wenn man davon ausgeht, dass der minimale Widerstand der maßgebende ist, zeigt sich bei Betrachtung dieser Abbildung, dass bereits bei relativ geringen Verschiebungen einer Einzelschwelle – welche je nach Größe der vertikalen Auflast variieren – die beiden benachbarten Schwellen aktiviert werden und erst bei relativ großen Verschiebungen von 4 – 5 mm, insgesamt fünf Schwellen Anteile an der Lastabtragung haben.

Der unbelastete Querverschiebewiderstand einer Einzelschwelle kann dabei experimentell bestimmt werden, wobei dieser Wert auch als w_Q in die Berechnung der Verwerfungssicherheit in die Gleichung (2.2) eingeht. Die Ermittlung des Querverschiebewiderstands erfolgt dabei meist

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

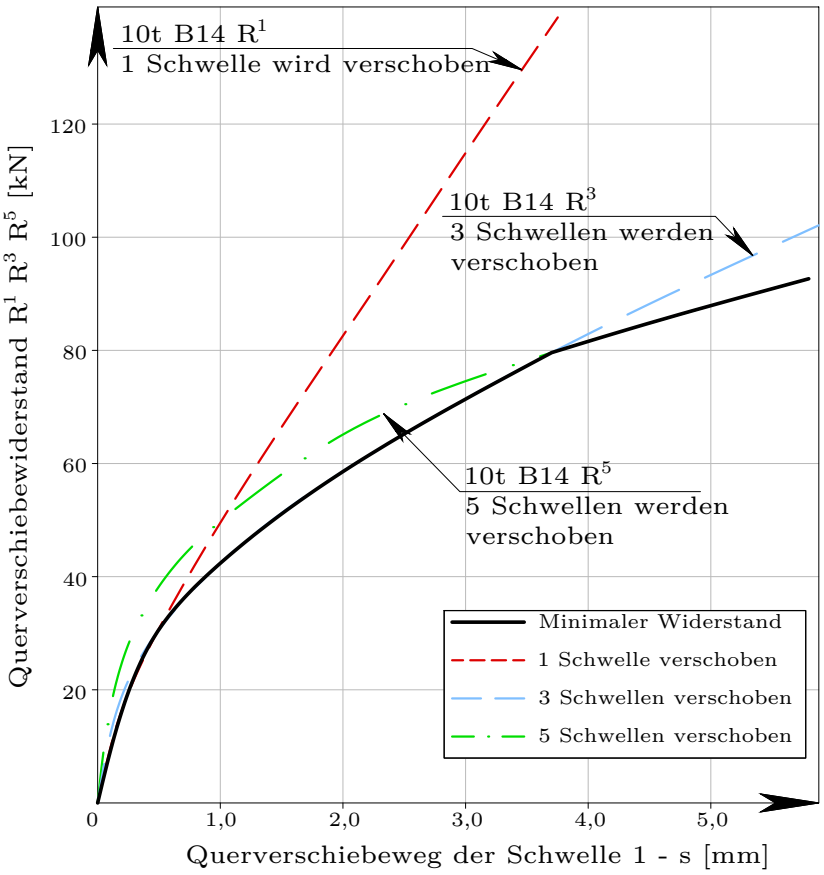


Abb. 2.7: Vergleich des Querverschiebewiderstands von belasteten Schwellen in Abhängigkeit vom Querverschiebeweg bei der Verschiebung von einer, drei und fünf Schwellen, adaptiert nach [35]

nach der Einzelschwellenmethode [41]. Bei dieser Methode werden zunächst die Schwellenbefestigungen der zu untersuchenden Schwelle ausgebaut. Die nun lose Schwelle wird anschließend mithilfe einer hydraulischen Versuchseinrichtung verschoben, wobei die Schiene als Widerlager dient. Das Ergebnis des Versuchs ist ein Kraft-Verschiebungsdiagramm, aus dem der statische Querverschiebewiderstand der Einzelschwelle abgelesen werden kann. Dieser Wert ist dabei als jene Kraft definiert, die notwendig ist, um eine bleibende Verschiebung von 2 mm zu erreichen [12]. Ein Beispiel für ein Kraft-Verschiebungsdiagramm aus einer statischen Querverschiebewiderstandsmessung ist in Abb. 2.8 dargestellt.

Die statische Querverschiebewiderstandsmessung der unbelasteten Schwelle stellt zwar die Standardmessmethode dar, ist jedoch nicht unumstritten. Einen wesentlichen Kritikpunkt stellt dabei die statische Belastung dar, welche nicht den tatsächlich im Gleis auftretenden dynamischen Lasten entspricht. Dies ist vor allem bei der Beurteilung des Entgleisungsrisikos aufgrund eines zu geringen Querverschiebewiderstands von Bedeutung [15]. *Esmaeili* schlägt daher in [15] eine Methode zur Messung des dynamischen Querverschiebewiderstands vor, welche eine bessere Abschätzung der Reaktion einer Schwelle auf dynamische Belastungen ermöglicht. Dafür wurde eine Belastungseinrichtung entwickelt, mit der eine stoßartige Belastung in die Schwelle eingeleitet wird, wobei einerseits die Beschleunigung der Schwelle, und somit die Massenträgheitskräfte, und andererseits, analog zum statischen Versuch, die Verschiebungswege gemessen werden. Daraus resultiert ebenfalls ein (Schotterwiderstands-)Kraft-Verschiebungsdiagramm, aus dem wiederum

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

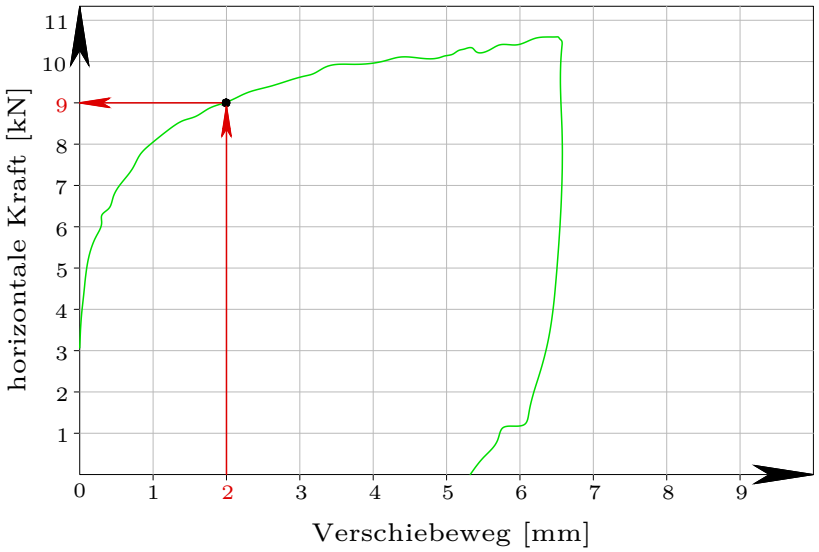


Abb. 2.8: Ermittlung des statischen Querverschiebewiderstands einer Einzelschwelle anhand eines Kraft-Verschiebungsdiagramms, adaptiert nach [38]

der dynamische Querverschiebewiderstand am Übergangspunkt zwischen Haft- und Gleitreibung abgelesen werden kann. Die TU München wendet ebenfalls eine adaptierte Variante der statischen Querverschiebewiderstandsmessung an, um dynamische Effekte berücksichtigen zu können [76]. Hierbei wird die Belastungseinrichtung des statischen Versuchs um einen, kraftschlüssig mit der Schwelle verschraubten, Unwuchtschwinger erweitert, der während des Verschiebevorgangs Schwingungen in Schwellenlängsrichtung (also quer zur Gleisachse) und in Vertikalrichtung induziert.

Neben der fehlenden Berücksichtigung der dynamischen Belastung wird auch die Fokussierung auf nur eine Schwelle kritisiert. Wie in den theoretischen Überlegungen von [35] angemerkt wurde, führt die Belastung einer Schwelle auch zur Aktivierung der benachbarten Schwellen. Dabei leisten die Schwellen am Rand – ähnlich wie beim Pfahlgruppeneffekt – einen größeren Beitrag zum Querverschiebewiderstand als die Schwellen in der Mitte des aktivierten Bereichs [36]. Dementsprechend würde nach [36] die Jochverschiebemethode, bei der nicht nur einzelne Schwellen sondern Gleisjoche mit 4 – 6 m Länge gegen zuvor hergestellte Fundamente verschoben werden, aussagekräftigere Ergebnisse liefern [41]. Ungeachtet der angesprochenen Alternativen ist der statische Querverschiebewiderstand der unbelasteten Schwelle vielfach Grundlage von Normen und Regelwerken im Bahnbau, weshalb ihm in der Praxis eine entsprechende Bedeutung beigemessen wird [12]. Viele Autoren haben sich deshalb damit beschäftigt, welche gleisbautechnischen Parameter den statischen Querverschiebewiderstand einer Einzelschwelle auf welche Art beeinflussen. Wesentlichen Einfluss haben dabei unter anderem [41]:

- Schwellentyp
- Ausgangsgestein des Gleisschotters
- Kornform- und oberfläche
- Korngrößenverteilung des Gleisschotters
- Geometrie des Schotterbetts (Schulterhöhe, Füllungsgrad der Zwischenfächer,etc.)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Bedeutung der einzelnen Parameter wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich bewertet. Ein Überblick über bisher erfolgte Untersuchungen wird in [31] und [15] gegeben. Dabei wird vor allem die Bedeutung der Geometrie des Schotterbetts durchaus kontrovers diskutiert. Während beispielsweise [71] die Schulter des Schotteroberbaus und die Sohlreibung als die entscheidenden Bestandteile des Querverschiebewiderstands angibt (mit 30 – 40 % beziehungsweise 50 – 60 % Anteil am Gesamtquerverschiebewiderstand), betrachten andere Autoren den Schotter in den Zwischenfächern als entscheidenden Faktor für den Gesamtquerverschiebewiderstand. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Autoren ist in [31] und [47] enthalten und wird in adaptierter Form in Tab. 2.3 wiedergegeben.

Tab. 2.3: Angaben verschiedener Autoren für den Anteil der mitwirkenden Schotterbereiche am Querverschiebewiderstand, adaptiert nach [31]

Literatur	**Beitrag Schulter**	**Beitrag Zwischenfach**	**Beitrag Sohlreibung**
Khatibi et al., 2017 [31]	49,6%	24,3%	26,1%
Zakeri und Bakhtiary, 2014	28%	29%	62%
Le Pen und Powrie, 2010	15–37%	37–50%	26–35%
Kish, 2011	20–25%	30–35%	35–40%
Selig and Waters [71], 1994	30–40%	10–20%	50–60%
Dipilato et al., 1983	30–40%	10–20%	50–60%
Shenton und Powell, 1973	4–15%	30–54%	31–58%
Mohammadzadeh et al., 2018 [47]			
- dichter Schotter	49%	24.4%	26.6%
- lockerer Schotter	35%	34.7%	30.3%
Lichtberger, 2010 [41]	35–40%	10–15%	45–50%
AREMA, Vol 1 2006	20–30%	30–35%	35–40%
ORE D 117/R8, 1976	33%	33%	33%

Mohammadzadeh et. al [47] haben Querverschiebwiderstandsmessungen in lockeren sowie in durch den Zugverkehr verdichteten Bereichen durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass der Anteil der einzelnen Schotterzonen stark vom Verdichtungsgrad des Schotters abhängt (siehe Tab. 2.3). Generell hat der Verdichtungszustand des Schotters großen Einfluss auf den Querverschiebewiderstand. In [31] werden die Auswirkungen der Schotterverdichtung (konkret die daraus resultierende Reduktion der Porosität), auf Basis der Ergebnisse einer Simulation der statischen Querverschiebewiderstandsmessung mittels Diskreter-Elemente-Methode, welche anhand real durchgeführter Versuche geeicht wurden, als „einflussreichster Parameter für den Querverschiebewiderstand“ beschrieben. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen anderer Autoren (zum Beispiel [41, 71]) welche einen signifikanten Einfluss der Schotterverdichtung auf den Querverschiebewiderstand feststellten. Zuletzt wurde auch die Verbesserung des Querverschiebewiderstands durch den Einsatz des DGS bei Schwellenformen mit ohnehin erhöhtem Querverschiebewiderstand (besohlte Schwellen) durch Forschungsarbeiten der TU München belegt [76]. Alternative Schwellenformen, die durch einen besseren Verbund zwischen Schotter und Schwellensohle oder aufgrund ihrer Form beziehungsweise erhöhter Masse einen höheren Querverschiebewiderstand aufweisen, sind:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Besohlte Schwellen
- Ohrenschwellen (werden nicht mehr eingesetzt [41])
- Leiterschwellen (eine vor allem in Japan verwendete Form der Langschwellen [41])
- Rahmenschwellen (werden zum Beispiel bei Hochgeschwindigkeitsabschnitten eingesetzt [41])

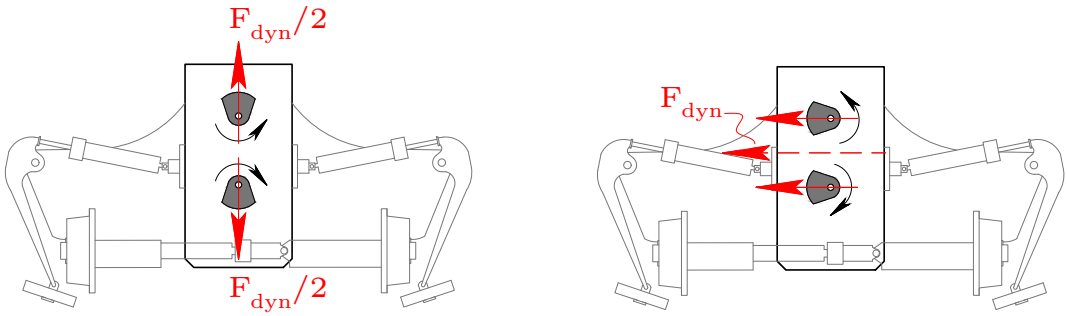
Der Querverschiebewiderstand kann zusätzlich bei Gleisabschnitten mit hohen Querbelastungen (wie zum Beispiel bei Weichen oder bei kritischen Gleisbögen) auch durch die Verwendung von Schwellenankern oder Sicherungskappen erhöht werden [41].

2.3.2 Verdichtung mit dem dynamischen Gleisstabilisator

Die Gleislagekorrektur mittels Hebe-, Richt- und Stopfmaschinen führt, wie bereits beschrieben, zur Reduktion des Querverschiebewiderstands, wobei eine anschließende Verdichtung des Schotters diesen wieder signifikant erhöht. Es werden daher von verschiedenen Herstellern von Stopfmaschinen unterschiedliche Systeme zur Schotterverdichtung eingesetzt. *Plasser & Theurer* entwickelte hierfür in den 1970er Jahren den DGS [62]. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits Zwischenfach- und Vorkopfverdichter entwickelt worden, mit denen die Wirksamkeit der Schotterverdichtung bereits bewiesen werden konnte [62, 70]. Das Konzept des dynamischen Gleisstabilisators war jedoch gänzlich neu. Anstatt die dynamische Anregung an der freien Schotteroberfläche aufzubringen, wurde die Vibration über die Schiene und die Schienenbefestigung in die Schwelle und somit in den Schotteroberbau eingeleitet. Gleichzeitig wurde eine vertikale Belastung über Hydraulikzylinder aufgebracht, um die durch die Verdichtung entstehenden Setzungen besser kontrollieren zu können [62]. Der DGS wurde dabei zunächst als eigenständige Gleisinstandhaltungsmaschine konzipiert [62]. Mittlerweile ist er aber auch in Hebe-, Richt- und Stopfmaschinen wie den *Dynamic Stopfexpress 09-4X E*^{3} integriert [58] und somit fester Bestandteil der Gleisinstandhaltung vieler Eisenbahninfrastrukturbetreiber weltweit.
Wie bereits angedeutet, besteht der DGS aus zwei voneinander unabhängigen Hauptkomponenten: den Unwuchterregern und den vertikalen Auflastzylindern. Bei den Unwuchterregern, welche im Folgenden als Stabilisationsaggregate bezeichnet werden, handelt es sich um zwei gegensinnig rotierende Unwuchten, die direkt übereinander angeordnet sind und in der Ausgangsstellung um 180° gegeneinander verdreht sind. Durch diese Anordnung heben sich die, von den rotierenden Unwuchten erzeugten, Kräfte in Vertikalrichtung auf (siehe Abb. 2.9a) und addieren sich in Horizontalrichtung (siehe Abb. 2.9b). Da die Kraftanregung oberhalb des Schwerpunkts erfolgt, entsteht beim Betrieb eines Aggregats (ohne äußere Krafteinwirkung) die in Abb. 2.10 dargestellte Kippschwingung. Im *Dynamic Stopfexpress 09-4X E*^{3} sind zwei dieser Stabilisationsaggregate verbaut, welche entweder synchron (sodass beide Aggregate gleichzeitig in dieselbe Richtung beschleunigen) oder asynchron (sodass die Aggregate gleichzeitig in einander entgegengesetzte Richtungen beschleunigen) betrieben werden können. Pro Stabilisationsaggregat sind zwei hydraulische Auflastzylinder installiert, die eine vertikale Belastung auf die Schienen und somit auf die Schwelle und den Schotter ausüben. Der Kontakt zwischen Stabilisator und Schiene wird einerseits durch die Auflastzylinder und andererseits durch Anpressrollen, in Verbindung mit hydraulischen Spreizachsen, sichergestellt. Durch die Verbindung zwischen Anpressrollen, Spreizachse und Schiene werden schlussendlich die durch die Stabilisationsaggregate erzeugten Schwingungen in den Schotter eingeleitet. Aufgrund der starren Kopplung zwischen den Auflastzylindern und dem Maschinenrahmen beziehungsweise dem Stabilisationsaggregat, werden die Vertikalkomponenten der beschriebenen Kippschwingung bei der derzeitigen Bauweise des DGS allerdings nicht nur in den Schotter, sondern auch in den Rahmen eingeleitet und regen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

diesen dadurch zum Mitschwingen an. Die vorhandene Interaktion zwischen Maschinenrahmen und DGS wird in [59] erwähnt. Eine Darstellung des DGS ist in Abb. 2.11 enthalten.



(a) Die durch die Unwuchten des DGS erzeugten Kräfte heben sich in Vertikalrichtung auf

(b) Die durch die Unwuchten des DGS erzeugten Kräfte addieren sich in Horizontalrichtung

Abb. 2.9: Funktionsprinzip der Unwuchtaggregate des DGS

Die Wirkungsweise des DGS wird gemäß [41] von folgenden vier variablen Prozessparametern beeinflusst:

- Frequenz der Unwuchterregung
- Größe der vertikalen Auflast
- „Dynamische Schlagkraft“
- Arbeitsgeschwindigkeit des DGS

Diese Parameter haben unterschiedlichen Einfluss auf den Verdichtungserfolg durch den DGS. Die Frequenz der Unwuchterregung hat, wie bei dynamischen Systemen üblich, großen Einfluss auf das Verhalten des Maschinen-Boden-Interaktionssystems und somit auch auf die Verdichtung. In Österreich wurde eine Frequenz zwischen 30 und 35 Hz vonseiten der ÖBB vorgeschrieben [49]. Dies entspricht jenem Frequenzbereich, in dem „Schotterfließen“ auftritt – was laut [18] bei Frequenzen ab circa 35 Hz beobachtbar ist – und die Schotterkörner dadurch eine dichtere Lage einnehmen können [41]. Die Einstellung der Anregungsfrequenz wird derzeit meist so gewählt, dass ein möglichst vibrationsarmer Lauf der Maschine erreicht wird [41].

Die vertikale Auflast hat insofern Einfluss auf die Verdichtungswirkung des DGS, als dass mit steigendem hydraulischen Druck eine größere statische Last aus dem Maschinenrahmen

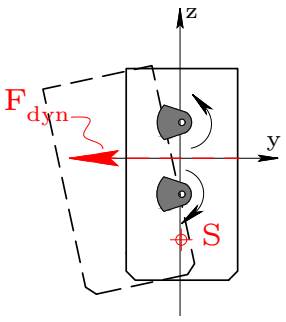


Abb. 2.10: Durch die Konstruktion der Unwuchtaggregate entstehende Kippschwingung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

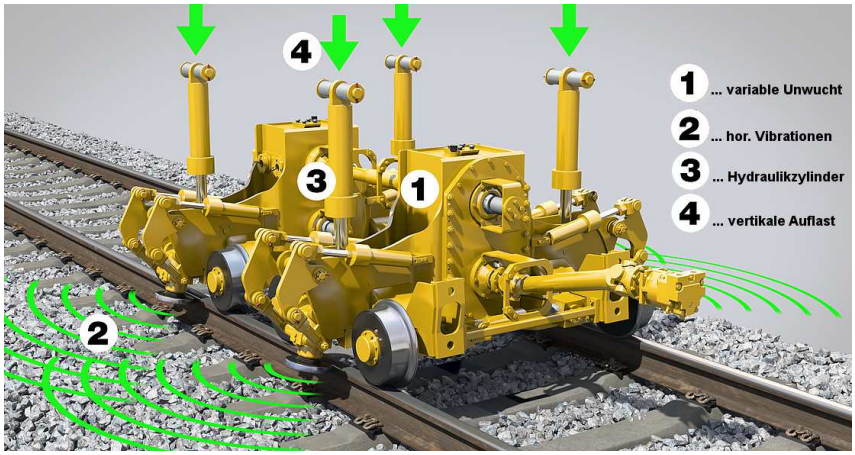


Abb. 2.11: Darstellung des DGS und der wichtigsten Komponenten, adaptiert nach [5]

aktiviert werden kann. Diese Last wirkt über die Schiene auf die Schwelle und erhöht damit auch die Schotterpressung. Bei Scherversuchen mit stoßartiger Scherlast konnte beobachtet werden, dass eine höhere Vertikalspannung, bei gleichem Impuls, höhere Scherwege zur Folge hat [32]. Daher wird in Zusammenhang mit dem DGS angenommen, dass eine höhere vertikale Auflast zu einer intensiveren Umlagerung des Schotters und damit zu einer besseren Verdichtung führt [41]. In Österreich wurde vonseiten der ÖBB je nach Streckenklasse ein Anpresszylinderdruck in Abhängigkeit von der Streckenklasse von 60 bis 75 bar festgelegt [49]. Dies entspricht bei Gleisstabilisatoren von *Plasser & Theurer* einer Anpresskraft von 229 beziehungsweise 277 kN [59].

Der Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit auf die Verdichtungsleistung des DGS wurde bereits zur Zeit seiner Entwicklung als gering identifiziert [62]. Dies kann damit erklärt werden, dass es einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Setzungen und den dafür verantwortlichen Lastspielen gibt, womit die ersten Lastspiele einen wesentlich höheren Beitrag an der Gesamtsetzung liefern als die darauffolgenden [41]. Es sind Arbeitsgeschwindigkeiten zwischen 200 m/h und 2500 m/h möglich. Die dynamische Schlagkraft ist von verschiedenen Faktoren abhängig und errechnet sich gemäß Gleichung (2.3):

$$F_{dyn} = m \cdot r \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \tag{2.3}$$

Wie in Gleichung (2.3) ersichtlich ist, haben sowohl die Anregungsfrequenz f, als auch die Masse der Unwuchten m sowie die Exzentrizität r derselben Einfluss auf die Größe der dynamischen Schlagkraft. Mittlerweile ist die Exzentrizität der Schwungmassen bei neu hergestellten Gleisstabilisatoren variabel, wodurch der DGS vibrationslos auf die gewünschte Frequenz angefahren werden kann. Die Einstellung der Exzentrizität erfolgt dabei zwischen 0% und 100%. Die beschriebenen Parameter ähneln jenen, die auch auf den Verdichtungserfolg anderer Verdichtungsgeräte, wie zum Beispiel Vibrations- und Oszillationswalzen, signifikanten Einfluss haben [1, 57]. Daher wird im Zuge der Auswertung der Messdaten in den späteren Kapiteln analog zu [57] die dynamische Schlagkraft nicht als eigenständiger Parameter angeführt. Es wird stattdessen die Amplitude der erzeugten Schwingung als variabler Parameter beschrieben. Diese wird zum Beispiel auch in [59] als Messgröße angegeben, da sie im Gegensatz zur dynamischen Schlagkraft direkt gemessen werden kann und nicht erst errechnet werden muss. Einige Gleisstabilisatoren wurden mit einem Modul zur automatischen Messung des Querverschiebewiderstands ausgeliefert. Dieses System basiert auf einer Leistungsbilanzbetrachtung [12]. Hierbei wird die durch das Hydraulikaggregat bereitgestellte Leistung mit einer theoretisch durch die Schwellen aufgenommenen Reibungsleistung verglichen. Daraus lässt sich aus den aufgezeichneten Maschinendaten ein dynamischer

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

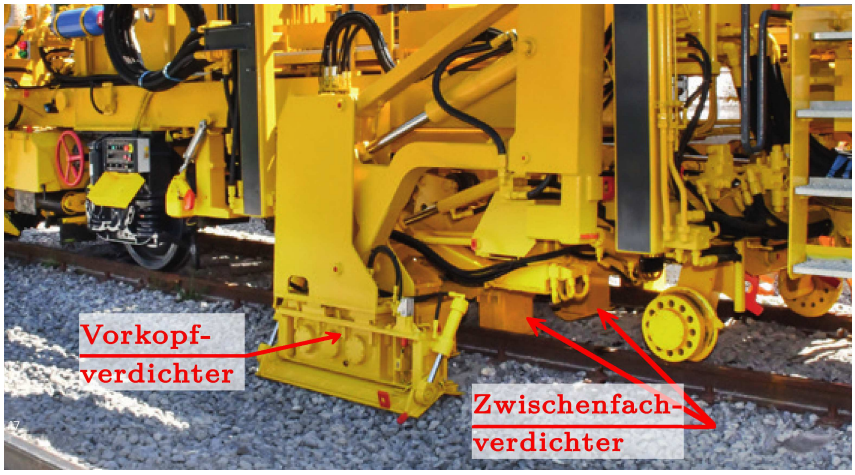


Abb. 2.12: Darstellung des Zwischenfachverdichters, adaptiert nach [45]

Querverschiebewiderstand errechnen. Dieser on-board ermittelte Querverschiebewiderstand wurde mit gemessenen Querverschiebewiderständen von Einzelschwellen verglichen. Durch lineare Korrelation ergab sich eine Formel, mit der eine Beziehung zwischen den kontinuierlichen Messungen und den statischen Querverschiebewiderstandsmessungen hergestellt werden konnte. Mit dieser Formel können die Ergebnisse der on-board Messung in einen statischen Querverschiebewiderstand umgerechnet werden, der in 90 % der Fälle von vergleichenden händischen Messungen überschritten wurde. Diese empirische Formel lautet gemäß [12]:

$$QVW_{einzelneSchwelle} = 0.1216 \cdot Ergebnis_{DGS62N} - 9.45 \tag{2.4}$$

Da sich diese Formel nur auf den DGS 62N bezieht und neuere Entwicklungen wie die variable Exzentrizität der Unwuchten nicht berücksichtigt werden, wird dieses Modul mittlerweile nicht mehr zum Verkauf angeboten.

2.3.3 Verdichtung mit Vorkopf- und Zwischenfachverdichter

Eine Alternative zum dynamischen Gleisstabilisator stellt die ältere Technologie der Vorkopf- beziehungsweise Zwischenfachverdichter dar [62]. Diese werden auch heute noch von manchen Herstellern verwendet und in neue Hebe-, Richt- und Stopfmaschinen integriert [22]. Diese Geräte sind vom Funktionsprinzip am ehesten mit Rüttelplatten zu vergleichen, wobei die Bewegung in Arbeitsrichtung zyklisch erfolgt. Die Verdichtungsplatten verbleiben also für eine gewisse Zeit an derselben Stelle bevor sie erneut angehoben und die nächsten Bereiche verdichtet werden. Sowohl beim Zwischenfach- als auch beim Vorkopfverdichter werden vertikale Schwingungen unter vertikaler Auflast auf die freie Schotteroberfläche aufgebracht. Die Fa. *MATISA* verwendet dabei beispielsweise für die Zwischenfachverdichter hydraulisch erzeugte Vibrationen, während die schwereren Vorkopfverdichter über eine integrierte Unwucht angeregt werden [45]. Eine Darstellung dieses Systems ist in Abb. 2.12 enthalten.

Die Funktionsweise dieses Systems wurde bereits in den 1980er Jahren ausführlich durch *Selig* untersucht [70]. Er kommt dabei zum Schluss, dass im Wesentlichen dieselben Prozessparameter wie beim DGS von Bedeutung für den Verdichtungserfolg sind. Der einzige Unterschied besteht darin, dass es bei dem System der Zwischenfach- und Vorkopfverdichtung keine Arbeitsgeschwindigkeit gibt, weshalb er stattdessen die Verdichtungszeit als relevanten Prozessparameter anführt. Im Gegensatz zu anderen Autoren, die sich mit dem dynamischen Verhalten des Oberbauschotters

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

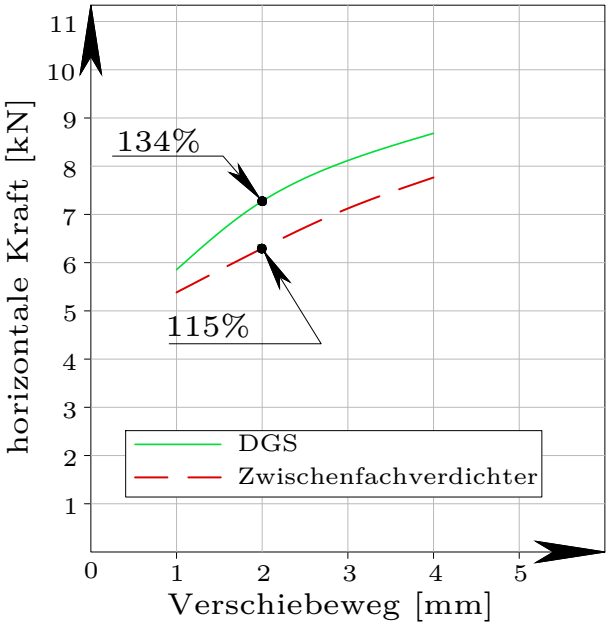


Abb. 2.13: Gegenüberstellung der Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den DGS und den Zwischenfachverdichter (in % des Widerstands direkt nach dem Stopfvorgang), adaptiert nach [71]

beschäftigt haben (wie zum Beispiel [41]), gibt *Selig* keine Grenzfrequenz an bei der ein „Fließen" des Schotters eintritt. Er weist stattdessen darauf hin, dass dieser Effekt in Wechselwirkung mit den anderen variablen Prozessparametern, wie der statischen Auflast und der Schwingungsamplitude, steht und daher nicht an einer spezifischen Frequenz festgemacht werden kann. Ähnlich wie beim DGS erhöht auch der Einsatz der Zwischenfach- und Vorkopfverdichter den statischen Querverschiebewiderstand einer Einzelschwelle [70]; auch jüngere Untersuchungen bestätigen dieses Ergebnis [22]. Zusätzlich zum Querverschiebewiderstand wird auch die Dichte des Schotters unterhalb der Schwelle durch die Zwischenfachverdichtung erhöht [70]. In einem späteren Werk stellt *Selig* den Effekt des DGS auf den Querverschiebewiderstand jenem der Zwischenfach- und Vorkopfverdichter gegenüber [71]. Es zeigt sich, dass der Einsatz des DGS im Allgemeinen einen etwas höheren Querverschiebewiderstand ermöglicht (siehe Abb. 2.13).

Da der statische Querverschiebewiderstand einer Einzelschwelle eine klare Abhängigkeit vom Verdichtungszustand des Oberbauschotters zeigt – er wird durch den Einsatz von beiden beschriebenen Verdichtungsgeräten erhöht –, handelt es sich bei diesem um einen möglichen Wert zur Verdichtungskontrolle.

2.4 Verfahren zur Verdichtungskontrolle im Gleisbau

Zur Verdichtungskontrolle werden im Straßenbau in der RVS 08.03.01 [64] für den Unterbau und in der RVS 08.15.01 [67] für die ungebundenen Tragschichten Mindestanforderungen für die Abnahme von Verdichtungsarbeiten definiert. Dafür werden zu erreichende Werte für den statischen (E_{v1}, E_{v2}) und dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}), sowie für den Verdichtungsgrad (erreichte Trockendichte in Prozent der Proctordichte D_{pr}) festgelegt. Die Messung dieser Werte erfolgt punktuell mit den entsprechenden Versuchen. Der Einsatz der FDVK ermöglicht hingegen diese Anforderungen nicht nur punktuell, sondern im gesamten Verdichtungsbereich zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

verifizieren [1]. Das Verdichtungsgerät wird bei der FDVK zugleich auch als Messgerät genutzt. Bei konstanten Prozessparametern (wie zum Beispiel Frequenz, Amplitude, Fahrgeschwindigkeit) kann eine Änderung des Bewegungsverhaltens des Verdichtungsgeräts (im Straßenbau betrifft dies die Bandage einer dynamischen Walze) nur durch veränderte Eigenschaften des Untergrunds erklärt werden. Durch dynamische Messungen am Verdichtungsgerät (konkret an der Lagerschale der Bandage) ist es möglich, die Veränderungen des Bewegungsverhaltens zu erfassen und zu analysieren. Aus diesen Messungen können wiederum Werte ermittelt werden, die in Relation zur Untergrundsteifigkeit stehen – die sogenannten FDVK-Werte. Dabei werden von verschiedenen Walzenherstellern unterschiedliche FDVK-Systeme und -Werte verwendet [23]. Über Korrelationsbildung zwischen einem dieser FDVK-Werte und klassischen Verdichtungskennwerten kann schlussendlich eine vollflächige Überprüfung der geforderten Kriterien erfolgen [65]. Bei der Verdichtungskontrolle kann daher allgemein zwischen punktuellen und flächendeckenden Verfahren unterschieden werden.

Während im Straßenbau sowohl die Ziele der Verdichtung als auch die damit verbundenen Kontrollen klar definiert sind, werden diese im Bahnbau in Österreich vonseiten der ÖBB nur für die Abnahme des Unterbauplanums, respektive der Planumsschutzschicht, vorgegeben [51]. Hinsichtlich der Verdichtungsarbeiten des Schotterbetts wurden nur geometrische, jedoch keine geotechnischen Anforderungen festgelegt [51]. Es gibt jedoch einige messbare Eigenschaften der Gleiskonstruktion, die in direktem Zusammenhang mit der Verdichtung des Oberbauschotters stehen und daher zumindest das Potential zur Verdichtungskontrolle haben:

- Trockendichte des Oberbauschotters
- Vertikale Steifigkeit der Gesamtkonstruktion
- Querverschiebewiderstand (horizontale Steifigkeit, siehe dazu: 2.3.1)

Zur Bestimmung der Trockendichte des Oberbauschotters im eingebauten Zustand eignen sich das Flüssigkeitsersatzverfahren mit Wasser sowie radiometrische Verfahren, wobei der Einbringvorgang der Messstäbe heikel ist und es oftmals zu verfälschten Ergebnissen kommen kann [40]. Kleine Änderungen der Trockendichte haben relativ große Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Schotters [40]. Um den Erfolg der Schotterverdichtung mit diesem Parameter beurteilen zu können, wäre eine sehr genaue Messmethode mit geringer Streuung erforderlich. Dies trifft auf keine der beiden genannten Methoden zu.

Im Straßenbau werden mit dem dynamischen Verformungsmodul und den statischen Verformungsoduln vertikale Steifigkeitsangaben zur Beurteilung des Verdichtungserfolgs herangezogen. Auch im Gleisbau werden verschiedene statische sowie dynamische Möglichkeiten zur Ermittlung von vertikalen Steifigkeiten angewendet [79]. Die Motivation für diese Versuche liegt aber weniger in der Ermittlung der Steifigkeit des Oberbauschotters (und somit in der Verdichtungskontrolle) als vielmehr in der Identifikation von Abschnitten mit gering tragfähigen und damit besonders setzungsanfälligen Untergrundverhältnissen [10]. Die meisten dieser Methoden ermöglichen nur eine punktuelle Beurteilung der vertikalen Steifigkeit. Es wurden aber auch Methoden zur kontinuierlichen Steifigkeitsmessung entwickelt [79]. Zu den punktuellen Methoden zählen [8, 39, 61, 79]:

- Statische Probebelastung mit hydraulischer Presse (statisch)
- Messung mit dem *Benkelmann*-Balken am Gleis (statisch)
- Impulshammermethode (dynamisch)
- Falling Weight Deflectometer (dynamisch)

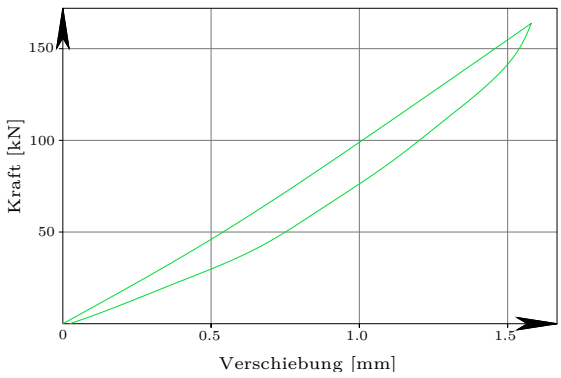
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Light Dynamic Penetrometer – PANDA (dynamisch)
- Dynamischer Lastplattenversuch mit dem „Leichten Fallgewichtsgerät“ (dynamisch)
- Track Loading Vehicle der schwedischen Bahn – TLV (statisch und dynamisch)
- Messung der dynamischen oder statischen Einsenkung mit verschiedenen Sensoren:
  - Dehnungsmessstreifen
  - Beschleunigungsaufnehmer
  - Induktive Wegaufnehmer
  - Kameramessung und Auswertung mit Bildkorrelation

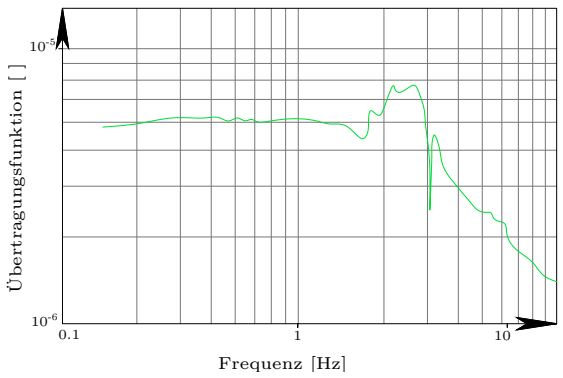
Die statischen Systeme basieren dabei auf einer sehr einfachen Definition der vertikalen Steifigkeit, wobei meist die Gesamtsteifigkeit der Gleiskonstruktion (inklusive eines wirksamen Anteils des Untergrunds) ermittelt wird (siehe Gleichung (2.5)) [8].

$$k_{(t)} = \frac{F_{(t)}}{z_{(t)}} \tag{2.5}$$

Die vertikale Steifigkeit $k_{(t)}$ wird hierbei als Verhältnis zwischen der zeitabhängigen Kraft $F_{(t)}$ und der daraus resultierenden Verformung $z_{(t)}$ betrachtet. Der unterstellte Zusammenhang ist linear, was bei realen Messungen aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Einzelkomponenten (zum Beispiel: elastische Zwischenlagen und Schotter) nicht zu beobachten ist (siehe Abb. 2.14) [8]. Die in Abb. 2.14a dargestellte Last-Verformungsmessung eines quasi-statischen Belastungsversuchs zeigt, neben dem beschriebenen nichtlinearen Verhalten, auch eine Hysterese. Dies weist darauf hin, dass bei Belastung der Gleiskonstruktion auch eine gewisse Energiedissipation stattfindet [8].



(a) Last-Verformungsverhalten eines vertikalen, quasistatischen Belastungsversuchs einer Gleiskonstruktion, adaptiert nach [8]



(b) Amplitude der vertikalen, komplexen Übertragungsfunktion zwischen Anregung (Kraft) und Reaktion (Verschiebung) in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz, adaptiert nach [8]

Abb. 2.14: Möglichkeiten zur Beurteilung der vertikalen Steifigkeit

Erfolgt die Beurteilung der vertikalen Steifigkeit über dynamische Methoden, so werden je nach Methode unterschiedliche Steifigkeitsdefinitionen verwendet. Bei der Impulshammermethode und bei der kombinierten Last- und Verschiebungsmessung mit dynamischen Sensoren eignet sich dafür die Ermittlung der komplexen Übertragungsfunktion (bestehend aus Phasenwinkel und Amplitude) zwischen Anregung (Kraft) und Systemreaktion (Verschiebung) im Frequenzbereich [8]. Ein Beispiel für eine komplexe Übertragungsfunktion ist in Abb. 2.14b dargestellt. Die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Übertragungsfunktion ist dabei in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz folgendermaßen definiert [8]:

$$\alpha_{(f)} = \frac{z_{(f)}}{F_{(f)}} \tag{2.6}$$

Oft wird zur Beurteilung der vertikalen Steifigkeit nicht die Übertragungsfunktion, sondern die dynamische Steifigkeit angegeben, wobei die dynamische Steifigkeit der Kehrwert der Übertragungsfunktion ist [8].

Die vertikale Steifigkeit unterhalb der Schienen (also ab Oberkante Schwelle) kann mit dem Falling Weigth Deflectometer bestimmt werden [8]. Beim Falling Weigth Deflectometer wird über eine spezielle Belastungseinrichtung mittels eines Gewichts, das aus einer definierten Höhe fallen gelassen wird, ein Impuls auf eine zuvor von den Schienen gelöste Schwelle aufgebracht. Dieser Impuls wird mithilfe einer dynamischen Kraftmessdose erfasst. Die durch den Impuls ausgelöste, vertikale Untergrundbeschleunigung wird wiederum radial in regelmäßigen Abständen zum Impulszentrum gemessen. Durch zweimalige Integration dieser Messsignale werden Verschiebungsgrößen ermittelt, die in Verbindung mit dem bekannten Impuls zur Steifigkeitsberechnung verwendet werden können.

Auf ähnliche Weise kann die Steifigkeit des Oberbauschotters mithilfe des dynamischen Lastplattenversuchs mit dem Leichten Fallgewichtsgerät ermittelt werden (eine Darstellung des Leichten Fallgewichtsgeräts und dessen Komponenten ist in Abb. 2.15a enthalten). Dabei wird allerdings nicht nur die reine Steifigkeit des Oberbauschotters gemessen. Je nach Stärke des Schotterbetts beeinflussen auch die Steifigkeit einer eventuell vorhandenen Planumsschutzschicht, beziehungsweise jene des Untergrunds das Messergebnis [39]. Analog zum Falling Weigth Deflectometer wird auch beim dynamischen Lastplattenversuch ein definierter Impuls auf das Schotterbett abgegeben. Dabei wird das Fallgewicht über ein Gestänge geführt und auf ein Feder-Dämpfer-Element fallengelassen [2]. Der so initiierte Impuls wird an eine kreisrunde Platte ($\varnothing$ 30 cm) weitergegeben und führt zu einer Beschleunigung und in weiterer Folge zu einer Verschiebung dieser Platte. Die Beschleunigung der Platte wird während des Versuchs über einen in die Platte eingebauten Beschleunigungssensors gemessen und anschließend über doppelte zeitliche Integration die Verschiebung der Platte ermittelt. Durch die Kenntnis der Verschiebung und des Impulses lässt sich, unter Zugrundelegung der Theorie des elastisch isotropen Halbraums mit einer kreisförmigen Belastung, ein Verformungsmodul E_{vd} ermitteln. Dieser Modul lässt sich unter bestimmten Voraussetzungen in den Verformungsmodul der Erstbelastung aus dem statischen Lastplattenversuch E_{v1} umrechnen [66]. Im Straßenbau wird der dynamische Lastplattenversuch seit längerem zur Verdichtungskontrolle angewendet [64, 67], wobei jüngere Untersuchungen auch die Eignung zur Steifigkeitsbeurteilung und somit zur Verdichtungskontrolle des Oberbauschotters belegen [39]. Dafür wurden Vergleichsversuche mit dem „Light Dynamic Penetrometer – PANDA“, aus denen ebenfalls der Verformungsmodul E_{v1} ermittelt werden kann, durchgeführt, wobei ähnliche Steifigkeitswerte für den Schotter ermittelt werden konnten [39] .

Beim „Light Dynamic Penetrometer“ handelt es sich um eine Variante des „Dynamic Cone Penetration Tests“ [39]. Dabei wird ein Gestänge mit einer definierten Spitze über dynamische Impulse in den Untergrund eingebracht, wodurch auf verschiedene Bodeneigenschaften geschlossen werden kann. Für die Ermittlung der Untergrundsteifigkeit müssen beispielsweise der Impuls (beziehungsweise die dadurch im Gestänge erzeugte Longitudinalwelle) und die Eindringtiefe bekannt sein. Diese Parameter können zum Beispiel durch Beschleunigungssensoren am Gestängekopf und dynamische Dehnmessstreifen am Gestänge (zur Messung der angeregten Longitudinalwelle) sowie einem linearen Differentialtransformator (LVDT) am Gestängefuß (zur Messung der Eindringtiefe) erfasst werden. Aus diesen Messergebnissen wird vom Messgerät der dynamische Widerstand q_d errechnet, woraus wiederum auf den Verformungsmodul des statischen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Lastplattenversuchs geschlossen werden kann. Diese Methode dauert länger als die Durchführung des dynamischen Lastplattenversuchs, bietet aber den Vorteil, dass die Steifigkeit der einzelnen durchdrungenen Schichten separat erfasst werden kann. Beim Gleis kann somit die Steifigkeit des Oberbauschotters, der Planumsschutzschicht, der einzelnen Schichten der Dammkonstruktion und des obersten Bereichs des Untergrunds ermittelt werden. Die Grenztiefe für die Anwendung des Versuchs wird in [39] mit 6 m angegeben.

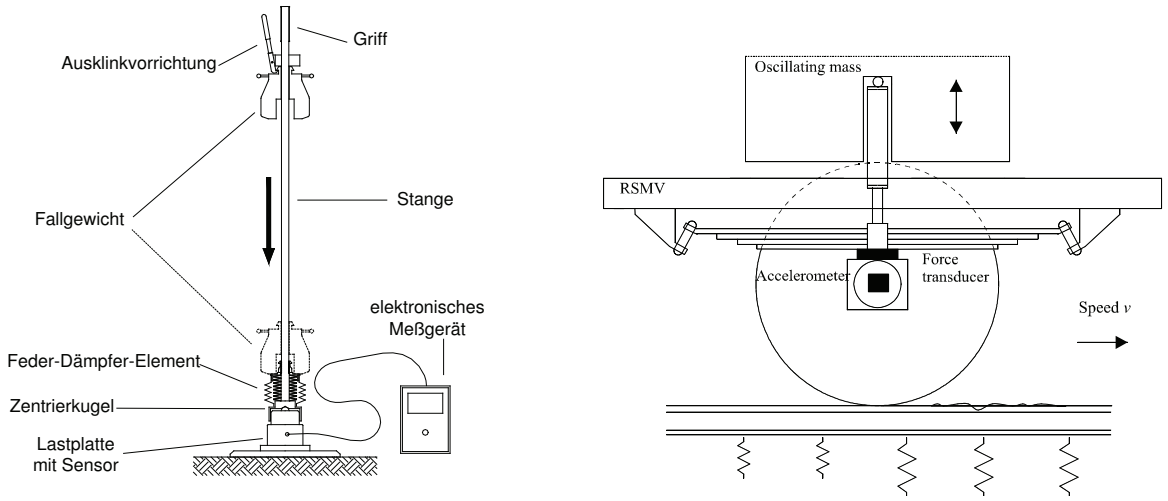
Neben den bisher angeführten allgemeinen Methoden zur Messung der vertikalen Steifigkeit der Gleiskonstruktion wurden von einigen Infrastrukturbetreibern auch spezielle Messfahrzeuge zu diesem Zweck entwickelt. Manche dieser Fahrzeuge, wie zum Beispiel das „Track Loading Vehicle (TLV)“ der schwedischen Bahn, stellen weitere punktuelle Messmethoden dar [8]. Es wurden aber auch Methoden zur kontinuierlichen Messung der vertikalen Steifigkeit entwickelt [8]:

- Messfahrzeug der Volksrepublik China (CARS)
- Messfahrzeug der USA (TTCI)
- Messfahrzeug der französischen Bahn (CETE)
- Messfahrzeug der SBB
- Messfahrzeug der schwedischen Bahn (Banverket)

Beim Messfahrzeug der schwedischen Bahn, dem „Rolling Stiffness Measurment Vehicle (RSMV)“ handelt es sich um ein Messgerät zur kontinuierlichen dynamischen Messung der vertikalen Steifigkeit der Gleiskonstruktion. Dies entspricht damit im Wesentlichen einer flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle. Im Gegensatz zur FDVK handelt es sich dabei allerdings um ein eigenständiges Messfahrzeug und nicht um eine arbeitsintegrierte Methode. Das RSMV besteht aus einem umgebauten zweiachsigen Frachtwagon, bei dem auf eine Achse ein Unwuchterreger mit zwei rotierenden Massen montiert wurde. Die vertikalen Schwingungen werden über hydraulische Zylinder auf die Achsen aufgebracht. Zur Messung der dynamischen Last ist am unteren Ende der hydraulischen Zylinder jeweils eine dynamische Kraftmessdose sowie an jeder Seite der Achse ein Beschleunigungsaufnehmer montiert [9]. Die statische Achslast beträgt 180 kN, die Amplitude der dynamischen Anregung maximal 60 kN, wobei die Anregungsfrequenz mit 50 Hz limitiert ist. Die Messgeschwindigkeit beträgt 10 – 30 km/h [8]. Der prinzipielle Aufbau des Geräts ist in Abb. 2.15b dargestellt.

Messfahrten mit höherer Geschwindigkeit erfolgen dabei mit einer definierten Anregungskreisfrequenz ω_0 und werden nach dem Prinzip der Amplitudenmodulation und -demodulation, welches seinen Ursprung in der Radiotechnik hat, ausgewertet. Das gemessene Signal wird dabei, aufgrund seiner Form, als bereits moduliertes Signal aufgefasst und anschließend demoduliert und tiefpassgefiltert. Nach einem Resampling des zeitbasierten Signals in eine räumliche Größe wird die Steifigkeit als Verhältnis zwischen gemessener Kraft und Verschiebung ermittelt [9]. Bei niedrigeren Messgeschwindigkeiten beeinflussen weniger Störungen (wie zum Beispiel aus Gleislagefehlern) die Messergebnisse, weshalb dann die Möglichkeit besteht nicht nur eine definierte Anregungsfrequenz, sondern ein ganzes Anregungsfrequenzband zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird die Steifigkeit nicht mehr über das Verfahren der Amplitudenmodulation und -demodulation ermittelt. Die Auswertung erfolgt hier über die Betrachtung einer Zeitreihe. Dafür werden aus den diskreten Messdaten die Autokovarianz der Verschiebung und der Kraft sowie die Kreuzkorrelationsfunktion zwischen diesen beiden Messgrößen ermittelt. Daraus werden wiederum zur Schätzung der Leistungsspektraldichten Periodogramme unter Verwendung der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Die dynamische Lastplatte mit dem Leichten Fallgewichtsgerät [2]

(b) Messprinzip des RSMV [8]

Abb. 2.15: Beispiele für die punktuelle und flächendeckende Ermittlung der vertikalen Steifigkeit

Welchfensterung erstellt. Die dynamische Steifigkeit wird schließlich über die Transferfunktion zwischen der Leistungsspektraldichte der Kraftmessung und jener der Kraft-Verschiebungsbeziehung errechnet [9]. Diese Messmethode ist vor allem dazu geeignet, um Untergrundbereiche geringer Steifigkeit zu identifizieren [9]. Es wurden allerdings auch Versuche durchgeführt, um mithilfe der Methode des „Machine Learnings“ von den gemessenen Steifigkeiten auf Parameter wie die Stärke der Dammkonstruktion oder die Scherwellengeschwindigkeit zu schließen [10]. Dabei wird in [10] festgestellt, dass die Methode zwar das Potential hat die genannten Parameter zu erheben, es jedoch einer großen Datenbasis für das Training der Modelle bedarf, um sicherere Vorhersagen treffen zu können.

