Diploma Thesis

Measurement and analysis of the motion behaviour of plate compactors in railway construction

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

Diplomarbeit

Messtechnische Erfassung und Analyse des Bewegungsverhaltens von Plattenverdichtern im Bahnbau

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

von

Julian Sigmund, BSc

Matr.Nr.: 01226521

unter der Anleitung von

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

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes Pistrol**, BSc

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/220-02, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2021

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

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

Die AHM 800-R ist eine Unterbausanierungsmaschine der Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H*, die in Österreich bei einem Großteil der gleisgebundenen Unterbausanierungsprojekte zum Einsatz kommt. Im Zuge einer Unterbausanierung erfolgt der Einbau einer neuen Tragschicht. Die Verdichtung dieser ungebundenen Tragschicht geschieht durch sechs Plattenverdichter. Um die Effizienz der Plattenverdichter zu steigern, führte die TU Wien in Kooperation mit der Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* Feldversuche zur Verdichtung von Böden mittels Plattenverdichter durch. Im Rahmen der Untersuchungen soll das Bewegungsverhalten von Plattenverdichtern für verschiedene Maschinenkonfigurationen analysiert werden, um die Verdichtungswirkung in der Praxis zu optimieren.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Datenaufbereitung und -auswertung von einem der durchgeführten Feldversuche sowie die Interpretation der vorliegenden Messergebnisse. Darüber hinaus wird der Fragestellung nachgegangen, ob das Bewegungsverhalten die Grundvoraussetzungen für die Entwicklung eines Systems zur arbeitsintegrierten, flächendeckenden Verdichtungskontrolle erfüllt. Zu diesem Zweck werden die Daten des Feldversuchs mithilfe von MATLAB aufbereitet und im Zuge einer Bewegungsanalyse ausgewertet. Anhand von Beschleunigungen, Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwegen sowie der Bodenkontaktkraft werden dabei das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters und die Interaktion zwischen Plattenverdichter und Boden analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich je nach Betriebskonfiguration ein unterschiedlich stark ausgeprägtes, jedoch durchwegs reproduzierbares Bewegungsverhalten des Plattenverdichters einstellt. Damit ist eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle 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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

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.

Abstract

The AHM 800-R is a formation rehabilitation machine from *Plasser & Theurer* which is used for the majority of track-bound rehabilitation projects in Austria. In the course of track maintenance, a new layer subballast is laid and compacted by six plate compactors. In order to increase the efficiency of the plate compactors, the TU Wien, in cooperation with the company *Plasser & Theurer* carried out field tests on the compaction of soils using plate compactors. Within the framework of the investigations, the motion behaviour of plate compactors for different machine configurations is to be analysed in order to optimise the compaction effect in practice.

The focus of this thesis is on the data processing and evaluation of one of the field tests and the interpretation of the available measurement results. In addition, the crucial point of whether the motion behaviour fulfils the basic requirements for the development of a system for work-integrated, area-wide compaction control is investigated. For this purpose, the data from the field test is processed using MATLAB and evaluated in the course of a motion analysis. The motion behaviour of the plate compactor and the interaction between the plate compactor and the soil are analysed on the basis of accelerations, velocities and displacements as well as the soil contact force. The results show that the motion behaviour of the plate compactor varies depending on the operating configuration, but is reproducible throughout. This is a necessary precondition for the development of a work-integrated compaction control.

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

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

Da sich mit dem Abschluss der Diplomarbeit auch das Studium dem Ende zuneigt, ist dies ein guter Zeitpunkt, um zurückzublicken und all jenen meinen Dank auszusprechen, die mich über die Jahre des Studiums unterstützt und begleitet haben.

Zuvor möchte ich mich jedoch bei denjenigen bedanken, die mich während der Entstehung meiner Diplomarbeit tatkräftig unterstützt haben. Spezieller Dank gebührt hierbei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam und Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol für die umfangreiche Betreuung und die interessanten themenbezogenen Diskussionen. Des Weiteren möchte ich die Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* erwähnen, ohne die es das Forschungsprojekt und damit auch diese Diplomarbeit nicht geben würde.

Einen großen Dank möchte ich an meine Familie richten. An meine Eltern Su und André und an meinen Bruder Leon, die mich während meines Studiums immer unterstützt haben und mir oftmals mit Rat zur Seite gestanden sind.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Freunden danken. Sowohl den Freunden, die ich durch das Studium kennengelernt habe und mit denen ich Tage – und teilweise auch Nächte – an der Uni verbracht habe, mit dem gemeinsamen Ziel, das Studium abzuschließen, als auch den Freunden, die nichts mit meinem Studium zu tun haben, mich aber durch gemütliche Nachmittage und Abende von meinem Studienalltag ablenken konnten. Ein spezieller Dank gilt dabei Clemens, Oskar, Luki und Arthur.

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

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.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **13**
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit . . . 13
1.2 Aufbau und Inhalt . . . 14

2 Grundlagen der Unterbausanierung und Tragschichtverdichtung **15**
2.1 Allgemeines zum Bahnkörper . . . 15
2.1.1 Aufbau des Bahnkörpers . . . 16
2.1.2 Aufbau des Unterbaus . . . 16
2.1.3 Aufbau der Tragschicht . . . 16
2.1.4 Aufgaben der Tragschicht . . . 17
2.1.5 Anforderungen an die Tragschicht . . . 20
2.1.6 Aufbau des Oberbaus . . . 21
2.2 Tragschichtsanierung im Zuge der Unterbausanierung . . . 22
2.2.1 Allgemeines zur Gleiskörpersanierung . . . 22
2.2.2 Zustandsbewertung des Fahrwegs . . . 22
2.2.3 Einfluss des Unterbauplanums . . . 23
2.2.4 Konventionelle Unterbausanierung . . . 23
2.3 Gleisgebundene Unterbausanierung mittels AHM 800-R . . . 23
2.3.1 Entstehung der gleisgebundenen Unterbausanierung . . . 23
2.3.2 Entwicklung der AHM 800-R . . . 24
2.3.3 Aufbau und technische Daten der AHM 800-R . . . 25
2.3.4 Arbeitsweise der AHM 800-R . . . 25
2.3.5 Material für den Einbau mittels AHM 800-R . . . 27
2.3.6 Vorteile der gleisgebundenen Unterbausanierung . . . 28
2.4 Verdichten von Böden als Verfahren zur Bodenverbesserung . . . 29
2.4.1 Verfahren zur Verdichtung von Böden . . . 30
2.4.2 Plattenverdichter WBB530 als Anbauverdichter . . . 34
2.5 Verdichtungskontrollen im Feld . . . 34
2.5.1 Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät . . . 35
2.5.2 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) . . . 36

3 Stand der Forschung **39**
3.1 Bewegungsverhalten von Vibrationsplatten . . . 39