Manche Autoren (zum Beispiel: [11, 30]) schlagen vor, Fahrzeuge, die ohnehin auf den Gleisen unterwegs sind, entsprechend zu instrumentieren, um die dynamische Steifigkeit der Gleiskonstruktion flächendeckend messen zu können. In [11] wird die Möglichkeit von Steifigkeitsmessungen durch Messwägen zur Erfassung der Gleisgeometrie vorgestellt. Dabei müssen auf dem Messwagen zwei unabhängige Systeme zur Messung der vertikalen Geometrie vorhanden sein (zum Beispiel eine Sehne und Beschleunigungssensoren). Aus diesen Messdaten kann die Einsenkung zufolge der Belastung durch das Fahrzeug errechnet werden. Durch eine zusätzliche Berechnung der Kontaktkraft zwischen Schiene und Fahrzeug oder eine direkte Messung dieser Kraft kann in weiterer Folge die vertikale Steifigkeit ermittelt werden. Eine Möglichkeit gewöhnliche Gleisfahrzeuge durch Ergänzung eines Beschleunigungsaufnehmers auf einer Achse mit bekannter Achslast und Steifigkeit der Federung als Messfahrzeug zu nützen, wird in [30] diskutiert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchungen am DGS

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert wurde, existieren zahlreiche Möglichkeiten zur Messung der vertikalen Steifigkeit im Gleisbau. FDVK-Werte werden meist mit Messgrößen der vertikalen Steifigkeit korreliert [65]. Würde es nun gelingen, einen FDVK-Wert für den DGS zu entwickeln und diesen ebenfalls mit Messwerten von Steifigkeitsmessungen zu korrelieren, könnten im Zuge der Gleisinstandhaltung Aussagen über die Verteilung der Steifigkeitsverhältnisse im bearbeiteten Bereich getroffen werden. Auf Basis dieser Daten wären bessere Vorhersagen über die Rate der Gleislageverschlechterung möglich und der Instandhaltungsprozess könnte optimiert werden. Um beurteilen zu können, ob die Entwicklung eines derartigen FDVK-Systems für den DGS möglich ist, erfolgten erste Vorversuche im Frühjahr 2019 durch *Plasser & Theurer* in Zusammenarbeit mit der *TU Wien* und *FCP*. Die Möglichkeit zur Versuchsdurchführung ergab sich kurzfristig im Zuge eines Maschinentests von *Plasser & Theurer*. Dabei kamen ein bereits im Vorfeld erstelltes Versuchs- und Messkonzept, um Auswirkungen von Veränderungen des Schotteroberbaus auf das Bewegungsverhalten des DGS erforschen zu können, zum Einsatz. Nachfolgend werden die beiden genannten Konzepte genauer ausgeführt.

3.1 Versuchskonzept

Das Versuchskonzept sah mehrere aufeinanderfolgende Fahrten des mechanisierten Durcharbeitungszuges (MDZ) auf derselben Strecke vor. Zu Beginn sollte eine erste Verdichtungsfahrt mit dem DGS durchgeführt werden, um den Ausgangszustand zu dokumentieren beziehungsweise die Reaktion des DGS auf einen „dichten“ Schotter messen zu können. Nach dieser Dokumentationsfahrt sollte ein Stopfdurchgang erfolgen, um den Oberbauschotter „aufzulockern“ und gleichzeitig über die Länge des Versuchsabschnitts zu homogenisieren. Im Ausgangszustand vorhandene Unregelmäßigkeiten des Verdichtungszustands des Schotters sollten also im Zuge des Stopfvorgangs ausgeglichen werden. Nach dem Stopfvorgang wurden zwei Verdichtungsvorgänge mit dem DGS vorgesehen, welche wiederum Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Verdichtung durch den DGS ermöglichen sollten. Außerdem sollten die zwei aufeinanderfolgenden Verdichtungsfahrten dazu dienen, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen.

Ein wesentlicher Aspekt bei FDVK-Systemen ist deren Fähigkeit, Inhomogenitäten im Untergrund festzustellen. Um eine solche Inhomogenität zu schaffen, sollte der DGS im Anschluss an die beschriebenen Verdichtungsfahrten ortsfest über einer messtechnisch instrumentierten Schwelle betrieben werden. Dabei sollte die Anregungsfrequenz der Unwuchten variiert werden, um gleichzeitig die Frequenzabhängigkeit des Maschinen-Boden-Interaktionssystems analysieren zu können. Hierfür wurde eine Frequenzvariation gewählt, die zunächst ausgehend von einer Frequenz von 25 Hz in Form einer Rampe auf 36 Hz erhöht, kurz konstant gehalten und danach erneut in Form einer Rampe auf 25 Hz reduziert werden sollte. Im Anschluss an die Frequenzvariation über einer Einzelschwelle sollte wiederum eine letzte Messfahrt durchgeführt werden, um erkennen zu können, ob die so entstandene Inhomogenität mithilfe der Messungen erkannt werden kann. Das Versuchskonzept kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1. DGS auf unbehandeltem Gleis (Ausgangssituation)
2. Stopfen des Gleises
3. DGS auf frisch gestopftem Gleis
4. DGS auf gestopftem und stabilisiertem Gleis
5. DGS über Einzelschwelle mit Frequenzrampe
6. DGS nach Frequenzrampe

Um sicherzustellen, dass Änderungen im Bewegungsverhalten tatsächlich aus geänderten Untergrundbedingungen resultieren, sollten im Rahmen des Versuchs variable Maschinenparameter (mit Ausnahme der Frequenz der Unwuchterregung bei der Frequenzrampe) konstant gehalten werden. Dabei wurden folgende Maschinenparameter festgelegt:

- Erregerfrequenz: 33 Hz
- Auflast: 70 – 75 bar (entspricht: 260 – 275 kN [59])
- Amplitude der Unwuchterregung: 100%
- Betriebsart der DGS-Aggregate: synchron
- Arbeitsgeschwindigkeit: 2 km/h

3.2 Messkonzept

Der Sinn des beschriebenen Versuchskonzepts bestand darin, Änderungen des Verdichtungszustands des Oberbauschotters herbeizuführen, um zu untersuchen, ob diese Änderungen Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten des Maschine-Boden-Interaktionssystem haben. Derartiges kann allerdings nur durch begleitende dynamische Messungen am DGS beziehungsweise der Schwelle mit entsprechenden Sensoren festgestellt werden. Folgende Sensoren sollten bei den Versuchen eingesetzt werden:

- Zwei Beschleunigungssensoren am DGS (3-D; MEMS; ±100 g)
- Mindestens ein Positionssensor zur Bestimmung der Unwuchtsposition
- Zwei Beschleunigungssensoren an mehreren Schwellen (3-D; MEMS; ±100 g)
- Drei Beschleunigungssensoren im Schotter (3-D; MEMS; ±100 g)
- Drei Beschleunigungssensoren im Nahbereich (3-D; MEMS; ±2 g)
- GPS-Antenne zur Bestimmung der Position der Maschine

Die Beschleunigungssensoren am DGS sollten dabei auf gleicher Höhe und mit ausreichendem horizontalen Abstand zueinander angebracht werden, sodass diese innerhalb einer Messebene liegen. Betrachtet man den DGS als Starrkörper, so ist davon auszugehen, dass die gemessenen Horizontalbeschleunigungen in der Messebene (in y-Richtung, siehe Abb. 3.5) gleich groß sind. Bei Betrachtung der Vertikalbeschleunigungen (z-Richtung, siehe Abb. 3.5) wären die gemessenen Signale nur dann gleich groß, wenn sich der gesamte DGS nach oben oder unten bewegen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

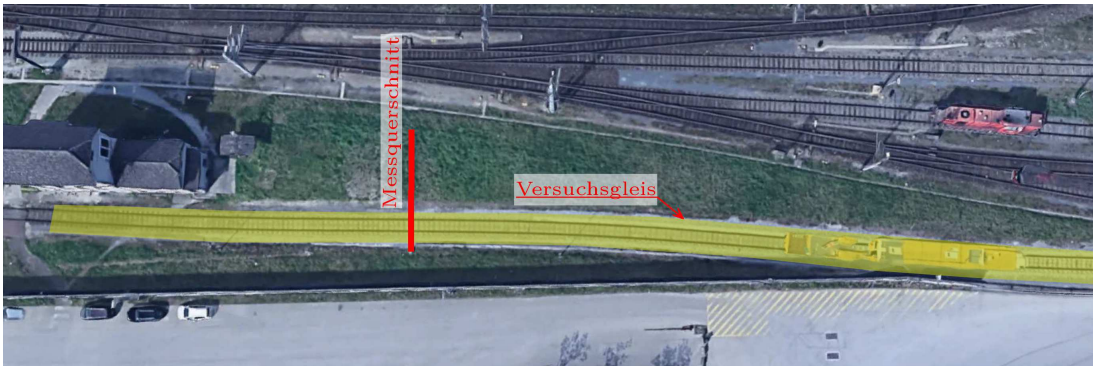


Abb. 3.1: Luftbildaufnahme des Testgleises (gelb markiert) mit Lage des Messquerschnitts, adaptiert nach [20]

würde. Werden hingegen verschiedene Vertikalbeschleunigungen gemessen, so bedeutet dies eine Verkippung beziehungsweise eine Rotation des DGS. Ähnliches gilt für die Beschleunigungen in x-Richtung.

Der DGS steht während des Verdichtungsvorgangs nicht im direkten Kontakt mit dem Schotter. Die dynamische Anregung des Schotters erfolgt vielmehr über den Umweg des Gleisrostes, welcher daher als Bestandteil des Maschine-Boden-Interaktionssystems gesehen werden kann. Da der Gleisrost und somit die Schwellen direkter Bestandteil des Verdichtungsgeräts sind, sollten die Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen an mindestens einer Schwelle gemessen werden. Weiters ist davon auszugehen, dass sich die vom DGS initiierte Horizontalbewegung, in Form einer „Transversalwelle“ entlang des Gleisrostes ausbreitet. Um diese Transversalwelle näher untersuchen zu können, sollte die Horizontalbeschleunigung idealerweise an mehreren Schwellen gemessen werden, wobei Messungen an mindestens einer Schwelle unbedingt erforderlich sind. Da die Sensoren der Schwelle auch in einer Messebene liegen sollten (also in derselben Höhe mit ausreichendem Horizontalabstand), gilt für die Beschleunigungen der Schwelle Ähnliches wie für die Beschleunigungen beim DGS. Auch hier werden gleiche Beschleunigungen in y-Richtung erwartet. Treten unterschiedliche Beschleunigung in z-Richtung auf, spricht dies für eine Rotation der Schwelle. Um des Weiteren einen Eindruck der Größenordnung der Beschleunigungen zu erhalten, die tatsächlich in den Schotter eingeleitet werden, sollten zusätzlich drei baugleiche Beschleunigungssensoren in einem ausgewählten Zwischenfach positioniert werden. Da der Schotter selbst wiederum in Kontakt mit dem umgebenden Untergrund steht, sollten auch im Nahbereich der messtechnisch ausgerüsteten Schwelle Beschleunigungssensoren positioniert werden, um Erkenntnisse über diese Interaktion gewinnen zu können. Diese Sensoren sollten dabei die vom DGS emittierten Oberflächenwellen erfassen.

3.3 Versuchsdurchführung

Das Versuchskonzept zur Untersuchung des Boden-Maschinen-Interaktionssystems von DGS, Gleis und Gleisschotter wurden am 01.03.2019 in Linz auf einem Nebengleis der *ÖBB* umgesetzt. Das betreffende Gleis liegt im statistischen Bezirk „Industriegebiet-Hafen“. Eine Satellitenaufnahme des Geländes ist Abb. 3.1 zu entnehmen. Beim vorgefundenen Gleis handelt es sich um ein Gleis mit lückenlos verschweißten Schienen mit Holzschwellen (Schwellenabstand $e \approx 60\,\text{cm}$) in Kofferlage. Die Korngrößenverteilung schien der Lieferkörnung K2 gemäß [34] zu entsprechen. Ein Foto der angetroffenen Verhältnisse ist in Abb. 3.2b enthalten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Vor Ort stand eine Stopfmaschine des Typs *Dynamic Stopfexpress 09-4X E*^{3} (siehe 3.2a) zur Verfügung. Bei dieser Maschine sind zwei Stabilisationsaggregate verbaut, was wiederum die Möglichkeit eröffnet, diese synchron oder asynchron zu betreiben (siehe: 2.3.2).

(a) Versuchsgleis mit Versuchsmaschine E3-4x und detaillierter Darstellung von Stopf- und Stabilisationsaggregat

(b) Versuchsgleis mit Schwellensensorik

Abb. 3.2: Aufnahmen des Versuchsgleises und der Versuchsmaschine

Während das Versuchskonzept, wie in 3.1 beschrieben, umgesetzt werden konnte, mussten beim Messkonzept aufgrund der kurzen Vorbereitungszeit einige Änderungen vorgenommen werden. So wurde nur das (in Arbeitsrichtung) vordere der beiden Stabilisationsaggregate anstelle beider Aggregate messtechnisch instrumentiert. Abb. 3.3 enthält eine Übersicht über den geänderten Versuchsaufbau. Bei der Instrumentierung des Aggregats wurden zwei Positionssensoren verwendet, um die Ausfallsicherheit dieser wichtigen Messgröße zu erhöhen. Auch bei der Schwelleninstrumentierung wurde nur eine anstatt mehrerer Schwellen messtechnisch ausgerüstet. Die Anzahl der Beschleunigungssensoren im Zwischenfach wurde ebenfalls von drei auf einen reduziert und die geplante GPS-Antenne zur Bestimmung der DGS-Position entlang der Versuchsstrecke entfiel. Die verwendeten Sensoren entsprachen allerdings jenen, die im Konzept vorgesehen waren und sind in Abb. 3.4 dargestellt. Als Beschleunigungssensoren wurden am DGS und auf der Schwelle auf Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) basierende, dreidimensionale, kapazitive Sensoren der Fa. *KISTLER* des Typs *8396A* mit einem Messbereich von ± 100 g eingesetzt. Die Erschütterungen im Nahbereich wurden mit dreidimensionalen *EpiSensoren* (MEMS mit einem Messbereich von ± 2 g) des Typs *FBA ES-T* der Fa. *Kinemetrics* gemessen. Die Position der Unwucht erfolgte mit, durch die Fa. *FCP* entwickelten und gebauten, Positionssensoren.

Eine Übersichtsskizze der tatsächlich verwendeten Sensorik ist in Abb. 3.5 und Abb. 3.6 enthalten. Die Beschleunigungssensoren am DGS wurden dabei auf gleicher Höhe (27 cm ab Schienenoberkante) mit einem Abstand von 1,20 m und die Beschleunigungssensoren der Schwelle in einem Abstand von 20 cm vom Schwellenkopf beziehungsweise mit einem Innenabstand von 1,98 m angebracht. Zur Synchronisierung der einzelnen Messungen wurden drei Einheiten des *BRIMOS*-Systems von *FCP* verwendet, wobei jeweils eine dieser Einheiten zur Erfassung der Messwerte des DGS, der Schwelle und der Oberflächensensoren diente. Während der Versuchsdurchführung traten bis auf die letzte Verdichtungsfahrt nach der Frequenzrampe, bei der die Schwellensensorik ausfiel, keine Probleme auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

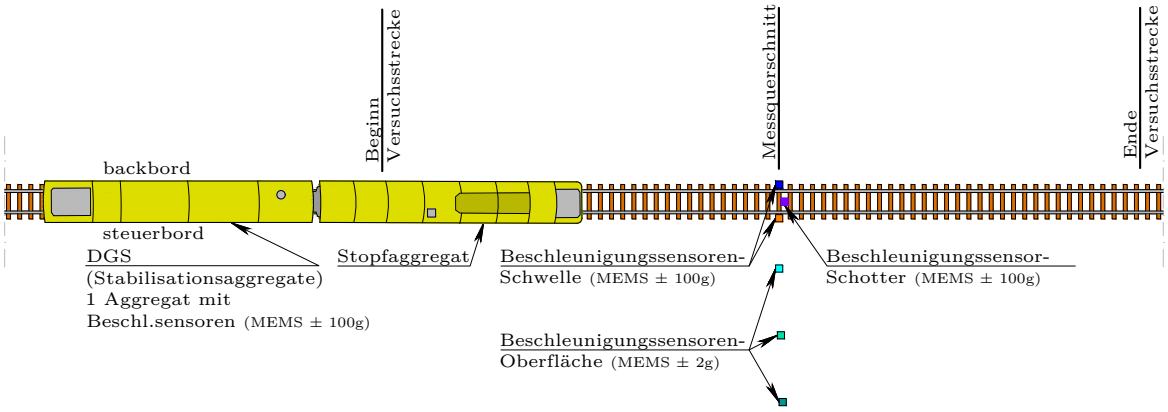
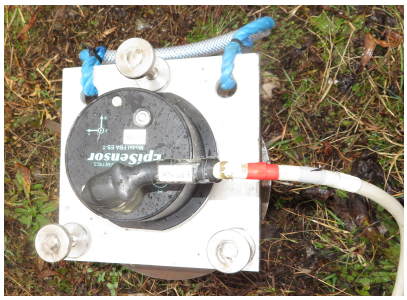


Abb. 3.3: Übersicht über den Versuchsaufbau und die messtechnische Ausrüstung

(a) Näherungssensor zur Bestimmung der Position der Unwucht

(b) ± 100 g Beschleunigungssensoren (DGS, Schwelle, Schotter)



(c) ± 2 g Beschleunigungssensoren (Oberfläche)

Abb. 3.4: Im Rahmen des Versuchs verwendete Sensoren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

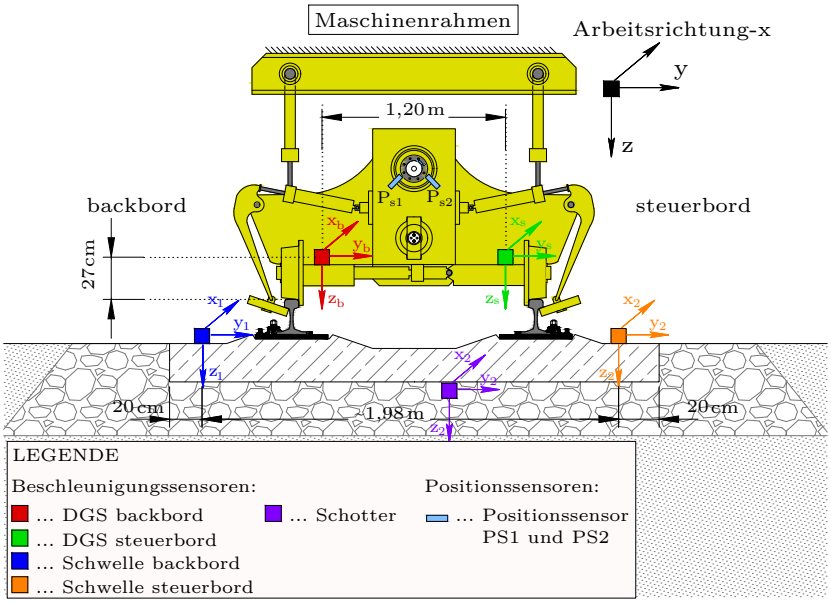


Abb. 3.5: Übersicht über die messtechnische Ausrüstung am DGS und der Schwelle

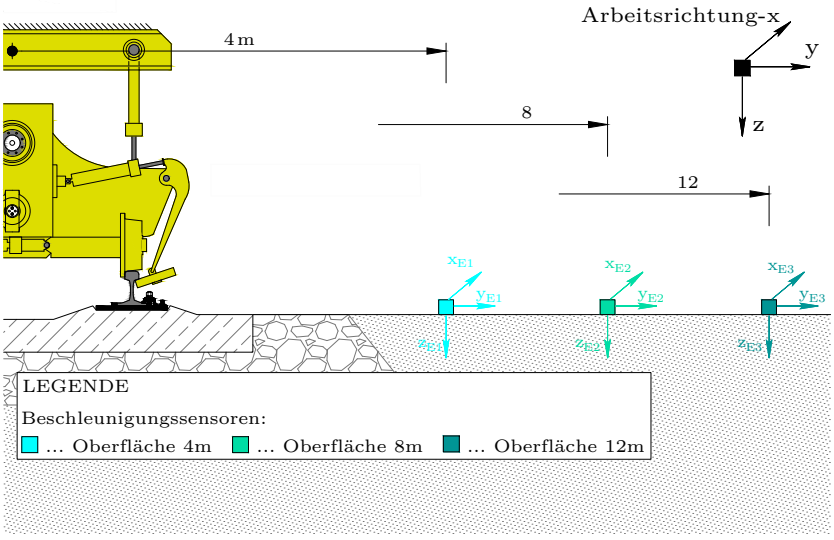


Abb. 3.6: Übersicht über die messtechnische Ausrüstung zur Messung der Erschütterungen im Nahbereich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 4

Mechanische und mathematische Grundlagen für die Versuchsauswertung

Das in Kapitel 3 beschriebene Versuchs- und Messkonzept dient dem Zweck, das Bewegungsverhalten des DGS und der Schwelle analysieren zu können. Die erfassten Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mithilfe der Software MATLAB aufbereitet, um diese kinematische Analyse zu ermöglichen. Nachfolgend werden die hierfür benötigten, wesentlichen mathematischen und mechanischen Werkzeuge und Begriffe und deren Bedeutung für die Auswertung näher erläutert, wobei teilweise einfache Testsignale zur Veranschaulichung dieser Werkzeuge untersucht werden.

4.1 Integration von Beschleunigungen zu Verschiebungen

Um die Kinematik des DGS und der Schwelle ausreichend genau erfassen und beschreiben zu können, sind die gemessenen Beschleunigungssignale alleine nicht ausreichend. Zur Bestimmung des Momentanpols der Bewegung eines Starrkörpers ist beispielsweise die Kenntnis der Geschwindigkeiten oder der Verschiebungen der Messpunkte erforderlich. Zu diesem Zweck wurden die gemessenen Beschleunigungen numerisch aufintegriert.

4.1.1 Numerische Integrationsverfahren

Für die numerische Integration von Beschleunigungssignalen sind prinzipiell verschiedene Verfahren geeignet, beispielsweise:

- Integration im Frequenzbereich und Rücktransformation in den Zeitbereich
- Integration im Zeitbereich mit Trapezregel oder Simpsonregel

Die Integration im Zeitbereich kann wesentliche Abweichungen von den realen Bewegungsgrößen bewirken und liefert nur bei Signalen geringer Frequenz (im Vergleich zur Aufzeichnungsfrequenz) genaue Ergebnisse [13]. Dennoch erfolgt die numerische Integration von Beschleunigungen zu Geschwindigkeiten beziehungsweise in weiterer Folge zu Verschiebungen am häufigsten über lineare Interpolation zwischen den Messdaten mittels Trapezregel [25, 43]. Bei diesem Verfahren wird, wie der Name bereits andeutet, ein linearer Verlauf zwischen den Messdaten angenommen. Daraufhin kann die Fläche unter einem trapezförmigen Teilstück im Interval $[a, b]$ der entstandenen, stetigen Kurve (g) mit Gleichung (4.1) ermittelt werden.

$$Q = \frac{(b-a)}{2} \cdot (g_a + g_b) \tag{4.1}$$

Der Funktionswert der integrierten Kurve (h) an der Stelle j kann dann durch Aufsummierung der n Teilflächen bis zu diesem Funktionswert bestimmt werden (siehe Gleichung (4.2)).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$h_j = \sum_{i=1}^{n} Q_i \tag{4.2}$$

In MATLAB erfolgt die Integration mittels der Trapezregel über den Befehl *cumtrapz*, wobei das Integrationsergebnis für jeden Zeitschritt ausgegeben wird. Nachfolgend wird die Integration anhand einer einfachen Sinusschwingung mit einer Periode von $f = 1\,\mathrm{Hz}$ ($\omega = f \cdot 2 \cdot \pi$) demonstriert. Diese Testfunktion wurde deshalb gewählt, da das gewünschte Ergebnis dieser Integration hinlänglich bekannt ist (siehe Gleichung (4.3)) und auch andere Autoren auf ähnliche Funktionen zur Veranschaulichung zurückgreifen (zum Beispiel: [43]).

$$\begin{aligned} \ddot{x}\,(t) &= \sin\,(\omega \cdot t) \\ \dot{x}\,(t) &= \int \sin\,(\omega \cdot t)\,dt = -\frac{1}{\omega} \cdot \cos\,(\omega \cdot t) + C_1 \\ x\,(t) &= \int -\frac{1}{\omega} \cdot \cos\,(\omega \cdot t) + C_1 dt = -\frac{1}{\omega^2} \cdot \sin\,(\omega \cdot t) + C_1 \cdot t + C_2 \end{aligned} \tag{4.3}$$

In Abb. 4.1 wird das Ergebnis der numerischen Integration jenem der analytischen Lösung mit Integrationskonstanten $C_1 = 0$ und $C_2 = 0$ gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass zwar die Stammfunktion durch die numerische Integration ermittelt werden kann, allerdings die Integrationskonstanten bei der numerischen Integration ungleich Null sind. Die Integrationskonstanten entsprechen vielmehr jenen, die bei den Anfangsbedingungen $\dot{y}_{(t=0)} = 0$ und $y_{(t=0)} = 0$ erhalten wurden. Als problematisch erweist sich beim vorgestellten Beispiel vor allem die Integrationskonstante C_1, die bei der Integration von Geschwindigkeiten zu Verschiebungen zu einem linearen Anwachsen der Verschiebungen über die Zeit führt. Dies ist einerseits ein unrealistisches Ergebnis und erschwert andererseits die Interpretation der Daten zum Beispiel hinsichtlich der Größe der Schwingungsamplituden. Daher wird im Zuge dieser Arbeit vor der Durchführung der numerischen Integration der Mittelwert des zu integrierenden Signals von jedem einzelnen Messwert abgezogen. Dadurch wird die Kurve in den Nullpunkt verschoben und das Ergebnis der Integration ist die Stammfunktion mit der Integrationskonstanten $C_1 = 0$. Im vorgestellten Beispiel wäre damit das Ergebnis der numerischen Integration ident mit jenem der analytischen Lösung.

Um die prinzipielle Eignung anderer Integrationsverfahren zu testen, wurde auch die Integration im Frequenzbereich, wie in [13] beschrieben, auf das Testsignal angewendet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse bei der Integration von Beschleunigungen zu Geschwindigkeiten ist in Abb. 4.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Integrationsmethode zwar eine andere Integrationskonstante C_1 liefert, als die numerische Integration mit der Trapezregel, diese aber ungleich Null ist. Es ist also notwendig, auch bei diesem Verfahren vor der Durchführung der numerischen Integration den Mittelwert abzuziehen, um einen Drift (linearer Anstieg der Verschiebungen über die Zeit) bei neuerlicher Integration des Signals zu vermeiden.

Gemessene Signale sind meist mit Messungenauigkeiten behaftet (dem sogenannten „Rauschen“), weshalb nachfolgend der Einfluss dieser Messungenauigkeiten auf die numerische Integration untersucht wird. Zu diesem Zweck wird das vorgestellte Testsignal (siehe Gleichung (4.3)) zuerst mit hochfrequenten und danach mit niederfrequenten Schwingungen überlagert und deren jeweilige Auswirkungen auf das Ergebnis der numerischen Integration analysiert, wobei die bereits beschriebene Notwendigkeit der Drift-Vermeidung durch Abziehen des Mittelwerts bereits angewendet wird. Da bei dem Vorhandensein von signifikanten Schwingungsanteilen mit Frequenzen unter 10 Hz von der numerischen Integration mit der Trapezregel abgeraten wird [25], empfiehlt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

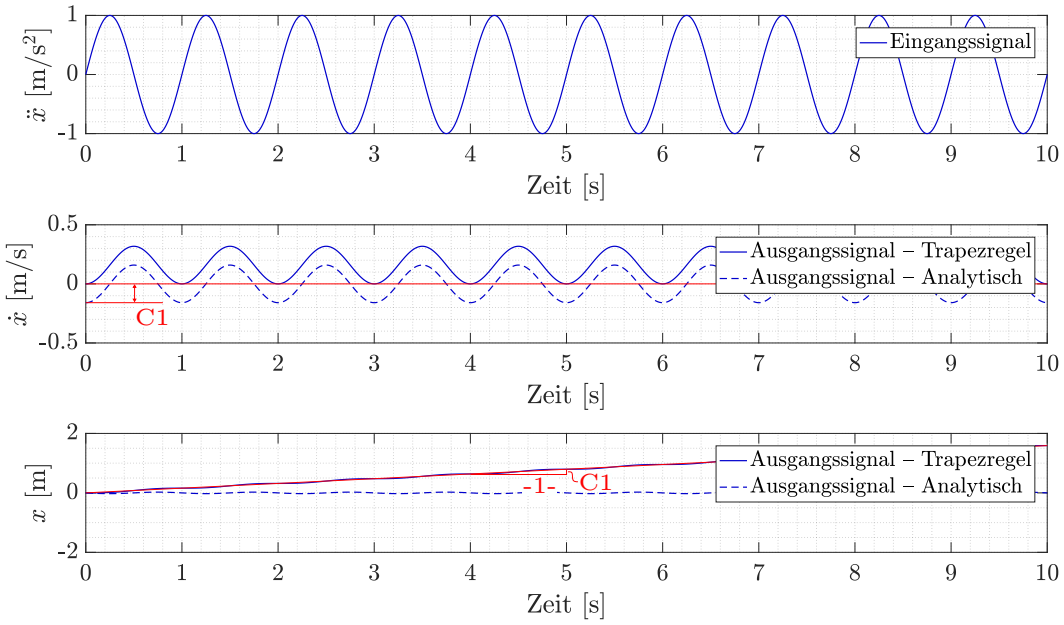


Abb. 4.1: Beispiel zur numerischen Integration mit der Trapezregel

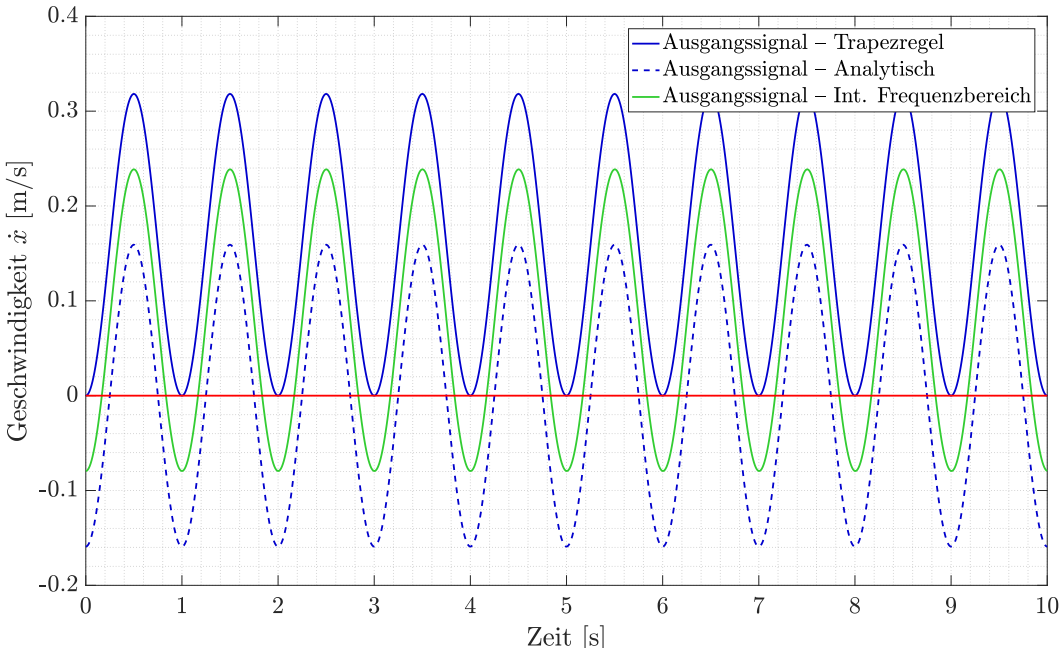


Abb. 4.2: Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

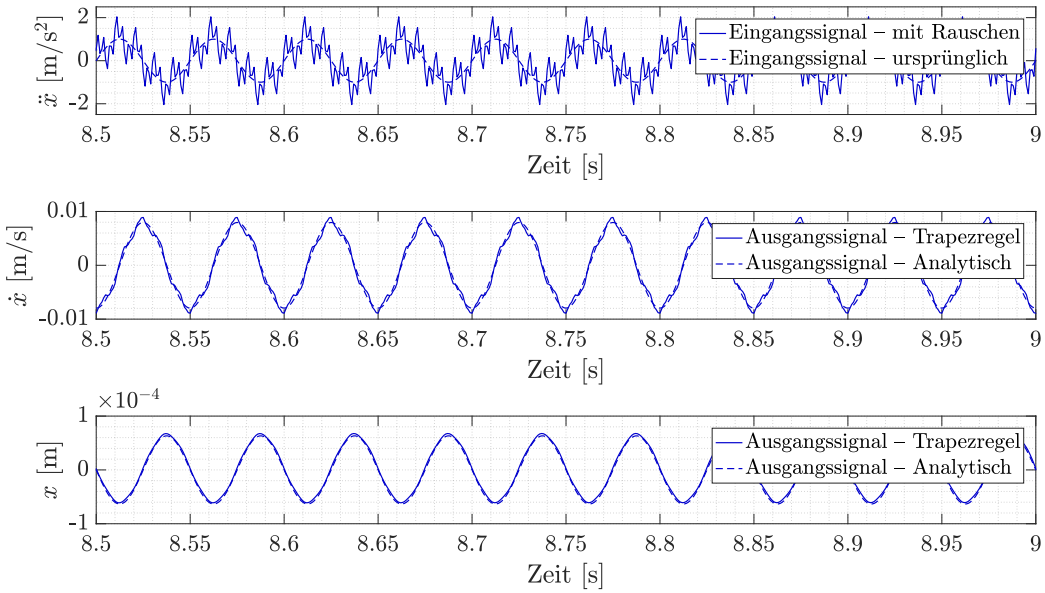


Abb. 4.3: Auswirkungen eines hochfrequenten Rauschens ($f_1 = 100\,\text{Hz}, \varphi_1 = 0,20 \cdot \pi$ und $(f_2 = 300\,\text{Hz}, \varphi_2 = 0,10 \cdot \pi)$ auf das Ergebnis der numerischen Integration mit der Trapezregel

es sich, das zuvor veränderte Testsignal zu variieren. Die Frequenz der Sinusschwingung wird von 1 Hz auf 20 Hz erhöht, wobei aber Gleichung (4.3) nach wie vor Gültigkeit besitzt.

Zunächst soll der Einfluss hochfrequenter Fehler auf das Ergebnis der numerischen Integration ermittelt werden. Hierfür wird das Testsignal mit zwei Sinusschwingungen mit Frequenz $f_1 = 100\,\text{Hz}$ und Phasenwinkel $\varphi_1 = 0,20 \cdot \pi$ beziehungsweise mit $f_2 = 300\,\text{Hz}$ und $\varphi_2 = 0,1 \cdot \pi$ überlagert, wobei die Amplituden dieser Schwingungen relativ groß gewählt wurden, um den Effekt der numerischen Integration deutlich veranschaulichen zu können:

$$\ddot{y}(t) = \sin(\omega \cdot t) + 0,6 \cdot \sin(f_1 \cdot 2\pi \cdot t + \varphi_1)) + 0,6 \cdot \sin(f_2 \cdot 2\pi \cdot t + \varphi_2)) \tag{4.4}$$

Die so entstandene Testfunktion ist im obersten Diagramm der Abb. 4.3 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung ist, anders als beim vorigen Testsignal mit $f = 1\,\text{Hz}$, nicht der gesamte Integrationszeitraum von zehn Sekunden abgebildet. Stattdessen wird ein Ausschnitt von einer halben Sekunde am Ende des Integrationszeitraums gewählt, sodass auch hier zehn Schwingungen dargestellt werden. Bei Betrachtung der Ergebnisse der numerischen Integration zeigt sich, dass das Rauschen mit jedem Integrationsschritt reduziert wird. Das Signal wird also durch die numerische Integration geglättet. Dieser Effekt ist unabhängig vom Integrationsverfahren (siehe Abb. 4.4) und der Einfluss von hochfrequenten Störungen auf das Ergebnis der numerischen Integration kann insgesamt als gering betrachtet werden.

Dieses Ergebnis gilt nicht zwingend für niederfrequente Störungen. Das Testsignal zur Untersuchung dieses Messfehlertyps wurde ebenfalls mit zwei Sinusschwingungen überlagert. Die Frequenz wurde allerdings mit $f_1 = 0{,}001\,\text{Hz}$ beziehungsweise $f_2 = 0{,}005\,\text{Hz}$ und der Phasenwinkel mit $\varphi_1 = 0,25 \cdot \pi$ und $\varphi_2 = 0,125 \cdot \pi$ gewählt. Auch die Amplitude wurde wesentlich geringer als bei den hochfrequenten Störungen gewählt, um den Einfluss einer visuell nicht erkennbaren Störung des Eingangssignals zu untersuchen (siehe Gleichung (4.3)).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

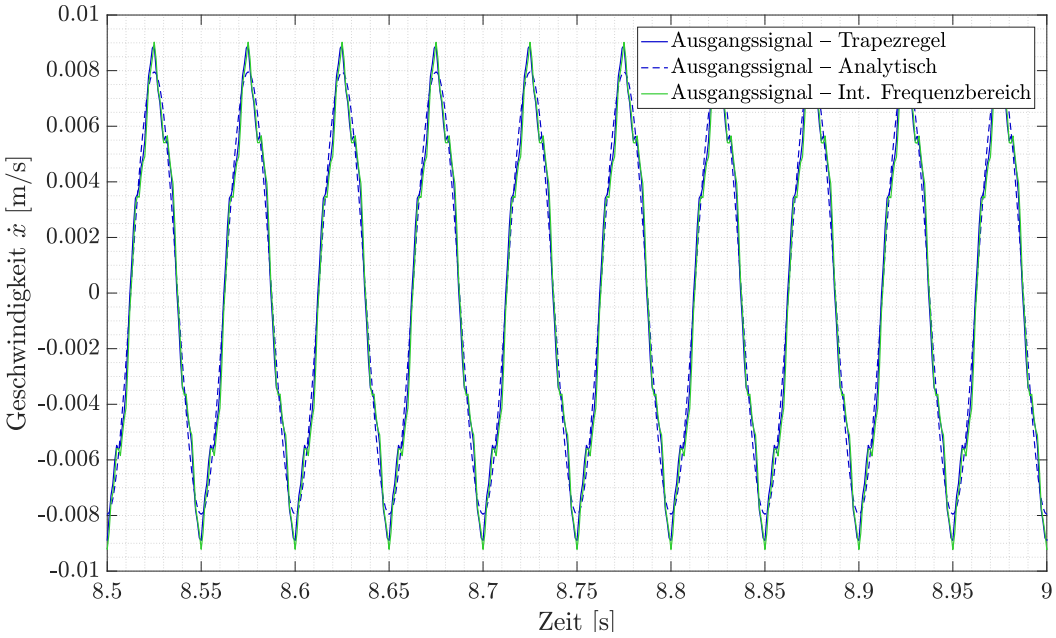


Abb. 4.4: Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich bei einem Messignal mit hochfrequenter Störung

$$\ddot{y}(t) = \sin(\omega \cdot t) + 0,005 \cdot \sin(f_1 \cdot 2\pi \cdot t + \varphi_1)) + 0,005 \cdot \sin(f_2 \cdot 2\pi \cdot t + \varphi_2)) \tag{4.5}$$

Die dadurch entstandene Testfunktion ist in Abb. 4.5 dargestellt. Die Störung des Signals ist, wie bereits erwähnt, rein visuell bei der Betrachtung von zehn Schwingungen nicht zu erkennen (oberer Teil der Abb. 4.5). Es handelt sich bei den gewählten Störungen um sehr langwellige Fehler, bei denen auch nicht zu erwarten ist, diese in einem kurzen Ausschnitt betrachten zu können. Doch auch wenn man den gesamten Zeitraum des Signals von zehn Sekunden zur Untersuchung des Signals wählt, sind derartige Fehler rein visuell nicht erkennbar (unterer Teil der Abb. 4.5). Das Ergebnis der numerischen Integration in Abb. 4.6 zeigt aber deutlich, dass bereits diese geringen Störanteile großen Einfluss auf das Resultat haben. Es entsteht dabei bereits im ersten Integrationsschritt ein Drift des Signals, der zu starken Veränderungen des Ergebnisses führt. Dieser Trend ist unabhängig vom gewählten Integrationsverfahren, wenngleich auch die Integration im Frequenzbereich einen geringeren Drift liefert (siehe Abb. 4.7). Aufgrund der starken Auswirkungen von niederfrequenten Störungen auf das Signal, wird die Anwendung von Hochpassfiltern zur Beseitigung dieser Störsignale empfohlen [13, 25].

4.1.2 Signalfilterung mit digitalen Filtern

Es besteht also die Notwendigkeit, die niedrigen Frequenzbereiche des gemessenen Beschleunigungssignals vor der Integration zu entfernen. Da die analysierten Daten in zeitdiskreter Form vorliegen, kommen nur digitale Filter in Frage. Verschiedene Autoren schlagen dafür unterschiedliche Filtermethoden vor (zum Beispiel: [25, 43]). In [25] wird beispielsweise die Entfernung der tiefen Frequenzen mittels eines IIR-Filters empfohlen. Digitale Filter lassen sich, je nach Art der Filterung, folgendermaßen kategorisieren:

- Hochpassfilter

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

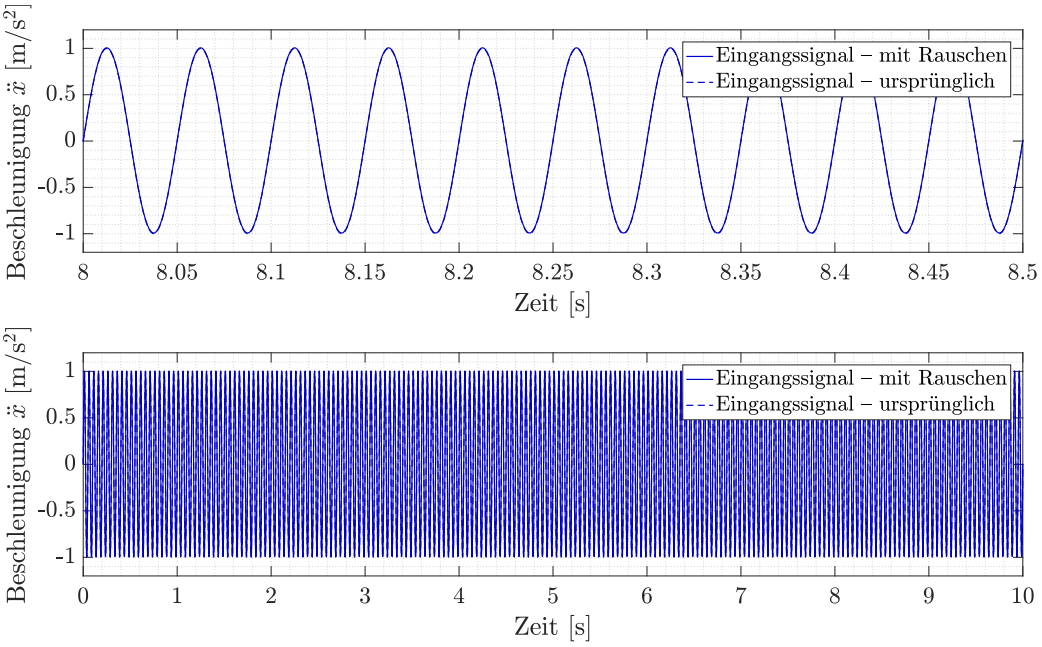


Abb. 4.5: Testsignal mit niederfrequentem Rauschen

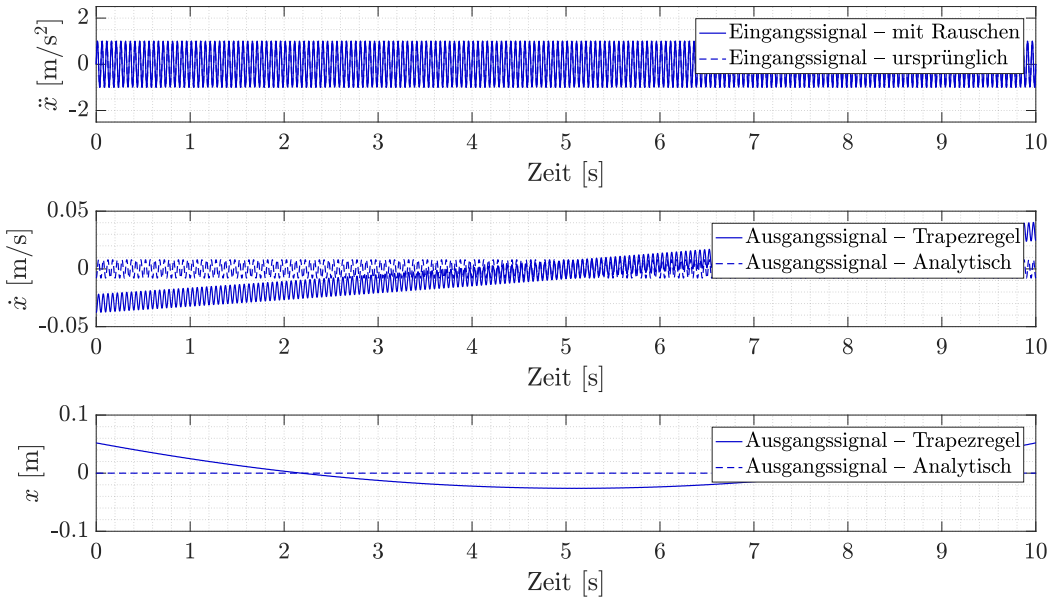


Abb. 4.6: Auswirkungen eines niederfrequenten Rauschens ($f_1 = 0{,}001\,\text{Hz}, \varphi_1 = 0,25 \cdot \pi$ und $(f_2 = 0{,}005\,\text{Hz}, \varphi_2 = 0,125 \cdot \pi)$ auf das Ergebnis der numerischen Integration mit der Trapezregel

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

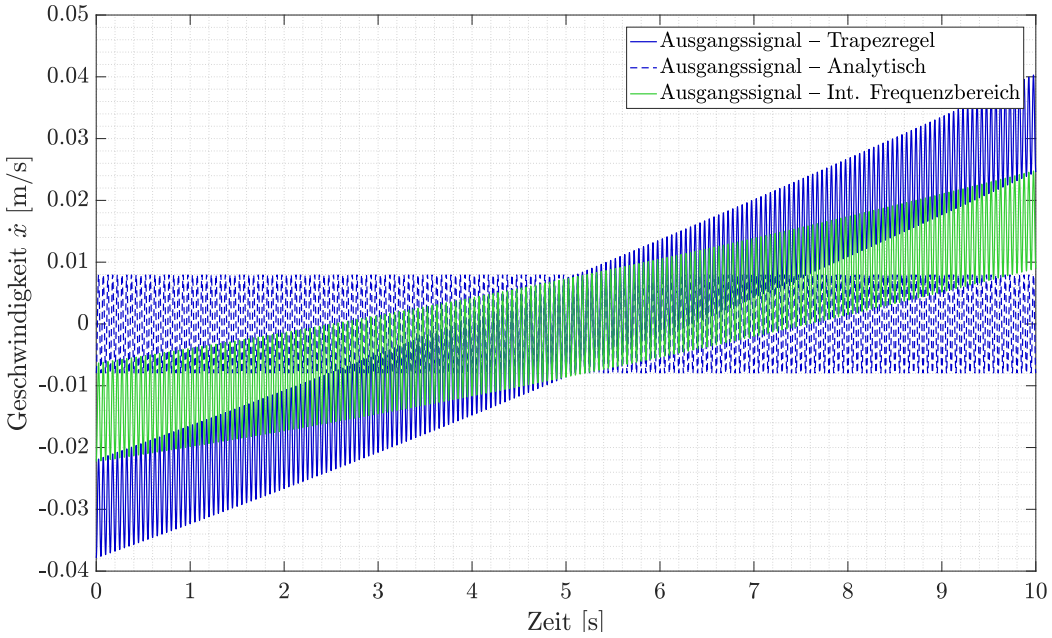


Abb. 4.7: Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich bei einem Messignal mit niederfrequenter Störung

- Bandpassfilter
- Bandsperrenfilter
- Tiefpassfilter

Diese Kategorisierung bezieht sich dabei auf den Amplitudenfreuquenzgang des jeweiligen Filters und ist als Übersicht in Abb. 4.8 dargestellt. Der Amplitudenfrequenzgang und der Phasenfrequenzgang eines digitalen Filters stellen die wesentlichen Entscheidungskriterien bei der Filterwahl dar. Einerseits sollen die unerwünschten Frequenzen im Sperrbereich größtmöglich gedämpft, andererseits die Signale im Durchlassbereich möglichst wenig durch die Filteranwendung beeinflusst werden. Zusätzlich soll der Übergang zwischen Sperrbereich und Durchlassbereich möglichst steil verlaufen. Diese Anforderung wird oftmals als „Steilheit der Flanke“ bezeichnet. Die genannten Eigenschaften sind im Amplitudenfrequenzgang erkennbar. Ein digitales Filter sollte aber idealerweise auch die Phase des Signals nicht verändern. Die meisten der zur Verfügung stehenden digitalen Filter verändern die Phase des Signals allerdings zumindest linear, was wiederum in einer konstanten Zeitverschiebung des Wellenpakets resultiert. Eine Möglichkeit, die Phasenverschiebung auch bei nichtlinearem Phasenfrequenzgang zu vermeiden, besteht darin, das Signal zweimal (einmal vorwärts und einmal rückwärts) zu filtern. Dies kann in MATLAB über den Befehl *filtfilt* realisiert werden.

Da vor der numerischen Integration die tiefen Frequenzen entfernt werden sollen, wird ein Hochpassfilter benötigt. Ein Hochpassfilter lässt sich als digitales Filter folgendermaßen realisieren:

- FIR-Filter (Finite-Impulse-Response-Filter)
- Moving Average Filter (Spezialfall des FIR-Filters)
- IIR-Filter (Infinite-Impulse-Response-Filter)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

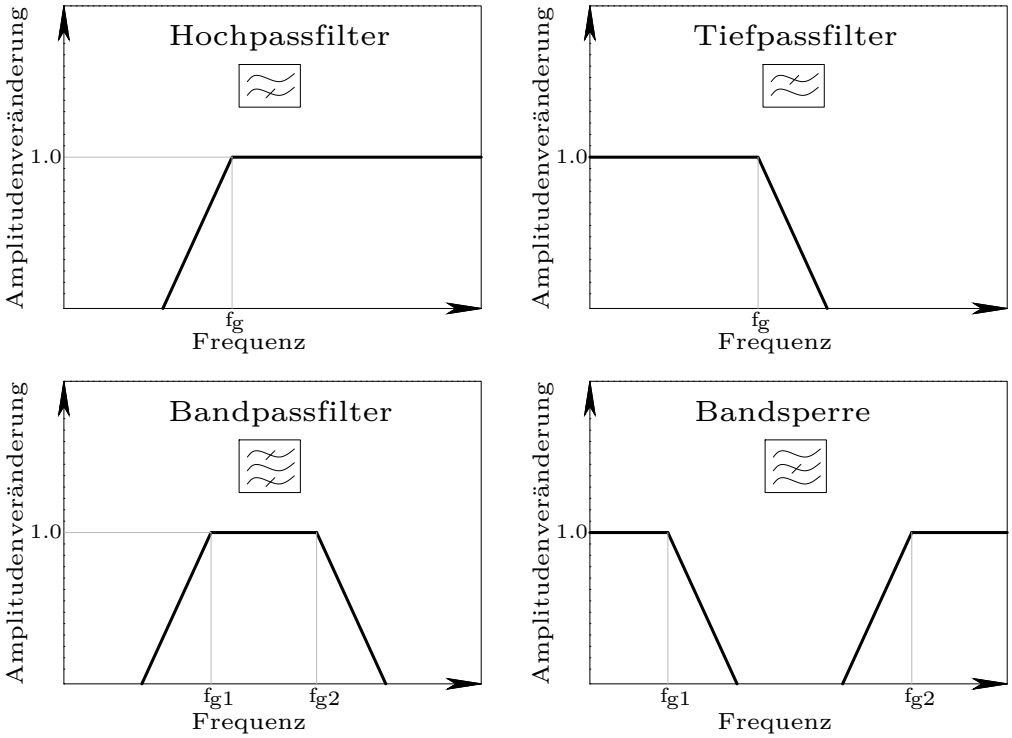


Abb. 4.8: Einteilung der Filter nach den gefilterten Frequenzen

Der Name der FIR-Filter leitet sich von einer Impulsantwort mit endlicher Länge ab. Die Impulsantwort beschreibt dabei das erzeugte Ausgangssignal, wenn als Eingangssignal ein Dirac-Impuls vorliegt [74]. Dieses Verhalten ist der nichtrekursiven Struktur dieses Filtertyps geschuldet. Nichtrekursive Struktur bedeutet in diesem Zusammenhang, dass für die Berechnung des Ausgangssignals nur Werte des Eingangssignals verwendet werden. Dies lässt sich anhand der linearen Differenzengleichung eines FIR-Filters erkennen [74]:

$$y\,(n) = \sum_{i=0}^{K} b_i \cdot x(n-i) \tag{4.6}$$

In Gleichung (4.6) steht dabei $y\,(n)$ für das Ausgangssignal an der Stelle n und $x\,(n)$ für das Eingangssignal an der Stelle n, wobei K Werte des Eingangssignals für die Berechnung des Ausgangssignals herangezogen werden. Die einfachste Form dieses Filtertyps stellt der gleitende Mittelwert (Moving Average Filter) dar. Bei diesem Filter wird im einfachsten Fall für die Berechnung des Ausgangswerts der arithmetische Mittelwert aus einer bestimmten Anzahl von vorangehenden Messwerten des Eingangssignals gebildet. Danach wandert dieser Block berücksichtigter Messwerte zum nächsten Punkt des Eingangssignals, um die Rechenoperation erneut auszuführen. Es entsteht eine Überlappung der einzelnen Blöcke für die Berechnung der Ausgangswerte, was eine gewisse Trägheit bewirkt und sprungartige Änderungen des Eingangssignals reduziert. Der gleitende Mittelwert entfernt somit hohe Frequenzanteile des Signals und bewirkt dadurch eine Glättung des ursprünglichen Signals. Es handelt sich dabei um einen Tiefpassfilter. Die Stärke der Filterung ist von der Anzahl der berücksichtigten Messwerte des Eingangssignals (Größe des Blocks) abhängig. Je mehr Messwerte für die Mittelwertsbildung berücksichtigt werden, desto stärker wird das Signal geglättet. Durch Abzug eines stark geglätteten Signals

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

vom Ursprungssignal kann mittels eines gleitenden Mittelwerts auch ein Hochpassfilter erzeugt werden.

Filter mit einer unendlich langen Impulsantwort werden als IIR-Filter bezeichnet. Durch die Verwendung einer rekursiven Filterstruktur werden bereits ermittelte Werte des Ausgangssignals für die weitere Berechnung herangezogen. Die Differenzengleichung eines IIR-Filters lautet dabei wie folgt [74]:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M} b_i \cdot x(n-i) - \sum_{j=1}^{N} a_j \cdot y(n-j) \tag{4.7}$$

Auch in dieser Gleichung steht $y(n)$ für das Ausgangssignal und $x(n)$ für das Eingangssignal, wobei M Werte des Eingangssignals und N Werte des Ausgangssignals für die Berechnung verwendet werden. IIR-Filter bilden analoge Filter nach und werden daher über das Design eines analogen Filters erzeugt [74].

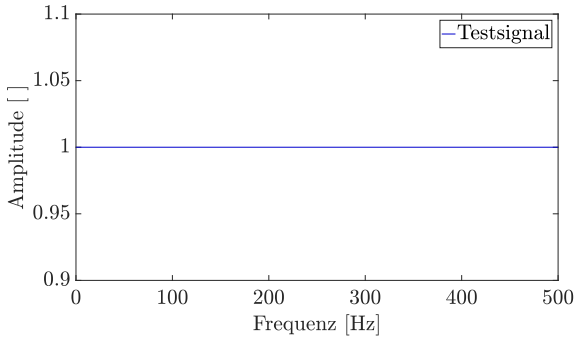
Um die Wirkungsweise der verschiedenen Filter zu veranschaulichen, wird ein in [37] vorgeschlagenes Verfahren zur Feststellung des Amplitudenfrequenzgangs genutzt. Bei diesem Verfahren wird der zu testende digitale Filter auf ein „weißes Rauschen“ im Zeitbereich angewendet. Das weiße Rauschen wird im Frequenzbereich erzeugt und ist durch eine, über alle Frequenzen konstante, Amplitude mit zufälligem Phasenwinkel gekennzeichnet. Zur Erstellung des Signals wurde eine eigene Funktion in MATLAB erstellt, der ein Vektor mit zufällig generierten Phasenwinkeln übergeben wird. Unter Verwendung der Beziehungen in Gleichung (4.8) werden dann Imaginär- und Realteil der komplexen Zahlen berechnet, sodass diese die Amplitude $|z| = 1$ und den vorgegebenen, zufälligen Phasenwinkel besitzen.

$$\begin{aligned} |z| &= \sqrt{\left(Re(z)^2 + Im(z)^2\right)} \\ \tan(\varphi) &= \frac{Im(z)}{Re(z)} \end{aligned} \tag{4.8}$$

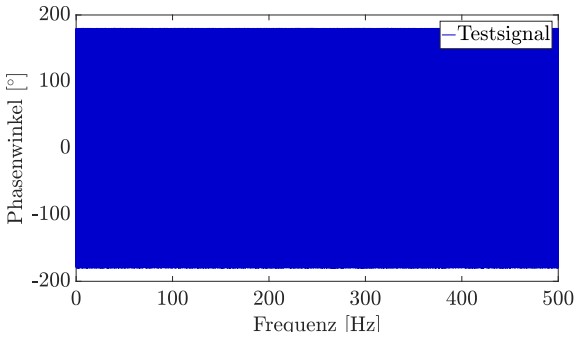
Dieses Testsignal wird dann unter Verwendung eines inversen FFT-Algorithmus in den Zeitbereich transformiert. Dort wird ein ausgewählter Filter auf das Testsignal angewendet und das veränderte Signal erneut in den Frequenzbereich, unter Verwendung eines FFT-Algorithmus, rücktransformiert. Das Ergebnis entspricht dem Amplitudenfrequenzgang, wobei auch eine eventuell entstandene Phasenverschiebung enthalten ist. Zur Überprüfung des Tests wurden die Ergebnisse mit den Kennlinien verglichen, die bei Kenntnis der Filterkoeffizienten vom MATLAB-Tool *fvtool* ausgegeben werden. Die erzeugten Linien sind ident, wobei die Vorgehensweise, ein Testsignal zu verwenden, den Vorteil hat, auch Auswirkungen von ungewöhnlichen Filterungsvorgängen, wie zum Beispiel der Verwendung eines gleitenden Mittelwerts als Hochpassfilter, leicht untersuchen zu können. Das beschriebene Testsignal ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Nachfolgend werden der Amplitudenfrequenzgang und der Phasenfrequenzgang verschiedener digitaler Filter untersucht. Der einfachste der vorgestellten Filter ist der gleitende Mittelwert, wobei hier ein gleitender arithmetischer Mittelwert mit einer Blocklänge von einer halben Sekunde untersucht wird (bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 1000 Messwerten pro Sekunde). Um das Verhalten des Filters im Bereich tiefer Frequenzen, die durch die Anwendung des Filters entfernt werden sollen, besser analysieren zu können, wurde ein Ausschnitt von 0 – 100 Hz gewählt. Wie in Abb. 4.10 zu erkennen ist, bewirkt der gleitende Mittelwert keine Phasenverschiebung. Der Amplitudenfrequenzgang weist aber eine eher flache Flanke auf und es kann ein Überschwingen beim Erreichen der Durchlassfrequenz mit einer ausgeprägten Welligkeit im gesamten Durchlassbereich festgestellt werden. Durch diese Eigenschaften und aufgrund der Tatsache, dass der gleitende Mittelwert als Filter nur schwer einzustellen ist, scheint dieser

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Amplitude des Testsignals im Frequenzbereich



(b) Phasenwinkel des Testsignals im Frequenzbereich

Abb. 4.9: Darstellung des Testsignals zur Filtertestung

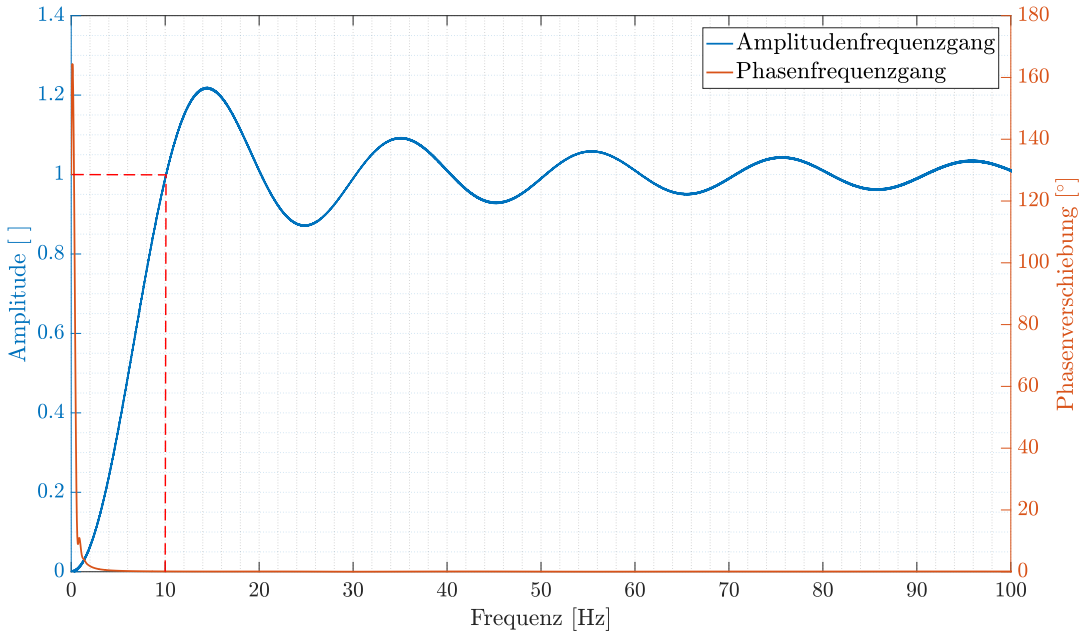


Abb. 4.10: Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines gleitenden Mittelwertfilters mit einer Blocklänge von 0,1 s

Filtertyp nicht gut dafür geeignet zu sein, das Messsignals vor der numerischen Integration aufzubereiten.

Für den Test eines höherwertigen FIR-Filters als jenen des gleitenden Mittelwerts, wurden mit der MATLAB-Funktion *designfilter* Filterkoeffizienten für einen FIR-Filter mit einer Grenzfrequenz des Sperrbereichs von 1 Hz und einer Grenzfrequenz des Durchlassbereichs von 10 Hz erzeugt. Der Amplituden- und Phasenfrequenzgang dieses Filters sind in Abb. 4.11 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Grenzfrequenz mit diesem Filtertyp gut eingestellt werden kann. Zusätzlich wird eine wesentlich steilere Flanke als beim gleitenden Mittelwert erreicht. Auch die Welligkeit im Durchlassbereich ist wesentlich geringer als die des gleitenden Mittelwerts. Bei einer einfachen Filterung mit diesem Filtertyp könnte eine lineare Phasenverschiebung über die Frequenz erkannt werden (konstante Verzögerung des gesamten Signals). Durch die Verwendung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

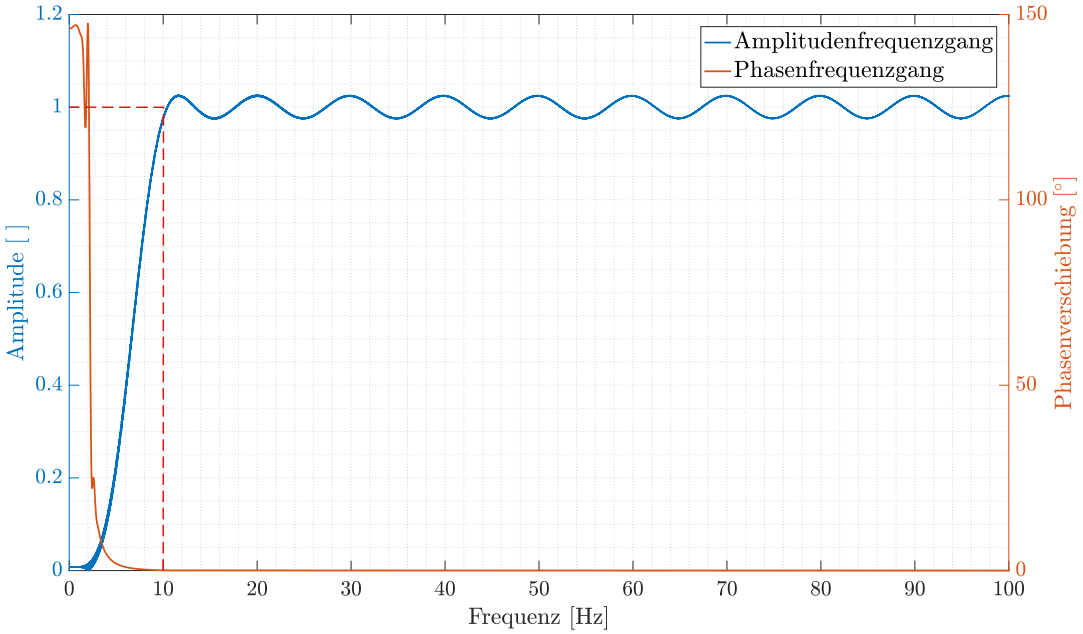


Abb. 4.11: Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines FIR-Filters mit einer Sperrfrequenz von 1 Hz und einer Durchlassfrequenz von 10 Hz

des *filtfilt*-Befehls in MATLAB wird aber auch bei diesem Filter keine Phasenverschiebung erzeugt.

Abschließend wird der in [25], für eine doppelte Integration der Beschleunigungssignale empfohlene, Butterworth-Filter 6. Ordnung mit einer Durchlassfrequenz von 10 Hz untersucht. Es handelt sich dabei um einen IIR-Filter, womit auch die Ergebnisse des gefilterten Signals in den Filterungsvorgang miteinbezogen werden. Der Amplituden- und Phasenfrequenzgang dieses Filtertyps sind in Abb. 4.12 dargestellt. Bei der Durchlassfrequenz von 10 Hz wird das Eingangssignal bei diesem Filtertyp immer noch um die Hälfte gedämpft. Dies liegt, daran, dass bei diesem Filtertyp anstelle der gewünschten Durchlassfrequenz die Grenzfrequenz mit einer Dämpfung von −3 dB definiert wird. Wenn man die Toleranz für die Durchlassfrequenz etwas strenger mit einer 10%-igen Dämpfung festlegt, so liegt diese bei einer Frequenz von 12 Hz. Beide Frequenzen sind in Abb. 4.12 dargestellt (rot strichlierte, beziehungsweise grün strichlierte Linie). Es ist anhand der Abbildung zu erkennen, dass dieser Filtertyp neben einer steilen Flanke auch keine nennenswerte Welligkeit im Durchlassbereich aufweist. Aufgrund dieser Vorteile, und da das nichtlineare Verhalten des Butterworth-Filters im Phasenfrequenzgang durch den *filtfilt*-Befehl unterdrückt werden kann, wird dieser Filter für die Aufbereitung der Beschleunigungssignale vor der numerischen Integration herangezogen.

4.2 Fast Fourier Transformation – FFT

In Abschnitt 4.1 wurde bereits bei der numerischen Integration im Frequenzbereich ein Fast-Fourier-Transformations-Algorithmus (FFT) angewendet. Es handelt sich dabei um eine schnelle Version der diskreten Fouriertransformation (DFT). Die DFT dient dabei der Transformation von einem digitalen (und somit diskretisierten) Signal vom Zeit- in den Frequenzbereich. Dabei wird das Signal in harmonische Anteile (Sinusschwingungen) mit unterschiedlicher Amplitude und unterschiedlichem Phasenwinkel „zerlegt“. Der häufig eingesetzte FFT-Algorithmus *Radix-2*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

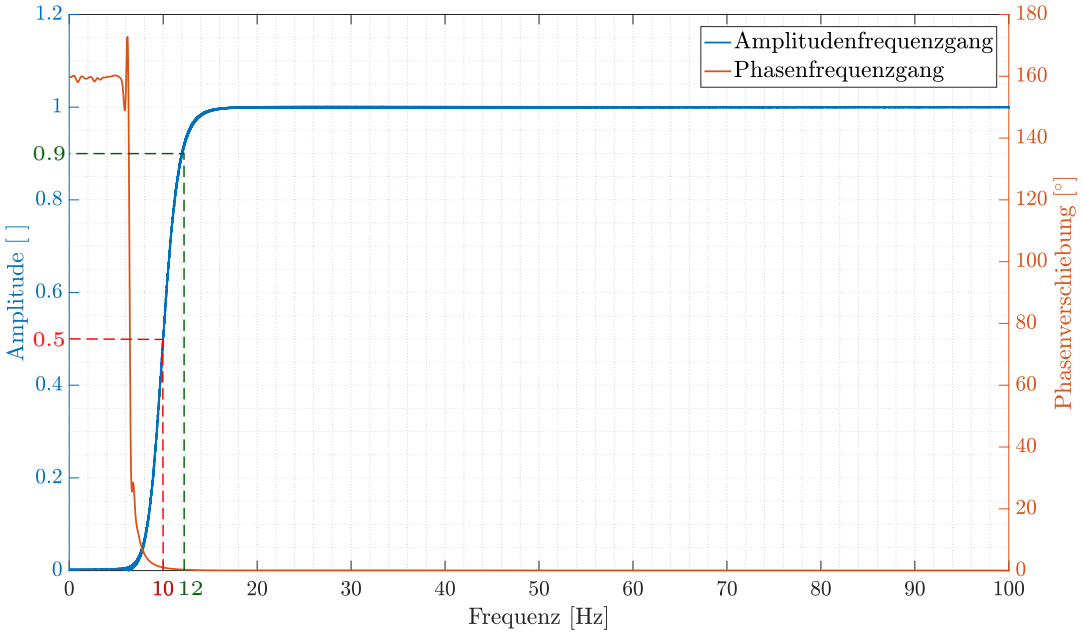
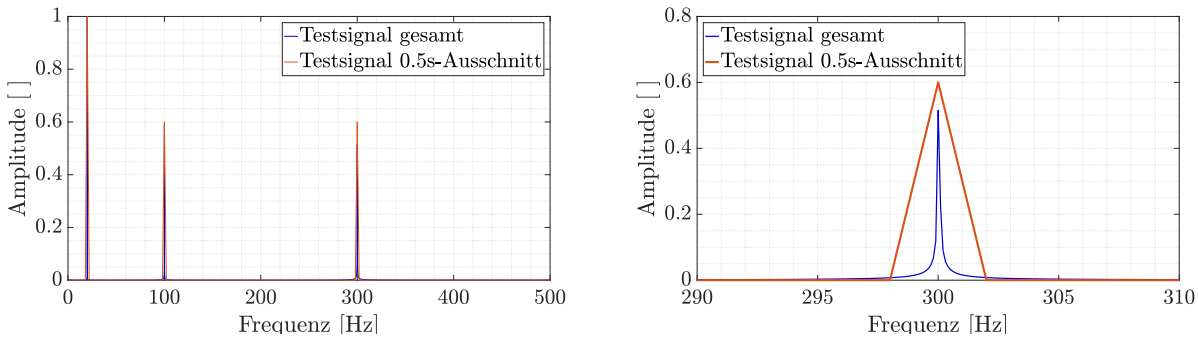


Abb. 4.12: Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines Butterworth-Filters 6. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz



(a) FFT des Testsignals aus Gleichung (4.4)

(b) FFT im Bereich von 300 Hz des Testsignals aus Gleichung (4.4)

Abb. 4.13: FFT des Testsignals aus Gleichung (4.4) für verschieden Zeitfenster

erfordert ein Signal der Länge $N = 2^n$ wobei $n \in \mathbb{N}$ gilt [81]. Obwohl dies bei der in MATLAB implementierten Funktion *fft* keine Voraussetzung ist, wird in der Dokumentation dennoch darauf hingewiesen, dass Signale mit der Länge $N = 2^n$ am schnellsten berechnet werden können [75]. Wendet man nun diesen, in MATLAB implementierten, FFT-Algorithmus auf das zehn-sekündige Testsignal aus Gleichung (4.4) an, so kann aus dem Ergebnis das blaue, einseitige Amplitudenfrequenzspektrum in Abb. 4.13 erzeugt werden. Für das Signal wurde eine Samplingfrequenz von 1000 Hz angenommen, womit das Testsignal eine Länge von N=10001 Werten aufweist.

Gut zu erkennen sind die dominante Grundschwingung mit 20 Hz und die überlagerten Oberschwingungen mit 100 Hz beziehungsweise 300 Hz. Es werden aber auch Frequenzanteile im Nahbereich dieser Frequenzen angezeigt, die im Testsignal in dieser Form nicht enthalten sind. Dieses Verhalten wird gemeinhin als „Leakage“-Effekt bezeichnet [74] und resultiert daraus, dass

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ein Signal mit endlich vielen Werten untersucht wird. Unter besonderen Umständen kann dieser Effekt vermieden werden. Betrachtet man beispielsweise nur zehn Schwingungen im Zeitraum zwischen 0 s und 0,5 s ergibt sich das orange Spektrum. Hier werden nur die tatsächlich vorhandenen Frequenzanteile mit der korrekten Amplitude dargestellt. Allerdings kann man bei genauerer Betrachtung des Spektrums (siehe Ausschnitt in Abb. 4.13b) erkennen, dass bei derartig kurzen Betrachtungszeiträumen die Frequenzauflösung der FFT abnimmt. Die Auflösung einer FFT ist dabei folgendermaßen von der Samplingfrequenz und der Anzahl der Messpunkte des Signals im betrachteten Zeitraum abhängig [74]:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \tag{4.9}$$

In Gleichung (4.9) beschreibt f_s die Samplingfrequenz des Signals und N die Anzahl der Messpunkte im analysierten Abschnitt. Im vorliegenden Beispiel kann somit für das gesamte Messsignal eine Auflösung von $\Delta f = 0{,}099\,\text{Hz}$ und für den kurzen Betrachtungszeitraum eine Auflösung von $\Delta f = 2{,}0\,\text{Hz}$ erreicht werden, womit die beobachteten Frequenzen genau getroffen werden und keine Aufteilung der Amplituden auf benachbarte Frequenzen erfolgt. Bedingt durch die niedrige Auflösung kurzer Zeitfenster kann sich aber auch ein ausgeprägter Leakage-Effekt ergeben. Dieser ist besonders stark, wenn das Signal nicht aus einer ganzzahligen Anzahl von Schwingungen besteht. Nachfolgend werden anhand eines Ausschnitts des Testsignals einige Möglichkeiten untersucht, um diesen Leakage-Effekt zu reduzieren:

- Zero-Padding
- Künstliche Verlängerung des Signals durch Hintereinanderkopieren
- Resampling des Signals durch lineare Interpolation
- Gewichtung des Signals durch Anwendung eines Hanning-Fensters

Als Testsignal zur Überprüfung der genannten Methoden wird der bereits beschriebene Ausschnitt von zehn Schwingungen um eine halbe Schwingung verkürzt. Es wird dementsprechend das Signal im Zeitraum von 0,025 s bis 0,50 s analysiert (siehe Abb. 4.14a). Danach wird das Signal vor der Anwendung des FFT-Algorithmus bearbeitet.

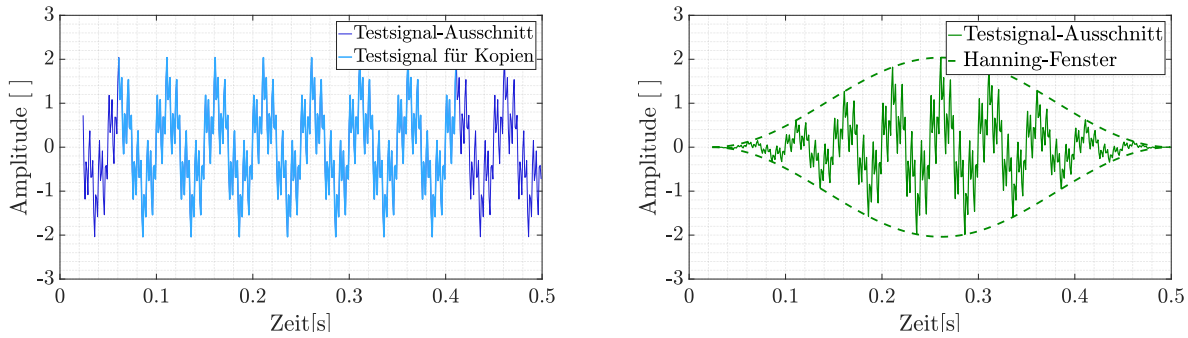
Beim Zero-Padding wird das Signal durch das Anhängen von Nullen bis zur gewünschten Länge gestreckt. Konkret wird die Auflösung durch die Erhöhung der Anzahl der Messpunkte verfeinert. Dieses Vorgehen bewirkt keine Veränderung des Spektrums [74].

Eine tatsächliche Veränderung des Spektrums kann nur durch das Hinzufügen von „echten“ Messdaten erreicht werden [74]. Dies kann zum Beispiel durch die Erzeugung eines periodischen Signals erfolgen, bei dem ein Ausschnitt der untersuchten Schwingung mehrmals aneinandergereiht wird, sodass einerseits die Auflösung erhöht wird und andererseits das Spektrum besser dargestellt werden kann. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Messdaten am Anfang und am Ende des Signals, bis zu den nächstgelegenen Hochpunkten entfernt, sodass ein Signal mit einer ganzzahligen Anzahl an Schwingungen verblieb (siehe Abb. 4.14a). Dieses Signal wurde daraufhin aneinandergereiht, bis die gewünschte Auflösung der FFT erreicht werden konnte.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Messpunkte wäre ein Resampling des Signals durch lineare Interpolation zwischen den vorhandenen Messdaten. Es wird damit aber nicht nur die Anzahl der Messpunkte erhöht, sondern auch die Samplingfrequenz. Durch diesen Effekt ist zu erwarten, dass das Resampling der Daten zu keiner erhöhten Auflösung und damit in weiterer Folge zu keiner Veränderung des Ergebnisses der FFT führt. Für die Überprüfung dieser Vermutung wurde das Testsignal mit der vierfachen Anzahl an Messpunkten neu abgetastet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abschließend wurde eine Methode getestet, die in der Signaltechnik oft zur Reduktion des Leakage-Effekts herangezogen wird. Durch eine Gewichtung des Signals mit einem *Hanning*-Fenster wird das Signal oben und unten durch eine Halbwelle beschränkt, womit der Einfluss aus den Randbereichen und somit der Leakage-Effekt deutlich reduziert werden kann [74]. Das derart aufbereitete Signal ist in Abb. 4.14b dargestellt.



(a) FFT des gekürzten Testsignals und Teilstück für die Erweiterung des Signals durch wiederholtes Kopieren

(b) Mit Hanning-Fenster überlagertes Testsignal

Abb. 4.14: Für die FFT aufbereitete Testsignale

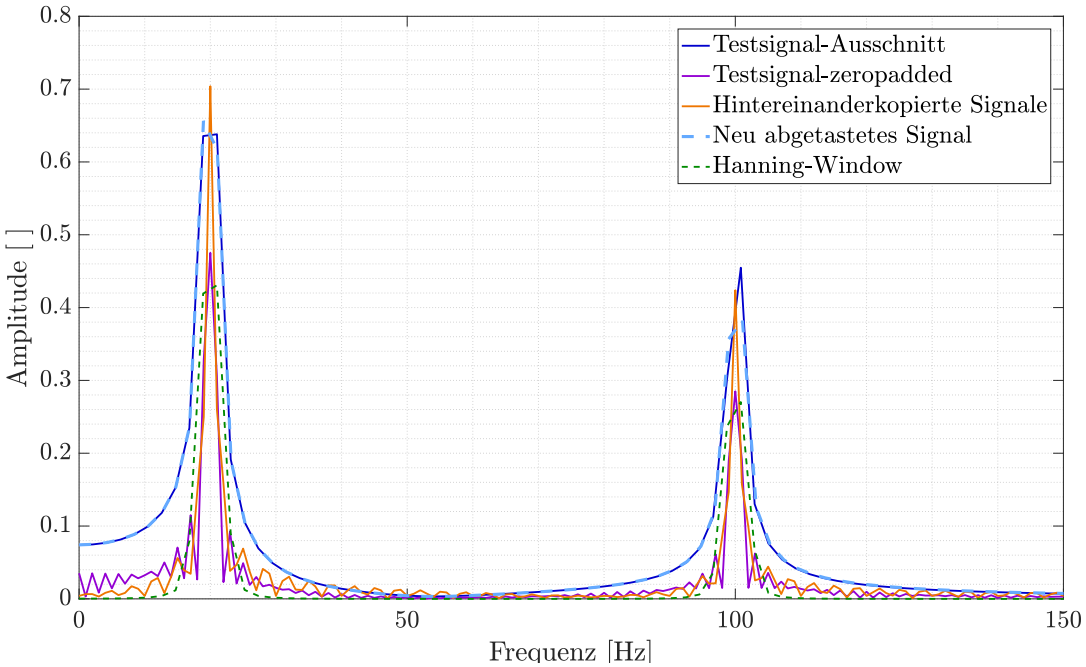


Abb. 4.15: Spektrum der aufbereitenden Signale im Vergleich mit dem Spektrum des unbearbeiteten Signals

Die Auswirkungen der verschiedenen Aufbereitungsformen der Signale auf das Ergebnis der FFT für den Frequenzbereich von 0 bis 100 Hz sind Abb. 4.15 zu entnehmen. Während das unbehandelte Signal einen deutlichen Leakage-Effekt aufweist, ist dieser bei den zuvor aufbereiteten Signalen (mit Ausnahme des neu abgetasteten Signals, bei welchem bereits im Vorfeld keine starke Veränderung des Spektrums der FFT zu erwarten war) nicht mehr in dieser Ausprägung zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

beobachten. Die beste Bereinigung des Leakage-Effekts kann mit dem Hanning-Fenster erzielt werden. Durch das Hanning-Fenster wird die Auflösung der FFT allerdings nicht verändert. Für den Fall, dass die tatsächliche Frequenz außerhalb der Frequenzauflösung liegt, führt dies dazu, dass die Amplitude in der FFT auf die zwei nächstgelegenen Frequenzen des erzeugten Spektrums aufgeteilt wird und die tatsächlichen Anregungsfrequenzen nicht korrekt ermittelt werden können.

Anders verhält sich dies bei den Verfahren, deren Ziel die Variation der Auflösung ist. Hier wird der Leakage-Effekt nur auf eine größere Anzahl an Frequenzen aufgeteilt und damit die Amplitude des Leakage verringert, die „Frequenzbreite“ dieses Effekts bleibt aber im Wesentlichen erhalten (womit auch die Unterschätzung der realen Amplitude verbleibt). Dennoch kann vor allem bei der Methode der künstlichen Verlängerung des Signals durch die Erzeugung von ganzzahligen Schwingungen vor allem die Anregungsfrequenz exakter ermittelt werden. Für die Auswertung im nachfolgenden Kapitel wird daher diese Methode zur Aufbereitung von kurzen Signalen vor der Anwendung des FFT-Algorithmus gewählt, wenn die Amplitude der FFT die zu ermittelnde Größe darstellt. Falls auch der in der FFT ermittelte Phasenwinkel (die zweite Größe die bei der Anwendung des FFT-Algorithmus ermittelt wird) von Interesse ist, so wird auf das Zero-Padding zurückgegriffen.

4.3 Dynamisches Rotationszentrum von Starrkörpern

Für die Analyse komplexer, dreidimensionaler Probleme in der Mechanik ist es oft sinnvoll, diese zu vereinfachen und auf ebene Probleme zu reduzieren. Eine derartige Vereinfachung stellt die Betrachtung des Rotationszentrums in der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen dar. Jede mögliche Bewegung eines Starrkörpers kann als Überlagerung von Rotation und Translation in den drei Richtungen des Raums beschrieben werden. Im Falle einer ebenen Betrachtung lässt sich jede Bewegungsform als Rotation um einen bestimmten Punkt ausdrücken. Auch eine reine Translation kann somit als Rotation, deren Zentrum in unendlicher Entfernung zum Ort der Bewegung liegt, beschrieben werden. In der Kinematik wird dieser Punkt als Momentanpol oder Geschwindigkeitspol und im Rahmen dieser Arbeit (in Anlehnung an bisherige Arbeiten zur Verdichtungskontrolle wie zum Beispiel: [57]) als Rotationszentrum bezeichnet.

4.3.1 Analytische Berechnung des dynamischen Rotationszentrums

Wie bereits beschrieben, wird für die Berechnung des dynamischen Rotationszentrums die Ebene der zwei dominanten Bewegungsrichtungen herangezogen. Da die Kraftanregung quer zur Gleisachse erfolgt, stellt dies eine der dominanten Bewegungsrichtungen dar. Als zweite dominante Bewegungsrichtung wird jene der vertikalen Bewegung angenommen. In dieser Richtung wird aufgrund der Maschinengeometrie ein größerer Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Maschine und dem Ort der Kraftanregung angenommen als in Gleislängsrichtung. Die dominanten Bewegungsrichtungen gehen dabei mit größeren Beschleunigungen einher und wurden durch die Beschleunigungsmessungen am DGS bestätigt (siehe Kapitel 5). Eine Darstellung des DGS in der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen ist in Abb. 3.5 und Abb. 4.16 enthalten, wobei die Richtung der Kraftanregung jener der y-Achse und die Vertikalrichtung jener der z-Achse entspricht.

Betrachtet man den DGS zunächst isoliert (also ohne die Verbindung zum Gleis beziehungsweise zum Maschinenrahmen), kann man die theoretische Lage des Rotationszentrums mithilfe von Impuls- und Drallsatz berechnen. Dabei wird zunächst angenommen, dass die Bewegung des DGS aus einer Überlagerung einer translatorischen Bewegung und einer rotatorischen Bewegung resultiert. Würde die Anregung des DGS im Schwerpunkt erfolgen, wäre das Resultat eine reine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

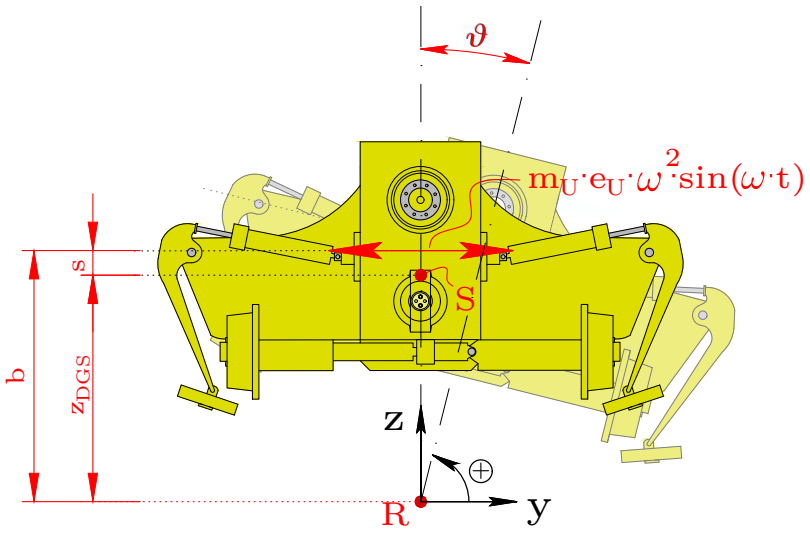


Abb. 4.16: Ebene Darstellung des DGS in der dominanten Bewegungsebene

Translation des DGS (das Rotationszentrum läge in diesem Fall in unendlicher Entfernung zum DGS: $z_{DGS} = \infty$). Eine Momenteneinwirkung im Schwerpunkt hätte wiederum eine reine Rotation zur Folge, wodurch das Rotationszentrum mit dem Schwerpunkt zusammenfiele. Da es sich allerdings im vorliegenden Fall um eine horizontale Krafteinwirkung mit einem vertikalen Abstand zum Schwerpunkt handelt, ist sowohl eine Kraft- als auch eine Momenteneinwirkung (bedingt durch Kraft mal Exzentrizität) vorhanden. Die beschriebene Kinematik des DGS ist in Abb. 4.16 dargestellt.

Durch Aufstellen der Bewegungsgleichungen für das kinematische System lässt sich der vertikale Abstand zwischen dem Schwerpunkt und dem Rotationszentrum ermitteln. Nachfolgend werden der Impulssatz in y-Richtung sowie der Drallsatz um die x-Achse (siehe Gleichungen (4.10)) zur Ermittlung der Bewegungsgleichungen herangezogen.

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y} &= \sum_{i=1}^{n} F_{yi} \\ I_{xx} \cdot \ddot{\vartheta} &= \sum_{i=1}^{n} M_{xi} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Der Impuls- beziehungsweise Drallsatz für den isolierten DGS lässt sich unter der Annahme kleiner Winkel und somit linearer Kinematik, für das gegebene System gemäß den Gleichungen (4.11) formulieren.

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y} &= m_U \cdot e_U \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ \left(I_{xx} + z_{DGS}^2 \cdot m\right) \cdot \ddot{\vartheta} &= -m_U \cdot e_U \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot (s + z_{DGS}) \end{aligned} \tag{4.11}$$

Wobei I_{xx} das Massenträgheitsmoment des DGS, m die Masse des DGS, m_U die Masse der Unwuchten, e_U die Unwuchtexzentrizität, ω die Kreisfrequenz der Anregung, z_{DGS} den Abstand zwischen dem Rotationszentrum des DGS und dem Schwerpunkt und s den Abstand zwischen der Wirkungslinie der Kraftanregung und dem Schwerpunkt beschreibt. Unter Beachtung des Zusammenhangs zwischen Trägheitsradius und Massenträgheitsmoment $I_{xx}/m = i_x^2$ und Lösung des Gleichungssystems der Gleichungen (4.11) nach z_{DGS}, kann folgende Lösung für den vertikalen Abstand des Rotationszentrums zum Schwerpunkt des DGS angegeben werden:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$z_{DGS} = \frac{i_x^2}{s} \tag{4.12}$$

Das Rotationszentrum liegt demnach ohne externe Krafteinwirkung unterhalb des Schwerpunkts. Dies ist allerdings nur dann gültig, wenn keine anderen Kräfte auf den DGS einwirken als jene, die durch die dynamischen Unwuchterreger erzeugt werden. Da der DGS während der Verdichtung mit dem Gleisrost verbunden ist, ist die Reaktionskraft aus dieser Verbindung und somit aus dem Schotter fester Bestandteil des Verdichtungssystems. Die Lage des Rotationszentrums wird durch diese Interaktion verändert, wobei davon auszugehen ist, dass die Steifigkeit des Schotters die Lage signifikant beeinflusst. Werden also alle Maschinenparameter konstant gehalten, kann eine Änderung der Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS ein Maß für die Steifigkeit des Schotters darstellen.

Dafür müsste sichergestellt werden, dass die Reaktionskraft aus dem Gleisrost die einzige maßgebende externe Kraft darstellt, die auf den DGS einwirkt. Der DGS ist in der derzeitigen Bauform jedoch dynamisch nicht vom Maschinenrahmen entkoppelt, weshalb eine zusätzliche signifikante Reaktionskraft aus diesem zu erwarten ist. Durch die hydraulischen Auflastzylinder können vertikale Beschleunigungen in den Maschinenrahmen eingeleitet werden, wodurch dessen Masse zum Mitschwingen angeregt wird. Vertikale Beschleunigungen sind dabei schon aufgrund der Bauform des DGS zu erwarten. Diese Bauform bedingt die in Gleichung (4.12) ermittelte Lage des Rotationszentrums außerhalb des Schwerpunkts, was wiederum eine Kippschwingung des DGS zur Folge hat, bei der neben den horizontalen Beschleunigungen auch unweigerlich die genannten vertikalen Beschleunigungen auftreten. Die Interaktion mit dem Maschinenrahmen ist dabei auch durch den praktischen Einsatz des DGS belegt. In der Betriebsanleitung des DGS wird aufgrund dieser Problematik empfohlen, die Frequenz der Unwuchterregung so zu wählen, dass ein möglichst ruhiger Lauf der Maschine (bestehend aus Aggregat und Maschinenrahmen) erzielt werden kann [59].

4.3.2 Berechnung des dynamischen Rotationszentrums aus Beschleunigungsmessungen

Das tatsächliche dynamische Rotationszentrum von Starrkörpern kann nicht nur analytisch bestimmt werden. Liegen Beschleunigungsmessungen des entsprechenden Starrkörpers, wie das beim DGS der Fall ist, vor, kann das dynamische Rotationszentrum auf Basis dieser Messergebnisse ermittelt werden. Die Beschleunigungssignale müssen für die Ermittlung des Rotationszentrums vor der Berechnung allerdings zuerst zu Geschwindigkeiten beziehungsweise Verschiebungen aufintegriert werden (siehe Abschnitt 4.1). Liegen nach der numerischen Integration der Beschleunigungen sowohl Geschwindigkeiten als auch Verschiebungen vor, so kann das Rotationszentrum auf Basis beider Größen berechnet werden. Da auf den DGS, neben der Erregerkraft, auch Reaktionskräfte aus dem Rahmen und der Gleiskonstruktion (bestehend aus Schiene, Schienenbefestigung, Schwellen und Gleisschotter) wirken, kann die Lage des Rotationszentrums stark von der analytisch ermittelten Lösung abweichen. Um dies zu verdeutlichen, wurde die Lage des dynamischen Rotationszentrums in der Abb. 4.17 und in der Abb. 4.18 oberhalb der Messebene eingezeichnet.

Berechnung des dynamischen Roationszentrums auf Basis von Geschwindigkeiten

Die Berechnung des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Geschwindigkeiten wird in vielen Publikationen der Mechanik beschrieben (zum Beispiel in [21]). Die Koordinaten des Rotationszentrums werden dabei ausgehend von einem (willkürlich) festgelegten Koordinatensystem unter Kenntnis der Geschwindigkeitsvektoren von zumindest zwei Punkten ermittelt. Es wird gemäß der Definition des Rotationszentrums davon ausgegangen, dass die gemessenen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

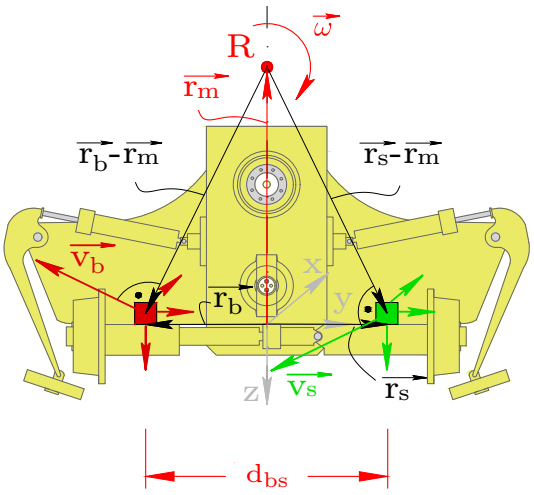


Abb. 4.17: Ermittlung des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Geschwindigkeitsvektoren

Geschwindigkeitsvektoren durch eine Rotation um das Rotationszentrum dargestellt werden können. Damit ergeben sich die Grundgleichungen zur Ermittlung des Rotationszentrums gemäß den Gleichungen (4.13).

$$\begin{aligned} \vec{v_b} &= \vec{\omega} \times (\vec{r_b} - \vec{r_m}) \\ \vec{v_s} &= \vec{\omega} \times (\vec{r_s} - \vec{r_m}) \end{aligned} \tag{4.13}$$

Wobei sich die Komponenten der Geschwindigkeits- und Ortsvektoren folgendermaßen aus den drei Raumkoordinaten der Sensoren zusammensetzen (Gleichung (4.14)):

$$\vec{v_i} = \begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{pmatrix} \qquad \vec{\omega} = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \vec{r_i} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \tag{4.14}$$

Eine Übersichtsskizze zur besseren Veranschaulichung der beschriebenen Vektoren ist in Abb. 4.17 enthalten. Die Lösung der vektoriellen Gleichungen nach $\vec{\omega}$ und $\vec{r_m}$, wobei $\vec{r_m}$ aus den Komponenten y_m und z_m gebildet wird, ergibt die Gleichungen (4.15).

$$\begin{aligned} \omega_x &= \frac{\dot{z}_s - \dot{z}_b}{d_{bs}} \\ y_m &= \frac{d_{bs} \cdot (\dot{z}_s + \dot{z}_b)}{2 \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_b)} \\ z_m &= \frac{d_{bs} \cdot \dot{y}_b}{\dot{z}_s - \dot{z}_b} \end{aligned} \tag{4.15}$$

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Messpunkte auf derselben Höhe (z-Koordinate) befinden und daher aufgrund der Betrachtung des DGS als Starrkörper $\dot{y}_s = \dot{y}_b$ gilt. Durch die ermittelten Geschwindigkeiten lässt sich sowohl der horizontale als auch der vertikale Abstand des Rotationszentrums vom gewählten Koordinatensystem berechnen. Ein sehr großer Vertikalabstand im Vergleich zum Horizontalabstand beschreibt dabei eine überwiegend horizontale Bewegung des DGS und ein großer Horizontalabstand im Vergleich zum Vertikalabstand beschreibt eine überwiegend vertikale Bewegung des DGS. Da die Bewegungen in Horizontalrichtung dominant

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

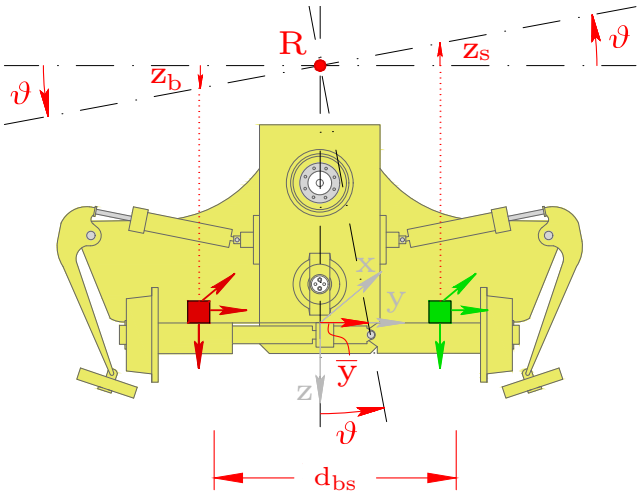


Abb. 4.18: Ermittlung des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Verschiebungen

sein sollten, kann der ermittelte Horizontalabstand dazu dienen, Auffälligkeiten im Bewegungsverhalten zu erkennen.

Berechnung des dynamischen Roationszentrums auf Basis von Verschiebungen
Durch die Betrachtung des Verschiebungszustandes des DGS lässt sich das Rotationszentrum etwas anschaulicher darstellen. Hierfür wird der DGS in der ausgelenkten Lage betrachtet und auf Basis dieser ausgelenkten Figur der vertikale Abstand des Rotationszentrums ermittelt. Eine Skizze zur Veranschaulichung dieses Prinzips ist in Abb. 4.18 enthalten. Wird der DGS um den (ausreichend kleinen) Winkel φ ausgelenkt, entspricht die horizontale Auslenkung bei Zugrundelegung einer linearisierten Kinematik und der Annahme, dass $y_b = y_s$ gilt, Gleichung (4.16).

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{y_b + y_s}{2} \\ \bar{y} &= \vartheta \cdot r_{DGS} \end{aligned} \tag{4.16}$$

Analog zur Horizontalauslenkung erfolgt auch eine einander entgegengesetzte vertikale Verschiebung der Messpunkte gemäß Gleichung (4.17).

$$\begin{aligned} z_s = -z_b &= \vartheta \cdot \frac{d_{bs}}{2} \\ \vartheta &= \frac{z_s - z_b}{d_{bs}} \end{aligned} \tag{4.17}$$

Einsetzen von Gleichung (4.17) in Gleichung (4.16) und umformen nach r_{DGS} führt schlussendlich zu dem Ausdruck für den vertikalen Abstand des Rotationszentrums in Gleichung (4.18).

$$r_{DGS} = \frac{\bar{y} \cdot d_{bs}}{z_s - z_b} \tag{4.18}$$

Das auf diese Art ermittelte Rotationszentrum des DGS dient vor allem der Kontrolle der geschwindigkeitsbasierten Betrachtung. Vergleicht man nun das Ergebnis in Gleichung (4.18) mit dem Ergebnis für z_m in Gleichung (4.15), zeigt sich, dass diese durchaus miteinander vergleichbar sind. Da allerdings ein Integrationsschritt zwischen Geschwindigkeiten und Verschiebungen liegt, ist mit gewissen Abweichungen bei der Anwendung der beiden Verfahren zu rechnen. Die in diesem Kapitel ermittelten Formeln zur Berechnung des Rotationszentrums anhand von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Beschleunigungsmessdaten gelten analog auch für die Berechnung des Rotationszentrums der Schwelle. Der horizontale Abstand zwischen den Beschleunigungsensoren des DGS beträgt dabei 1,20 m, jener zwischen den Beschleunigungssensoren der Schwelle 1,98 m. Dieser Wert muss in der jeweiligen Formel entsprechend eingesetzt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 5

Aufbereitung und Auswertung der Messdaten

Die im Zuge der Versuche am 01.03.2019 in Linz gewonnenen Messdaten werden nachfolgend unter Verwendung der im vorigen Kapitel erläuterten Auswerteprozeduren aufbereitet. Da die Analyse des Bewegungsverhaltens des DGS und des damit in Verbindung stehenden Gleisrostes Gegenstand dieser Arbeit ist, werden die dafür benötigten physikalischen Grundgrößen (Geschwindigkeiten und Verschiebungen) aus den Beschleunigungssignalen ermittelt. Anhand dieser Größen werden daraufhin Diagramme zur Analyse der Messergebnisse erstellt. Diese Diagramme werden beispielhaft für die erste Messfahrt (Messfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands) detailliert beschrieben.

5.1 Aufbereitung der Messdaten

Zur Ermittlung der Geschwindigkeiten und Verschiebungen aus den gemessenen Beschleunigungssignalen war es zunächst erforderlich zu beurteilen, ob eine numerische Integration durchführbar ist, oder ob im Signal nennenswerte niederfrequente Anteile vorhanden sind. Dies war insofern von Interesse, da diese Anteile im Zuge der numerischen Integration mittels Trapezregel durch einen Butterworthfilter entfernt werden müssen, wodurch aber eine eventuell wesentliche Information über das Bewegungsverhalten verloren ginge. Um dem vorzubeugen, wurde das gesamte Beschleunigungssignal unter Anwendung des in MATLAB implementierten FFT-Algorithmus in den Frequenzbereich transformiert, wobei zuvor wie in Abschnitt 4.1 beschrieben der Mittelwert des analysierten Signals von jedem einzelnen Messwert abgezogen wurde. Hierbei wurde keine besondere Aufbereitung des Signals vor Durchführung der FFT vorgenommen, da bei langen Signalen der Leakage-Effekt aufgrund der hohen Frequenzauflösung von geringer Bedeutung ist [74]. Das Ergebnis der FFT ist für die Messdaten des DGS im Zuge der ersten Überfahrt in Abb. 5.1 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass in der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen keine nennenswerten niederfrequenten Schwingungsanteile vorliegen. Die relativ großen Amplituden niedriger Frequenzanteile in x-Richtung betreffen nur den backbordseitigen Sensor und scheinen daher keine wesentlichen Informationen über das Bewegungsverhalten des DGS zu enthalten. Das FFT-Frequenzspektrum wurde auch für die anderen Beschleunigungssensoren ausgewertet, wobei bei keinem der erstellten FFT-Spektren (mit Ausnahme des Beschleunigungssensors im Schotter, bei dem eine eventuelle Beschädigung bereits im Vorfeld der Versuchen befürchtet worden war) ein nennenswerter Anteil im niederfrequenten Bereich festgestellt werden konnte. Es treten augenscheinlich neben der angeregten Grundschwingung nur Oberschwingungen, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen der Anregungsfrequenz entspricht, im FFT-Spektrum auf.

Damit sind die gemessenen Beschleunigungen für die numerische Integration zu Geschwindigkeiten und in weiterer Folge zu Verschiebungen geeignet. Bei der numerischen Integration wurden folgende Ziele hinsichtlich des Ergebnisses definiert:

- keine Phasenverschiebung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

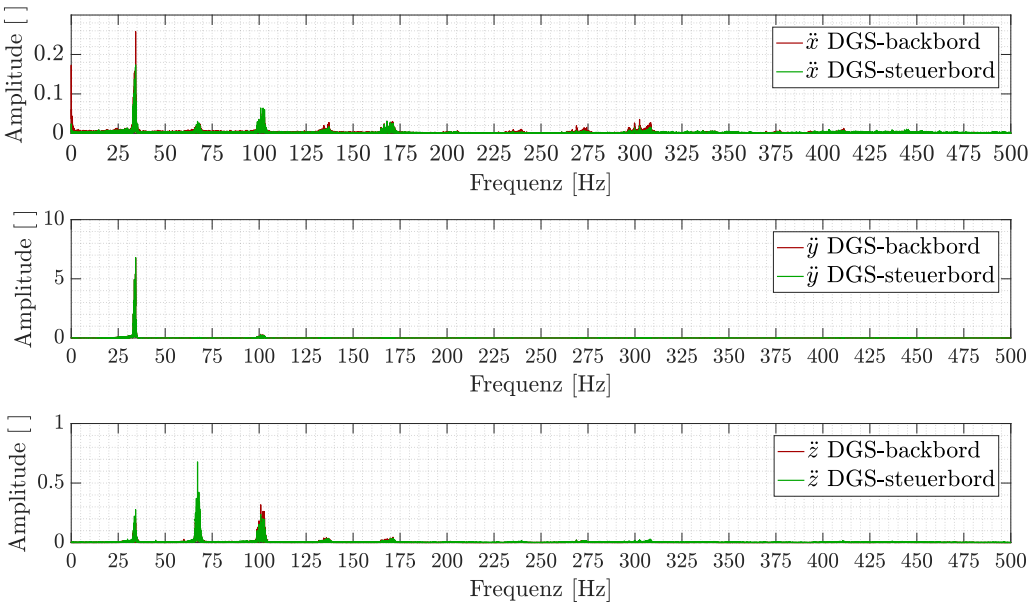
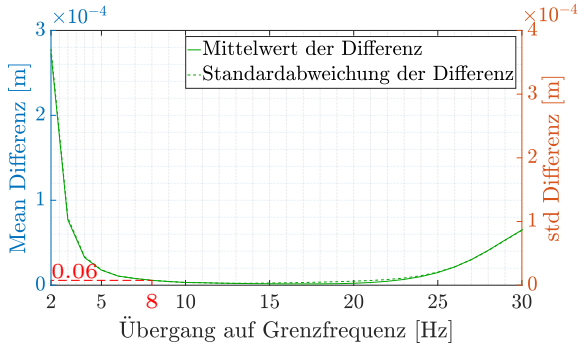


Abb. 5.1: Darstellung der Beschleunigungssignale $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$ am DGS im Frequenzbereich (Erregerfrequenz $f = 33\,\text{Hz}$)

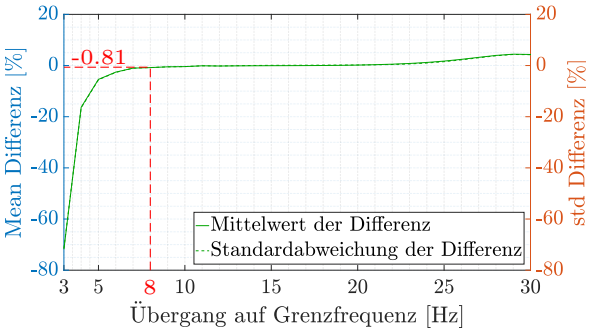
- möglichst geringe Amplitudenveränderung des Signals
- Erhaltung der Charakteristik (Gestalt) des Signals

Die Vermeidung einer allfälligen Phasenverschiebung wurde durch die Wahl des Filterungsprozesses sichergestellt (siehe 4.1.2). Damit eine möglichst geringe Amplitudenveränderung durch die Filterung und die weitere Integration erfolgt, war es notwendig, die Grenzfrequenz möglichst gering zu wählen. Zu diesem Zweck wurde eine Konvergenzstudie in MATLAB durchgeführt. Dafür wurde die Grenzfrequenz des Butterworthfilters schrittweise um 1 Hz erhöht und die numerische Integration durchgeführt. Die für jeden Schritt erhaltenen Verschiebungen wurden von der jeweils vorhergehenden abgezogen und die erhaltene Differenz aufgezeichnet. Zur leichteren Beurteilung wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der so erhaltenen Differenzkurven ermittelt. Der Verlauf der Mittelwerte beziehungsweise der Standardabweichung der Differenz ist in Abb. 5.2 für die horizontale Bewegung des steuerbordseitigen DGS-Sensors dargestellt. Es zeigt sich, dass bis zu einer Grenzfrequenz von 8 Hz die Veränderung des Signals mehr als 1% im Vergleich zum Übergang von 1 Hz auf 2 Hz Grenzfrequenz beträgt (das Vorzeichen in Abb. 5.2b beschreibt nur den Trend, also ob der Mittelwert der Differenz ab- oder zugenommen hat). Eine stärkere Filterung des Signals zeigte bis zu einer Grenzfrequenz von 20 Hz nur minimale Auswirkungen auf das Signal, wobei aber eine über diese Frequenz hinausgehende Filterung erneut wesentliche Veränderungen des Signals bewirkte. Dies spricht dafür, dass ab einer Grenzfrequenz des Filters von ca. 20 Hz wesentliche Informationen aus dem Signal entfernt werden. Als Grenzfrequenz für die Aufbereitung der Beschleunigungssignale vor der numerischen Integration wurden aus diesem Grund schließlich 9 Hz gewählt. Ab dieser Frequenz beträgt die Veränderung des Signals bei allen Sensoren weniger als 1 % im Vergleich zum ersten Filterübergang. Die Ergebnisse der Konvergenzbetrachtung sind für alle Sensoren in Tab. 5.1 zusammengefasst. Es wurde versucht, die Grenzfrequenz niedrig zu wählen, um einerseits möglichst wenig Informationen aus dem Signal zu entfernen und andererseits dennoch plausible Verschiebungsgrößen zu erhalten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Darstellung des Mittelwerts und der Standardabweichung der Differenzen beim Übergang auf verschiedene Grenzfrequenzen für den steuerbordseitigen Beschleunigungssensor in y-Richtung



(b) Prozentuelle Veränderung des Mittelwerts und der Standardabweichung der Differenzen im Bezug auf den ersten Übergang von 1 Hz auf 2 Hz beim Übergang auf verschiedene Grenzfrequenzen für den steuerbordseitigen Beschleunigungssensor in y-Richtung

Abb. 5.2: Veränderung des Testsignals beim Übergang auf verschiedene Testfrequenzen

Tab. 5.1: Übersicht über die Ergebnisse der Konvergenzbetrachtung für die einzelnen Sensoren. Als Grenzfrequenz wurde jene Frequenz definiert, bei der eine Verringerung des Mittelwerts der Differenzen von weniger als 1 % gegenüber dem Übergang von 1 auf 2 Hz auftritt (eingetragen in Spalten mit „MW %“)

Sensor		**x-Richtung** Grenzfreq.	MW %	**y-Richtung** Grenzfreq.	MW %	**z-Richtung** Grenzfreq.	MW %
DGS	steuerbord	7 Hz	−0,93 %	8 Hz	−0,81 %	8 Hz	−0,77 %
	backbord	7 Hz	−0,52 %	7 Hz	−0,89 %	7 Hz	−0,93 %
Schwelle	steuerbord	7 Hz	−0,59 %	7 Hz	−0,95 %	7 Hz	−0,85 %
	backbord	8 Hz	−0,95 %	9 Hz	−0,48 %	7 Hz	−0,70 %
Schotter		7 Hz	−0,41 %	7 Hz	−0,71 %	7 Hz	−0,41 %
Erschütterungen	4 m	5 Hz	−0,14 %	5 Hz	+0,13 %	5 Hz	+0,17 %
	8 m	6 Hz	−0,70 %	6 Hz	−0,69 %	5 Hz	+0,03 %
	12 m	5 Hz	−0,39 %	5 Hz	+0,21 %	5 Hz	−0,84 %

Mit dem gewählten Butterworthfilter 6. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 9 Hz wurde die Integration der Beschleunigungssignale nach folgendem Schema durchgeführt:

1. Abziehen des Mittelwerts vom Beschleunigungssignal
2. Hochpassfilterung des Beschleunigungssignals
3. Numerische Integration des Beschleunigungssignals mit der Trapezregel
4. Abziehen des Mittelwerts vom integrierten Beschleunigungssignal (Geschwindigkeitssignal)
5. Hochpassfilterung des Geschwindigkeitssignals
6. Numerische Integration des Geschwindigkeitssignals mit der Trapezregel

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

7. Abziehen des Mittelwerts vom integrierten Geschwindigkeitssignal (Verschiebungssignal)

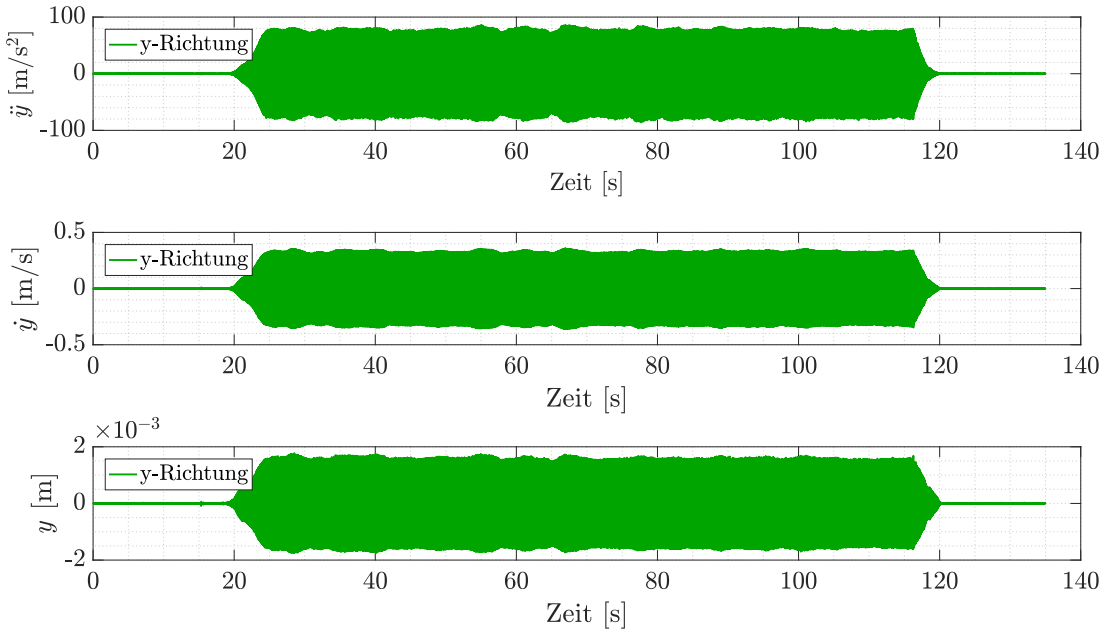


Abb. 5.3: Gemessene Horizontalbeschleunigungen und daraus berrechnete Horizontalgeschwindigkeiten beziehungsweise -verschiebungen des steuerbordseitigen DGS-Sensors

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist beispielhaft in Abb. 5.3 für die Horizontalrichtung (y-Richtung) des steuerbordseitigen DGS-Sensors dargestellt. Es ist erkennbar, dass die grundlegende Charakteristik des Beschleunigungssignals (größere Beschleunigungen bewirken größere Verschiebungen) erhalten bleibt, womit auch die dritte der oben definierten Anforderungen an die numerische Integration erfüllt ist. Die so ermittelten Geschwindigkeiten und Verschiebungen bilden die Grundlage für die weitere Versuchsauswertung. Ein großer Teil dieser Auswertung basiert dabei auf der Betrachtung des Signals über einzelne, kurze Zeitfenster, um Veränderungen im Bewegungsverhalten sichtbar machen zu können. Die betrachteten Zeitfenster wurden anhand des Signals der Positionssensoren, mit welchem die Position der Unwucht – und somit die initiale Schwingungsanregung – ermittelt wird, bestimmt.

Da für den Versuch zwei Positionssensoren verwendet wurden und es zu keinen Ausfällen bei diesen kam, werden beide Signale für die Versuchsauswertung herangezogen. Eine Möglichkeit, die Signale beider Positionssensoren in Form einer einzigen Kurve darzustellen ist, das Signal eines Positionssensors vom anderen zu subtrahieren. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist in Abb. 5.4 dargestellt. In dieser Abbildung sind die erhobenen Messpunkte des digitalen Signals mit blauen Kreuzen markiert. Der Verlauf zwischen den Messpunkten wurde linear interpoliert und ebenfalls in blau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beide Sensoren eine ähnliche Amplitude liefern. Die Unterschiede zwischen den Sensoren können mit dem leicht unterschiedlichen Abstand der Näherungssensoren zum, auf der Unwuchtwelle befestigten, Magneten erklärt werden. Um schließlich auf Basis dieses Signals den Anfang einer Unwuchtumdrehung und damit eines Zeitfensters ermitteln zu können, wurde jeweils der erste Messwert der aufsteigenden Flanke, der größer als Null aber kleiner als 0,07 mV ist, ermittelt (rot markierte Werte in Abb. 5.4). Die Dauer einer Unwuchtumdrehung entspricht dabei dem zeitlichen Abstand zwischen zwei

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dieser Punkte. In weiterer Folge entsprechen die gewählten Zeitfenster meist der Dauer von zehn Unwuchtumdrehungen.

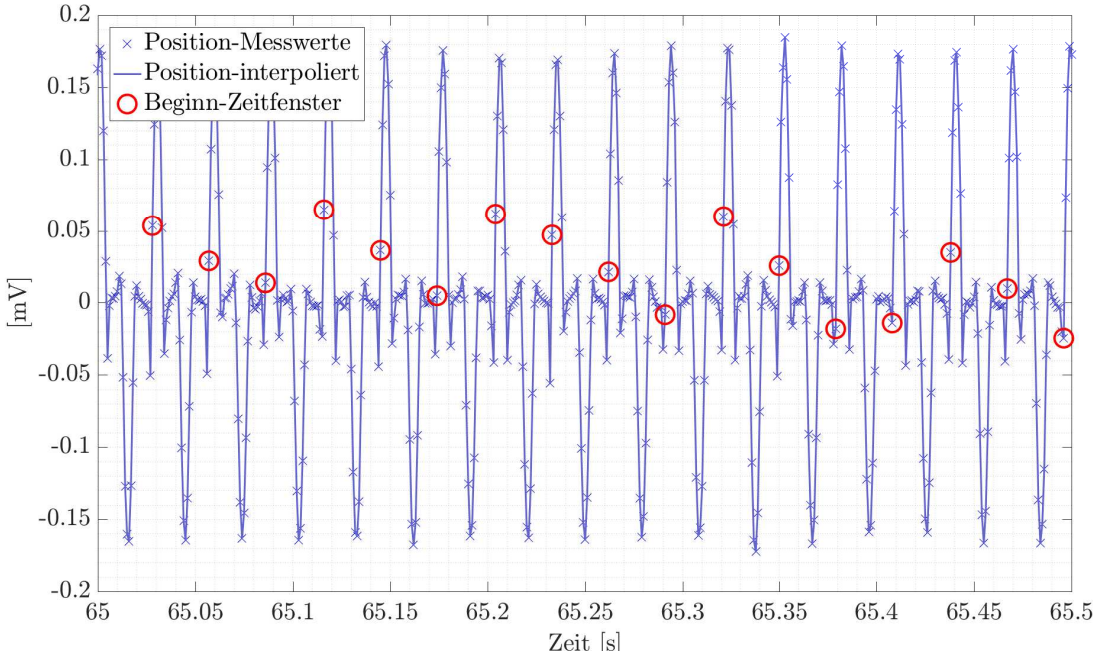


Abb. 5.4: Zusammengeführtes Signal der zwei Positionssensoren. Eingezeichnet sind die Messpunkte, wobei die Punkte die den Beginn einer Schwingung darstellen, rot hervorgehoben sind.

5.2 Auswertungen auf Basis der aufbereiteten Messdaten

Unter Zugrundelegung der Zeitfenster für jeweils zehn Unwuchtumdrehungen werden Auswertungsdiagramme erstellt, die eine Beurteilung der Veränderung des Bewergungsverhaltens des Maschine-Boden-Interaktionssystems erleichtern sollen. Dies ist insofern von Interesse, da die ermittelten Bewegungsgrößen (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen) zwar die Grundlage für die Beschreibung des Bewegungsverhaltens darstellen, konkrete Aussagen über Änderungen im Bewegungsverhalten in der vorliegenden Form aber nicht möglich sind. Dies ist vorrangig der Datenmenge geschuldet (bei einer Aufzeichnungsfrequenz von 1000 Hz und einem Beobachtungszeitraum von 140 s ergibt dies 140.000 Datenpunkte für eine Raumrichtung eines Sensors), die eine rein visuelle Analyse des Signals unmöglich macht. Nachfolgend werden die erstellten Auswertungsprozeduren konkret beschrieben.

5.2.1 Frequenzverlauf der Unwuchtanregung

In einem ersten Schritt wird die Anregungsfrequenz der Unwucht für Zeitfenster von jeweils zehn Unwuchtumdrehungen ermittelt. Dies dient dazu, die auf der Maschine eingestellte Anregungsfrequenz von 33 Hz zu überprüfen, da die Anregungsfrequenz eine wesentliche Größe für das Bewegungsverhalten dynamischer Systeme darstellt und somit keinen Unsicherheiten unterliegen sollte. Die Ermittlung der Anregungsfrequenz erfolgt auf Basis des Signals der Positionssensoren auf zwei Arten, um Unsicherheiten hinsichtlich des Ermittlungsverfahrens zu minimieren:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1. Ermittlung im Zeitbereich
2. Ermittlung im Frequenzbereich

Die Ermittlung der Anregungsfrequenz im Zeitbereich erfolgt für jedes Zeitfenster mithilfe von Gleichung (5.1).

$$f_{Anregung} = \frac{n}{t_{Ende} - t_{Beginn}} \tag{5.1}$$

Dabei wird die Anzahl der Schwingungen n im untersuchten Zeitfenster (wie bereits beschrieben handelt es sich aufgrund der Art der Festlegung der Zeitfenster um zehn Schwingungen) durch die Dauer des Zeitfensters ($t_{Ende} - t_{Beginn}$) dividiert. Um diese simple Herangehensweise überprüfen zu können, wird eine alternative Ermittlung im Frequenzbereich durchgeführt. Das Signal des entsprechenden Zeitfensters wird dafür zunächst gemäß 4.2 durch künstliche Verlängerung mittels Hintereinanderkopieren von ganzzahligen Schwingungen aufbereitet. Danach wird das Signal über Anwendung eines FFT-Algorithmus in den Frequenzbereich transformiert und die dominante Frequenz abgelesen. Das Ergebnis beider Vorgehensweisen ist in Abb. 5.5 dargestellt, wobei die auf der Maschine eingestellte Frequenz (33 Hz) als rote Linie dargestellt ist. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse beider Methoden gut übereinstimmen. Außerdem ist erkennbar, dass sich die Anregungsfrequenz im Laufe des Versuchs erhöhte und nicht mehr der eingestellten Frequenz entsprach.

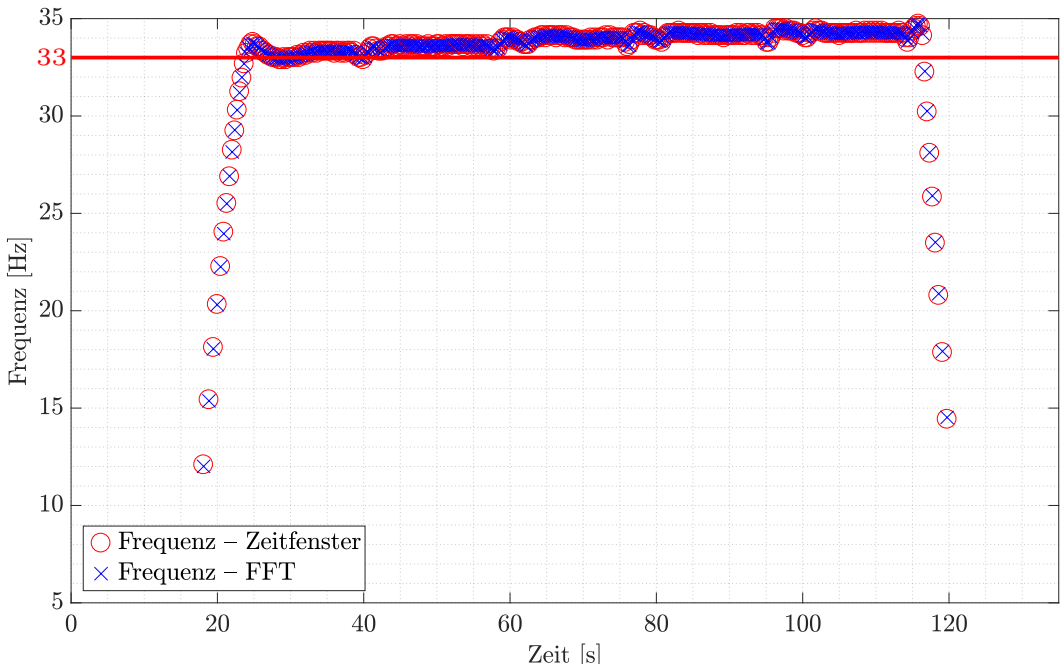


Abb. 5.5: Verlauf der Anregungsfrequenz während der ersten Messfahrt (Ausgangssituation)

5.2.2 Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden

Eine wesentliche Kenngröße von Schwingungen ist neben der Frequenz die Schwingungsamplitude. Um eine Schwingungsamplitude angeben zu können, muss zumindest eine ganze Schwingung betrachtet werden. Da die Zeitfenster jedoch auf Basis des Signals der Positionssensoren ermittelt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

werden, ist nicht davon auszugehen, dass die derart ermittelten Zeitpunkte auch ganzzahlige Schwingungen des DGS, der Schwelle und der Ausbreitung erfassen. Deshalb wird ein größerer Zeitausschnitt von zehn Unwuchtumdrehungen für die Ermittlung der Amplitude gewählt. In diesem Zeitausschnitt werden daraufhin die obere Einhüllende und die untere Einhüllende des Signals ermittelt, wie der Darstellung in Abb. 5.6 zu entnehmen ist.

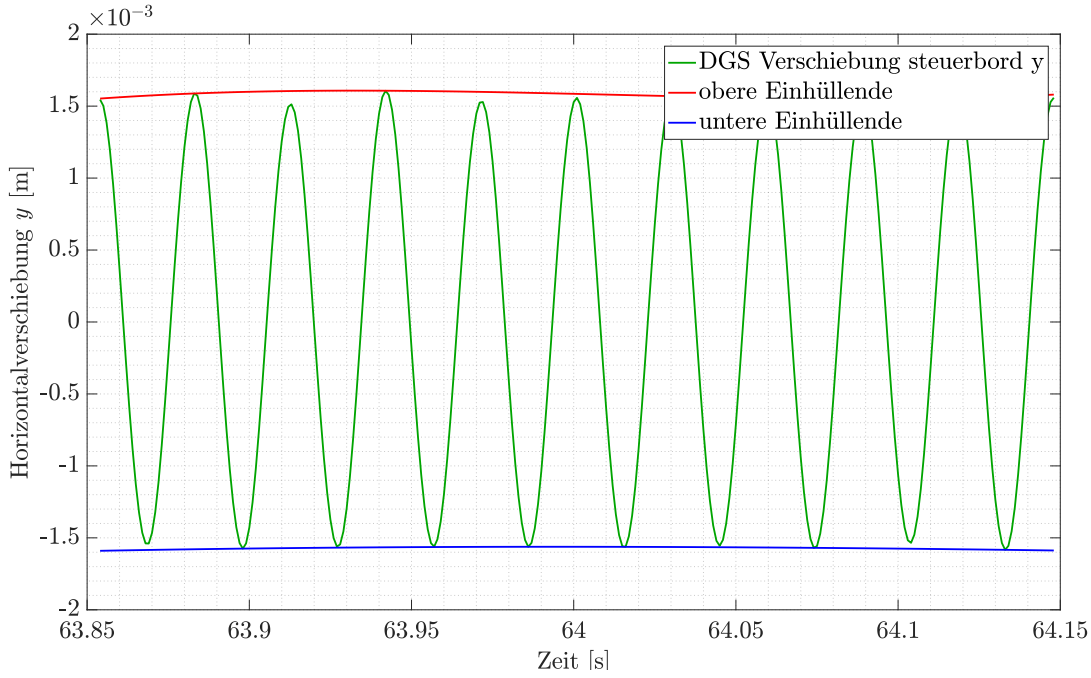


Abb. 5.6: Ermittlung der Amplitude mittels Einhüllenden

In Abb. 5.6 ist ein Zeitausschnitt des steuerbordseitigen Verschiebungssignals am DGS für die erste Messfahrt dargestellt. Wenn man nun die Differenz zwischen dem Mittelwert der oberen Einhüllenden (rot) und jenem der unteren Einhüllenden (blau) bildet und diesen Wert halbiert, entspricht dies der mittleren Amplitude des Signals für den betrachteten Zeitabschnitt. Aufgrund des Berechnungsverfahrens das zur Einhüllendenberechnung in MATLAB mit dem Befehl *envelope* verwendet wird, kann es vorkommen, dass die Einhüllende an den Rändern des untersuchten Zeitbereichs sehr große beziehungsweise sehr kleine Werte annimmt. Diese Werte werden vor der Berechnung der Amplitude des Zeitfensters entfernt. Der Amplitudenverlauf der Horizontalbeschleunigungen (Beschleunigungen in y-Richtung) des DGS und der Schwelle für die erste Messfahrt sind in Abb. 5.7 und jene der Horizontalverschiebungen des DGS und der Schwelle in Abb. 5.8 dargestellt.

Da im Zuge der Versuche auch eine Frequenzvariation am Stand über der instrumentierten Schwelle durchgeführt wurde, ist es möglich, eine alternative Darstellung für die im Zuge der Frequenzvariation erhobenen Daten zu erstellen. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Amplitudenfrequenzgang des DGS und der Schwelle. Dabei wird auf der horizontalen Achse anstelle der Zeit die Frequenz aufgetragen. Die so erhaltenen Diagramme sind für die Horizontalbeschleunigungs- und Verschiebungsamplituden in Abb. 5.9 und Abb. 5.10 dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

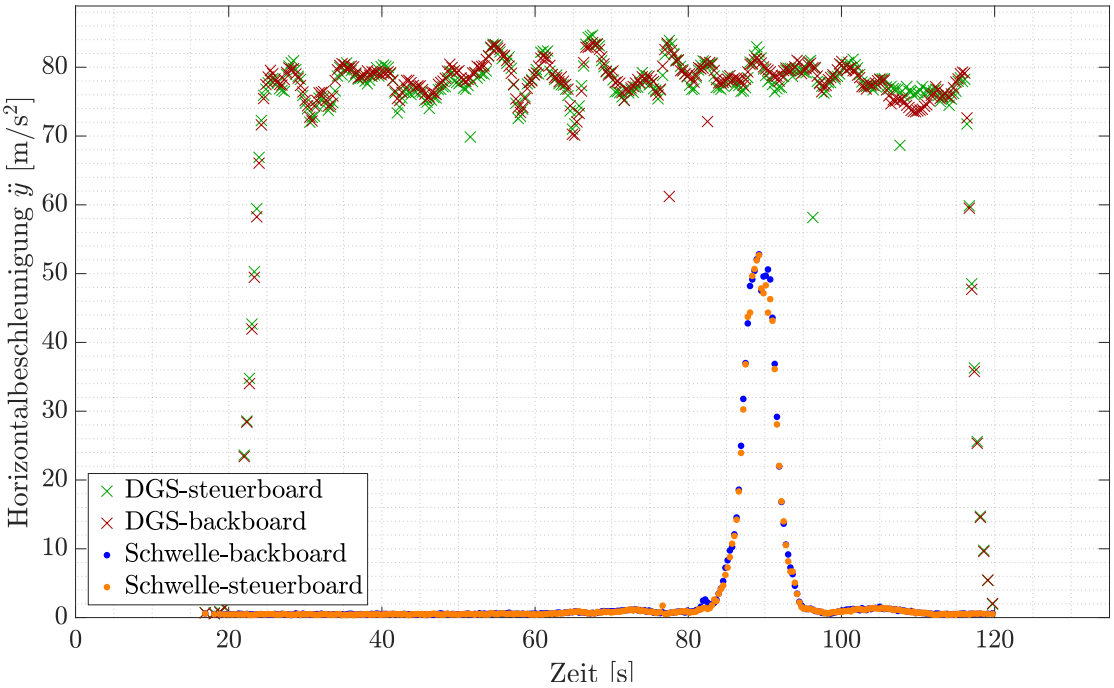


Abb. 5.7: Horizontalbeschleunigungsamplituden $\ddot{y}$ des DGS und der Schwelle für die erste Messfahrt

5.2.3 Darstellung der Bewegungen in der y-z-Ebene

Eine weitere Veranschaulichung der Bewegungen des DGS und der Schwelle ist durch die Darstellung der Bewegungen in der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen (y-z-Ebene) möglich. Bei dieser Darstellungsvariante werden die am DGS beziehungsweise auf der Schwelle ermittelten Verschiebungskoordinaten für den Zeitraum von jeweils zehn Schwingungen dargestellt, wobei die Horizontalverschiebungen (y-Richtung) auf der Abszisse und die Vertikalverschiebungen (z-Richtung) auf der Ordinate, entsprechend dem in den Abschnitten 3.3 und 4.3.2 dargestellten Koordinatensystem, aufgetragen werden.

Eine reine Translation wäre in diesem Diagramm durch eine vertikale beziehungsweise horizontale Linie erkennbar. Diese Form würde auch eine Rotation um einen Punkt mit derselben Distanz zu beiden Sensoren aufweisen. Ob es sich in diesem Fall um eine reine Rotation oder eine reine Translation handelt, kann anhand des Rotationszentrums beurteilt werden (siehe Abschnitt 4.3.2). Hat das Rotationszentrum einen großen Abstand zu den betrachteten Punkten, so handelt es sich überwiegend um eine Translation, hat es einen kleineren Abstand, so handelt es sich um eine überwiegend rotatorische Bewegung. Ist, wie bei der Schwellenbewegung im unteren Teil der Abb. 5.11 eine Neigung mit einer entsprechenden Krümmung der Kurve zu erkennen, so handelt es sich um eine Kippschwingung, wobei die Krümmung mit zunehmendem Abstand des Rotationszentrums zu den betrachteten Punkten geringer wird. Liegt das Rotationszentrum unterhalb der Messebene, so sind die Kurven zueinander geneigt (negative Krümmung, konkave Form), liegt es oberhalb der Messebene, weisen die Kurven eine konvexe Form mit positiver Krümmung auf. In Abb. 5.11 beschreibt die Kurve annähernd die Form einer geneigten Ellipse. Dies deutet auf eine Überlagerung mit einer entsprechend großen Horizontalbewegung hin. Würde es sich um eine reine Kippschwingung ohne Horizontalverschiebung handeln, würde die Kurve keine Fläche einschließen. Die Kurven im oberen Teil der Abb. 5.11 weisen eine konvexe Form auf.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

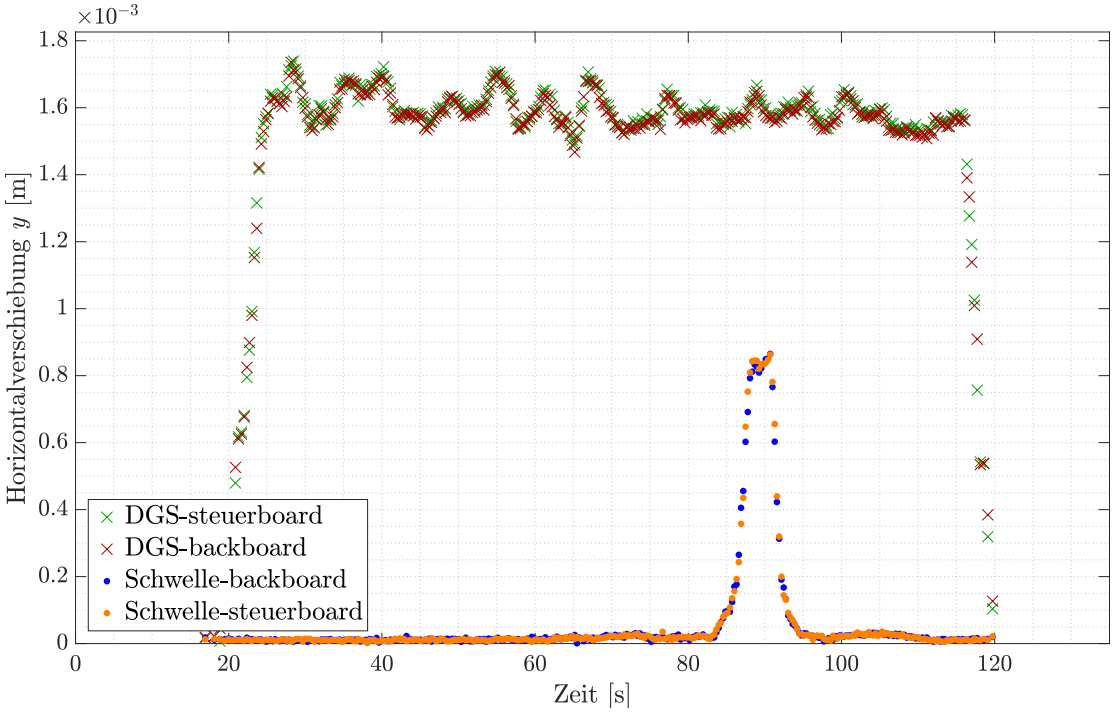


Abb. 5.8: Horizontalverschiebungsamplituden y des DGS und der Schwelle für die erste Messfahrt

Der DGS unterliegt in diesem Zeitraum also einer Kippschwingung, wobei das Rotationszentrum oberhalb der Messebene liegt. Zusätzlich zu dieser Kippschwingung beschreibt die Kurve die Form einer liegenden Acht. Dies deutet darauf hin, dass es zu Überlagerungen mit vertikalen Verschiebungen aus einer Interaktion mit dem Rahmen oder dem Untergrund kommt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

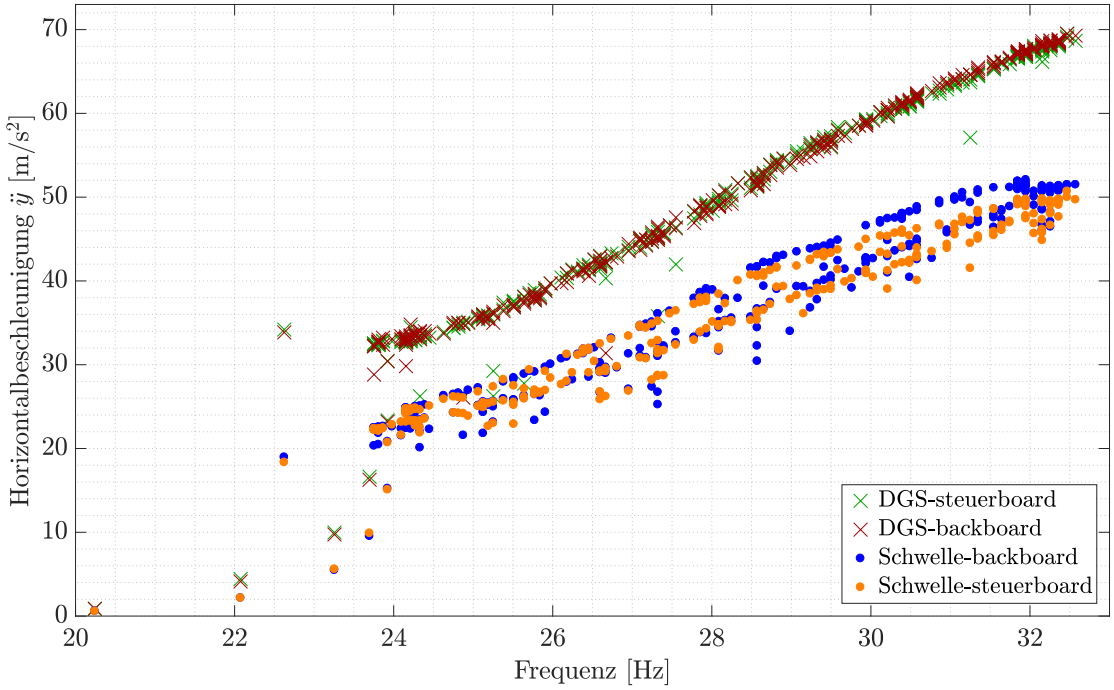


Abb. 5.9: Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalbeschleunigungsamplituden $\ddot{y}$ des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

5.2.4 Lage des dynamischen Rotationszentrums

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben wurde, kann das dynamische Rotationszentrum des DGS beziehungsweise der Schwelle sowohl auf Basis von Geschwindigkeiten als auch von Verschiebungen ermittelt werden. Der Ermittlung des Rotationszentrum wird jeweils das in Abschnitt 4.3.2 enthaltene Koordinatensystem zugrunde gelegt. Nachfolgend werden die Ergebnisse beider Varianten gegenübergestellt.

Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Geschwindigkeiten

Das dynamische Rotationszentrum des DGS wurde anhand der in Kapitel 4.3.2 ermittelten Formeln auf Basis der einmal aufintegrierten Beschleunigungssignale berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 5.12 für die Messergebnisse der DGS-Sensoren der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) dargestellt. In Abb. 5.12a ist dabei der vertikale Abstand des Rotationszentrums und in Abb. 5.12b der horizontale Abstand vom Koordinatenursprung abgebildet. Unrealistisch große Werte für den Abstand des Rotationszentrums (Ergebnisse >100 m) werden im Zuge der Ergebnisdarstellung und bei der Berechnung des in rot dargestellten, gleitenden Mittelwerts nicht berücksichtigt. Diese Aussagen gelten auch für die Berechnungsergebnisse des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle, welche in Abb. 5.13 dargestellt sind.

Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Verschiebungen

Um die geschwindigkeitsbasierte Lösung überprüfen zu können, wird die Lage des dynamischen Rotationszentrums auch auf Basis der Verschiebungsgrößen gemäß Kapitel 4.16 berechnet. Auch bei dieser Berechnungsmethode werden unrealistisch große Abstandswerte (>100 m) weder bei der Darstellung der Ergebnisse, noch bei der Berechnung des gleitenden Mittelwerts berücksichtigt. Die Ergebnisse der Berechnung aus den Messungen für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) sind für den DGS in Abb. 5.14 und für die Schwelle in Abb. 5.15 dargestellt. Es

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

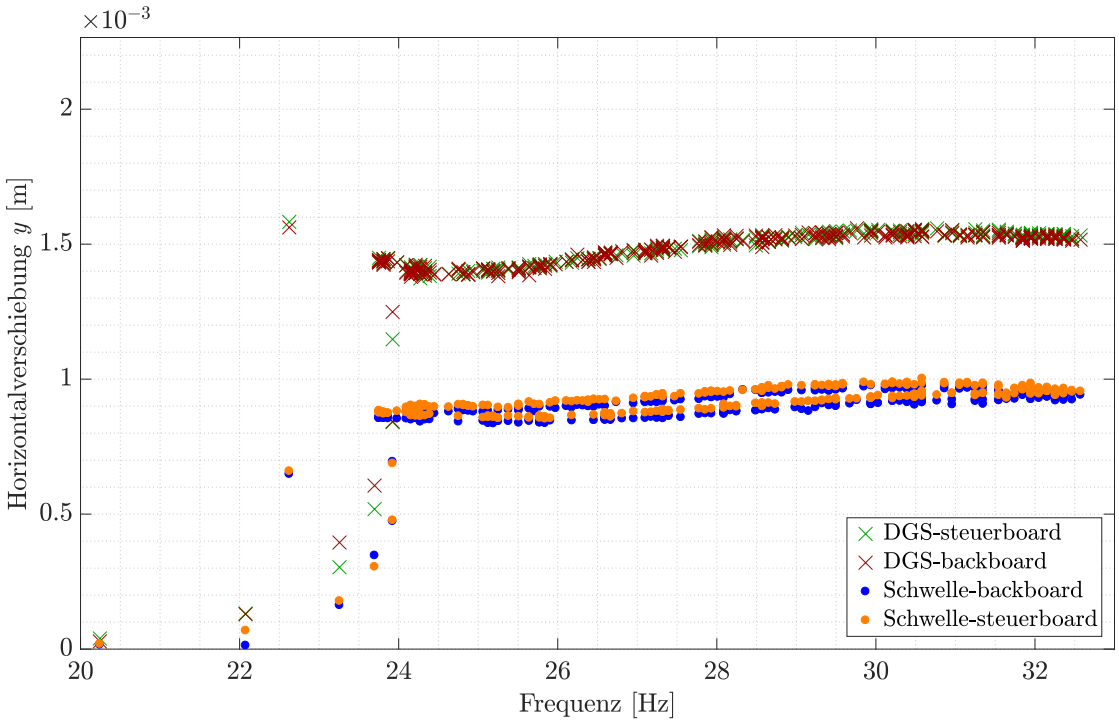


Abb. 5.10: Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalverschiebungsamplituden y des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

zeigt sich, dass beide Herangehensweisen ähnliche Ergebnisse liefern, wobei die Ergebnisse des geschwindigkeitsbasierten Verfahrens eine etwas geringere Streuung aufweisen.

Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis der Ergebnisse der FFT

Durch die Ermittlung der Lage des Rotationszentrums anhand der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Methoden erhält man für alle Zeitpunkte, an denen Messdaten vorliegen, Ergebnisse. Dies hat die Punktwolken in den Abb. 5.12 bis Abb. 5.15 zur Folge, die keine eindeutigen Ergebnisse liefern, sondern im besten Fall Bereiche mit erhöhter Ergebniskonzentration. Um eindeutige Ergebnisse zu erhalten, besteht die Möglichkeit, anstatt der realen Geschwindigkeits- beziehungsweise Verschiebungsdaten, gemittelte Werte zu verwenden. Zur Berechnung gemittelter Werte kann neben dem bereits vorgestellten gleitenden Mittelwert ein Verfahren, das auf einer Analyse im Frequenzbereich basiert, verwendet werden. Für dieses Verfahren werden einzelne Zeitfenster der untersuchten Schwingungen in den Frequenzbereich transformiert und die Amplitude der dominanten Frequenz verwendet. Die zugrunde liegende Idee ist dabei folgende: Aufgrund der Tatsache, dass bei den vorgestellten Methoden zur Berechnung des Rotationszentrums Relationen (Brüche) betrachtet werden, liegt jeweils eine dimensionslose Größe vor und somit sollten die reduzierten Amplituden der FFT (welche durch den Leakage-Effekt hervorgerufen werden) geringere Auswirkungen haben.

Für die Berechnung des Rotationszentrums auf der Basis von Ergebnissen einer FFT werden zunächst die Ausdrücke im Zähler und im Nenner von Gleichung (4.15) beziehungsweise Gleichung (4.18) als jeweils eigenständige Schwingungen betrachtet[1]. Für diese Schwingungen werden wiederum, anhand einer bestimmten Anzahl von Unwuchtumdrehungen, Zeitfenster festgelegt,

[1] Die im Zuge der Erklärung des Verfahrens angegebenen Formeln greifen auf die Ausdrücke in Gleichung (4.15) zurück, gelten aber analog auch für die Ausdrücke in Gleichung (4.18).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

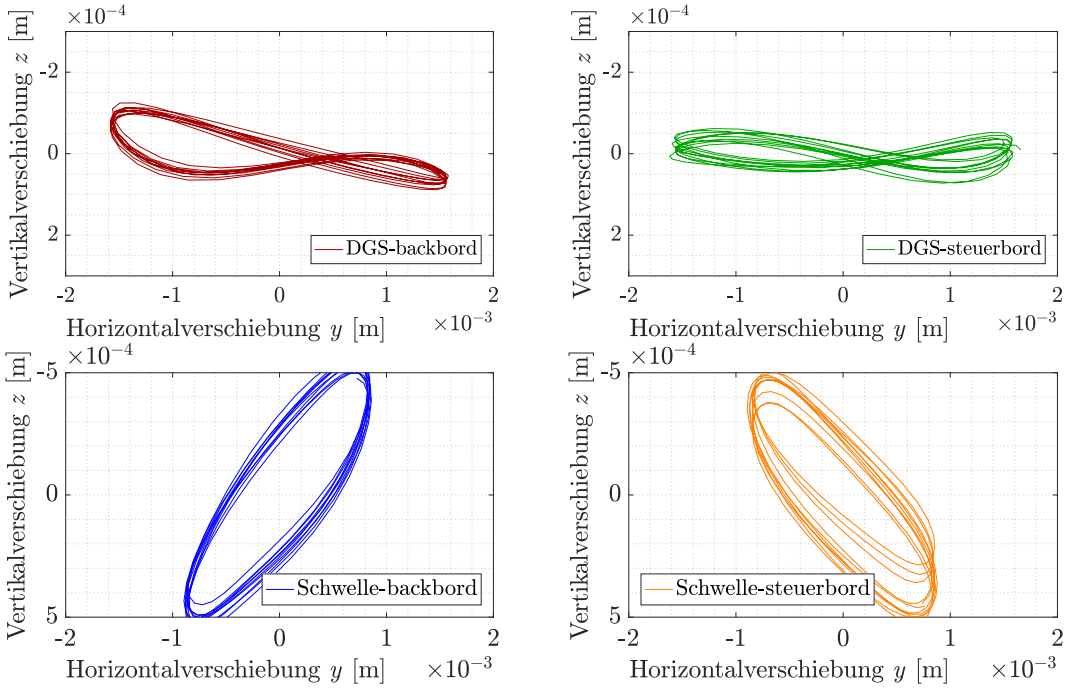
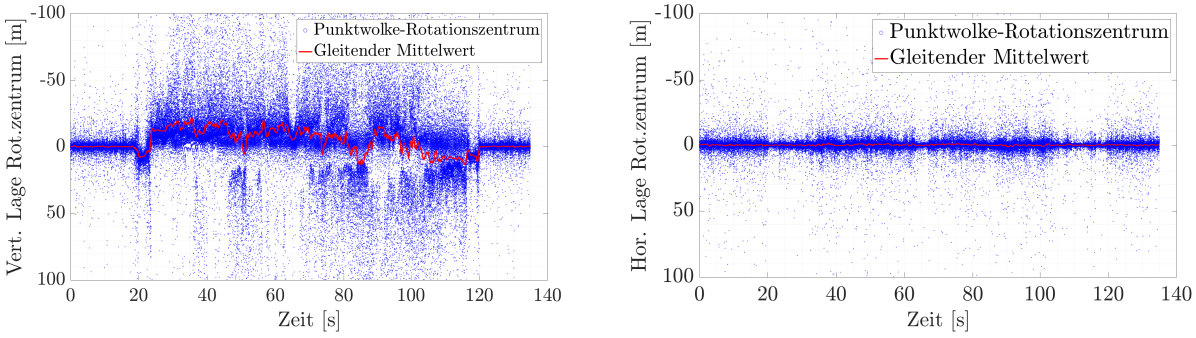


Abb. 5.11: Darstellung der Verschiebungsgrößen im Zeitraum von zehn Unwuchtumdrehungen (bei ~90,3 s – 90,6 s) in der y-z-Ebene (Blickrichtung in Arbeitsrichtung)



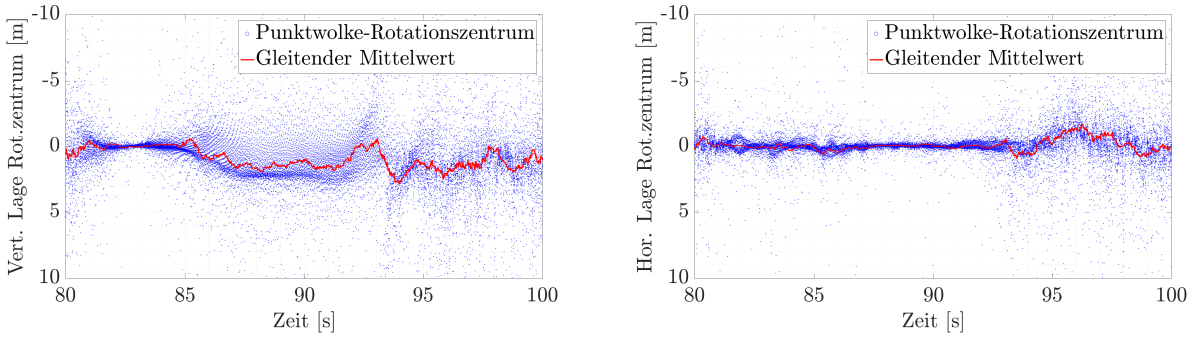
(a) Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums

(b) Horizontale Lage des dynamischen Rotationszentrums

Abb. 5.12: Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten

für die eine Transformation in den Frequenzbereich unter Verwendung eines FFT-Algorithmus erfolgt. Diese Zeitfenster werden unter Anwendung des Zero-Paddings verlängert, sodass eine gewünschte Auflösung erzielt wird. Nach Ausführung des FFT-Algorithmus werden die Amplituden des Zählers (Horizontalbewegung) und des Nenners (Vertikalbewegung) für die dominante Frequenz des Zählers (welche in diesem Fall die maßgebende Größe darstellt, da in dieser Richtung die Kraftanregung des Unwuchterregers erfolgt) ausgewertet und für die weitere Berechnung verwendet. Zur Beurteilung, ob die Ergebnisse der FFT des betrachteten Zeitfensters für die Berechnung des Rotationszentrums verwendet werden können, werden die Phasenwinkel (der Phasenwinkel ist im Phasenfrequenzspektrum enthalten, welches im Zuge jeder FFT zusätzlich zum Amplitudenfrequenzspektrum ausgegeben wird; siehe auch Gleichung (4.8)) an der Stelle

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums

(b) Horizontale Lage des dynamischen Rotationszentrums

Abb. 5.13: Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten

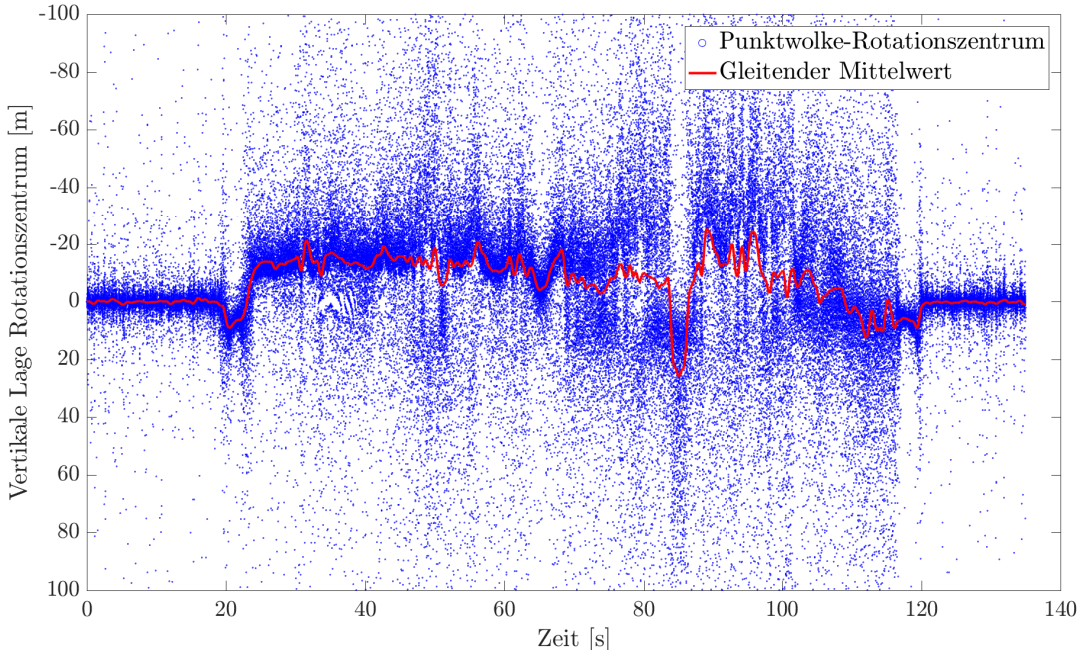


Abb. 5.14: Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen

der betrachteten Frequenz herangezogen. Die Ergebnisse der FFT des jeweiligen Zeitfensters wird dann verwendet, wenn die Bedingung in Gleichung (5.2) erfüllt ist.

$$\left|\cos\left(\varphi\left(\dot{y}_b\right)_{fy} - \varphi(\dot{z}_s - \dot{z}_b)_{fy}\right)\right| > 0,9 \tag{5.2}$$

Wobei $\varphi\left(\dot{y}_b\right)_{fy}$ den Phasenwinkel der Horizontalbewegung im untersuchten Zeitfenster an der Stelle der dominanten Frequenz dieser Bewegung und $\varphi(\dot{z}_s - \dot{z}_b)_{fy}$ den Phasenwinkel der Differenz der Vertikalbewegungen im untersuchten Zeitfenster an der Stelle der dominanten Frequenz der Horizontalbewegung beschreibt. Die Ermittlung der beschriebenen Phasenwinkel ist beispielhaft in Abb. 5.16b dargestellt. In diesem Beispiel beträgt die Differenz zwischen den Phasenwinkeln 200°, womit die Bedingung aus Gleichung (5.2) erfüllt ist, da $|\cos(200)| = 0,94 > 0,9$. Diese

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

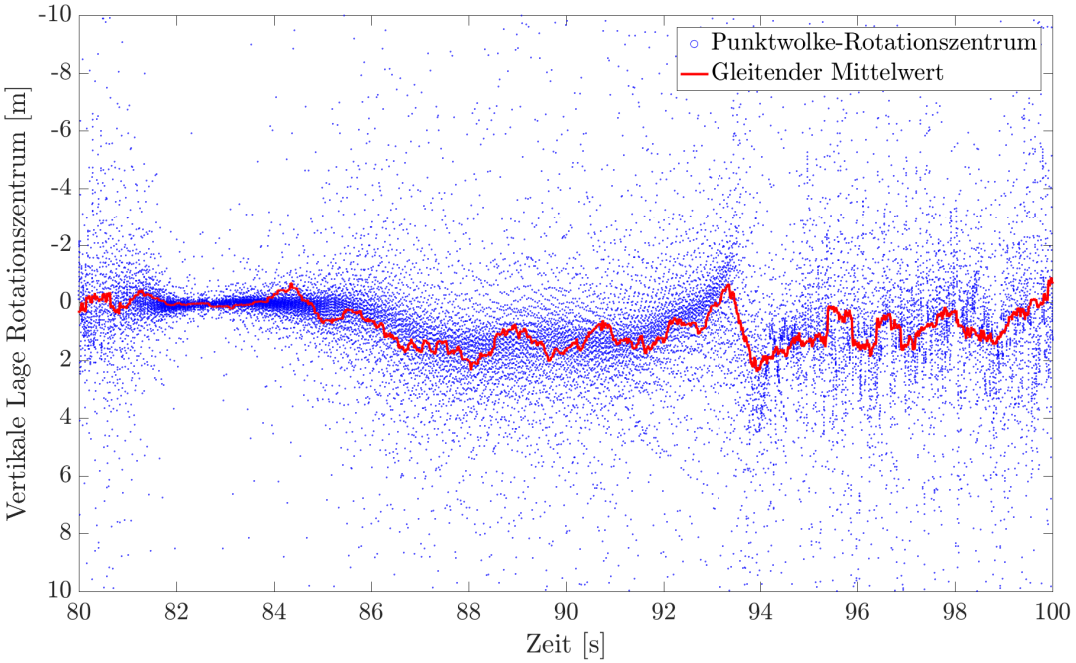
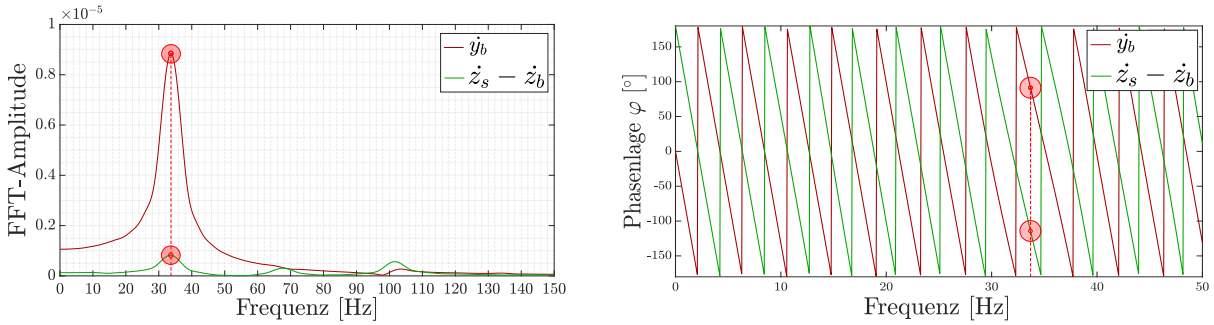


Abb. 5.15: Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen

Bedingung hat sich bei den, dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten, als zielführend erwiesen, um plausible Ergebnisse zu erhalten, weshalb diese Bedingung bei der Beurteilung anderer Messdaten überprüft werden müsste.



(a) Ermittlung der Amplitude für die Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der Ergebnisse der FFT

(b) Ermittlung des Phasenwinkels für die Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der Ergebnisse der FFT

Abb. 5.16: Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis der Ergebnisse der FFT (Geschwindigkeitsdaten)

Wenn die Bedingung in Gleichung (5.2) wie im Beispiel aus Abb. 5.16 erfüllt ist, muss noch unterschieden werden, ob sich die Schwingungen in Phase oder in entgegengesetzter Phase befinden. Das heißt die Bewegung findet entweder synchron (es erfolgt gleichzeitig eine Bewegung in positiver beziehungsweise negativer y- und z-Richtung) oder asynchron (es erfolgt gleichzeitig eine Bewegung in positiver y- und negativer z-Richtung oder umgekehrt in negativer y- und positiver

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

z-Richtung) statt. Zur Beurteilung ob die Schwingungen in Phase oder in entgegengesetzter Phase stattfinden, kann die Differenz der Phasenwinkel aus Gleichung 5.2 verwendet werden. Beträgt die Differenz dabei weniger als 25,8° (entspricht der festgelegten Grenze, ab der der Wert als physikalisch interpretierbar betrachtet wird: $\cos(25,84°) = 0,9$), so befinden sich die Schwingungen in Phase, andernfalls in entgegengesetzter Phase. Dies entscheidet über das Vorzeichen der Berechnung. Befinden sich die Schwingungen in Phase gilt Gleichung (5.3), bei Schwingungen in entgegengesetzter Phase gilt Gleichung (5.4).

$$z_m = \frac{d_{bs} \cdot \dot{y}_b}{\dot{z}_s - \dot{z}_b} \tag{5.3}$$

$$z_m = -\frac{d_{bs} \cdot \dot{y}_b}{\dot{z}_s - \dot{z}_b} \tag{5.4}$$

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist für die Auswertung des Rotationszentrums auf Basis von Verschiebungen in Abb. 5.17, jenes auf Basis von Geschwindigkeiten in Abb. 5.18 dargestellt. Für die dargestellten Auswertungen wurden Zeitfenster von fünf Unwuchtumdrehungen mit einer Auflösung der FFT von $\Delta f_s = 0{,}05\,\text{Hz}$ gewählt. Die Fenster wiesen dabei eine zeitliche Überschneidung von jeweils einer Unwuchtumdrehung auf (der zeitliche Ausschnitt von fünf Unwuchtumdrehungen wurde nach erfolgter Berechnung um vier Unwuchtumdrehungen weiter verschoben).

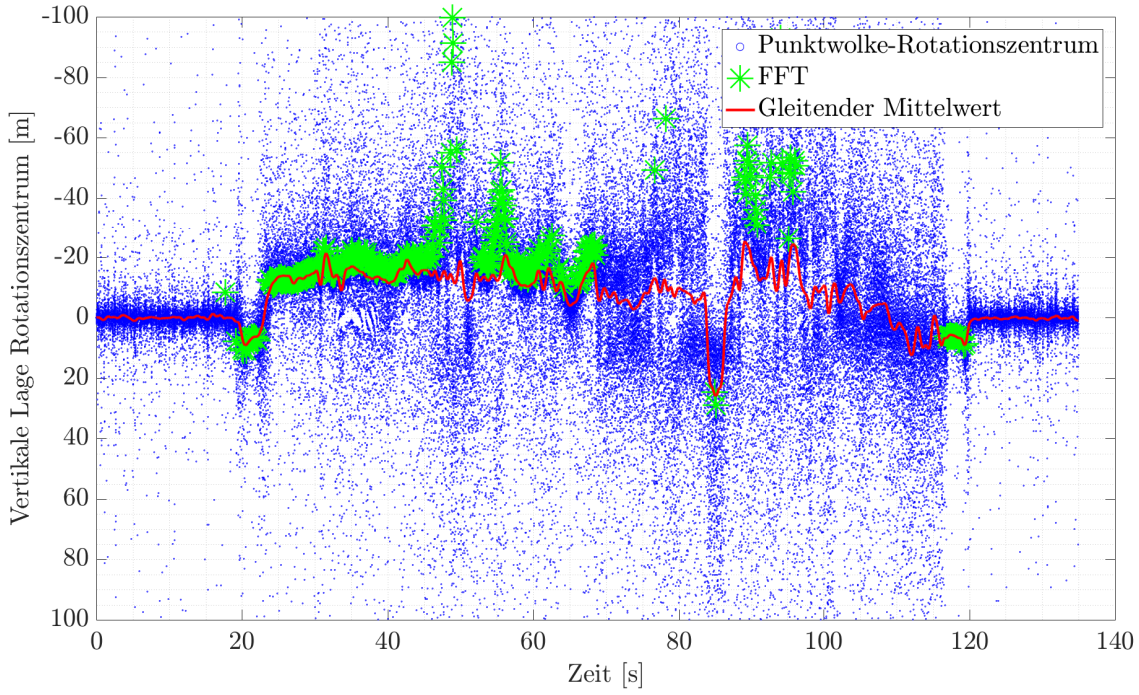


Abb. 5.17: Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen mit Ergebnissen der Berechnung unter Zugrundelegung der Betrachtung im Frequenzbereich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

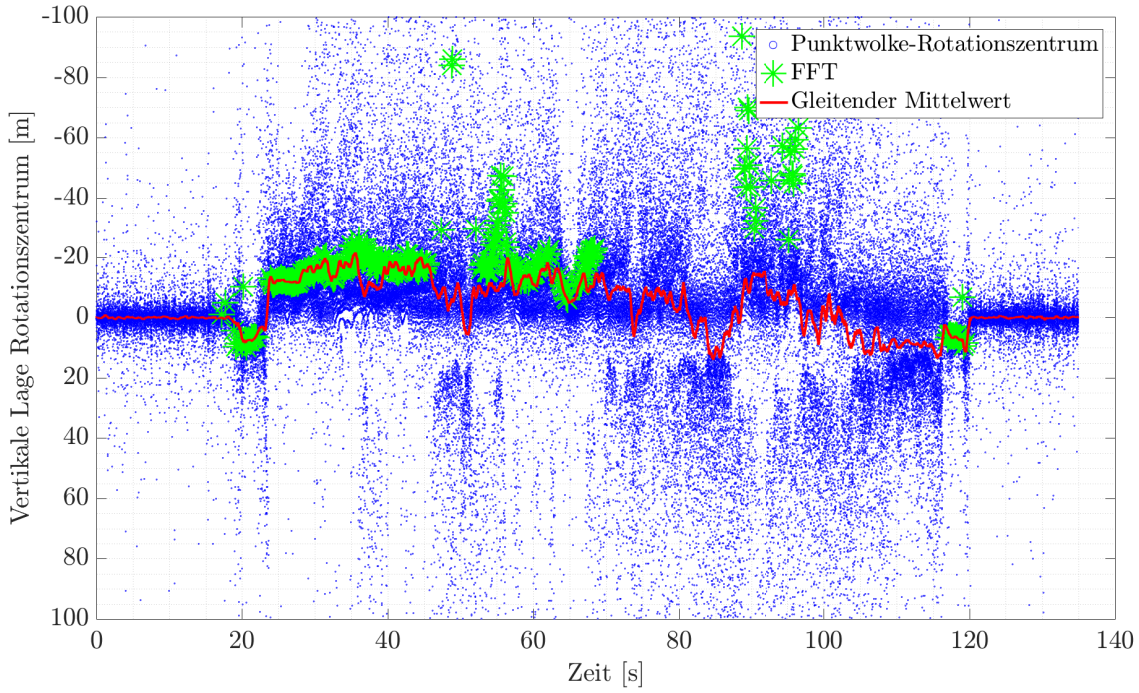


Abb. 5.18: Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten mit Ergebnissen der Berechnung unter Zugrundelegung der Betrachtung im Frequenzbereich

5.2.5 Phasendifferenz der Horizontalschwingungen

Eine weitere Möglichkeit, Änderungen im Bewegungsverhalten des Maschine-Boden-Interaktionssystems zu identifizieren besteht darin, die Phasenlage der einzelnen Sensoren an der Stelle der Erregerfrequenz zu vergleichen. Zu diesem Zweck wird die Anregungsfrequenz der Unwuchterregung gemäß Abschnitt 5.2.1 ermittelt, wobei zusätzlich in allen betrachteten Zeitfenstern der Phasenwinkel der Erregerschwingung sowie des Signals der Horizontalbeschleunigung (Beschleunigung in y-Richtung) aller anderen Sensoren an der Stelle der Erregerfrequenz über eine Transformation in den Frequenzbereich mittels einer FFT errechnet wird. In weiterer Folge werden die ermittelten Phasenwinkel in Relation zum Phasenwinkel der Unwuchterregung an der Stelle der Erregerfrequenz gesetzt. Dazu wird der Phasenwinkel der Unwuchterregung vom Phasenwinkel des jeweiligen Schwingungssignals der verschiedenen Sensoren im betrachteten Zeitfenster abgezogen. Damit ergibt sich die Phasendifferenz zwischen der Unwuchterregung ω und dem Sensor j für das Zeitfenster i zufolge Gleichung 5.5.

$$\Delta\varphi_{ji} = \varphi\left(\omega_i\right)_{f\omega} - \varphi\left(j_i\right)_{f\omega} \tag{5.5}$$

Darin beschreibt $\varphi\left(\omega_i\right)_{f\omega}$ den Phasenwinkel der Unwuchterregung an der Stelle der Erregerfrequenz und $\varphi\left(j_i\right)_{f\omega}$ den Phasenwinkel des Beschleunigungssignals des Sensors j an der Stelle der Erregerfrequenz. Das Ergebnis dieser Berechnung für die Sensoren am DGS und auf der Schwelle ist in Abb. 5.19 dargestellt. Bei der Darstellung wurden bei Ergebnissen $> 180°$, $360°$ subtrahiert, damit die Differenz der Phasenwinkel innerhalb der definierten Grenzen von $[-180°, 180°]$ verblieb. Bei Betrachtung der Daten in Abb. 5.19 ist erkennbar, dass die Phasendifferenz zwischen der Unwuchterregung und der Schwingungsantwort des DGS nahezu konstant bleibt. Die Phasendifferenz zwischen der Unwuchterregung und der Schwingungsantwort der Schwelle verläuft hingegen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

abschnittweise linear, wobei der zeitliche Abstand zwischen zwei Punkten gleicher Phasendifferenz als Periodendauer einer Transversalwellenbewegung des Gleisrostes interpretiert werden kann. Diese Interpretation wird in Abb. 5.20 für die Signale der Sensoren der Schwelle beziehungsweise in Abb. 5.21 für die Signale der Oberflächensensoren verdeutlicht.

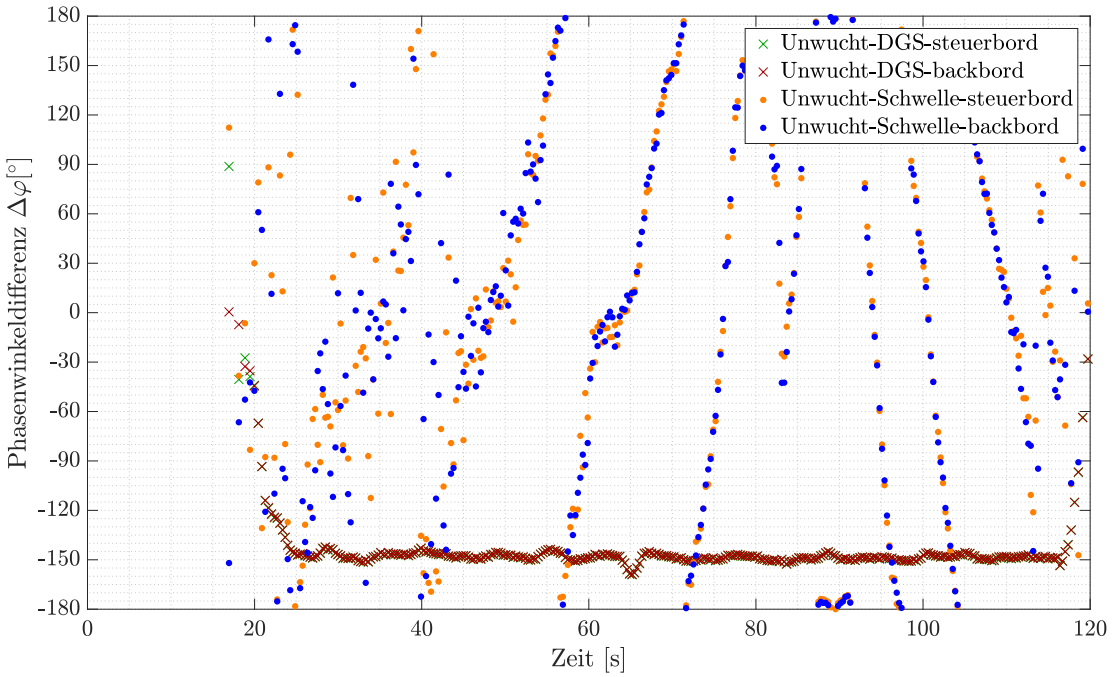


Abb. 5.19: Differenz zwischen den Phasenwinkeln der Unwuchterregung und der Horizontalschwingungen des DGS beziehungsweise der Schwelle

Wenn zusätzlich zur zeitlichen Information eine örtliche Information zur Verfügung steht (zum Beispiel in Form eines GPS-Signals am DGS), kann der Abstand zwischen dem Ursprung der Schwingungsanregung und der Schwelle (unter Berücksichtigung der Fahrtbewegung der Maschine) und somit die Wellenlänge der Transversalwellen bestimmt werden. Auf Basis dieser Informationen wäre es möglich, die Phasengeschwindigkeit dieser Welle gemäß Gleichung (5.6) zu ermitteln.

$$v_p = \frac{\lambda}{T} \tag{5.6}$$

Darin beschreibt λ die Wellenlänge und T die Periodendauer der Transversalwelle. Dieser Wert könnte vom Verdichtungszustand des Schotters abhängig sein und damit einen potentiellen Wert zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle darstellen. Da im Zuge des Versuchs keine Ortsinformationen gesammelt wurden, wird das Potential der Transversalwellengeschwindigkeit als Kennwert für die Verdichtungskontrolle Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

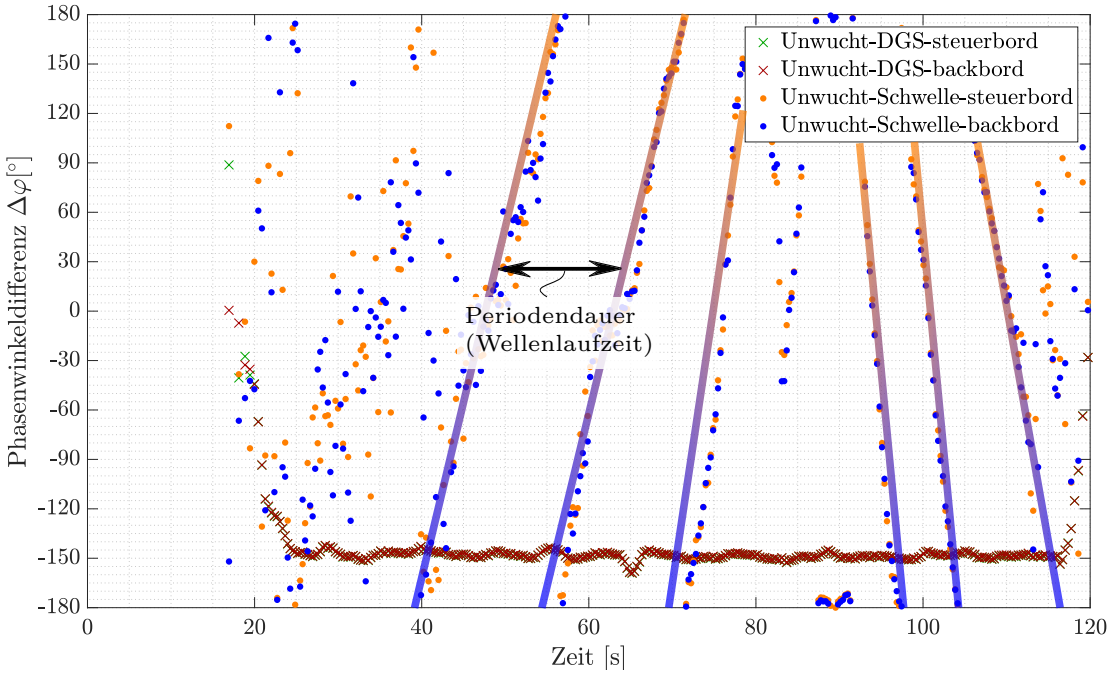


Abb. 5.20: Darstellung des zeitlichen Abstands zwischen Punkten gleicher Phasendifferenz als Periodendauer einer Transversalwellenbewegung des Gleisrostes (Transversalwellenlaufzeit)

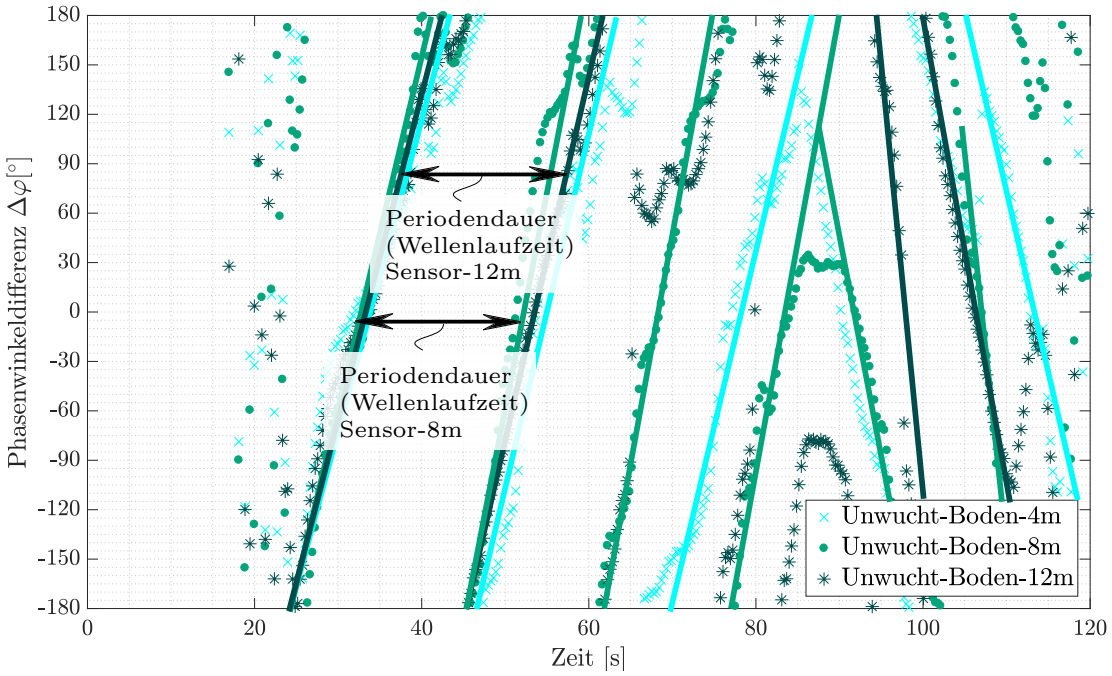


Abb. 5.21: Darstellung des zeitlichen Abstands zwischen Punkten gleicher Phasendifferenz als Periodendauer einer oberflächlichen Transversalwellenbewegung des Untergrunds (Transversalwellenlaufzeit)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kapitel 6

Interpretation der Messdatenauswertung

Nachdem in Kapitel 5 auf die möglichen Aufbereitungsarten der gemessenen Signale eingegangen wurde, erfolgt nun eine Gegenüberstellung der ermittelten Ergebnisse für die einzelnen Messfahrten. Dabei sollen Größen identifiziert werden, die eine mögliche Abhängigkeit vom Verdichtungszustand des Schotters aufweisen. Hierbei kommt der Analyse der Frequenzrampe besondere Bedeutung zu, da im Zuge dieses Versuchs die Reaktion des Maschine-Boden-Interaktionssystems auf verschiedene Anregungsfrequenzen überprüft wurde.

6.1 Untersuchung der Erregerfrequenz

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für das Funktionieren eines FDVK-Systems stellen konstante Prozessparameter während des Verdichtungsvorgangs dar. Nur so kann gewährleistet werden, dass Änderungen im Bewegungsverhalten des Verdichtungsgeräts ihren Ursprung in der Änderung des Verdichtungszustands des Untergrunds und nicht in variierenden Prozessparametern haben [2, 57]. Dazu zählt auch die Anregungsfrequenz des Systems, welche der einzige Parameter ist, der mithilfe der erhobenen Messdaten überprüft werden kann. Wie bereits in Abb. 5.5 erkennbar ist, steigerte sich die Anregungsfrequenz im Laufe der ersten Versuchsfahrt kontinuierlich und erreichte am Ende dieser Versuchsfahrt ein Maximum von 35 Hz, womit diese in diesem Zeitraum 2 Hz über der festgelegten Anregungsfrequenz von 33 Hz lag. Zusätzlich sind kurzfristige Reduktionen der Erregerfrequenz erkennbar, welche durch eine Leistungsentnahme eines anderen Teils des MDZ hervorgerufen worden sein könnten. In Abb. 6.1, Abb. 6.2 und Abb. 6.3 ist der Verlauf der Anregungsfrequenz während der einzelnen Versuchsfahrten dargestellt. Der Frequenzverlauf während der Frequenzrampe ist in Abschnitt 6.4 enthalten.

Die beschriebene Steigerung der Frequenz im Laufe des Versuchs sowie die kurzzeitigen Frequenzreduktionen sind bei allen Versuchsfahrten erkennbar. Am schwächsten sind diese Effekte bei der letzten Versuchsfahrt im Anschluss an den Versuch der kontinuierlichen Frequenzvariation am Stand (Frequenzrampe) ausgeprägt. Bei dieser Versuchsfahrt wurde jedoch die gewünschte Anregungsfrequenz von 33 Hz unterschritten und lag weitgehend konstant bei 31 Hz. Insgesamt zeigt die Auswertung der Anregungsfrequenz, dass die Frequenzsteuerung des DGS Optimierungspotential aufweist, welches für eine zukünftige Nutzung des DGS als Messwerkzeug der Verdichtungskontrolle ausgeschöpft werden sollte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

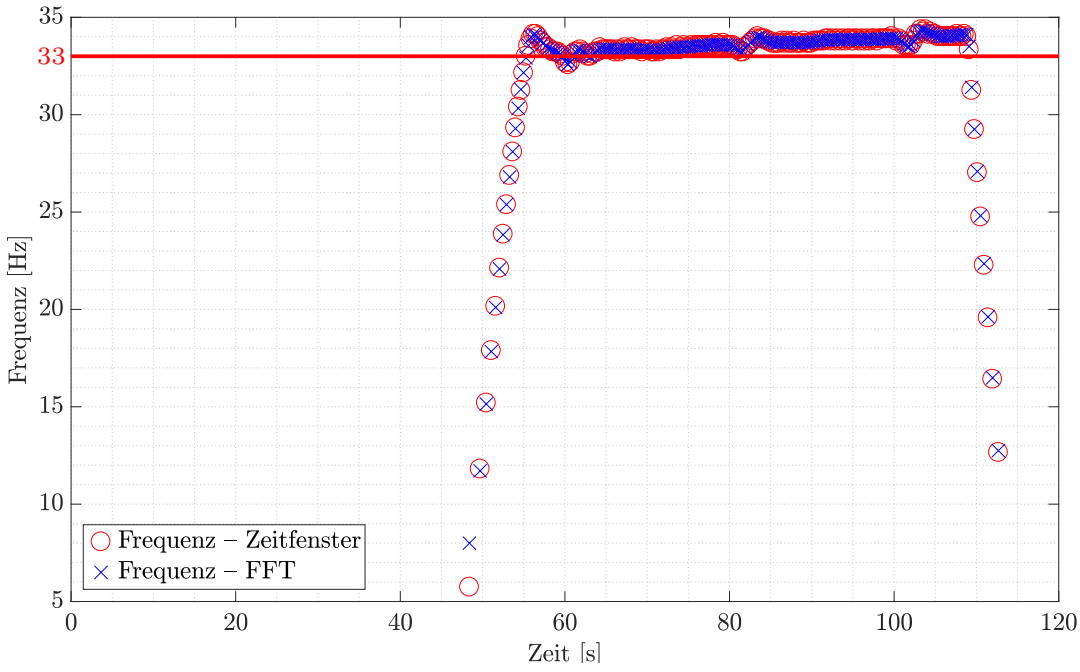


Abb. 6.1: Verlauf der Anregungsfrequenz während der zweiten Messfahrt (erste Fahrt nach Stopfvorgang)

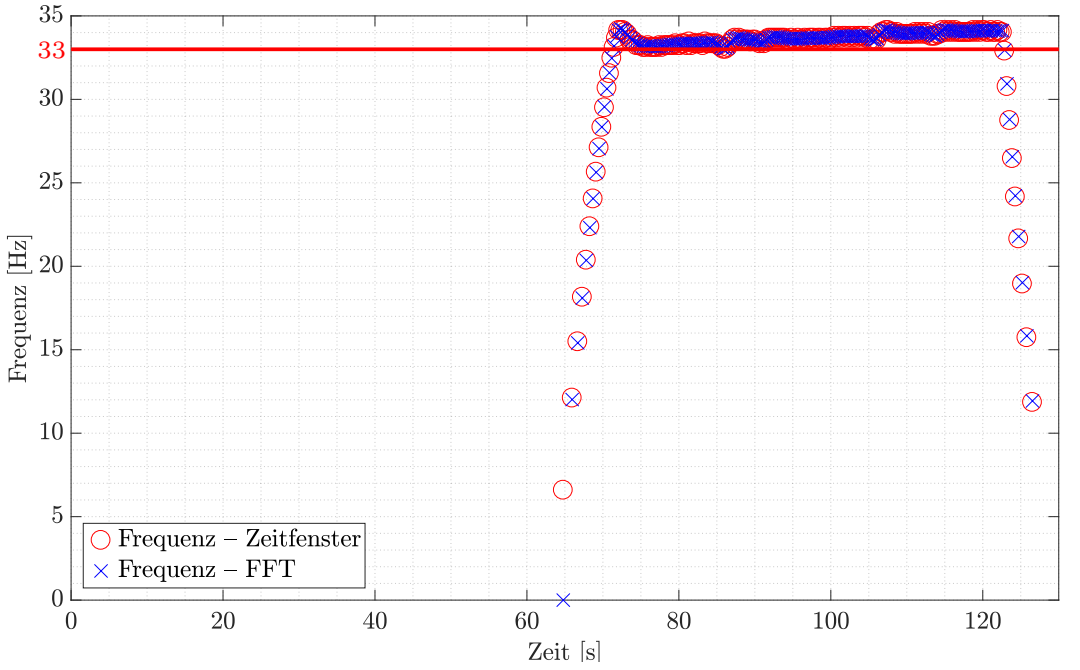


Abb. 6.2: Verlauf der Anregungsfrequenz während der dritten Messfahrt (zweite Fahrt nach Stopfvorgang)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

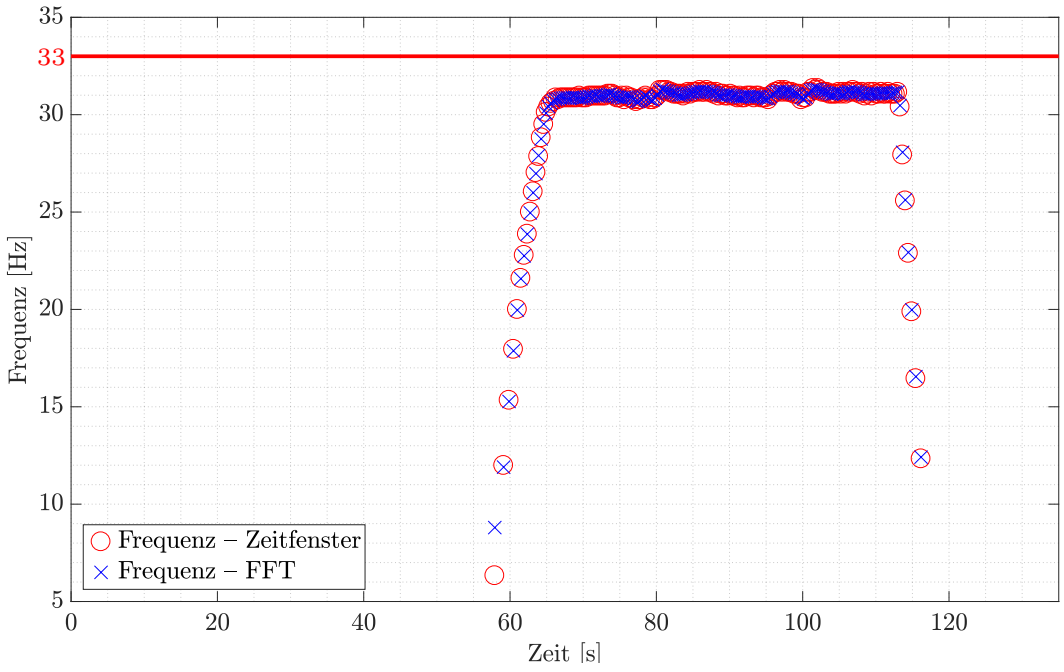


Abb. 6.3: Verlauf der Anregungsfrequenz während der vierten Messfahrt (erste Messfahrt nach der Frequenzrampe über der instrumentierten Schwelle)

6.2 Analyse der Bewegungsgrößen

6.2.1 Analyse der Frequenzspektren

Nachfolgend werden die aufbereiteten Diagramme zur Beurteilung des Bewegungsverhaltens der einzelnen Messfahrten gegenübergestellt. Zuerst erfolgt eine Analyse des Frequenzspektrums der gesamten einzelnen Messfahrten, um Auffälligkeiten, wie zum Beispiel das Auftreten eines zusätzlichen Schwingungsanteils, erkennen zu können. Dafür wird, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, das gesamte Beschleunigungssignal einer Raumrichtung eines Sensors mittels eines FFT-Algorithmus in den Frequenzbereich transformiert und die so erhaltenen Spektren werden für die jeweiligen mitschwingenden Komponenten (DGS, Schwelle, Boden) und Raumrichtungen analysiert.

Das Ergebnis der Transformation in den Frequenzbereich für die Sensoren am DGS ist in Abb. 6.4, jenes für die Sensoren der Schwelle in Abb. 6.5 und jenes für die Sensoren zur Messung der Erschütterungen im Nahfeld in Abb. 6.6 dargestellt. Wie in Abb. 6.4 erkennbar ist, stellt beim DGS die Bewegung in lateraler Richtung (quer zur Gleisachse beziehungsweise in y-Richtung) die Komponente mit der größten Amplitude dar. Damit folgt der DGS vorrangig der Bewegung des Unwuchterregers, dessen Wirkungsrichtung jener der y-Richtung entspricht, wobei die Frequenz dieser Schwingung ebenfalls jener der Erregerkraft entspricht. Da, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, der Angriffspunkt der Erregerkraft durch die Unwuchterreger nicht mit dem Schwerpunkt des DGS zusammenfällt, treten auch Komponenten in z-Richtung auf. Die dadurch entstehende Vertikalschwingung ist im Gegensatz zur Querschwingung in y-Richtung auf mehrere Frequenzen aufgeteilt. Neben der Erregerfrequenz weist das Frequenzspektrum auch Anteile einer ersten und zweiten Oberschwingung mit gleich großen oder größeren Amplituden als die Grundschwingung auf. Diese Amplituden betragen ca. das 0,1-fache der Querschwingung in y-Richtung. Auch in x-Richtung weist das Signal, zumindest an der Stelle der Erregerfrequenz, Amplituden in einer Größenordnung ähnlich wie jene der Vertikalschwingung auf. Die Amplituden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

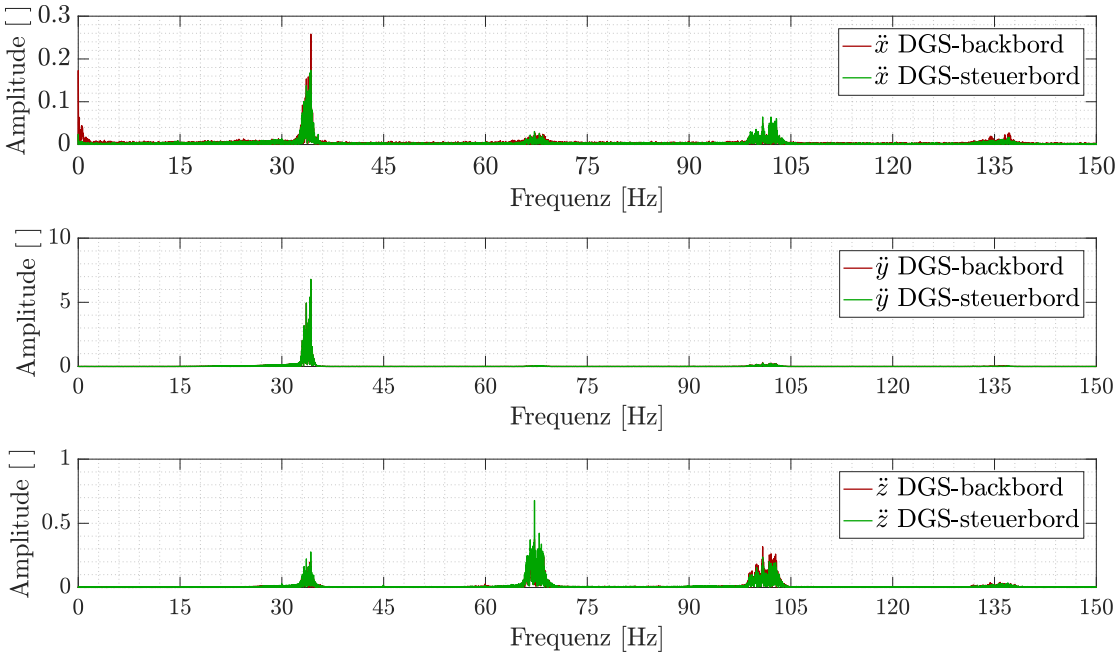


Abb. 6.4: Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der DGS-Sensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands

der Oberschwingungen in x-Richtung sind aber wesentlich geringer ausgeprägt als jene der Oberschwingungen der Vertikalschwingung. Es scheint daher sowohl in x-Richtung als auch in z-Richtung eine Ausmitte der Kraftanregung zum Schwerpunkt zu existieren. Aufgrund der Ausprägung der ersten Oberschwingung der Vertikalschwingung, scheint es hier noch einen weiterer Effekt durch die Interaktion mit dem Untergrund oder dem Maschinenrahmen zu geben, welcher bei der Schwingung in x-Richtung nicht zu beobachten ist.

Das Frequenzspektrum der Beschleunigungsmessungen auf der Schwelle in Abb. 6.5 zeigt ein unterschiedliches Bewegungsverhalten der Schwelle im Vergleich zu jenem des DGS. Hier weisen die Amplituden der Querschwingung in y-Richtung und der Vertikalschwingung in z-Richtung beinahe gleich große Werte auf, während die Amplitude der Schwingung in x-Richtung wesentlich kleiner ist und nur das 0,1-fache dieser Werte erreicht. Auch die Oberschwingungen der Schwelle haben in y-Richtung und in z-Richtung ähnliche Amplituden. Obwohl der DGS auch nennenswerte Amplituden in x-Richtung aufweist, kann die y-z-Ebene als dominante Bewegungsebene des Maschine-Boden-Interaktionssystems betrachtet werden, da der DGS und die Schwelle in dieser Ebene die größten Amplituden aufweisen. Außerdem werden die Bewegungen in x-Richtung nicht in voller Größe vom DGS auf die Schwelle übertragen. Die Unterschiede zwischen den Frequenzspektren des DGS und der Schwelle sind durch die Kopplung dieser Körper über die Schiene und die Schienenbefestigung erklärbar. Durch diese Kopplungen werden die von der Unwucht erzeugten Beschleunigungen des DGS in veränderter Form auf die Schwelle übertragen. In x-Richtung kann die Torsionsschwingung des DGS aufgrund des hohen Trägheitsmoments des Gleisrostes um die z-Achse reduziert werden. Die Kippschwingung in der y-z-Ebene erfährt wiederum eine geringfügige Phasenverschiebung sowie eine Veränderung der Amplitude.

Das Frequenzspektrum der Erschütterungssensoren weist in allen drei Raumrichtungen ein ähnliches Erscheinungsbild auf. Die Grundschwingung liegt im Bereich der Erregerfrequenz und die Oberschwingungen weisen geringere Amplituden als diese auf, wobei die Oberschwingungen der Vertikalschwingung ausgeprägter sind als jene der beiden Horizontalschwingungen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

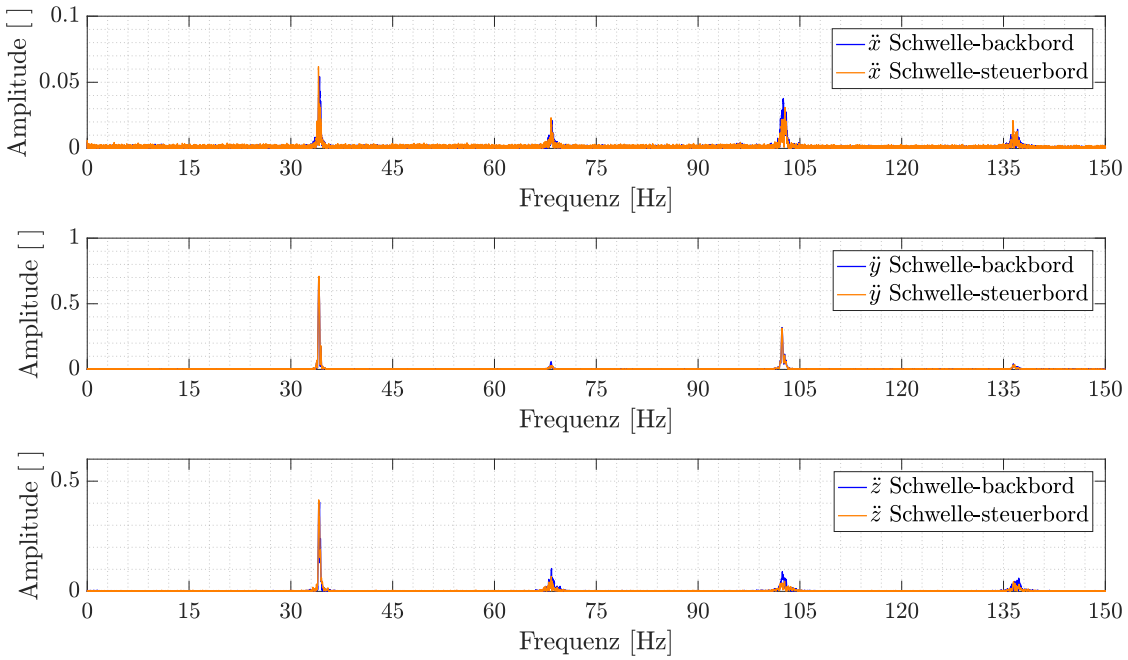


Abb. 6.5: Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Schwellen-Sensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands

In Abb. 6.7, Abb. 6.8 und Abb. 6.9 sind die Spektren der ersten Überfahrt des DGS zur Feststellung des Ist-Zustands den Spektren der ersten Überfahrt des DGS nach dem Stopfvorgang gegenübergestellt. Anhand dieser Diagramme kann festgestellt werden, dass die Amplituden aller Schwingungen (mit Ausnahme der Grundschwingung der Vertikalschwingung des DGS) nach dem Stopfvorgang reduziert wurden. Dies könnte auf eine Aufweichung des Systems durch die Auflockerung des Schotters im Zuge des Stopfens zurückzuführen sein. Außerdem sind die Frequenzen für die Messfahrt nach dem Stopfen im Vergleich zu jenen für die erste Messfahrt ermittelten Frequenzen leicht reduziert, was auf einen unterschiedlichen Verlauf der Erregerfrequenz während den Versuchsfahrten zurückgeführt werden kann. Bei der darauffolgenden, zweiten Überfahrt des DGS nach dem Stopfen kann keine weitere Veränderung der Spektren festgestellt werden. Das Spektrum der Überfahrt des DGS nach der Frequenzrampe am Stand über der instrumentierten Schwelle wird nicht zum Vergleich mit den Spektren der anderen Überfahrten herangezogen, da sich bei dieser Messfahrt die Erregerfrequenz signifikant von jener der übrigen Messfahrten unterscheidet (siehe Abb. 6.3) und Veränderungen der Amplituden durch die geänderte Erregerfrequenz bedingt sein könnten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

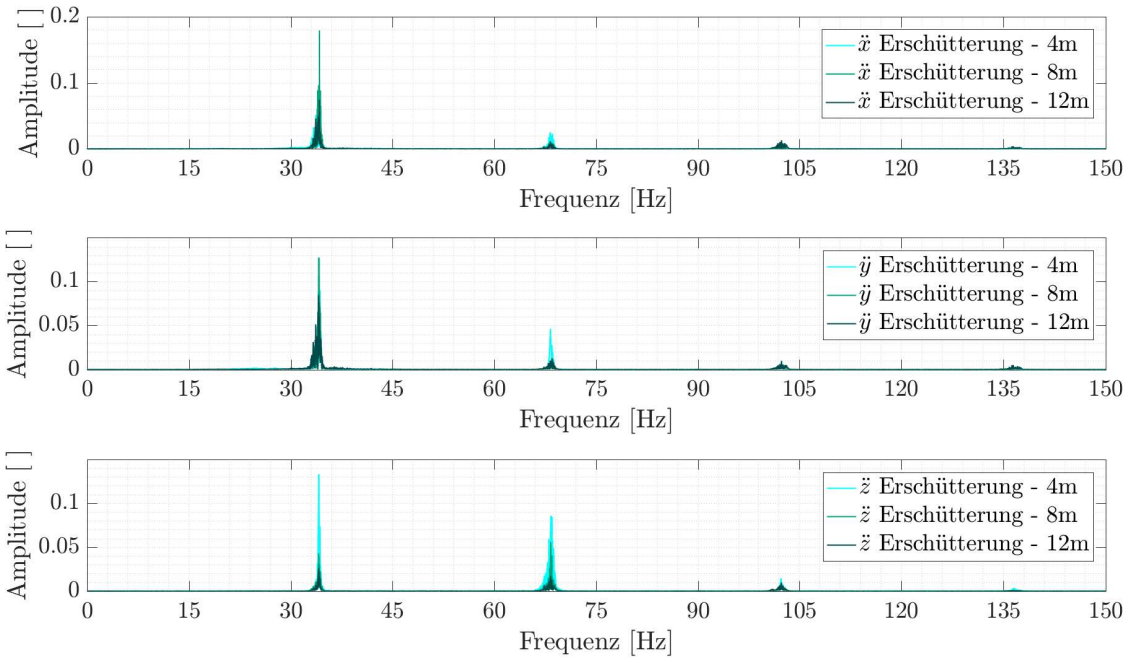


Abb. 6.6: Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Erschütterungssensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands

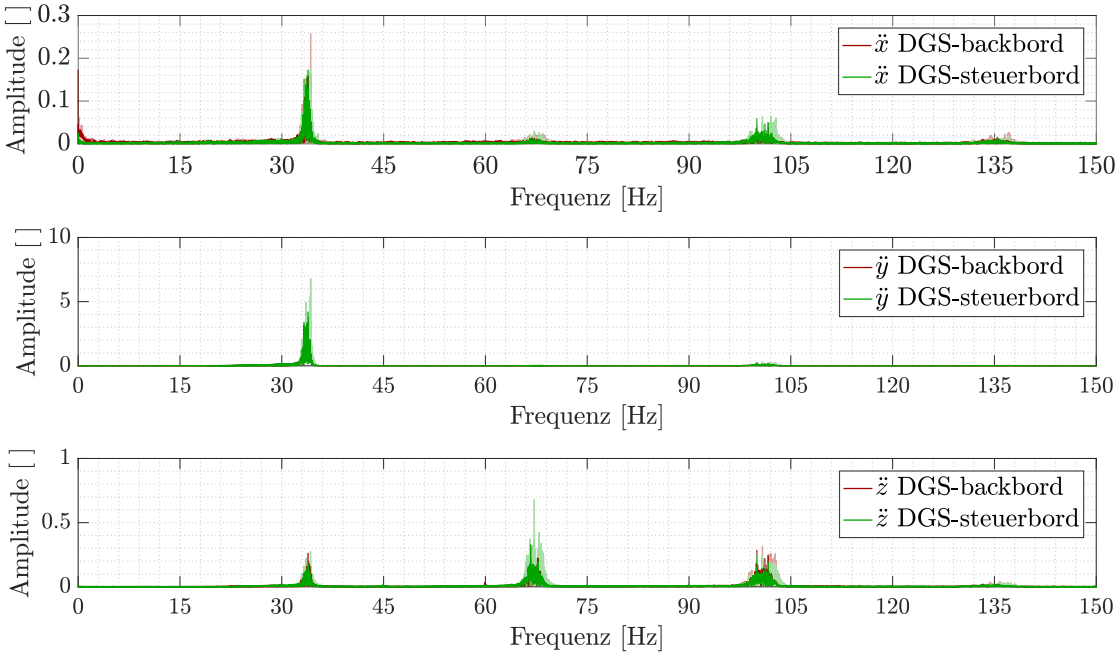


Abb. 6.7: Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der DGS-Sensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

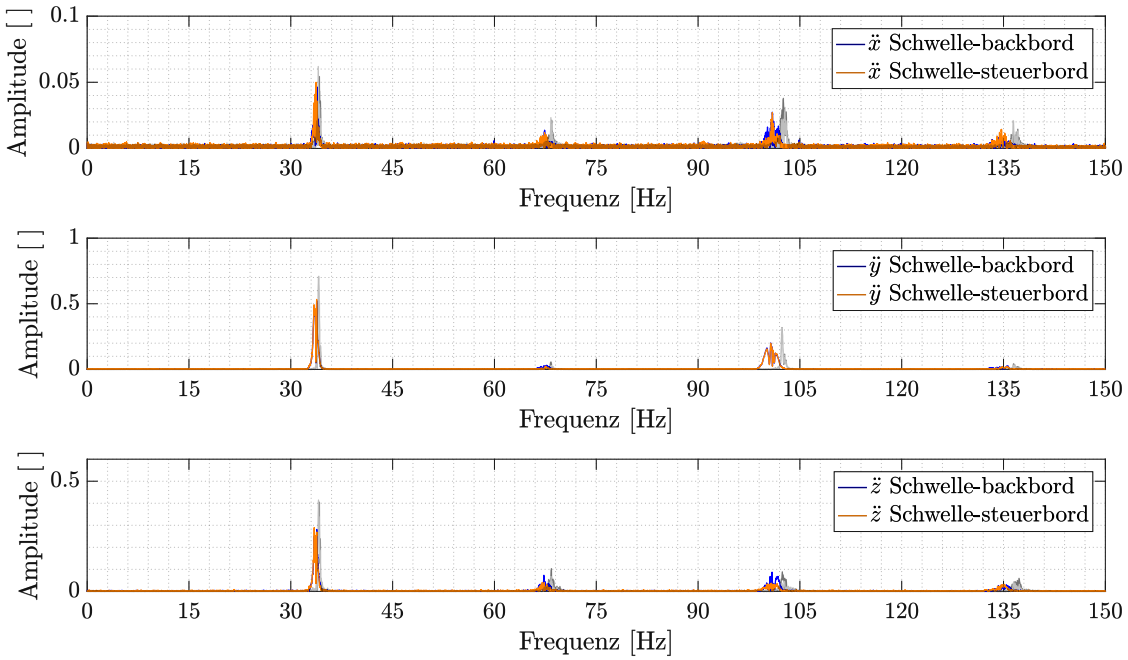


Abb. 6.8: Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Schwellen-Sensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent, grau) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen

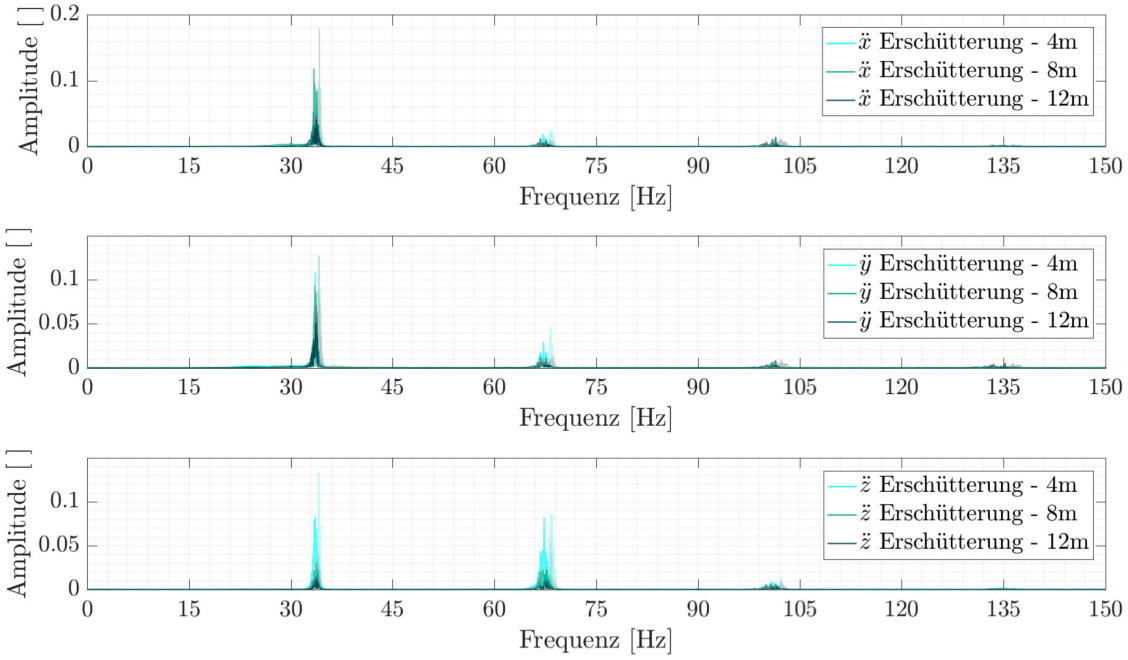


Abb. 6.9: Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Erschütterungssensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.2.2 Analyse der Bewegungsamplituden

Bei Betrachtung der mittels FFT-Algorithmus ermittelten Frequenzspektren der gemessenen Signale, kann eine Reduktion der Amplituden nach dem Stopfen festgestellt werden. Nachfolgend werden die gemäß Abschnitt 5.2.2 ermittelten Amplituden für die drei Raumrichtungen der DGS-, Schwellen- und Erschütterungssensoren sowie die daraus abgeleitete Übertragungsfunktionen der einzelnen Überfahrten miteinander verglichen.

Beschleunigungsamplituden

Zur Beurteilung der Veränderung der Beschleunigungsamplituden zwischen den einzelnen Messfahrten werden folgende statistischen Parameter für die einzelnen Messfahrten ausgewertet:

- Mittelwert der DGS-Amplituden
- Maximalwert der DGS-Amplituden
- Minimalwert der DGS-Amplituden
- Standardabweichung der DGS-Amplituden
- Variationskoeffizient der DGS-Amplituden
- Maximalwert der Schwellen-Amplituden
- Maximalwerte der Erschütterungsamplituden im Nahfeld

Diese Parameter sind in Abb. 6.10 anhand des Beispiels der horizontalen Beschleunigungsamplituden dargestellt. In Tab. 6.1 werden die beschriebenen Parameter für die Amplituden der verschiedenen Raumrichtungen aufgelistet. Bei der Auswertung der Parameter für die Amplituden des DGS und der Schwelle wird der Mittelwert für die Ergebnisse der beiden Sensoren gebildet, um eine bessere Übersicht über die Entwicklung dieser Parameter zwischen den einzelnen Messfahrten zu ermöglichen. Ab der zweiten Messfahrt nach dem Stopfvorgang lieferte der backbordseitige Sensor unrealistisch hohe Beschleunigungswerte in x-Richtung ($50\,\mathrm{m/s^2}$ und höher, siehe Abb. 6.11), weshalb für diese Messfahrt nur der steuerbordseitige Sensor in x-Richtung ausgewertet wurde.

Die Werte in Tab. 6.1 bestätigen nur teilweise die Ergebnisse der Auswertung der Frequenzspektren. Zwar treten nach dem Stopfen am DGS geringere Beschleunigungsamplituden als vor dem Stopfen auf, auf der Schwelle können allerdings (mit Ausnahme der Vertikalbeschleunigungen) höhere Beschleunigungsamplituden festgestellt werden. Die betragsmäßig größten Amplituden treten in y-Richtung und z-Richtung auf, was die Annahme der Ebene der dominanten Bewegungsrichtungen bestätigt. Die Amplituden in y-Richtung betragen am DGS circa das sechsfache und auf der Schwelle ungefähr das dreifache der Beschleunigungsamplituden in z-Richtung. Die gemessenen Beschleunigungsamplituden der Erschütterungssensoren wurden nur beim zum Gleis nächstgelegenen Sensor in 4 m Entfernung und dabei nur in y-Richtung und z-Richtung reduziert. Bei allen anderen Sensoren konnte kein nennenswerter Effekt der Auflockerung durch den Stopfvorgang auf die Beschleunigungsamplituden der Erschütterungssensoren festgestellt werden.

In der Literatur finden sich nur in wenigen Werken Angaben über Erfahrungswerte hinsichtlich der Beschleunigungen der Schwelle und der Oberfläche des Nahfelds während der Schotterverdichtung mit dem DGS. *Lichtberger* gibt in [41] frequenzabhängige Beschleunigungswerte für die Querbeschleunigung (entspricht einer Beschleunigung in y-Richtung) und die Vertikalbeschleunigung (entspricht einer Beschleunigung in z-Richtung) der Schwelle und für die Vertikalbeschleunigung in 2 m Entfernung zum Gleis an. Für die Schwelle werden bei einer Anregungsfrequenz

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

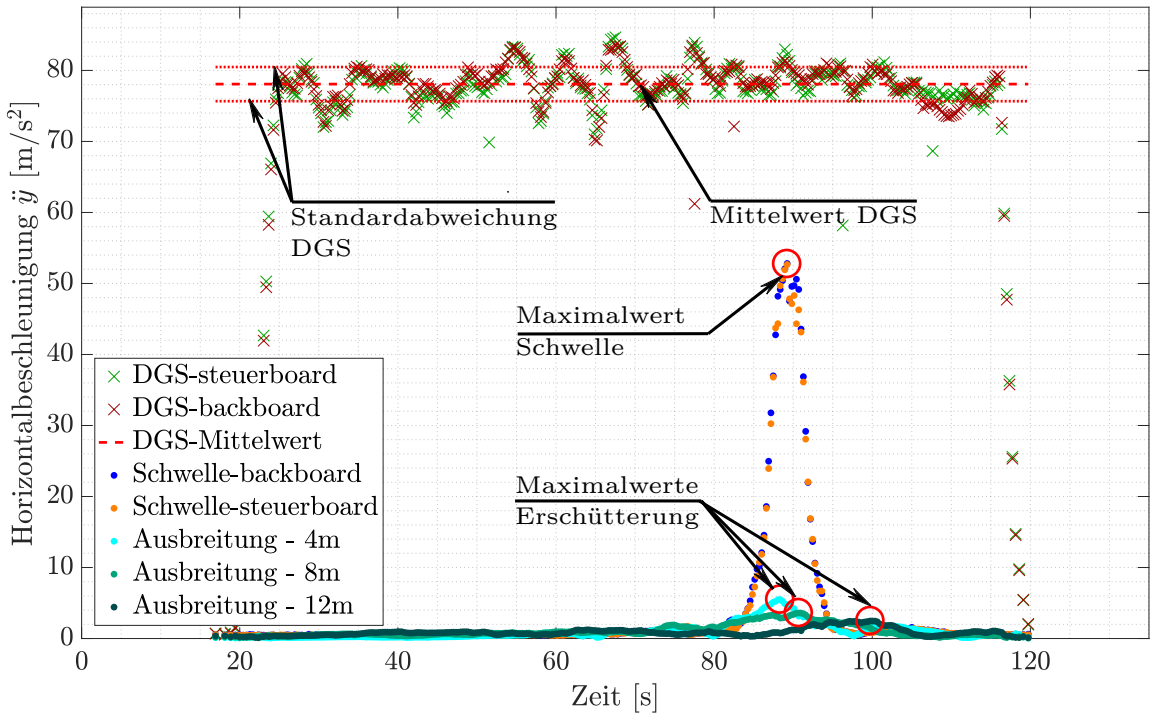


Abb. 6.10: Veranschaulichung der untersuchten Parameter der Bewegungssgrößen am Beispiel des Horizontalbeschleunigungssignals

von 34 Hz Querbeschleunigungen von 8,7 g ($\hat{=}$ 85,4 m/s^2) und Vertikalbeschleunigungen von 0,9 g ($\hat{=}$ 8,8 m/s^2) angegeben. In 2 m Entfernung treten bei einer Anregungsfrequenz von 34 Hz gemäß [41] Vertikalbeschleunigungen von 0,16 g ($\hat{=}$ 1,6 m/s^2) auf. Da in [41] der Schwellentyp, das Schienenprofil, die Form des Querschnittsprofils (Damm- oder Kofferlage) und der Punkt der Schwelle, auf den sich die Beschleunigungswerte beziehen, nicht angegeben werden, sind Vergleiche mit den vorliegenden Messergebnissen nur schwer möglich. Im Zuge von eigenständigen Untersuchungen durch *Plasser & Theurer* mit dem Ziel, die durch den DGS verursachten Erschütterungen im Nahfeld zu reduzieren, wurden ebenfalls Beschleunigungsmessungen am DGS und im Nahfeld des Gleises durchgeführt [60]. Bei diesen Versuchen wurden auf der Schwelle Querbeschleunigungen zwischen 16,0 m/s^2 und 25,8 m/s^2 und Vertikalbeschleunigungen zwischen 10,0 m/s^2 und 12,0 m/s^2 gemessen. Hinsichtlich der Erschütterung im Nahfeld wurden in 3 m Entfernung Querbeschleunigungen von 1,9 m/s^2 bis 3,4 m/s^2 und Vertikalbeschleunigungen zwischen 1,0 m/s^2 und 3,4 m/s^2 gemessen. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den im Versuch erhobenen Daten aus Tab. 6.1, zeigt sich, dass die Beschleunigungen der Schwelle einer starken Streuung unterliegen. Da weder in [41] noch in [60] detaillierte Angaben über die Positionierung der Beschleunigungssensoren auf der Schwelle oder über den genauen Schwellen- und Querschnittstyp des Schotteroberbaus (Damm- oder Kofferlage) gemacht werden, können die Gründe für die Abweichungen nicht genau bestimmt werden. Für die Erschütterungen im Nahfeld ergaben sich im Zuge der Messung ähnliche Werte wie bei [60]. Die Werte, die in [42] für die Beschleunigung im Nahfeld angegeben werden, sind hingegen wesentlich geringer als jene in [60] und die gemessenen Werte in Tab. 6.1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

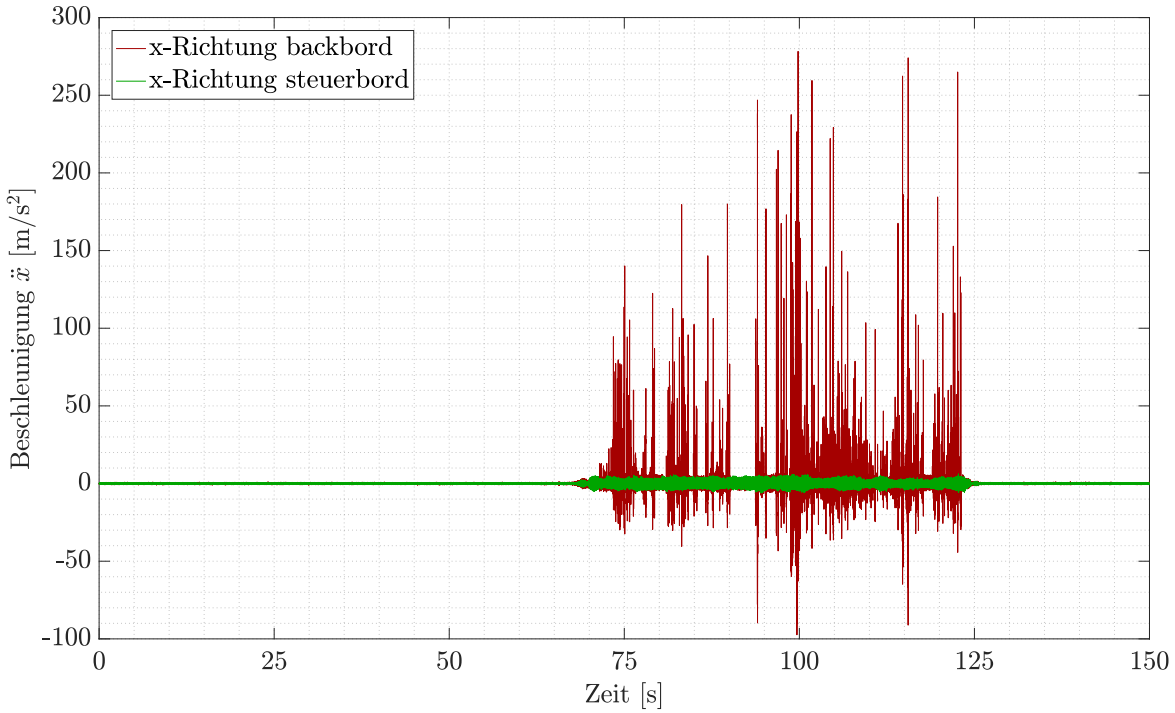


Abb. 6.11: Ergebnisse der Beschleunigungssensoren am DGS für die dritte Messfahrt (zweite Fahrt nach Stopfen) in x-Richtung

Geschwindigkeitsamplituden

Die Geschwindigkeitsamplituden werden hinsichtlich derselben statistischen Parameter wie die Beschleunigungsamplituden ausgewertet. Die Amplituden der Schwinggeschwindigkeiten stellen die wesentliche Größe für die Beurteilung von Erschütterungen dar [55]. Die Auswertung der Geschwindigkeitsamplituden dient daher dem Zweck eine Relation zwischen den, vom DGS emittierten, und den im Nahfeld verbleibenden Erschütterungen herzustellen. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tab. 6.2 enthalten.

Verschiebungsamplituden

Für die Verschiebungsamplituden werden dieselben statistischen Parameter wie für die Beschleunigungs- beziehungsweise die Geschwindigkeitsamplituden ausgewertet. Diese Parameter sind in Tab. 6.3 für die drei Raumrichtungen der Sensoren aufgelistet.

Von der TU München wurden im April 2018 im Zuge von Versuchen Verschiebungsamplituden an mehreren Schwellen in jeweils verschiedenen Versuchsabschnitten gemessen [77]. Der Querschnittstyp des Schotteroberbaus und die Positionierung des Beschleunigungssensors auf der Schwelle sind in diesem Bericht nicht enthalten. Es werden jedoch konkrete Angaben über den Schwellentyp und das Schienenprofil sowie den Typ der Schienenbefestigung gemacht. Bei Betonschwellen des Typs 19a mit W-Befestigung, Stahlwinkelführungsplatten, Schienenprofil S49 und asynchroner Unwucht der zwei DGS-Aggregate, ergeben sich im Mittel maximale Horizontalverschiebungsamplituden (entspricht einer Verschiebung in y-Richtung) von 1,30 mm und Vertikalverschiebungsamplituden von 0,28 mm. Geringere Verschiebundsamplituden werden bei Holzschwellen mit Pandrol-Federbügeln und Schienenprofil UIC 54 gemessen. Hier betragen die maximalen Horizontalverschiebungsamplituden im Mittel 0,62 mm und die maximalen Vertikalverschiebungsamplituden im Mittel 0,41 mm. Ein Vergleich mit den gemessenen Werten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 6.1: Zusammenstellung statistischer Parameter der Beschleunigungsamplituden der einzelnen Messfahrten

Sensor	Parameter	Ist-Zustand vor Stopfen	1. Fahrt nach Stopfen	2. Fahrt nach Stopfen
DGS-x	$\bar{a}_x$	4,39 m/s²	3,86 m/s²	3,52 m/s²
	$a_{x,max}$	9,34 m/s²	6,94 m/s²	5,15 m/s²
	$a_{x,min}$	3,41 m/s²	0,95 m/s²	1,58 m/s²
	s/v (a_x)	0,70 m/s²	0,72 m/s²	0,74 m/s²
		(16,0 %)	(18,8 %)	(20,9 %)
DGS-y	$\bar{a}_y$	78,07 m/s²	72,43 m/s²	74,25 m/s²
	$a_{y,max}$	84,13 m/s²	75,91 m/s²	78,58 m/s²
	$a_{y,min}$	69,04 m/s²	63,64 m/s²	64,68 m/s²
	s/v (a_y)	2,41 m/s²	1,59 m/s²	2,10 m/s²
		(3,08 %)	(2,20 %)	(2,83 %)
DGS-z	$\bar{a}_z$	12,91 m/s²	10,62 m/s²	11,66 m/s²
	$a_{z,max}$	19,11 m/s²	15,21 m/s²	15,07 m/s²
	$a_{z,min}$	7,18 m/s²	1,09 m/s²	8,57 m/s²
	s/v (a_z)	2,48 m/s²	2,21 m/s²	1,34 m/s²
		(19,2 %)	(20,79 %)	(11,52 %)
Schwelle	$a_{x,max}$	6,17 m/s²	7,87 m/s²	5,98 m/s²
	$a_{y,max}$	52,74 m/s²	58,76 m/s²	53,81 m/s²
	$a_{z,max}$	26,87 m/s²	26,76 m/s²	27,65 m/s²
Erschütterung – 4m	$a_{x,max}$	2,47 m/s²	2,45 m/s²	2,49 m/s²
	$a_{y,max}$	5,48 m/s²	4,62 m/s²	4,37 m/s²
	$a_{z,max}$	6,91 m/s²	6,17 m/s²	7,17 m/s²
Erschütterung – 8m	$a_{x,max}$	3,33 m/s²	3,50 m/s²	3,46 m/s²
	$a_{y,max}$	3,59 m/s²	3,63 m/s²	3,00 m/s²
	$a_{z,max}$	2,53 m/s²	2,27 m/s²	1,89 m/s²
Erschütterung – 12m	$a_{x,max}$	1,49 m/s²	1,67 m/s²	1,68 m/s²
	$a_{y,max}$	2,47 m/s²	2,64 m/s²	2,73 m/s²
	$a_{z,max}$	1,10 m/s²	0,91 m/s²	0,97 m/s²

in Tab. 6.3 zeigt, dass bei den Versuchen, die im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet wurden, bei einem Gleis mit Holzschwellen ähnliche Amplituden wie bei dem Gleis mit Betonschwellen, welches in [77] untersucht wird, erzielt werden konnten, wobei jedoch eine geringere Vertikalverschiebungsamplitude ermittelt wurde. Bei Gleisen mit demselben Schwellentyp ergeben sich im Zuge der Schotterverdichtung folglich teilweise erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Verschiebungsamplituden der Schwelle. Es scheint daher plausibel, dass der Verdichtungszustand, die Sieblinie und das Ausgangsgestein des Schotters sowie die Querschnittsform des Schotteroberbaus größeren Einfluss auf die Verschiebungsamplitude haben, als der Schwellentyp. Im Wesentlichen stellt dies eine dynamische Entsprechung der Ergebnisse aus [31] dar. Laut [31] stellt der Verdichtungszustand des Schotters den einflussreichsten Parameter für den Querverschiebewiderstand dar. Obwohl die Versuchsergebnisse ebenfalls diese Vermutung zu unterstützen scheinen, kann anhand der vorliegenden Versuchsdaten, die nur einen Schwellen- und Querschnittstyp abdecken,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 6.2: Zusammenstellung statistischer Parameter der Geschwindigkeitamplituden der einzelnen Messfahrten

Sensor	Parameter	Ist-Zustand vor Stopfen	1. Fahrt nach Stopfen	2. Fahrt nach Stopfen
DGS-x	$\bar{v}_x$	11,83 mm/s	14,87 mm/s	9,81 mm/s
	$v_{x,max}$	33,02 mm/s	29,33 mm/s	23,61 mm/s
	$v_{x,min}$	4,13 mm/s	1,75 mm/s	3,23 mm/s
	s/v (v_x)	3,22 mm/s	4,76 mm/s	3,26 mm/s
		(27,18 %)	(32,01 %)	(33,23 %)
DGS-y	$\bar{v}_y$	330,05 mm/s	312,86 mm/s	317,19 mm/s
	$v_{y,max}$	355,59 mm/s	326,99 mm/s	334,58 mm/s
	$v_{y,min}$	309,44 mm/s	301,74 mm/s	264,16 mm/s
	s/v (v_y)	8,61 mm/s	5,97 mm/s	7,89 mm/s
		(2,61 %)	(1,91 %)	(2,49 %)
DGS-z	$\bar{v}_z$	27,77 mm/s	23,84 mm/s	23,69 mm/s
	$v_{z,max}$	43,91 mm/s	42,03 mm/s	37,08 mm/s
	$v_{z,min}$	14,77 mm/s	10,24 mm/s	6,23 mm/s
	s/v (v_z)	5,92 mm/s	4,24 mm/s	4,20 mm/s
		(21,30 %)	(17,77 %)	(17,75 %)
Schwelle	$v_{x,max}$	18,45 mm/s	18,09 mm/s	20,27 mm/s
	$v_{y,max}$	209,63 mm/s	244,22 mm/s	223,21 mm/s
	$v_{z,max}$	43,91 mm/s	42,03 mm/s	37,08 mm/s
Erschütterung – 4m	$v_{x,max}$	10,78 mm/s	11,21 mm/s	10,39 mm/s
	$v_{y,max}$	18,33 mm/s	17,08 mm/s	16,49 mm/s
	$v_{z,max}$	25,58 mm/s	23,59 mm/s	23,00 mm/s
Erschütterung – 8m	$v_{x,max}$	15,06 mm/s	15,76 mm/s	15,78 mm/s
	$v_{y,max}$	15,04 mm/s	14,78 mm/s	11,96 mm/s
	$v_{z,max}$	7,20 mm/s	5,93 mm/s	5,17 mm/s
Erschütterung – 12m	$v_{x,max}$	5,50 mm/s	6,65 mm/s	6,29 mm/s
	$v_{y,max}$	9,30 mm/s	10,09 mm/s	11,01 mm/s
	$v_{z,max}$	3,72 mm/s	3,12 mm/s	3,06 mm/s

dieses Ergebnis allerdings nicht mit ausreichender Sicherheit bestätigt werden.

Die reduzierten Variationskoeffizienten $s(a_y)$ und $s(d_y)$ der Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden in y-Richtung deuten darauf hin, dass das Stopfen eine gleichmäßigere Bewegung des DGS bewirkt. Dieser Effekt wird bei neuerlicher Überfahrt reduziert und der Variationskoeffizient wird wieder erhöht. Die generelle Verringerung der Amplituden am DGS kann ein Hinweise darauf sein, dass durch den aufgelockerten Schotter mehr Energie dissipiert wird als durch einen bereits kompakt gelagerten Schotter, womit die Amplituden am DGS reduziert werden. Eine lockerere Lagerung des Schotters ermöglicht größere Horizontalbeschleunigungen und somit -verschiebungen der Schwelle, was sich mit der bekannten Beobachtung eines reduzierten Querverschiebewiderstands nach Stopfarbeiten deckt [41, 71]. In diesem Sinn kann auch die erneute Verringerung der Verschiebungsamplituden in y-Richtung mit einer Erhöhung des Querverschiebewiderstands

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 6.3: Zusammenstellung statistischer Parameter der Verschiebungsamplituden der einzelnen Messfahrten

Sensor	Parameter	Ist-Zustand vor Stopfen	1. Fahrt nach Stopfen	2. Fahrt nach Stopfen
DGS-x	$\bar{d}_x$	0,063 mm	0,071 mm	0,049 mm
	$d_{x,max}$	0,161 mm	0,143 mm	0,130 mm
	$d_{x,min}$	0,031 mm	0,012 mm	0,004 mm
	s/v (d_x)	0,016 mm	0,021 mm	0,017 mm
		(25,5 %)	(29,2 %)	(34,7 %)
DGS-y	$\bar{d}_y$	1,593 mm	1,518 mm	1,543 mm
	$d_{y,max}$	1,731 mm	1,593 mm	1,628 mm
	$d_{y,min}$	1,479 mm	1,451 mm	1,393 mm
	s/v (d_y)	0,047 mm	0,030 mm	0,039 mm
		(2,93 %)	(1,98 %)	(2,56 %)
DGS-z	$\bar{d}_z$	0,088 mm	0,080 mm	0,076 mm
	$d_{z,max}$	0,185 mm	0,188 mm	0,143 mm
	$d_{z,min}$	0,040 mm	0,043 mm	0,030 mm
	s/v (d_z)	0,022 mm	0,020 mm	0,017 mm
		(24,61 %)	(24,81 %)	(22,59 %)
Schwelle	$d_{x,max}$	0,075 mm	0,090 mm	0,096 mm
	$d_{y,max}$	0,864 mm	1,033 mm	0,908 mm
	$d_{z,max}$	0,520 mm	0,539 mm	0,527 mm
Erschütterung – 4m	$d_{x,max}$	0,049 mm	0,053 mm	0,050 mm
	$d_{y,max}$	0,081 mm	0,082 mm	0,078 mm
	$d_{z,max}$	0,111 mm	0,101 mm	0,100 mm
Erschütterung – 8m	$d_{x,max}$	0,071 mm	0,077 mm	0,077 mm
	$d_{y,max}$	0,072 mm	0,072 mm	0,059 mm
	$d_{z,max}$	0,026 mm	0,023 mm	0,020 mm
Erschütterung – 12m	$d_{x,max}$	0,025 mm	0,032 mm	0,031 mm
	$d_{y,max}$	0,045 mm	0,051 mm	0,054 mm
	$d_{z,max}$	0,015 mm	0,012 mm	0,012 mm

nach einmaliger Überfahrt mit dem DGS erklärt werden [41, 71]. Die reduzierten Amplituden der Vertikalbeschleunigung nach dem Stopfen können, wie auch die allgemeine Reduktion der DGS-Amplituden, der Energiedissipation im Zuge der Schotterverdichtung geschuldet sein.

6.2.3 Entwicklung der Schwingschnellen im Nahfeld

Durch eine erhöhte Energiedissipation bei locker gelagertem Schotter ist ein Einfluss der Lagerungsdichte auf die Erschütterungswirkung des DGS auf die Umgebung denkbar. Die Intensität von Erschütterungen wird gemäß ÖNORM S 9020:2015-12 [55] anhand der resultierenden Schwingschnelle beurteilt. Die resultierende Schwingschnelle wird gemäß Gleichung (6.1) anhand aufintegrierter Beschleunigungssignale oder anhand von Schwingschnellenmessungen errechnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$v_R = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \tag{6.1}$$

Für die resultierende Schwingschnelle werden in der ÖNORM S 9020:2015-12 maximal zulässige Grenzwerte definiert. Diese Grenzwerte hängen dabei von folgenden Parametern ab:

- Maßgebende Frequenz des Erschütterungsspektrums (Anregungsfrequenz des DGS)
- Ereignisdauer
- Häufigkeit der Ereignisse
- Empfindlichkeitsklasse des betroffenen Bauwerks

Des Weiteren werden in der ÖNORM S9020 fünf Empfindlichkeitsklassen definiert (Klassen 0 bis 4), wobei Klasse 0 sehr wenig empfindliche Bauwerke, wie ingenieurmäßige Holzkonstruktionen, und Klasse 4 sehr empfindliche Bauwerke, wie denkmalgeschützte Bauwerke, die aufgrund ihrer Bauweise oder ihres Zustands besonders erschütterungsanfällig sind, beschreibt. Diese Empfindlichkeitsklassen werden nachfolgend als Bauwerksempfindlichkeitsklasse (BEKL) bezeichnet. Für diese Bauwerksempfindlichkeitsklassen werden anhand der maßgebenden Frequenz des Erschütterungsspektrums (ermittelt durch eine FFT-Analyse mit einer Auflösung von zumindest 0,5 Hz), der Ereignisdauer (impulsförmig, kurzzeitig oder kontinuierlich) und der Häufigkeit der Ereignisse (selten, wiederholt oder häufig) die zulässigen Richtwerte für die maximale resultierende Schwingschnelle errechnet. Die Erschütterungen die vom DGS ausgehen stellen dabei kontinuierliche, seltene Einwirkungen mit einer Frequenz > 10 Hz dar. Für diese Einwirkungsart sind im Anhang E der ÖNORM S9020 Interpolationsformeln für die verschiedenen Bauwerksempfindlichkeitsklassen angegeben. Diese Formeln werden für die mittlere maßgebende Frequenz aus der FFT ausgewertet und die Ergebnisse sind für die erste Überfahrt des DGS (Feststellung des ist-Zustands) gemeinsam mit den resultierenden Schwingschnellen der Erschütterungssensoren in Abb.6.12 dargestellt. Die Ergebnisse für die ersten zwei Überfahrten nach dem Stopfen sind in Abb. 6.13 und Abb. 6.14 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den örtlichen Gegebenheiten (Gleis mit Holzschwellen in Kofferlage, Untergrundbedingungen) und bei den gewählten Prozessparametern des DGS bereits in 12 m Entfernung die maximal zulässige resultierende Schwingschnelle nur für Bauwerke der höchsten Bauwerksempfindlichkeitsklasse (BEKL 4) erreicht wird. In 8 m Entfernung wären auch Bauwerke der Bauwerksempfindlichkeitsklasse 3 und in 4 m Entfernung von der Gleisachse auch Bauwerke der Bauwerksempfindlichkeitsklasse 2 von einer Überschreitung der maximal zulässigen resultierenden Schwingschnelle betroffen. Hinsichtlich des Verdichtungszustands des Schotters kann nur bei den in 4 m Entfernung ermittelten Schwingschnellen ein geringer Einfluss des Verdichtungszustands des Schotters auf die resultierende Schwingschnelle festgestellt werden. Hier nimmt die maximale resultierende Schwingschnelle nach dem Stopfvorgang leicht ab und überschreitet erst bei der zweiten Überfahrt nach dem Stopfen erneut die maximal zulässige resutierende Schwingschnelle der Bauwerksempfindlichkeitsklasse 2.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

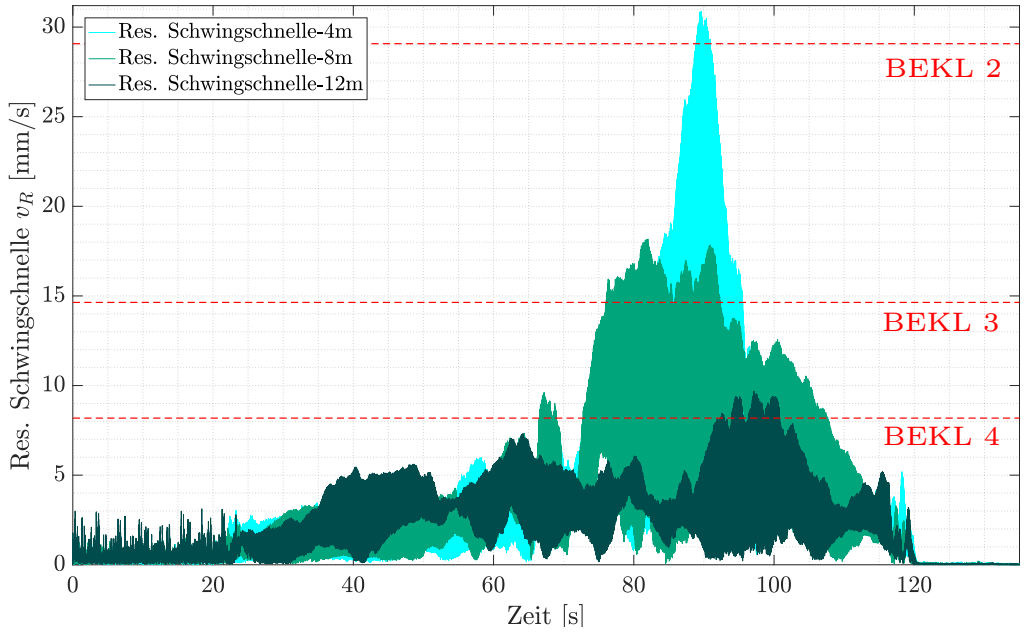


Abb. 6.12: Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die erste Überfahrt des DGS (Feststellung des Ist-Zustands) und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen (BEKL) bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des Erschütterungsspektrums

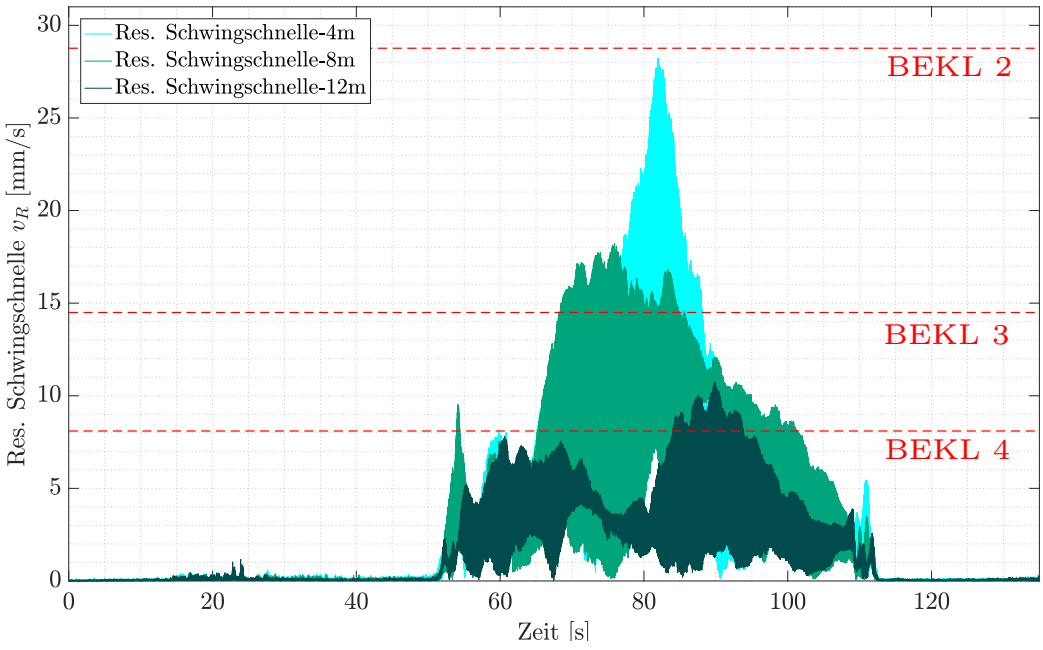


Abb. 6.13: Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die erste Überfahrt des DGS nach dem Stopfen und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des jeweiligen Erschütterungsspektrums

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

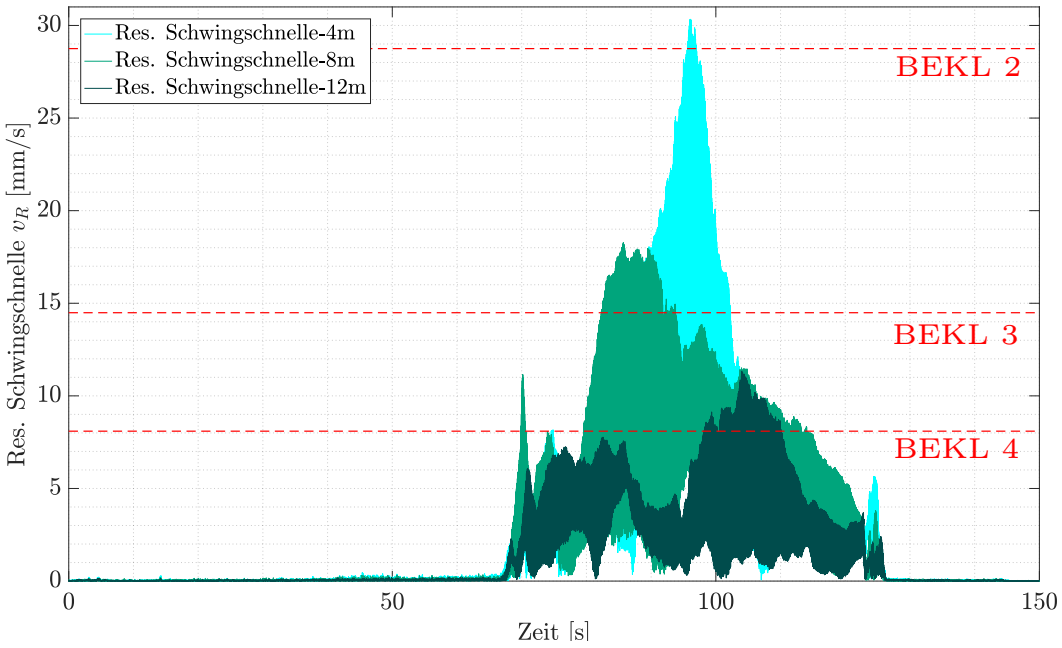


Abb. 6.14: Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die zweite Überfahrt des DGS nach dem Stopfen und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des jeweiligen Erschütterungsspektrums

6.3 Analyse des dynamischen Rotationszentrums

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, liegt das dynamische Rotationszentrum des DGS, ohne zusätzliche äußere (vertikale) Krafteinwirkungen durch die Interaktion mit dem Untergrund oder dem Rahmen, unterhalb der Messebene. Nachfolgend wird die Entwicklung des vertikalen Abstands des dynamischen Rotationszentrums von der Messebene (vertikale Lage des Rotationszentrums) auf Basis von Geschwindigkeiten beziehungsweise auf Basis der FFT-Amplituden zwischen den einzelnen Versuchsfahrten verglichen. Die vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS während der ersten Messfahrt ist in Abb. 6.15 und die Entwicklung der vertikalen Lage des Rotationszentrums der Schwelle während der Überfahrt durch den DGS in Abb. 6.16 dargestellt. Das dynamische Rotationszentrum des DGS liegt während der ersten Messfahrt meist circa 20 m oberhalb der Messebene, jenes der Schwelle während der Überfahrt circa 2 m unterhalb der Messebene. Vor der Überfahrt des DGS (erkennbar durch eine schwarz strichlierte Linie, die den Zeitpunkt der maximalen Schwellenbeschleunigung in y-Richtung markiert) wandert das Rotationszentrum der Schwelle in den Schwerpunkt und die Schwelle rotiert um die x-Achse. Die Berechnung auf Basis der Amplituden der FFT liefert für die Schwelle wenige Ergebnisse (Verletzung des Kriteriums der Phasendifferenz, siehe Abschnitt 5.2.4). Bei der Berechnung der Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS stimmen die Ergebnisse der Berechnung auf Basis der Amplituden der FFT einzelner Zeitfenster zu Beginn mit jenen des gleitenden Mittelwerts überein. Während der zweiten Hälfte der Messfahrt werden auf Basis der Amplituden der FFT entweder wesentlich höhere Abstände zur Messebene ermittelt oder die Phasendifferenz zwischen Vertikal- und Horizontalanteil liegt außerhalb des gewerteten Toleranzbereichs für die Phasendifferenz. Zum besseren Verständnis des Bewegungsverhaltens des DGS wird für einige Zeiträume, in denen kein Ergebnis auf Basis der Amplituden der FFT ermittelt werden kann, die Darstellung der Bewegung in der y-z-Ebene stichprobenartig betrachtet. In Abb. 6.17 ist eine

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene, bei der die Bedingung der Phasendifferenz erfüllt wird (Abb. 6.17a), einer Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene, bei der diese Bedingung verletzt wird (Abb. 6.17b), gegenübergestellt. In Abb. 6.17a ist die systemimmanente Kippbewegung des DGS anhand der konvexen Form der Kurve erkennbar. Diese Kippschwingung wird durch eine vertikale Schwingung („Auf- und Abwärtsbewegung“) überlagert, wodurch die Form einer verzerrten, liegenden Acht entsteht. Im weiteren Verlauf der Überfahrt verändert sich die Bewegungscharakteristik des DGS. Die verzerrten Ellipsen in Abb. 6.17b deuten darauf hin, dass die Kippschwingung des DGS durch die Reaktionskräfte aus dem Gleisrost und/oder dem Rahmen kompensiert werden, wodurch eine Überlagerung einer Translation in y-Richtung und in z-Richtung verbleibt. Da die Anregungsfrequenz während der ersten Überfahrt beständig von 33 Hz auf etwas über 34 Hz zunimmt und die Ergebnisse der Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT im Verlauf der Überfahrt nur für die erste Hälfte des Versuchs plausible Ergebnisse lieferten, kann dieser Effekt von der Anregungsfrequenz abhängig sein. Diese Beobachtung wird in Abschnitt 6.4 untersucht.

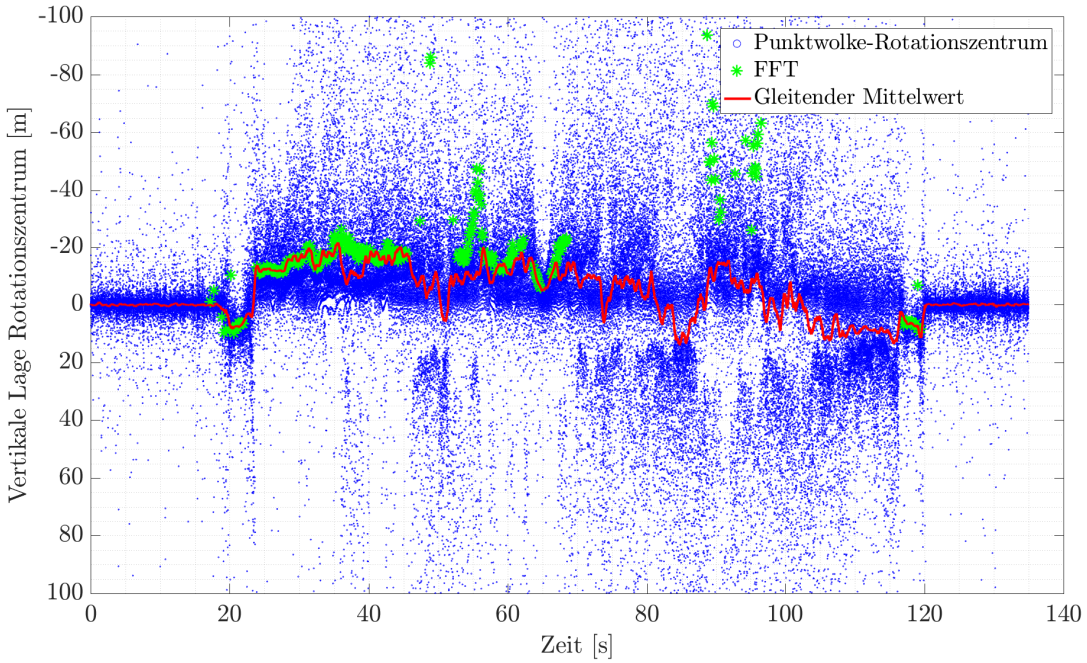


Abb. 6.15: Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands)

Um den Einfluss des Verdichtungszustandes des Schotters auf die Entwicklung des dynamischen Rotationszentrums des DGS und der Schwelle beurteilen zu können, wird der Verlauf der dynamischen Rotationszentren nach dem Stopfvorgang (Abb. 6.18, Abb. 6.19) mit den Verläufen der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) verglichen (Abb. 6.15 und Abb. 6.16). Das Rotationszentrum des DGS weist nach dem Stopfvorgang, dort wo Ergebnisse anhand der Amplituden der FFT bestimmt werden können, weiterhin einen Abstand von circa 20 m zur Messebene auf und liegt oberhalb derselben. Die Punktwolke der errechneten Abstände liefert allerdings für den Großteil der Messfahrt keine klaren Ergebnisse, womit die Lage des Rotationszentrums in diesen Bereichen nicht exakt ermittelt werden kann. In Abb. 6.20 ist die Bewegung des DGS in der y-z-Ebene zu Beginn und gegen Ende der zweiten Messfahrt dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

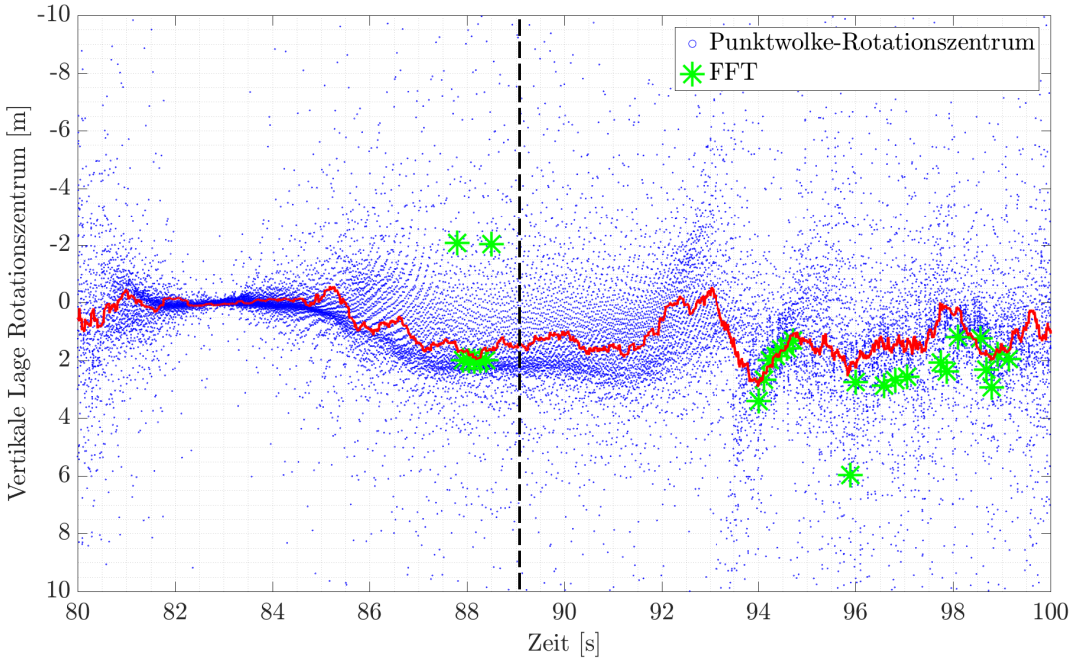


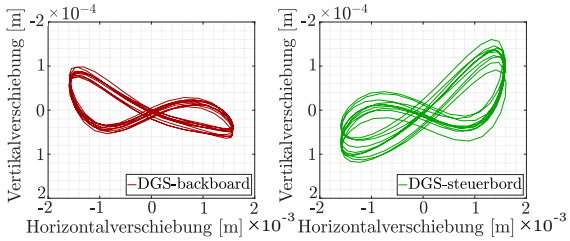
Abb. 6.16: Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands)

Das Bewegungsverhalten des DGS am Ende der zweiten Messfahrt (Abb. 6.20b) ähnelt dabei jenem am Ende der ersten Messfahrt. Da die Anregungsfrequenz in diesem Zeitraum ebenfalls circa 34 Hz beträgt und die Untergrundbedingungen durch den Stopfvorgang erheblich geändert werden, ist eine Frequenzabhängigkeit dieses Effekts wahrscheinlich. Zu Beginn der Messfahrt beträgt die Anregungsfrequenz allerdings 33 Hz, womit das veränderte Bewegungsverhalten des DGS in der y-z-Ebene in Abb. 6.20a eher durch den aufgelockerten Schotter hervorgerufen worden sein dürfte. Der Verdichtungszustand des Schotters scheint daher das Bewegungsverhalten des DGS direkt zu beeinflussen.

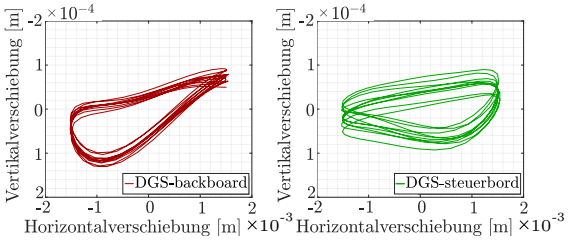
Die berechnete Lage des Rotationszentrums der Schwelle weist nach dem Stopfen ebenfalls eine größere Streuung auf als während der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands). Bei Betrachtung der Punktwolke in Abb. 6.18b kann ein verdichteter Bereich in einer Tiefe von rund 3 m unterhalb der Messebene ausgemacht werden. Das Rotationszentrum der Schwelle liegt demnach nach dem Stopfvorgang weiter unterhalb der Messebene als davor, was auf größere Horizontalbewegungen der Schwelle nach dem Stopfen hinweist. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Abschnitt 6.2.2, in dem festgestellt wird, dass nach dem Stopfvorgang größere Horizontalbeschleunigungs- und Verschiebungsamplituden auftreten als bei der Messfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands.

Im Zuge der neuerlichen Überfahrt durch den DGS (zweite Überfahrt nach dem Stopfen) werden die Streuungen der berechneten Vertikalabstände des dynamischen Rotationszentrums zur Messebene wieder reduziert (siehe Abb. 6.19b). Während sich die reine Rotation der Schwelle um die x-Achse während der ersten Messfahrt nach dem Stopfen (siehe Abb. 6.18b) nicht mehr ausbildet, kann dieses Verhalten anhand der berechneten Lage des dynamischen Rotationszentrums für die dritte Messfahrt (zweite Überfahrt nach dem Stopfen) wieder festgestellt werden. Das Rotationszentrum der Schwelle liegt entsprechend der Berechnungsergebnisse auf Basis der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



(a) Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 43,06 – 43,36 s der ersten Überfahrt (Feststellung des Ist-Zustands). Eine Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT ist möglich.



(b) Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 110,704 – 110,995 s der ersten Überfahrt (Feststellung des Ist-Zustands). Eine Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT ist nicht möglich.

Abb. 6.17: Vergleich einer DGS-Bewegung in der y-z-Ebene für die eine Berechnung der Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis der FFT-Amplituden möglich ist **(a)** und einer DGS-Bewegung in der y-z-Ebene für die die Bedingung der Phasendifferenz nicht erfüllt ist **(b)**

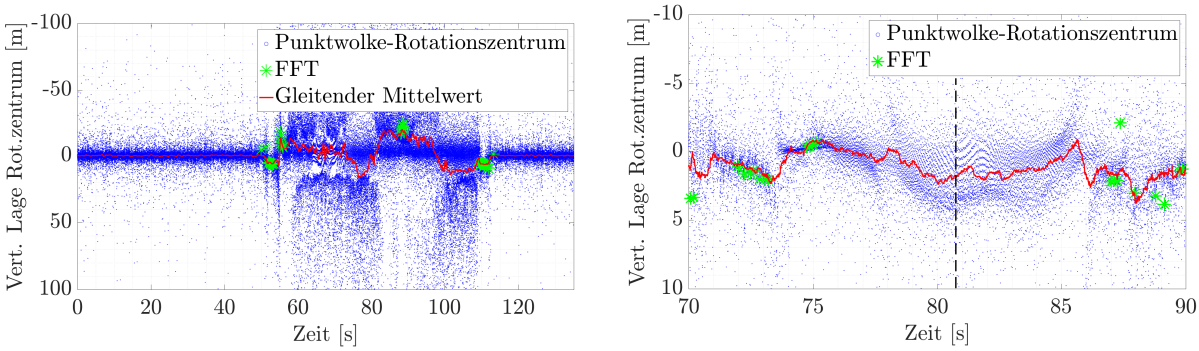
Amplituden der FFT während der dritten Messfahrt des DGS 2,20 m unterhalb der Messebene. Damit reduziert sich der Abstand des dynamischen Rotationszentrums von der Messebene nach der Verdichtung erneut, was auch auf eine kleinere Horizontalverschiebung hinweist. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.2.

Die Berechnung des Vertikalabstands des dynamischen Rotationszentrums von der Messebene lieferte für die dritte Messfahrt (zweite Überfahrt nach dem Stopfen) ähnliche Ergebnisse wie für die zweite Messfahrt (erste Messfahrt nach Stopfen). Der Verlauf des gleitenden Mittelwerts lässt sich bei gleichbleibenden Prozessparametern (was bei der zweiten und dritten Messfahrt zumindest hinsichtlich des Verlaufs der Eregerfrequenz während des Versuchs der Fall war; siehe Abb. 6.1 beziehungsweise Abb. 6.2) qualitativ reproduzieren. Die unterschiedlichen Ergebnisse der Berechnung auf Basis der Amplituden der FFT für die zweite und dritte Messfahrt (siehe Abb. 6.18a, Abb. 6.19a) weisen allerdings auf eine Veränderung des Bewegungsverhaltens hin. Die Betrachtung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene bestätigt diese Vermutung teilweise. Dabei unterscheidet sich das Bewegungsverhalten des DGS zu Beginn der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach Stopfen) stark von jenem der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach Stopfen), während sich die Bewegungen in der y-z-Ebene am Ende der Messfahrt sehr ähnlich sind. Die Bewegungen des DGS in der y-z-Ebene zu Beginn der dritten Messfahrt implizieren hinsichtlich der Form einen Zustand des Übergangs zwischen jenen in Abb. 6.18a und jenen in Abb. 6.17a. Unter der Voraussetzung, dass diese Annahme zutreffend ist, stellt die in der y-z-Ebene beschriebene Bewegungsform des DGS eine potentielle Möglichkeit zur Verdichtungskontrolle dar. Dieser Ansatz ähnelt damit jenem, der in [57] für die Verdichtungskontrolle mit Oszillationswalzen vorgeschlagen wird.

Aufgrund des Ausfalls der Schwellensensorik nach der Durchführung der Frequenzrampe kann für die letzte Messfahrt nur die vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abb. 6.22 dargestellt. Das Rotationszentrum liegt bei dieser Messfahrt unterhalb der Messebene. Da die Erregerfrequenz während dieser Versuchsfahrt circa 31 Hz beträgt und somit mindestens 2 Hz unter der Erregerfrequenz der vorhergehenden Messfahrten liegt, bestätigt dies die Vermutung, dass die vertikale Lage des Rotationszentrums und damit das Bewegungsverhalten des DGS stark von der Erregerfrequenz abhängen. Das dynamische Rotationszentrum lieg, bei den gegebenen Verhältnissen und für Erregerfrequenzen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

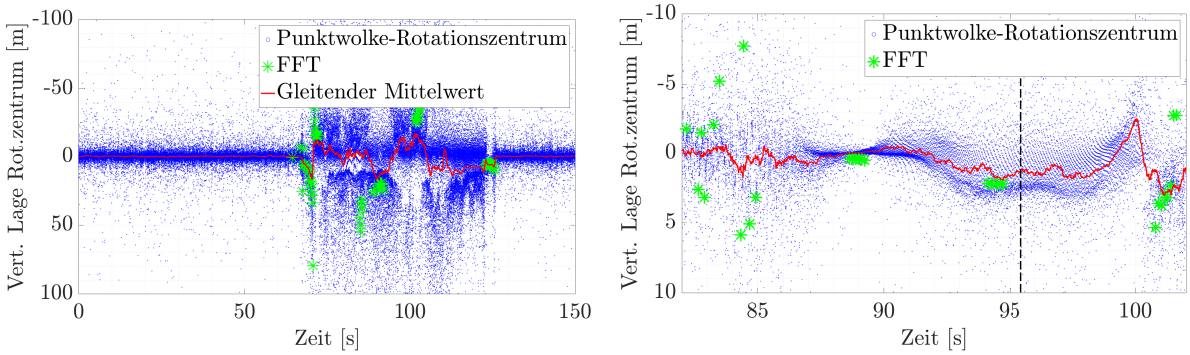
kleiner als 33 Hz, unterhalb der Messebene und für Erregerfrequenzen größer als 33 Hz oberhalb der Messebene. Der Einfluss der Erregerfrequenz auf das Bewegungsverhalten des DGS und der Schwelle wird im folgenden Abschnitt untersucht.



(a) Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen)

(b) Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen)

Abb. 6.18: Entwicklung der Rotationszentren des DGS und der Schwelle während der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen)

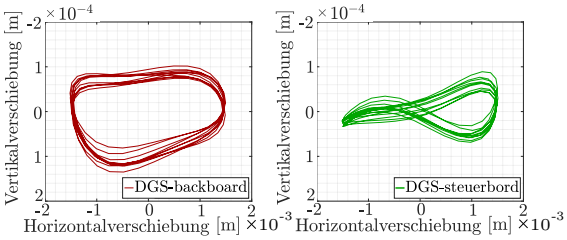


(a) Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen)

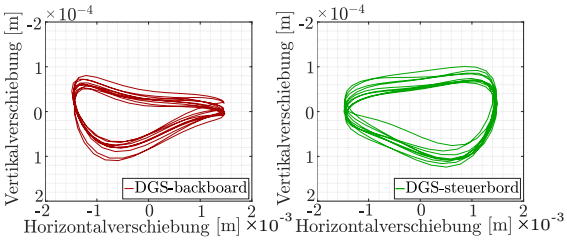
(b) Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen)

Abb. 6.19: Entwicklung der Rotationszentren des DGS und der Schwelle während der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

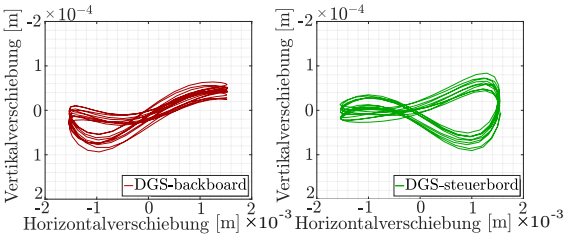


(a) Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 65,637 – 65,937 s der zweiten Überfahrt (erste Fahrt nach Stopfen)

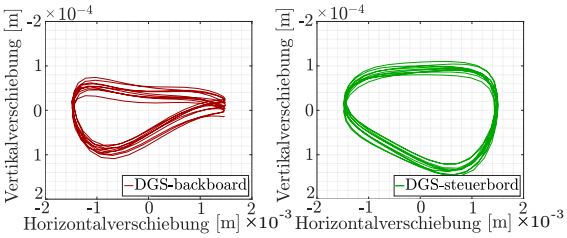


(b) Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 101,325 – 101,623 s der zweiten Überfahrt (erste Fahrt nach Stopfen)

Abb. 6.20: Vergleich der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene zu Beginn und am Ende der zweiten Messfahrt (erste Fahrt nach Stopfen)



(a) Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 80,31 – 80,61 s der dritten Überfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen)



(b) Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 116,263 – 116,556 s der dritten Überfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen)

Abb. 6.21: Vergleich der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene zu Beginn und am Ende der dritten Messfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen)

6.4 Analyse der Frequenzrampe

Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit des Maschine-Boden-Interaktionssystems wurde die Erregerfrequenz am Stand, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, über der messtechnisch instrumentierten Schwelle variiert. Während dieser Variation wurden die anderen Prozessparameter des DGS konstant gehalten. Um die tatsächlich im Versuchsverlauf erreichte Erregerfrequenz mit der vorgesehene Frequenzvariation von 25 Hz auf 36 Hz und wieder zurück auf 25 Hz vergleichen zu können, wird der Verlauf der Erregerfrequenz gemäß der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Das Ergebnis des Verlaufs der Erregerfrequenzrampe ist in Abb. 6.23 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die erreichte Variation der Erregerfrequenz stark von den geplanten Werten abweicht und die Frequenz anstatt im Bereich von 25 Hz bis 36 Hz nur im Bereich von 24 Hz bis 32 Hz variiert werden konnte. Dies war vornehmlich der Spontanität des Versuchs geschuldet, da eine stetige Variation der Erregerfrequenz am Stand nicht standardmäßig in der Maschinensteuerung des DGS implementiert ist und daher manuell durchgeführt werden musste.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

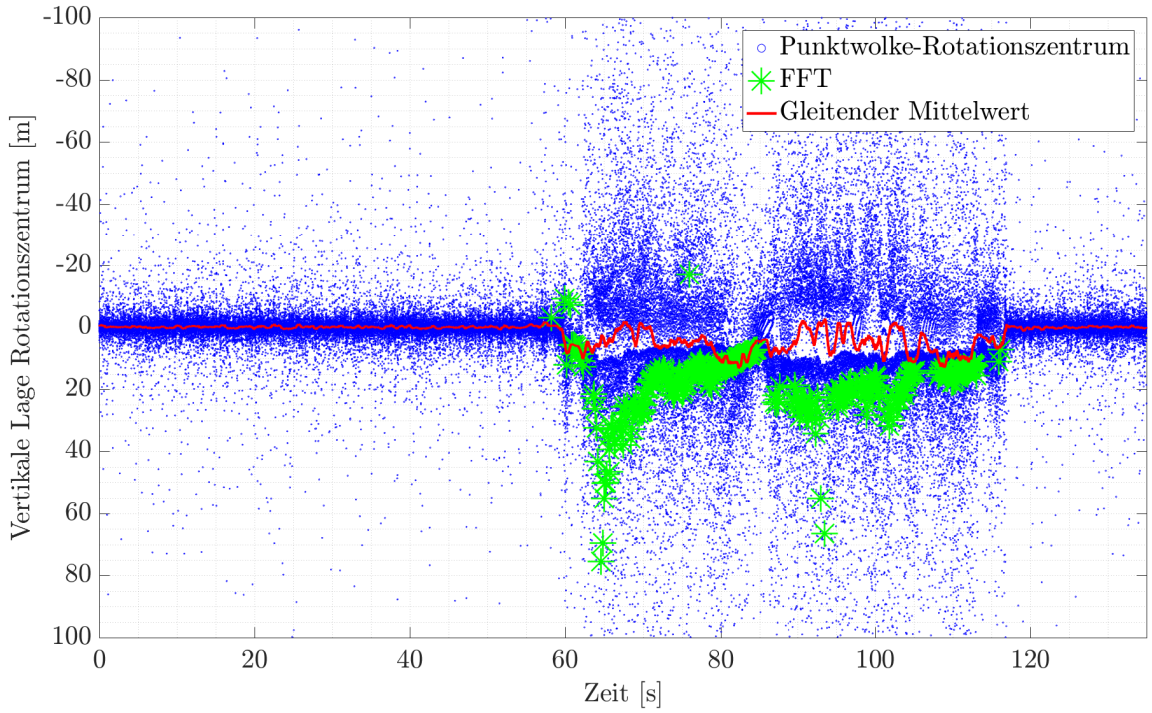


Abb. 6.22: Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der vierten Messfahrt (Fahrt nach der Frequenzrampe)

Amplitudenfrequenzgang

Obwohl die Frequenzvariation nicht das ursprünglich gewünschte Spektrum umfasst, wird nachfolgend die Frequenzabhängigkeit des Bewegungsverhaltens des DGS und der Schwelle untersucht. Hierfür wird die in Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Auswertung der Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz betrachtet (Amplitudenfrequenzgang), wobei zusätzlich zwischen Frequenzanstieg („Rampe hinauf“) und Frequenzabfall („Rampe hinab“) unterschieden wird. Das Ergebnis dieser Betrachtungsweise ist für die Amplituden der Horizontalbeschleunigung in Abb. 6.24 und für die Amplituden der Vertikalbeschleunigung in Abb. 6.25 dargestellt.

Da die Erregerkraft quadratisch mit der Erregerfrequenz zunimmt (siehe Gleichung (2.3)), nehmen die Horizontalbeschleunigungen des DGS und der Schwelle mit steigender Anregungsfrequenz erwartungsgemäß zu. Im Falle der Schwelle können im Zuge des Frequenzanstiegs geringere Horizontalbeschleunigungen (Abb. 6.24) und Horizontalverschiebungen (Abb. 6.26) beobachtet werden als beim Frequenzabfall, wobei die Horizontalverschiebungen beim Frequenzanstieg circa 0,05 mm geringer sind als beim Frequenzabfall. Dies deutet auf eine erneute Auflockerung des Schotters aufgrund der langen Verdichtungsdauer, bei Durchführung der Variation der Erregerfrequenz, hin. Durch eine Auflockerung können die Horizontalspannungen im Schwellenzwischenfach und im Bereich der Schwellensohle reduziert werden, wodurch wiederum der Reibungswiderstand an der Schwellenoberfläche vermindert wird, was größere Verschiebungsamplituden in Horizontalrichtung bei gleicher Belastung ermöglicht [71].

Betrachtet man den Amplitudenfrequenzgang der Vertikalbeschleunigungen (Abb. 6.25) und der Vertikalverschiebungen (Abb. 6.27), so zeigt sich, dass die Amplituden beim Frequenzanstieg, mit Ausnahme der backbordseitigen Vertikalbeschleunigung der Schwelle, höher sind als beim

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

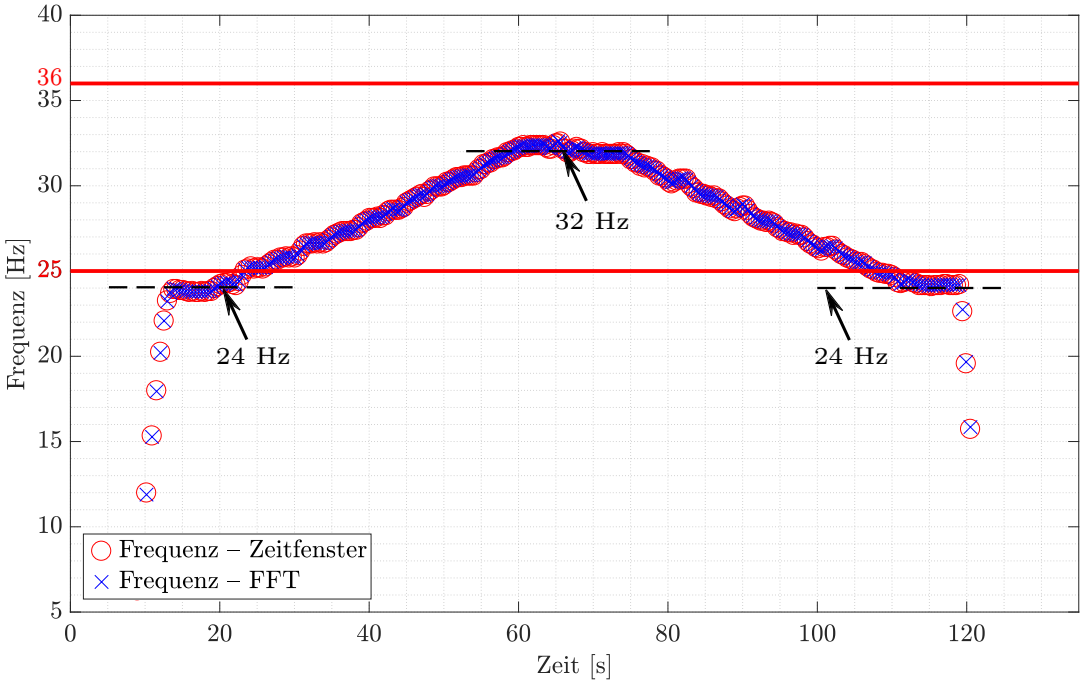


Abb. 6.23: Verlauf der Anregungsfrequenz während der Frequenzrampe

Frequenzabfall. Dies kann gegebenenfalls auf eine Auflockerung des Schotters aufgrund der langen Verdichtungszeit zurückgeführt werden. Es ist denkbar, dass ein steiferer Schotter mit höherer Dichte ebenfalls eine geringere Dämpfung besitzt und daher größere Verschiebungen in Vertikalrichtung ermöglicht. Außerdem ist in den vertikalen Bewegungsgrößen des DGS ein Maximum zwischen 27 Hz und 30 Hz erkennbar. Dieses Maximum ist in den Vertikalbeschleunigungen der Schwelle nicht vorhanden. Vielmehr nehmen die Vertikalbeschleunigungen der Schwelle mit höherer Erregerfrequenz stetig zu. Es ist daher denkbar, dass in diesem Frequenzbereich eine Eigenfrequenz des Rahmens liegt und die Vertikalschwingungen des DGS (aufgrund der fehlenden dynamischen Entkopplung zwischen DGS und Maschinenrahmen) durch die Interaktion mit dem Rahmen verstärkt werden. Ebenso ist es möglich, dass ab einer Frequenz zwischen 28 Hz und 29 Hz Eigenfrequenzen des Rahmens aktiviert werden und die Amplituden in Vertikalrichtung durch die Interaktion mit dem Rahmen vermindert werden. In beiden Fällen wirkt sich der Rahmen direkt auf das Schwingungsverhalten des DGS aus. Für die Entwicklung eines Systems zur kontinuierlichen Verdichtungskontrolle mit dem DGS müssten Änderungen des Bewegungsverhaltens des DGS allerdings ihren Ursprung zweifelsfrei in geänderten Untergrundverhältnissen haben und nicht aus einer veränderten Schwingungsantwort des Rahmens resultieren. Daher ist es für die Entwicklung eines Systems zur kontinuierlichen Verdichtungskontrolle mit dem DGS notwendig, diesen dynamisch vom Maschinenrahmen zu entkoppeln.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

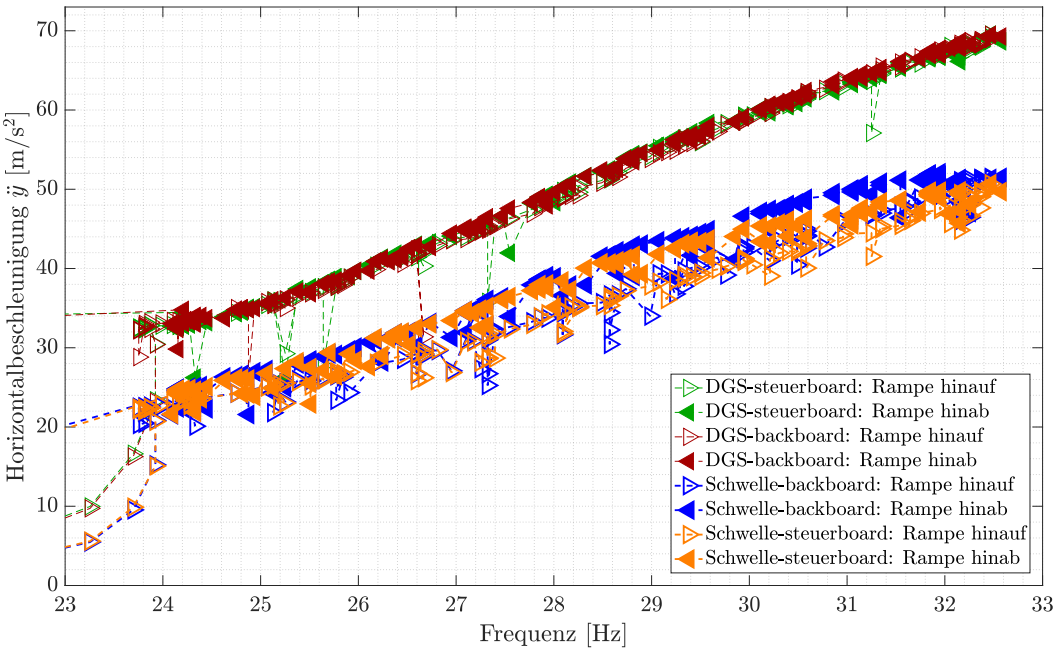


Abb. 6.24: Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalbeschleunigungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

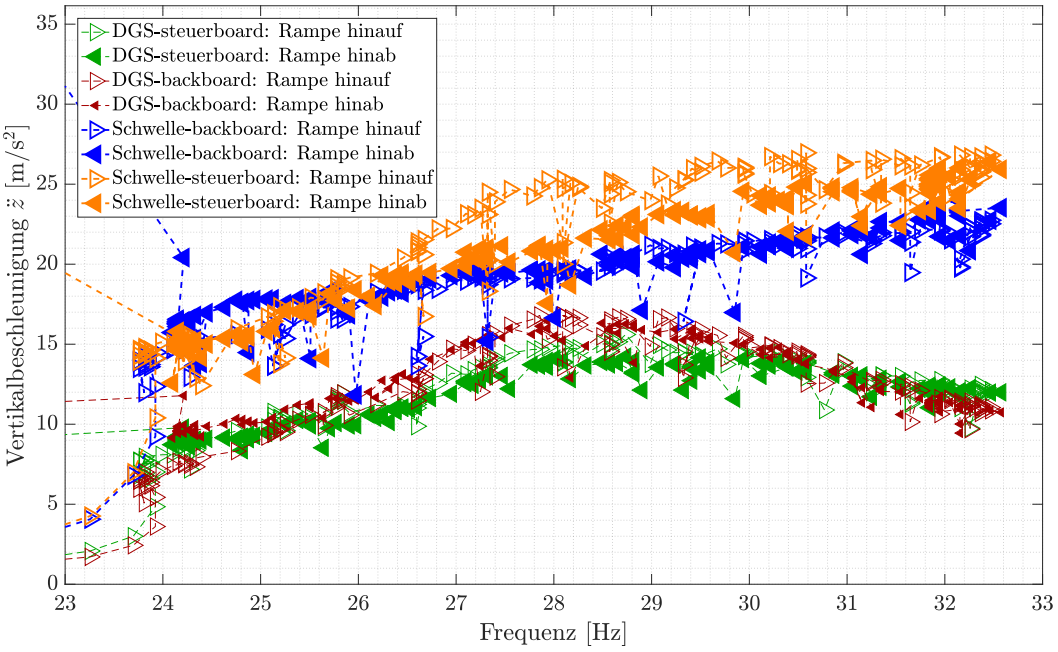


Abb. 6.25: Amplitudenfrequenzgang für die Vertikalbeschleunigungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

Lage des dynamischen Rotationszentrums

Bereits im vorhergehenden Abschnitt 6.3 wurde eine starke Frequenzabhängigkeit des dynamischen Rotationszentrum des DGS festgestellt. Diese Abhängigkeit soll nun anhand der Ergebnisse

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

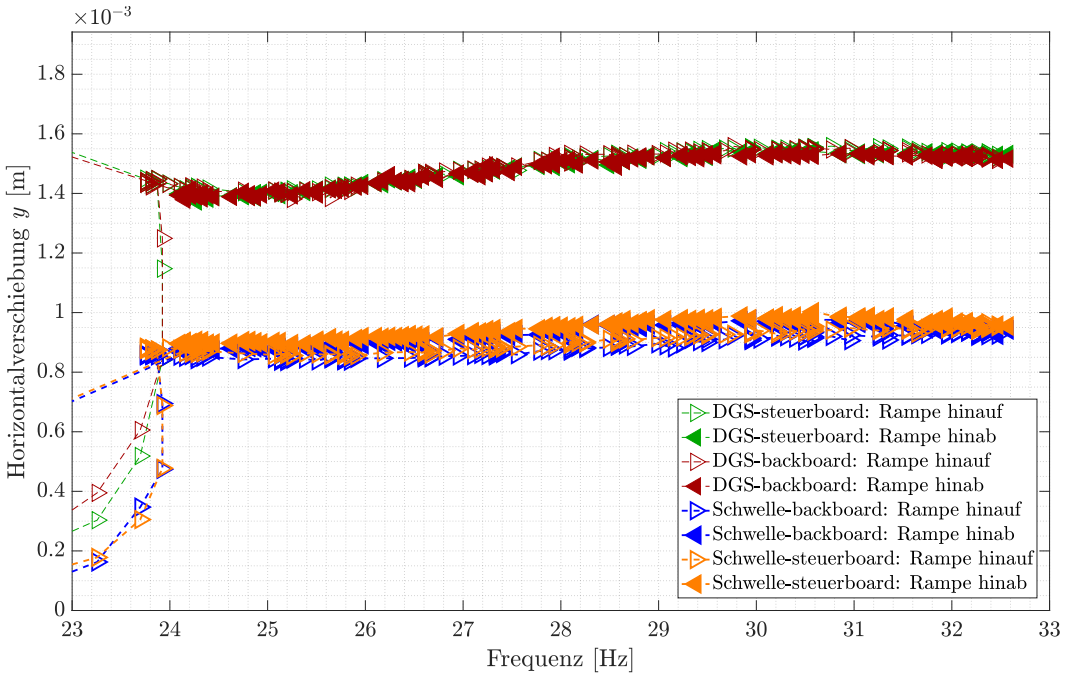


Abb. 6.26: Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalverschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

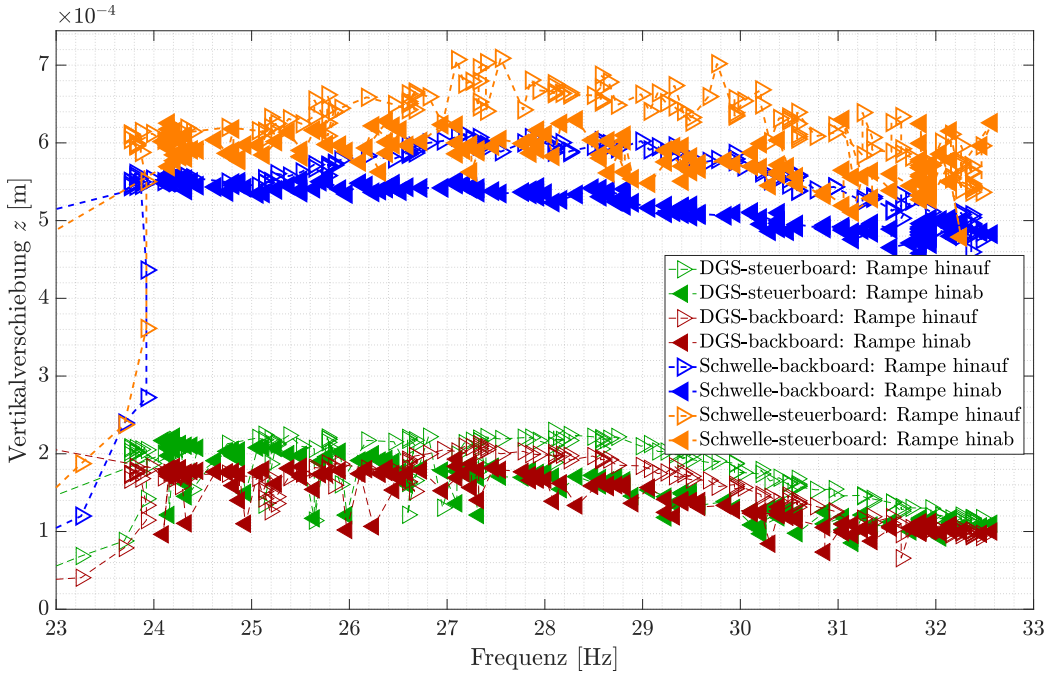


Abb. 6.27: Amplitudenfrequenzgang für die Vertikalverschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle)

der Analyse der Frequenzrampe näher untersucht werden. Die Entwicklung des Vertikalabstands des dynamischen Rotationszentrums des DGS von der Messebene ist in Abb. 6.28 und jene der Schwelle in Abb. 6.29 dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass die vertikale Lage des dyna-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

mischen Rotationszentrums, die auf Basis der Amplituden der FFT ermittelt wurde, gut mit den Ergebnissen des gleitenden Mittelwerts übereinstimmt. Nur im Zeitraum von ~61 s – ~75 s konnte auf Basis der Amplituden der FFT die Lage des dynamischen Rotationszentrums nicht bestimmt werden. Dies entspricht beim Frequenzanstieg einer Erregerfrequenz von 32,3 Hz, ab der die Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der FFT nicht mehr möglich ist und beim Frequenzabfall einer Erregerfrequenz von 31,6 Hz ab der die Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT wieder möglich ist. Die zu Beginn dieses Unterkapitels identifizierte mögliche Aktivierung der Eigenfrequenzen des Maschinenrahmens scheint sich demzufolge, ab einer Frequenz von circa 31 Hz, signifikant auf das Bewegungsverhalten des DGS auszuwirken. Geht man zusätzlich davon aus, dass der Schotter beim Frequenzanstieg dichter war als beim Frequenzabfall, so scheint der Verdichtungszustand des Schotters ebenfalls die Aktivierung der angesprochenen Eigenfrequenzen des Rahmens zu beeinflussen. Die Eigenfrequenzen des Rahmens scheinen für steiferen (also dichter gelagerten) Schotter bei einer höheren Frequenz aktiviert zu werden. Dies würde auch die erfolgreiche Ermittlung der Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis der FFT-Amplituden zu Beginn der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf dicht gelagertem Schotter erklären, welche bei den späteren Messfahrten auf lockererem Schotter nicht reproduziert werden konnte.

Obwohl die vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle geringeren Streuungen unterworfen ist als jene des DGS, kann diese auf Basis der Amplituden der FFT nur für einen beschränkten Frequenzbereich ermittelt werden. Während des Frequenzanstiegs kann die Lage des dynamischen Rotationszentrums für den Frequenzbereich von 29,1 Hz bis 31,8 Hz und im Zuge des Frequenzabfalls zwischen 26,3 Hz und 31,0 Hz ermittelt werden. Das dynamische Rotationszentrum liegt während des Frequenzabfalls in größerer Entfernung unterhalb der Messebene als während des Frequenzanstiegs. Der vertikale Abstand des dynamischen Rotationszentrums von der Messebene beträgt für eine Erregerfrequenz von 31 Hz während des Frequenzanstiegs 1,80 m und während des Frequenzabfalls 2,11 m. Wenn die in Abschnitt 6.3 aufgestellte Vermutung, dass der vertikale Abstand des dynamischen Rotationszentrum umgekehrt proportional zur Verdichtungsgrad des Schotters ist, zutrifft, deutet dies erneut darauf hin, dass die Lagerungsdichte im Zuge der Durchführung der Frequenzrampe reduziert worden ist. Da für den Frequenzabfall das dynamische Rotationszentrum für einen größeren Frequenzbereich ermittelt werden kann, liegt die Vermutung nahe, dass sich die Lagerungsdichte auf die Ermittlung der Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle stärker auswirkt als dies für den DGS der Fall ist.

In jenem Frequenzbereich, in dem das dynamische Rotationszentrum auf Basis der Amplituden der FFT für den DGS nicht ermittelt werden kann, ist es auch nicht möglich, dieses auf Basis der Amplituden der FFT für die Schwelle zu ermitteln. Dies deutet darauf hin, dass auch das Bewegungsverhalten der Schwelle durch die Interaktion des DGS mit dem Rahmen verändert wird. Da die Bewegungen des DGS über die Schiene und die Schienenbefestigung auf die Schwelle übertragen werden und die Kippbewegung des DGS bei einer Interaktion mit dem Rahmen stark verzerrt wird, scheint es plausibel, dass durch diese Interaktion mit dem Rahmen auch die Kippbewegung der Schwelle verzerrt wird. Bei Betrachtung der Bewegungen des DGS und der Schwelle in der y-z-Ebene in Abb. 6.30 für diesen Interaktionszeitraum, ist die Verzerrung der Bewegung des DGS zwar klar ersichtlich, jene der Schwellenbewegung ist jedoch nicht sofort erkennbar. Vergleicht man allerdings die Schwellenbewegung mit jener in Abb. 6.31b, für die die Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT ermittelt werden kann, so ist erkennbar, dass sich die Krümmung der Kurven stark unterscheidet. In jenen Fällen, in denen ein Rotationszentrum auf Basis der Amplituden der FFT ermittelt werden kann, weisen die Kurven sowohl für die Auf- als auch für die Abwärtsbewegung annähernd dieselbe Krümmung auf. Wird diese Bewegung durch Interaktion mit dem Rahmen verzerrt, so weisen Auf- und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abwärtsbewegung Krümmungen unterschiedlichen Vorzeichens auf und es entsteht die bauchige Figur aus Abb. 6.30b.

Die hier beschriebenen Effekte können auch auf die verschiedenen Frequenzvariationsraten beim Frequenzanstieg und beim Frequenzabfall (der Frequenzanstieg dauerte circa 40 s und der Frequenzabfall bei gleicher Frequenzdifferenz circa 35 s) zurückzuführen sein. Es ist daher notwendig, die geäußerten Vermutungen anhand einer Frequenzrampe mit gleich lang andauerndem Frequenzanstieg und Frequenzabfall zu überprüfen.

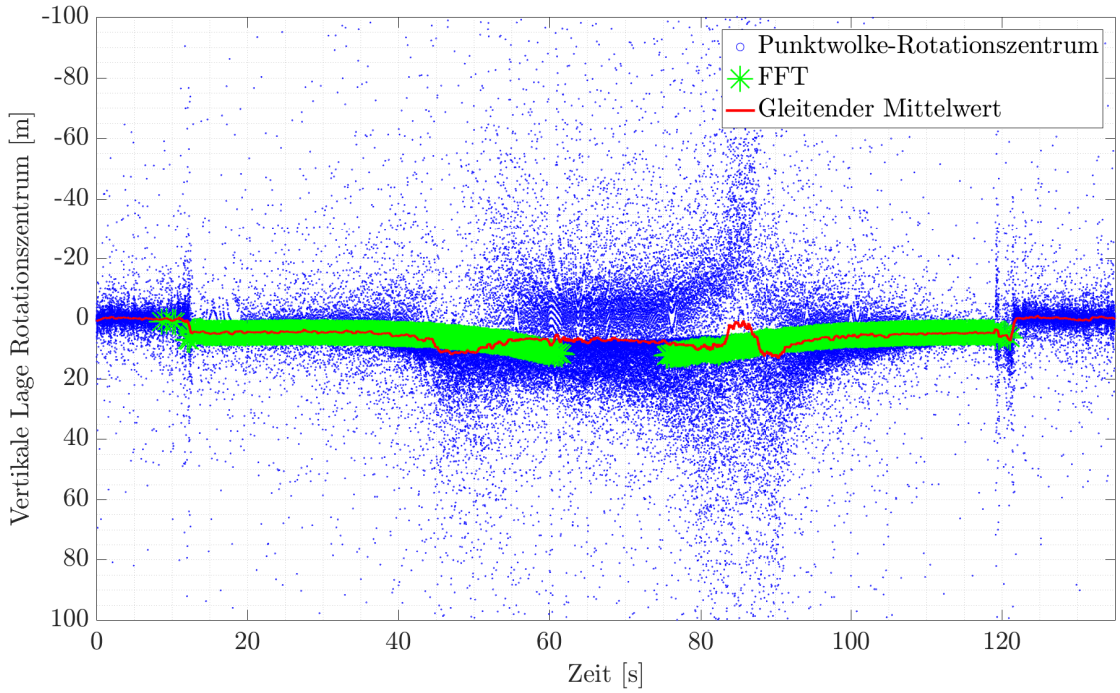


Abb. 6.28: Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Frequenzrampe

Phasendifferenz der Horizontalschwingungen

Die in Abschnitt 5.2.5 beschriebene, lineare Form der Phasendifferenz der Horizontalschwingungen entsteht durch die kontinuierliche Verkürzung der Distanz zwischen Schwingungsemittent (DGS) und Schwingungsempfänger (Schwelle). Falls die Distanz zwischen DGS und Schwelle konstant bleibt, wie dies beim Versuch der Frequenzvariation am Stand der Fall war, sollte auch die Phasendifferenz zwischen DGS und Schwelle konstant bleiben. Dieses Verhalten kann anhand Abb. 6.32 bestätigt werden. Zusätzlich kann in Abb. 6.32 eine Zunahme der Phasendifferenz mit steigender Erregerfrequenz festgestellt werden. Bei Betrachtung der Phasendifferenzen zwischen der Unwuchterregung und den Horizontalschwingungen an der Oberfläche im Nahfeld (siehe Abb. 6.33) lässt sich erkennen, dass die Phasendifferenz direkt von der Errgerfrequenz abhängig ist. Bei Konstanthaltung der Erregerfrequenz (im Zeitraum von 60 – 80 s) ist die Phasendifferenz ebenfalls konstant und bei einem linearen Anstieg beziehungsweise Abfall der Frequenz nimmt auch die Phasendifferenz linear ab beziehungsweise zu. Von Rayleighwellen ist bekannt, dass deren Wellenlänge von der Frequenz abhängig ist [73]; dies kann den Effekt aus Abb. 6.33 erklären.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

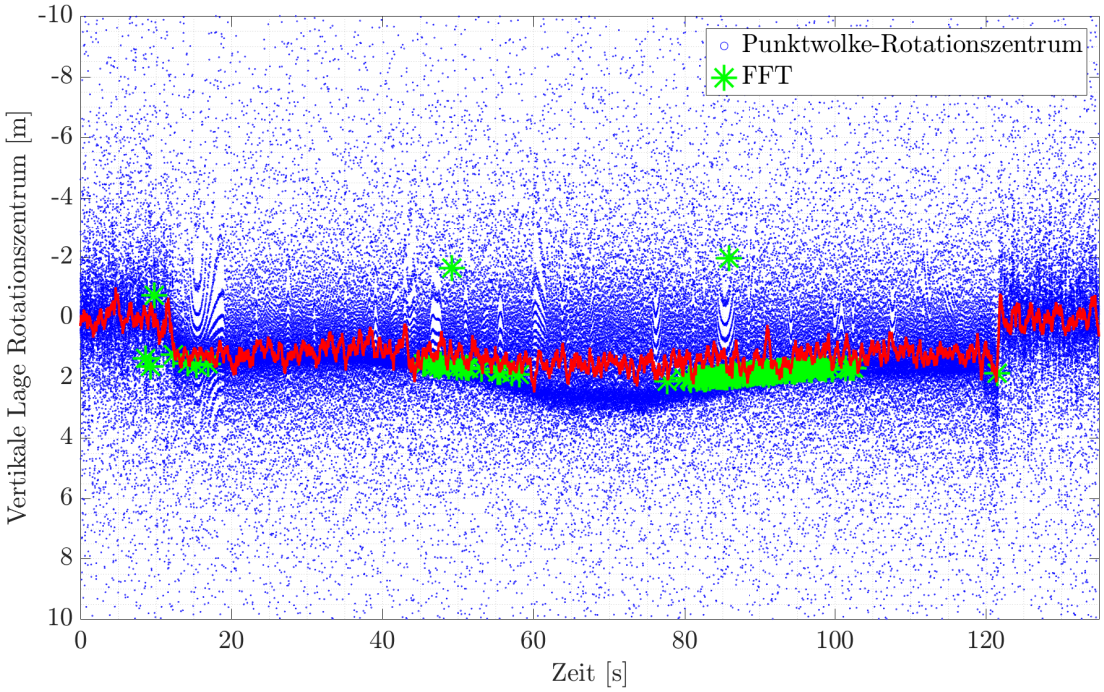
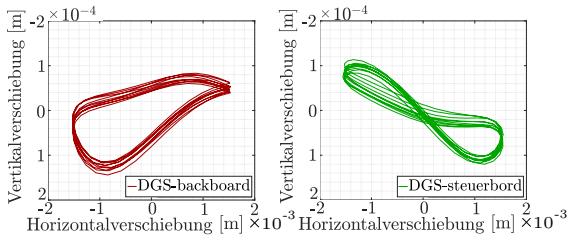
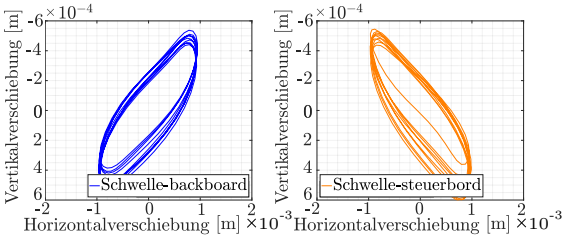


Abb. 6.29: Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Frequenzrampe

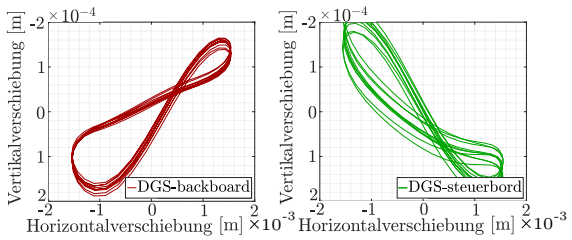


(a) Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 69,829 – 70,142 s der Frequenzrampe

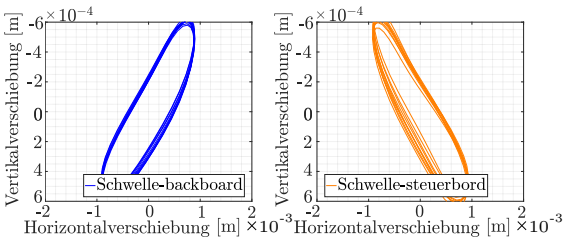


(b) Darstellung der Schwellen-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 69,829 – 70,142 s der Frequenzrampe

Abb. 6.30: Vergleich der DGS-Bewegung und der Schwellenbewegung in der y-z-Ebene für eine Erregerfrequenz von 31,9 Hz



(a) Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 46,888 – 47,224 s der Frequenzrampe



(b) Darstellung der Schwellen-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 46,888 – 47,224 s der Frequenzrampe

Abb. 6.31: Vergleich der DGS-Bewegung und der Schwellenbewegung in der y-z-Ebene für eine Erregerfrequenz von 29,4 Hz

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

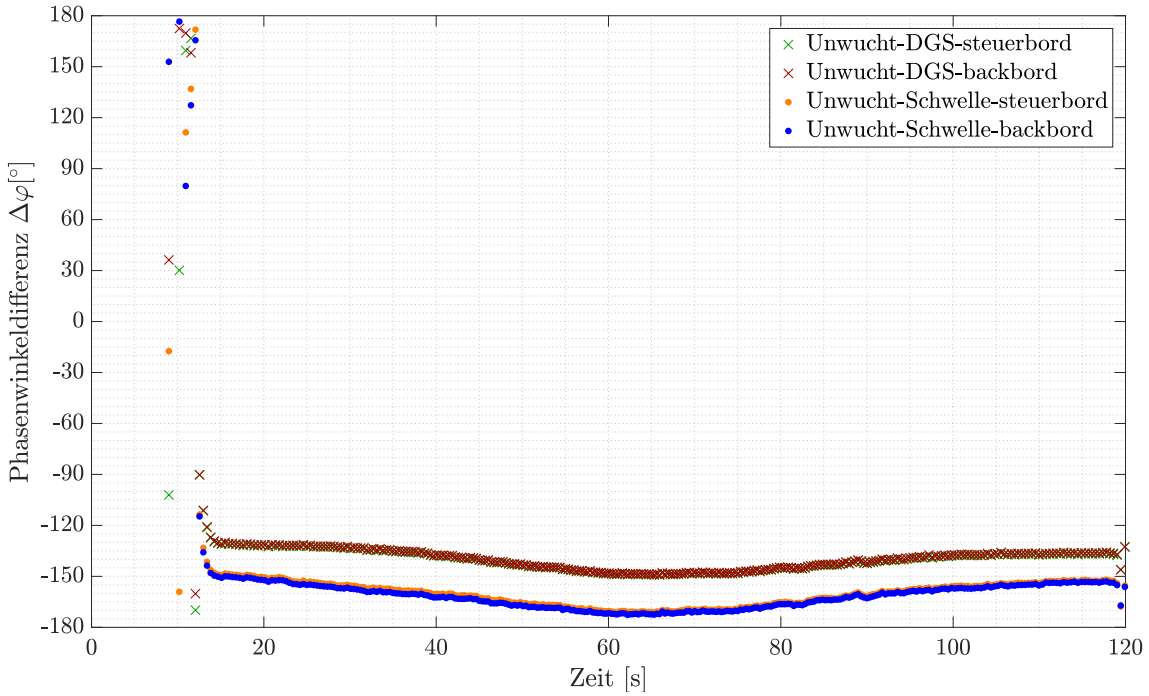


Abb. 6.32: Differenz der Phasenwinkel zwischen der Unwuchterregung und den Horizontalschwingungen des DGS beziehungsweise der Schwelle während der Frequenzvariation

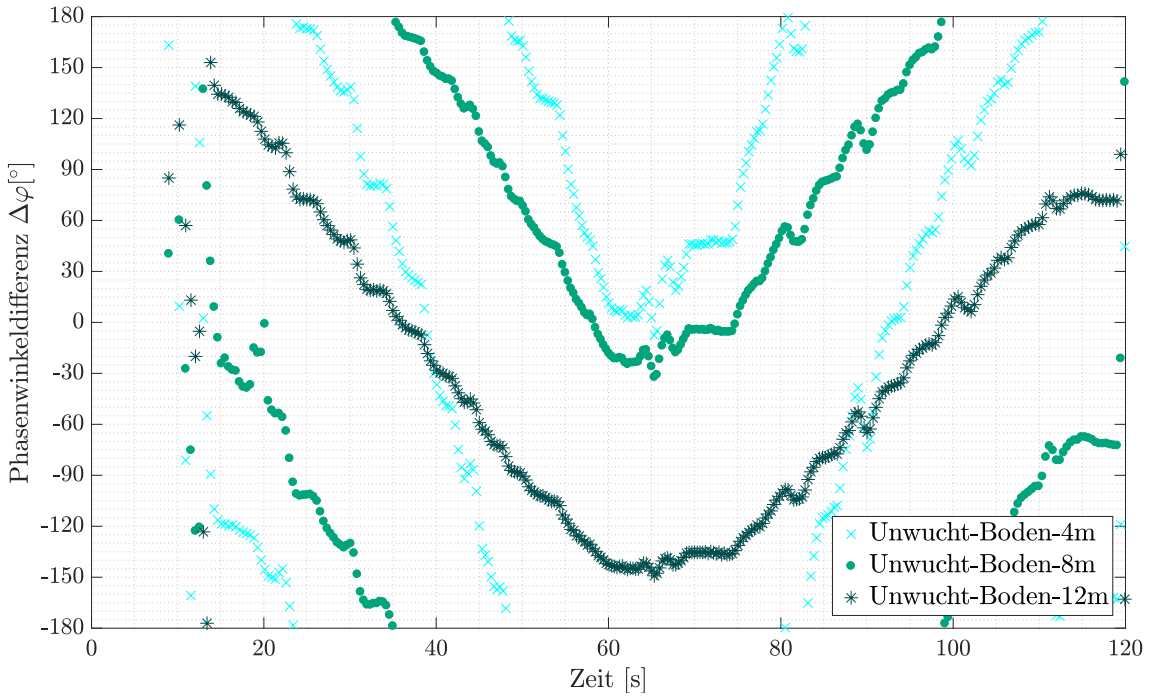


Abb. 6.33: Differenz der Phasenwinkel zwischen der Unwuchterregung und den Horizontalschwingungen an der Oberfläche im Nahfeld während der Frequenzvariation

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Der dynamische Gleisstabilisator (DGS) von *Plasser & Theurer* wird international vorrangig bei der Instandhaltung von Schottergleisen eingesetzt [16, 40, 42, 44, 71]. Dabei wird er als Teil des Prozesses der Gleislagekorrektur mit Stopfmaschinen in Form einer Komponente des Mechanisierten Durcharbeitungszugs (MDZ) genutzt, was wiederum die häufigste Form der Routine-Instandhaltung beim Auftreten von Gleislagefehlern darstellt. Die Dauerhaftigkeit dieser Korrekturen wird, neben der Art und Qualität der Einzelkomponenten der Gleiskonstruktion (Schienen, Schwellen, Schotter, Untergrund) und der Art der späteren Verkehrsbelastung, potentiell vom Verdichtungszustand des Schotters beeinflusst [41]. Bisherige Forschungsarbeiten lieferten dazu teilweise widersprüchliche Ergebnisse. In [41, 70] wird eine positive Auswirkung der Schotterverdichtung beschrieben, während in [56] beispielsweise keine Auswirkungen der Schotterverdichtung auf die Dauerhaftigkeit der Gleislagekorrekturen festgestellt werden konnten. Der Einfluss der Schotterverdichtung auf die Dauerhaftigkeit von Gleislagekorrekturen ist dementsprechend noch nicht vollständig geklärt und bedarf weiterer Forschung.

Die Auswirkungen der Schotterverdichtung auf den Querverschiebewiderstand des Gleises sind hingegen belegt [31, 33, 41, 71]. Der Widerstand gegen Gleisverwerfungen wird im Zuge der Schotterverdichtung erhöht, wodurch Langsamfahrstellen im Anschluss an Gleislagekorrekturen mit dem MDZ vermieden werden können. Der Querverschiebewiderstand wird zumeist versuchstechnisch in Form eines statischen Querverschiebewiderstands einer Einzelschwelle ermittelt. Diese Widerstandsgröße setzt sich aus einem Reibungswiderstand an der Schwellenflanke (Schotter im Zwischenfach) und der Schwellensohle, sowie einem passiven Erddruck an der Schwellenstirn (Vorkopfwiderstand, Schotter der Schulter) zusammen. Der Beitrag der einzelnen Teilwiderstände wird dabei in verschiedenen Forschungsarbeiten [31, 42, 47, 71] sehr unterschiedlich beurteilt (siehe Tab. 2.3).

Neben dem Querverschiebewiderstand existiert mit der vertikalen Steifigkeit der Gleiskonstruktion noch eine andere Größe, die zur Beurteilung des Verdichtungszustands des Schotters herangezogen werden kann. Neben punktuellen Versuchen sind hier insbesondere kontinuierliche Methoden zur Messung der vertikalen Steifigkeit der Gleiskonstruktion zu nennen. *Berggren* stellt in seiner Dissertation [8] ein Messfahrzeug vor, dessen Funktionsprinzip jenem des DGS ähnelt, allerdings eine vertikale, anstelle einer horizontalen Kraftanregung verwendet. Mit diesem Messfahrzeug können zwar Untergrundbereiche mit unzureichenden Steifigkeitseigenschaften identifiziert werden, der Verwitterungs- beziehungsweise Verdichtungszustand des Schotters kann damit jedoch nicht erfasst werden. Da die arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle mit dynamischen Walzen im Erdbau bereits Aussagen zur Verteilung der Steifigkeitsverhältnisse des zu verdichtenden Materials ermöglicht, wurde im Zuge dieser Diplomarbeit untersucht, ob auch das Bewegungsverhalten des DGS vom Verdichtungszustand des Schotters abhängig und somit das Potential zur arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle mit dem DGS vorhanden ist.

Hierfür wurde am 01.03.2019 ein von der *TU Wien* in Kooperation mit *Plasser & Theurer* konzipiertes Versuchs- und Messkonzept in Linz auf einem Nebengleis der *ÖBB* umgesetzt. Dies

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

beinhaltete Beschleunigungsmessungen am DGS, auf der Schwelle und im Nahfeld der Versuchsstrecke, die es ermöglichten, Änderungen im Bewegungsverhalten bei aufeinanderfolgenden Messfahrten zu identifizieren. Wie im Versuchskonzept vorgesehen, wurde der Verdichtungszustand des Schotters zwischen den Messfahrten variiert. Dies erfolgte nach der ersten Messfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands durch eine Auflockerung des Schotters mit einem Stopfvorgang (ohne nachfolgende Stabilisierung) und im Falle der anderen Messfahrten durch die jeweils vorhergehende Verdichtung mit dem DGS. Zusätzlich lieferte eine Variation der Erregerfrequenz über einer instrumentierten Schwelle am Stand Aufschlüsse über die Frequenzabhängigkeit des Maschine-Boden-Interaktionssystems.

Die anhand dieser Versuche gewonnenen Messdaten wurden für die spätere Analyse mittels MATLAB aufbereitet. Für die Analyse waren, neben den gemessenen Beschleunigungsdaten auch Geschwindigkeits- und Verschiebungsinformationen erforderlich, weshalb es notwendig war, die gemessenen Beschleunigungen numerisch aufzuintegrieren. Zu diesem Zweck wurde die numerische Integration mit Trapzregel verwendet. Die notwendige Entfernung der tiefen Frequenzen vor der numerischen Integration erfolgte, nach einem Vergleich verschiedener infrage kommender digitaler Filter, mit einem Butterworth-Filter 6. Ordnung. Die Grenzfrequenz für diesen Filter wurde nach einer Konvergenzbetrachtung anhand des Signals der ersten Messfahrt mit 9 Hz gewählt.

Eine Analyse der Daten im Frequenzbereich erfolgte in der vorliegenden Arbeit durch die Verwendung eines FFT-Algorithmus. Vor der Anwendung dieses Algorithmus wurde das Signal aufbereitet, um die Genauigkeit der erhaltenen Ergebnisse zu erhöhen. Das Hintereinanderkopieren eines zuvor auf eine ganzzahlige Anzahl von Schwingung gekürzten Signals zeigte dabei die besten Resultate. War zusätzlich zur virtuellen Amplitude der FFT auch der Phasenwinkel von Interesse, wurde auf ein alleiniges Zero-Padding zum Erreichen der benötigten Frequenzauflösung zurückgegriffen.

Anhand der aufbereiteten Messdaten erfolgte in einem ersten Schritt eine Analyse der Anregungsfrequenz während der einzelnen Versuchsfahrten. Diese ergab, dass die Anregungsfrequenz mit der zum Versuchszeitpunkt eingesetzten Frequenzsteuerung während einer Versuchsfahrt nicht konstant gehalten wird und bis zu 2 Hz vom eingestellten Wert abweicht. Da konstante Prozessparameter, zu denen auch die Erregerfrequenz zählt, eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung des DGS zur Verdichtungskontrolle darstellen, sollte die Frequenzsteuerung des DGS für zukünftige Forschungstätigkeiten optimiert werden. Dass ein wesentlicher Einfluss der Erregerfrequenz auf das Bewegungsverhalten des DGS und in etwas abgeschwächter Form auch auf die Schwelle besteht, konnte anhand der Analyse der Auswertung der Frequenzrampe gezeigt werden. Ab einer Frequenz von 29 Hz werden die Vertikalbeschleunigungen des DGS, aufgrund der starren Verbindung der hydraulischen Auflastzylinder zwischen DGS und Maschinenrahmen, durch die Interaktion mit dem Rahmen beeinflusst. Diese Beeinflussung scheint von der Verdichtung des Schotters abhängig zu sein und wirkt sich ab einer Frequenz von 31 Hz – 32 Hz signifikant auf das Bewegungsverhalten des DGS aus. Damit Änderungen im Bewegungsverhalten des DGS unzweifelhaft auf Änderungen der Schotter- oder Untergrundsteifigkeiten zurückgeführt werden können, ist es notwendig, die starre Verbindung zwischen DGS und Maschinenrahmen durch eine dynamisch entkoppelte Konstruktion zu ersetzen. Dies hätte zusätzlich den Vorteil, dass die gesamte, durch die Aggregate erzeugte Energie, für die Verdichtung des Schotters zur Verfügung steht und nicht ein Teil dieser Energie durch die Schwingungserregung des Rahmens verloren geht.

Neben den beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten des DGS konnte anhand der Messdaten ein verdichtungsabhängiges Verhalten des DGS und der Schwelle identifiziert werden. Die Analyse des Frequenzspektrums der verschiedenen Messfahrten ergab zunächst, dass keine größeren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Veränderungen im Frequenzspektrum während der Messfahrten auftreten. Es ändert sich lediglich die Größe der Amplituden der einzelnen Frequenzanteile, wobei die Vertikalbewegung des DGS am stärksten betroffen ist. Die Auswertung der auftretenden Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden bestätigte dieses Ergebnis. Hier wiesen die Amplituden des DGS und der Schwelle in Horizontalrichtung (y-Richtung) die stärkste Abhängigkeit vom Verdichtungszustand des Schotters auf. So ergab sich für die Horizontalverschiebungsamplituden der Schwelle ein Maximum nach dem Stopfen (1,033 mm) und ein Minimum bei der ersten Messfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (0,864 mm). Die Ergebnisse entsprechen damit tendenziell den bekannten Ergebnissen von statischen Querverschiebewiderstandsmessungen von Einzelschwellen. Die Messung des statischen Querverschiebewiderstands liefert in der Regel vor dem Stopfen einen größeren Widerstand als nach dem Stopfen, wobei dieser durch die Anwendung des DGS erneut erhöht wird [41, 71, 76]. Ein höherer Querverschiebewiderstand wäre somit gleichbedeutend zu kleineren Verschiebungsamplituden der Schwelle. Ebenfalls verdichtungsabhängig scheinen die Vertikalbeschleunigungen des DGS zu sein, wobei im Zuge der Versuche dichter Schotter zu höheren Vertikalbeschleunigungen am DGS führte. Auch hier wurde ein Maximum für die mittleren Vertikalbeschleunigungen des DGS bei der ersten Messfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (12,91 m/s^2) und ein Minimum nach dem Stopfen (10,62 m/s^2) festgestellt. Die Vertikalbeschleunigung am DGS stellt somit ein mögliches Maß für die im Zuge der Schotterverdichtung dissipierte Energie dar.

Im Gegensatz zur Auswertung der Beschleunigungs- und Verschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle ergab die Auswertung der Schwingschnellen keine maßgebliche Auswirkung der Schotterverdichtung auf die resultierende Schwingschnelle der Erschütterungssensoren im Nahbereich. Zwar ließ sich für den, dem DGS am nächsten gelegenen, Sensor eine geringfügige Reduktion der Erschütterungen nach dem Stopfen feststellen, insgesamt ergaben die Messfahrten allerdings ein nahezu gleichbleibendes Niveau für die resultierende Schwingschnelle. Der Verdichtungszustand des Schotters scheint sich damit kaum auf die durch den DGS hervorgerufenen Erschütterungen der Umgebung auszuwirken.

Die Auswertung der vertikalen Lage des Rotationszentrums des DGS zeigte vorrangig eine starke Abhängigkeit von der Erregerfrequenz. Bei den gegebenen Verhältnissen lag das dynamische Rotationszentrum für Erregerfrequenzen größer als 33 Hz oberhalb der Messebene und für Erregerfrequenzen kleiner als 33 Hz unterhalb der Messebene. Die starke Frequenzabhängigkeit dürfte zumindest teilweise durch die Interaktion mit dem Maschinenrahmen in diesem Frequenzbereich hervorgerufen werden. Die Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der FFT erwies sich, für die Stellen an denen diese aufgrund der Verletzung des Phasenkriteriums nicht durchgeführt werden konnte, als Indikator für auffällige Änderungen des Bewegungsverhaltens des DGS. Die Darstellung der DGS-Bewegungen in der y-z-Ebene zeigt für die dermaßen identifizierten Zeiträume eine signifikante Überlagerung der DGS-Bewegung mit der vertikalen Schwingungsantwort aus dem Maschinenrahmen. Die Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene weist überdies darauf hin, dass die dort dargestellte Figur, bei gleicher Erregerfrequenz, von der Verdichtung abhängig ist (siehe Veränderung von Abb. 6.17a über Abb. 6.20a hin zu Abb. 6.21a) und somit einen potentiellen Wert zur Verdichtungskontrolle (ähnlich jenem in [57] beschriebenen Wert) liefern könnte. Der vertikale Abstand des Rotationszentrums der Schwelle erwies sich ebenfalls als verdichtungsabhängiger Kennwert. Dieser konnte auf Basis der Amplituden der FFT ermittelt werden und betrug während der ersten Messfahrt 2,0 m. Für die darauffolgende Messfahrt nach dem Stopfen konnte der Abstand nicht exakt ermittelt werden (ist aber bei Betrachtung der Punktwolke augenscheinlich größer und wurde auf rund 3,0 m geschätzt). Während der dritten Messfahrt verminderte sich der vertikale Abstand des dynamischen Rotationszentrums zur Messebene erneut auf 2,20 m. Je dichter der Schotter gelagert ist, desto geringer scheint der vertikale Abstand des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle zur Messebene zu sein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zusätzlich zu den genannten verdichtungsabhängigen Größen besteht die Möglichkeit, die Periodendauer der durch den DGS emittierten Transversalwelle des Gleisrostes zu bestimmen. Bei zusätzlicher Kenntnis von Ortsangaben durch ein GPS-Modul am DGS, könnte die Darstellung in Abb. 5.20 auch in Abhängigkeit dieser Ortskoordinate (z.B. als Abstand von der Schwelle) anstelle der Zeitkoordinate erfolgen. Damit würde anstelle der Periodendauer die Wellenlänge gemessen und somit wäre die Errechnung der Wellengeschwindigkeit möglich. Die Wellengeschwindigkeit einer Transversalwelle mit einer definierten Frequenz sollte wiederum verdichtungsabhängig sein und stellt somit eine potentielle Möglichkeit der Verdichtungskontrolle dar, welche in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden soll.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen scheint die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle mit dem DGS, aufgrund des in dieser Arbeit identifizierten verdichtungsabhängigen Bewegungsverhaltens des DGS und der Schwelle, möglich. Hierfür müssen konstante Prozessparameter gewährleistet und der DGS dynamisch vom Maschinenrahmen entkoppelt werden. Für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Messmethode scheint zusätzlich die Entwicklung einer berührungslosen Messmethode der Schwellenbewegung unumgänglich, da die im Rahmen dieses Versuchs eingesetzte ortsfeste Messtechnik nicht für eine kontinuierliche Verdichtungskontrolle geeignet ist. Des Weiteren sollte auch das zweite Stabilisationsaggregat messtechnisch instrumentiert werden, um weitere Erkenntnisse über das Maschine-Boden-Interaktionssystem zu erlangen.

Die Entwicklung eines Systems zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle des Gleisschotters sollte durch die Festlegung eines Kennwerts begleitet werden, der im Zuge der Verdichtungsarbeiten erreicht werden soll. Dafür kann zum Beispiel ein Kennwert, der über einen Standardversuch ermittelt wird (wie der dynamische Lastplattenversuch für die Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd}), oder ein bodenphysikalischer Kennwert zweckmäßig sein. Die einzige, derzeit im Bahnbau übliche Anforderung an die Schotterverdichtung wird über den statischen Querverschiebwiderstand einer Einzelschwelle definiert (siehe [48]). Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Dauerhaftigkeit von Gleislagekorrekturen bei Erreichung eines gewissen Spannungszustands im Schotteroberbau günstig beeinflusst werden kann [28]. Der im Schotter vorherrschende Spannungszustand könnte mit der Steifigkeit des Schotters korrelieren. Diese könnte über einen bodenmechanischen Standardversuch ermittelt werden, der in weiterer Folge mit einem Verdichtungskennwert zur kontinuierlichen dynamischen Verdichtungskontrolle korreliert werden könnte. Eine andere Möglichkeit die Steifigkeit des Schotters zu ermitteln besteht darin die Steifigkeit direkt anhand eines, auf Basis des Bewegungsverhaltens des DGS ermittelten, Kennwerts zu definieren. Dieser Kennwert müsste anhand eines (boden-)mechanischen Modells abgeleitet werden.

Gelingt es ein derartiges (boden-)mechanisches Modell zur Reproduktion des Bewegungsverhaltens zu entwickeln, wären damit auch die Grundlagen für eine Steifigkeitsbeurteilung des Gleises in Horizontal- und Vertikalrichtung geschaffen. Die Horizontalsteifigkeit könnte Aufschluss über die Schottersteifigkeit geben, während die Vertikalsteifigkeit analog zu [8] Aufschlüsse über die Untergrundbeschaffenheit ermöglichen würde. Die Kenntnis dieser Steifigkeitseigenschaften könnte wesentlich zur Verbesserung der Planbarkeit von Gleisinstandhaltungsmaßnahmen beitragen und somit in Verbindung mit den nach [7] im Zuge des Stopfens gewonnen Informationen zum Verwitterungszustand des Schotters, die Grundlagen für ein prognosebasiertes Instandhaltungsmodell bereitstellen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildungsverzeichnis

2.1 Gegenüberstellung der linearen Verschleißrate der Schiene mit der nichtlinearen Gleisverschlechterungsrate . . . 12
a Lineare Verschleißrate der Schiene, adaptiert nach [41] . . . 12
b Nichtlineare Gleisverschlechterungsrate, adaptiert nach [40] . . . 12
2.2 Parameter zur Definition der Gleisgeometrie nach [53] . . . 15
a Definition der Spurweite und der Überhöhung im Bestandsgleis, adaptiert nach [53] . . . 15
b Definition der Längshöhe und der Richtung im Bestandsgleis, adaptiert nach [53] . . . 15
2.3 Stopfaggregat zur Asynchron-Gleichdruck-Stopfung [6] . . . 17
2.4 Vergleich der Sieblinie der Lieferkörnung K1 (ÖBB) [34] mit der von Indraratna et al. empfohlenen Sieblinie [28] . . . 21
2.5 Zusammenhang zwischen aufgebrachter Hebung und daraus resultierender Setzung, adaptiert nach [40] . . . 23
2.6 Darstellung der Widerstandsgrößen des Gleises anhand von Federn, adaptiert nach [33] . . . 24
2.7 Vergleich des Querverschiebewiderstands von belasteten Schwellen in Abhängigkeit vom Querverschiebeweg bei der Verschiebung von einer, drei und fünf Schwellen, adaptiert nach [35] . . . 26
2.8 Ermittlung des statischen Querverschiebewiderstands einer Einzelschwelle anhand eines Kraft-Verschiebungsdiagramms, adaptiert nach [38] . . . 27
2.9 Funktionsprinzip der Unwuchtaggregate des DGS . . . 30
a Die durch die Unwuchten des DGS erzeugten Kräfte heben sich in Vertikalrichtung auf . . . 30
b Die durch die Unwuchten des DGS erzeugten Kräfte addieren sich in Horizontalrichtung . . . 30
2.10 Durch die Konstruktion der Unwuchtaggregate entstehende Kippschwingung . . . 30
2.11 Darstellung des DGS und der wichtigsten Komponenten, adaptiert nach [5] . . . 31
2.12 Darstellung des Zwischenfachverdichters, adaptiert nach [45] . . . 32
2.13 Gegenüberstellung der Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den DGS und den Zwischenfachverdichter (in % des Widerstands direkt nach dem Stopfvorgang), adaptiert nach [71] . . . 33
2.14 Möglichkeiten zur Beurteilung der vertikalen Steifigkeit . . . 35
a Last-Verformungsverhalten eines vertikalen, quasistatischen Belastungsversuchs einer Gleiskonstruktion, adaptiert nach [8] . . . 35
b Amplitude der vertikalen, komplexen Übertragungsfunktion zwischen Anregung (Kraft) und Reaktion (Verschiebung) in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz, adaptiert nach [8] . . . 35
2.15 Beispiele für die punktuelle und flächendeckende Ermittlung der vertikalen Steifigkeit . . . 38
a Die dynamische Lastplatte mit dem Leichten Fallgewichtsgerät [2] . . . 38
b Messprinzip des RSMV [8] . . . 38

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.1 Luftbildaufnahme des Testgleises (gelb markiert) mit Lage des Messquerschnitts, adaptiert nach [20] . . . 41
3.2 Aufnahmen des Versuchsgleises und der Versuchsmaschine . . . 42
a Versuchsgleis mit Versuchsmaschine E3-4x und detaillierter Darstellung von Stopf- und Stabilisationsaggregat . . . 42
b Versuchsgleis mit Schwellensensorik . . . 42
3.3 Übersicht über den Versuchsaufbau und die messtechnische Ausrüstung . . . 43
3.4 Im Rahmen des Versuchs verwendete Sensoren . . . 43
a Näherungssensor zur Bestimmung der Position der Unwucht . . . 43
b ± 100 g Beschleunigungssensoren (DGS, Schwelle, Schotter) . . . 43
c ± 2 g Beschleunigungssensoren (Oberfläche) . . . 43
3.5 Übersicht über die messtechnische Ausrüstung am DGS und der Schwelle . . . 44
3.6 Übersicht über die messtechnische Ausrüstung zur Messung der Erschütterungen im Nahbereich . . . 44

4.1 Beispiel zur numerischen Integration mit der Trapezregel . . . 47
4.2 Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich . . . 47
4.3 Auswirkungen eines hochfrequenten Rauschens ($f_1 = 100\,\text{Hz}, \varphi_1 = 0,20 \cdot \pi$ und ($f_2 = 300\,\text{Hz}, \varphi_2 = 0,10 \cdot \pi$) auf das Ergebnis der numerischen Integration mit der Trapezregel . . . 48
4.4 Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich bei einem Messignal mit hochfrequenter Störung 49
4.5 Testsignal mit niederfrequentem Rauschen . . . 50
4.6 Auswirkungen eines niederfrequenten Rauschens ($f_1 = 0{,}001\,\text{Hz}, \varphi_1 = 0,25 \cdot \pi$ und ($f_2 = 0{,}005\,\text{Hz}, \varphi_2 = 0,125 \cdot \pi$) auf das Ergebnis der numerischen Integration mit der Trapezregel . . . 50
4.7 Vergleich der numerischen Integration mit der Trapezregel und der numerischen Integration im Frequenzbereich bei einem Messignal mit niederfrequenter Störung 51
4.8 Einteilung der Filter nach den gefilterten Frequenzen . . . 52
4.9 Darstellung des Testsignals zur Filtertestung . . . 54
a Amplitude des Testsignals im Frequenzbereich . . . 54
b Phasenwinkel des Testsignals im Frequenzbereich . . . 54
4.10 Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines gleitenden Mittelwertfilters mit einer Blocklänge von 0,1 s . . . 54
4.11 Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines FIR-Filters mit einer Sperrfrequenz von 1 Hz und einer Durchlassfrequenz von 10 Hz . . . 55
4.12 Amplituden- und Phasenfrequenzgang eines Butterworth-Filters 6. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz . . . 56
4.13 FFT des Testsignals aus Gleichung (4.4) für verschieden Zeitfenster . . . 56
a FFT des Testsignals aus Gleichung (4.4) . . . 56
b FFT im Bereich von 300 Hz des Testsignals aus Gleichung (4.4) . . . 56
4.14 Für die FFT aufbereitete Testsignale . . . 58
a FFT des gekürzten Testsignals und Teilstück für die Erweiterung des Signals durch wiederholtes Kopieren . . . 58
b Mit Hanning-Fenster überlagertes Testsignal . . . 58
4.15 Spektrum der aufbereitenden Signale im Vergleich mit dem Spektrum des unbearbeiteten Signals . . . 58
4.16 Ebene Darstellung des DGS in der dominanten Bewegungsebene . . . 60

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.17 Ermittlung des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Geschwindigkeitsvektoren . . . 62
4.18 Ermittlung des dynamischen Rotationszentrums auf Basis von Verschiebungen . 63

5.1 Darstellung der Beschleunigungssignale $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$ am DGS im Frequenzbereich (Erregerfrequenz $f = 33\,\text{Hz}$) . . . 66
5.2 Veränderung des Testsignals beim Übergang auf verschiedene Testfrequenzen . . 67
a Darstellung des Mittelwerts und der Standardabweichung der Differenzen beim Übergang auf verschiedene Grenzfrequenzen für den steuerbordseitigen Beschleunigungssensor in y-Richtung . . . 67
b Prozentuelle Veränderung des Mittelwerts und der Standardabweichung der Differenzen im Bezug auf den ersten Übergang von 1 Hz auf 2 Hz beim Übergang auf verschiedene Grenzfrequenzen für den steuerbordseitigen Beschleunigungssensor in y-Richtung . . . 67
5.3 Gemessene Horizontalbeschleunigungen und daraus berrechnete Horizontalgeschwindigkeiten beziehungsweise -verschiebungen des steuerbordseitigen DGS-Sensors . . . 68
5.4 Zusammengeführtes Signal der zwei Positionssensoren. Eingezeichnet sind die Messpunkte, wobei die Punkte die den Beginn einer Schwingung darstellen, rot hervorgehoben sind. . . . 69
5.5 Verlauf der Anregungsfrequenz während der ersten Messfahrt (Ausgangssituation) 70
5.6 Ermittlung der Amplitude mittels Einhüllenden . . . 71
5.7 Horizontalbeschleunigungsamplituden $\ddot{y}$ des DGS und der Schwelle für die erste Messfahrt . . . 72
5.8 Horizontalverschiebungsamplituden y des DGS und der Schwelle für die erste Messfahrt . . . 73
5.9 Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalbeschleunigungsamplituden $\ddot{y}$ des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) . . . 74
5.10 Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalverschiebungsamplituden y des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) . . . 75
5.11 Darstellung der Verschiebungsgrößen im Zeitraum von zehn Unwuchtumdrehungen (bei ~90,3 s – 90,6 s) in der y-z-Ebene (Blickrichtung in Arbeitsrichtung) . . . 76
5.12 Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten . . . 76
a Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums . . . 76
b Horizontale Lage des dynamischen Rotationszentrums . . . 76
5.13 Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten . . . 77
a Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums . . . 77
b Horizontale Lage des dynamischen Rotationszentrums . . . 77
5.14 Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen . . . 77
5.15 Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen . . . 78
5.16 Lage des dynamischen Rotationszentrums der Schwelle für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis der Ergebnisse der FFT (Geschwindigkeitsdaten) . . . 78
a Ermittlung der Amplitude für die Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der Ergebnisse der FFT . . . 78

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

b Ermittlung des Phasenwinkels für die Berechnung des Rotationszentrums auf Basis der Ergebnisse der FFT 78
5.17 Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Verschiebungen mit Ergebnissen der Berechnung unter Zugrundelegung der Betrachtung im Frequenzbereich 79
5.18 Vertikale Lage des dynamischen Rotationszentrums des DGS für die erste Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) auf Basis von Geschwindigkeiten mit Ergebnissen der Berechnung unter Zugrundelegung der Betrachtung im Frequenzbereich . . . 80
5.19 Differenz zwischen den Phasenwinkeln der Unwuchterregung und der Horizontalschwingungen des DGS beziehungsweise der Schwelle 81
5.20 Darstellung des zeitlichen Abstands zwischen Punkten gleicher Phasendifferenz als Periodendauer einer Transversalwellenbewegung des Gleisrostes (Transversalwellenlaufzeit) 82
5.21 Darstellung des zeitlichen Abstands zwischen Punkten gleicher Phasendifferenz als Periodendauer einer oberflächlichen Transversalwellenbewegung des Untergrunds (Transversalwellenlaufzeit) 82

6.1 Verlauf der Anregungsfrequenz während der zweiten Messfahrt (erste Fahrt nach Stopfvorgang) 84
6.2 Verlauf der Anregungsfrequenz während der dritten Messfahrt (zweite Fahrt nach Stopfvorgang) 84
6.3 Verlauf der Anregungsfrequenz während der vierten Messfahrt (erste Messfahrt nach der Frequenzrampe über der instrumentierten Schwelle) 85
6.4 Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der DGS-Sensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands 86
6.5 Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Schwellen-Sensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands 87
6.6 Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Erschütterungssensoren bei der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands 88
6.7 Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der DGS-Sensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen 88
6.8 Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Schwellen-Sensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent, grau) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen 89
6.9 Gegenüberstellung der Frequenzspektren der Beschleunigungssignale der Erschütterungssensoren zwischen der ersten Überfahrt zur Feststellung des Ist-Zustands (transparent) und der ersten Überfahrt nach dem Stopfen 89
6.10 Veranschaulichung der untersuchten Parameter der Bewegungssgrößen am Beispiel des Horizontalbeschleunigungssignals 91
6.11 Ergebnisse der Beschleunigungssensoren am DGS für die dritte Messfahrt (zweite Fahrt nach Stopfen) in x-Richtung 92
6.12 Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die erste Überfahrt des DGS (Feststellung des Ist-Zustands) und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen (BEKL) bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des Erschütterungsspektrums 97

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6.13 Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die erste Überfahrt des DGS nach dem Stopfen und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des jeweiligen Erschütterungsspektrums 97
6.14 Resultierende Schwingschnellen der Erschütterungssensoren für die zweite Überfahrt des DGS nach dem Stopfen und maximal zulässige resultierende Schwingschnelle für verschiedene Bauwerksempfindlichkeitsklassen bei der mittleren maßgebenden Frequenz aus der FFT-Analyse des jeweiligen Erschütterungsspektrums 98
6.15 Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) 99
6.16 Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der ersten Messfahrt (Feststellung des Ist-Zustands) . . . 100
6.17 Vergleich einer DGS-Bewegung in der y-z-Ebene für die eine Berechnung der Lage des dynamischen Rotationszentrums auf Basis der FFT-Amplituden möglich ist **(a)** und einer DGS-Bewegung in der y-z-Ebene für die die Bedingung der Phasendifferenz nicht erfüllt ist **(b)** 101
a Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 43,06 – 43,36 s der ersten Überfahrt (Feststellung des Ist-Zustands). Eine Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT ist möglich. 101
b Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 110,704 – 110,995 s der ersten Überfahrt (Feststellung des Ist-Zustands). Eine Ermittlung der Lage des Rotationszentrums auf Basis der Amplituden der FFT ist nicht möglich. 101
6.18 Entwicklung der Rotationszentren des DGS und der Schwelle während der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen) 102
a Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen) 102
b Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der zweiten Messfahrt (erste Messfahrt nach dem Stopfen) 102
6.19 Entwicklung der Rotationszentren des DGS und der Schwelle während der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen) 102
a Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen) 102
b Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Überfahrt des DGS bei der dritten Messfahrt (zweite Messfahrt nach dem Stopfen) 102
6.20 Vergleich der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene zu Beginn und am Ende der zweiten Messfahrt (erste Fahrt nach Stopfen) 103
a Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 65,637 – 65,937 s der zweiten Überfahrt (erste Fahrt nach Stopfen) 103

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

b Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 101,325 – 101,623 s der zweiten Überfahrt (erste Fahrt nach Stopfen) 103
6.21 Vergleich der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene zu Beginn und am Ende der dritten Messfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen) 103
a Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 80,31 – 80,61 s der dritten Überfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen) 103
b Darstellung der DGS Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 116,263 – 116,556 s der dritten Überfahrt (zweite Fahrt nach dem Stopfen) 103
6.22 Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster im Laufe der vierten Messfahrt (Fahrt nach der Frequenzrampe) 104
6.23 Verlauf der Anregungsfrequenz während der Frequenzrampe 105
6.24 Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalbeschleunigungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) 106
6.25 Amplitudenfrequenzgang für die Vertikalbeschleunigungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) 106
6.26 Amplitudenfrequenzgang für die Horizontalverschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) 107
6.27 Amplitudenfrequenzgang für die Vertikalverschiebungsamplituden des DGS und der Schwelle (Frequenzrampe über instrumentierter Schwelle) 107
6.28 Vertikale Lage des Rotationszentrums des DGS auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Frequenzrampe 109
6.29 Vertikale Lage des Rotationszentrums der Schwelle auf Geschwindigkeitsbasis und auf Basis der Amplituden aus der FFT einzelner Zeitfenster während der Frequenzrampe 110
6.30 Vergleich der DGS-Bewegung und der Schwellenbewegung in der y-z-Ebene für eine Erregerfrequenz von 31,9 Hz 110
a Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 69,829 – 70,142 s der Frequenzrampe 110
b Darstellung der Schwellen-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 69,829 – 70,142 s der Frequenzrampe 110
6.31 Vergleich der DGS-Bewegung und der Schwellenbewegung in der y-z-Ebene für eine Erregerfrequenz von 29,4 Hz 110
a Darstellung der DGS-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 46,888 – 47,224 s der Frequenzrampe 110
b Darstellung der Schwellen-Bewegung in der y-z-Ebene im Zeitraum von 46,888 – 47,224 s der Frequenzrampe 110
6.32 Differenz der Phasenwinkel zwischen der Unwuchterregung und den Horizontalschwingungen des DGS beziehungsweise der Schwelle während der Frequenzvariation 111
6.33 Differenz der Phasenwinkel zwischen der Unwuchterregung und den Horizontalschwingungen an der Oberfläche im Nahfeld während der Frequenzvariation . . . 111

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabellenverzeichnis

2.1 Beispiele für die Zustandsüberwachung und Routine-Instandhaltung bei verschiedenen Gleiskomponenten basierend auf [7, 8, 28, 40–42, 44, 71] 13
2.2 Mögliche Versagensformen des Untegrunds und deren Ursachen, adaptiert nach [40] 20
2.3 Angaben verschiedener Autoren für den Anteil der mitwirkenden Schotterbereiche am Querverschiebewiderstand, adaptiert nach [31] 28

5.1 Übersicht über die Ergebnisse der Konvergenzbetrachtung für die einzelnen Sensoren. Als Grenzfrequenz wurde jene Frequenz definiert, bei der eine Verringerung des Mittelwerts der Differenzen von weniger als 1 % gegenüber dem Übergang von 1 auf 2 Hz auftritt (eingetragen in Spalten mit „MW %“) 67

6.1 Zusammenstellung statistischer Parameter der Beschleunigungsamplituden der einzelnen Messfahrten 93
6.2 Zusammenstellung statistischer Parameter der Geschwindigkeitamplituden der einzelnen Messfahrten 94
6.3 Zusammenstellung statistischer Parameter der Verschiebungsamplituden der einzelnen Messfahrten 95

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Literaturverzeichnis

[1] D. Adam. *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen*. Dissertation. Wien: TU Wien, 1996.

[2] D. Adam. *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik 1*. Wien: Institut für Geotechnik der TU Wien, 2016.

[3] F. Auer. *Infrastrukturmanagement*. 1. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2017.

[4] F. Auer. *Versuch Design-Stopfen*. Wien: ÖBB, 2004.

[5] F. Auer und B. Antony. Der dynamische Gleisstabilisator auf Schiene. In: *Eisenbahntechnische Rundschau – ETR; Impulsgeber für das System Bahn* 69 (5), 2019, S. 48–51.

[6] F. Auer und R. Wenty. „Für jeden Anwendungsfall das richtige Stopfaggregat". In: *Eisenbahn-Ingenieur-Kompendium – EIK; Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik*. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2017, S. 39–50.

[7] O. Barbir. *Development of condition-based tamping process in railway engineering*. Dissertation. Wien: TU Wien. unveröffentlicht.

[8] E. G. Berggren. *Railway Track Stiffness: Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance*. Dissertation. Stockholm: KTH, 2009.

[9] E. G. Berggren, Å. Jahlènius, B.-E. Bengtsson und M. Berg. Simulation, Development and Field Testing of a Track Stiffness Measurment Vehicle. In: *8th international Heaavy Haul Conference*, 2005, S. 763–771.

[10] E. G. Berggren, A. M. Kaynia und B. Dehlbom. Identification of substructure properties of railway tracks by dynamic stiffness measurements and simulations. In: *Journal of Sound and Vibration* 329 (19), 2010, S. 3999–4016. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.04.015.

[11] E. G. Berggren, A. Nissen und B. S. Paulsson. Track deflection and stiffness measurements from a track recording car. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 228 (6), 2014, S. 570–580. DOI: 10.1177/0954409714529267.

[12] R. van den Bosch. Querverschiebewiderstandsmessung mit dem dynamischen Gleisstabilisator. In: *Der Eisenbahningenieur – EI; internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr & Technik* 58, 2007, S. 15–19.

[13] A. Brandt und R. Brincker. Integrating time signals in frequency domain – Comparison with time domain integration. In: *Measurement* 58, 2014, S. 511–519. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.004.

[14] B. Counter. *Rail track maintenance machinery – Innovations in the UK*. 2017. URL: https://www.globalrailwayreview.com/article/31629/rail-track-maintenance-machinery-innovations-uk/ (Zugriff am 20. 07. 2019).

[15] M. Esmaeili, S. Hosseini und M. Sharavi. Experimental assessment of dynamic lateral resistance of railway concrete sleeper. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 82, 2016, S. 40–54. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.11.011.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[16] C. Esveld. *Modern railway track*. 2. Auflage. Zaltbommel: MRT-Productions, 2002.

[17] P. I. Fair und W. F. Anderson. Railway track maintainance using the stoneblower. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineering – Transport* 156 (3), 2003, S. 155–167.

[18] J. Fischer. *Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter*. Dissertation. Graz: TU Graz, 1983.

[19] W. Glawischnig und K. Riessberger. *Dynamischer Gleisstabilisator. Festigkeit durch Vibration*. Fa. Plasser & Theurer, 1976.

[20] Google Maps. *Ausschnitt aus der Satellitenaufnahme von Linz, Österreich*. 2019. URL: `https://www.google.at/maps/@48.2763079,14.3157098,109a,35y,256.64h,4.28t/data=!3m1!1e3` (Zugriff am 03. 09. 2019).

[21] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall. *Technische Mechanik 3 – Kinetik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.

[22] R. Grossniklaus. *Advances in tamping technology*. MATISA Material Industirel SA, 2016.

[23] M. Hager. *Messwerte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im theoretischen und experimentellen Vergleich*. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2015.

[24] Harsco Corporation. *Multipurpose Stoneblower*. 2018. URL: `http://www.harscorail.com/equipment/surfacing/stoneblower.html` (Zugriff am 20. 07. 2019).

[25] S. Hofmann. Numerische integration von Beschleunigungssignalen. In: *IMW – Institutsmitteilungen* 38, 2013, S. 103–114.

[26] D. Iliev. *Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlten Schwellen*. Dissertation. München: TU München, 2011.

[27] B. Indraratna, H. Khabbaz, W. Salim und D. Christie. Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 10 (3), 2006, S. 91–101. DOI: `10.1680/grim.2006.10.3.91`.

[28] B. Indraratna, W. Salim und C. Rujikiatkamjorn. *Advanced rail geotechnology - Ballasted track*. 1. Aufl. London: CRC Press, 2011.

[29] B. Indraratna, J. Vinod und J. Lackenby. Influence of particle breakage on the resilient modulus of railway ballast. In: *Géotechnique* 59 (7), 2009, S. 643–646. DOI: `10.1680/geot.2008.T.005`.

[30] M. José Cano, P. Martínez Fernández und R. Franco. Measuring track vertical stiffness through dynamic monitoring. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport* 169 (1), 2016, S. 3–11. DOI: `10.1680/jtran.14.00081`.

[31] F. Khatibi, M. Esmaeili und S. Mohammadzadeh. DEM analysis of railway track lateral resistance. In: *Soils and Foundations* 57 (4), 2017, S. 587–602. DOI: `10.1016/j.sandf.2017.04.001`.

[32] K. Kienzer. *Das Scherverhalten von Oberbauschotter bei stoßartiger Belastung*. Dissertation. Graz: TU Graz, 1983.

[33] A. Kish. On the Fundamentals of Track Lateral Resistance. In: *AREMA annual conference*, 2011.

[34] E. Klotzinger. Der Oberbauschotter. Teil 1: Anforderungen und Beanspruchungen. In: *Eisenbahntechnische Rundschau – ETR; Impulsgeber für das System Bahn* 57 (01/02), 2008, S. 34–41.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[35] K. Klugar. Der statische Querverschiebewiderstand des belasteten Gleises. In: *Eisenbahntechnische Rundschau – ETR; Impulsgeber für das System Bahn* 25 (4), 1976, S. 211–216.

[36] Y. Koike, T. Nakamura, K. Hayano und Y. Momoya. Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks. In: *Soils and Foundations* 54 (3), 2014, S. 502–514. DOI: 10.1016/j.sandf.2014.04.014.

[37] F. Kopf. *Ermittlung der Filterkennlinie verschiedener digitaler Filter*. Interner Bericht für FCP/VCE. FCP/VCE, 2018. unveröffentlicht.

[38] C. Kuttelwascher und M. Zuzic. Oberbauschotter – Kompendium für Österreich. In: *Eisenbahn-Ingenieur-Kalender – EIK; Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik*, 2013, S. 100–126. ISSN: 0934-5930.

[39] F. Lamas-Lopez, Y. Cui, S. Costa D'Aguiar und N. Calon. Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes. In: *Soils and Foundations* 56 (2), 2016, S. 240–250. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.02.007.

[40] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann und S. Chrismer. *Railway Geotechnics*. Boca Raton: CRC Press, 2015. DOI: 10.1201/b18982.

[41] B. Lichtberger. *Handbuch Gleis : Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. 3. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2010.

[42] B. Lichtberger. Vollhydraulisch Stopfen – eine neue Technologie für effiziente Instandhaltung. In: *Der Eisenbahningenieur – EI; Internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr & Technik* 66 (7), 2015, S. 18–22.

[43] B. Lotfi und L. Huang. An approach for velocity and position estimation through acceleration measurements. In: *Measurement* 90, 2016, S. 242–249. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.04.011.

[44] L. Marx und D. Moßmann. *Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus*. 7. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag, 2011.

[45] MATISA. *100 % TAMPING MASHINE TOOLS*. 2018. URL: https://www.matisa.ch/brochures_pdf/en/outils_bourreuses_en.pdf (Zugriff am 29. 08. 2019).

[46] V. Matthews. *Bahnbau*. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer, 2011.

[47] S. Mohammadzadeh, M. Esmaeili und F. Khatibi. A new field investigation on the lateral and longitudinal resistance of ballasted track. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 232.8, 2018, S. 2138–2148. DOI: 10.1177/0954409718764190.

[48] ÖBB. *Erläuterung 07.06.05.01: Oberbau/ Oberbauschweißtechnik, Schienenbearbeitung und zerstörungsfreie Prüfung*. Wien: ÖBB-Infrastruktur AG, Juni 2017.

[49] ÖBB. *Oberbau / Maschinentechnik – Dynamische Gleisstabilisation – Einsatz des dynamsichen Gleisstabilisators. Technische Anweisung*. Wien: ÖBB-Infrastruktur AG, Aug. 2014.

[50] ÖBB. *Regelwerk 07.02.01: Oberbau / Schotteroberbau – Gleise: Planung und konstruktive Ausführung*. Wien: ÖBB-Infrastruktur AG, Juni 2015.

[51] ÖBB. *Regelwerk 07.07: Oberbau / Gleise und Weichen – Abnahme von Oberbauarbeiten*. Wien: ÖBB-Infrastruktur AG, März 2015.

[52] ÖNORM EN 13306: 2018 01 15. *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Wien: Austrian Standards, 2018.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[53] ÖNORM EN 13848-1:2019 05 15. *Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität – Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie*. Wien: Austrian Standards, Sep. 2019.

[54] ÖNORM EN 13848-5:2017 10 01. *Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität – Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen - Gleise, Weichen und Kreuzungen*. Wien: Austrian Standards, Sep. 2017.

[55] ÖNORM S 9020:2015-12. *Erschütterungsschutz für ober- und unterirdische Anlagen*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2015.

[56] ORE. *Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr. Die Effektivität dynamischer Gleisstabilisierung unter Verwendung des DTS*. Bericht. Forschungs- und Versuchsamt der UIC, Sep. 1981.

[57] J. Pistrol. *Verdichtung mit Oszillationswalzen*. Dissertation. Wien: TU Wien, 2016.

[58] Plasser & Theurer. *Der nächste Schritt - die Hybridmaschine*. 2019. URL: `https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stopfung-dynamic-stopfexpress-09-4x-e3.html` (Zugriff am 10. 08. 2019).

[59] Plasser & Theurer. *Die Technologie des dynamischen Gleisstabilisierens. Allgemeine Einführung - Funktionsprinzip - Arbeitsanleitung*. 2010.

[60] Plasser & Theurer. *Untersuchung der optimalen Betriebsparameter für die Minimierung der Umweltvibrationen durch den DGS*. Bericht. Plasser & Theurer, 30. Okt. 1995.

[61] S. Rapp. *Modell zur Identifizierung von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper in konventioneller Schotterbauweise*. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2017.

[62] K. Rießberger. *Die dynamische Stabilisierung der Gleise*. Fa. Plasser & Theurer, 1976.

[63] K. Rießberger und R. Wenty. „40 Jahre ‚dynamische Gleisstabilisation'". In: *Eisenbahn-Ingenieur-Kalender – EIK; Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik*. Hamburg: DVV Media Group GmbH / Eurailpress, 2015, S. 55–76.

[64] RVS 08.03.01. *Technische Vertragsbedingungen. Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten*. Okt. 2010.

[65] RVS 08.03.02. *Technische Vertragsbedingungen. Erdarbeiten. Kontinuierliche, walzenintegrierter Verdichtungsnachweis*. 1999.

[66] RVS 08.03.04. *Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches*. März 2008.

[67] RVS 08.15.01. *Ungebundene Tragschichten*. Juli 2010.

[68] M. Sadri und M. Steenbergen. Effects of railway track design on the expected degradation: Parametric study on energy dissipation. In: *Journal of Sound and Vibration* 419, 2018, S. 281–301. DOI: `10.1016/j.jsv.2018.01.029`.

[69] R. Schilder und W. Schumergruber. Schnellumbauzug SUZ 500 für Gleisumbau und Neubau bei den ÖBB. In: *Eisenbahntechnische Rundschau – ETR; Impulsgeber für das System Bahn* 53, 2004, S. 150–157.

[70] E. T. Selig, T. S. Yoo und C. M. Panuccio. *Mechanics of ballast compaction. Vol. 1: technical review of ballast compaction and related topics*. Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo, 1982.

[71] E. T. Selig und J. M. Waters. *Track geotechnology and substructure management*. London: Telford, 1994.

[72] M. Sol-Sánchez, F. Moreno-Navarro und M. Gámez. Analysis of ballast tamping and stone-blowing processes on railway track behaviour: The influence of using USPs. In: *Géotechnique* 66, 2016, S. 1–9. DOI: `10.1680/jgeot.15.P.129`.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[73] J. A. Studer, J. Laue und M. G. Koller. *Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.

[74] L. Tan und J. Jiang. *Digital Signal Processing. Fundamentals and application*. Hrsg. von L. Tan und J. Jiang. 2nd Edition. Boston: Academic Press, 2013. DOI: 10.1016/C2011-0-05250-X.

[75] The MathWorks, Inc. *MATLABR2016b (9.1.0.441655)*. URL: https://de.mathworks.com/help/index.html (Zugriff am 17. 09. 2019).

[76] TU München. *Bericht Nr. 3706. Bestimmung des statischen und dynamischen Querverschiebewiderstands*. München: Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau, 17. Mai 2018.

[77] TU München. *Zusammenstellung der Ergebnisse der Schwingungsmessung Neusiedl am See*. München: Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau, 2018.

[78] H. Turnher und A. Sandström. A new device for instant compaction control. In: *Proceedings of the International Conference on Compaction* II, 1980, S. 611–614.

[79] M. Vilotijević, L. Brajovic, L. Lazarević und N. Mirković. Methods for track stiffness measurment – state of the art. In: *New Horizons 2017 - VI International Symposium of transport and communication*, 2017.

[80] G. Vizcarra, S. Nimbalkar, B. Indraratna und M. Casagrande. Effect of particle size distribution on railroad ballast deformation and breakage. In: *COBRAMSEG 2014: XVII Brazilian Congress of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, S. 1–6.

[81] M. Werner. *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB: Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN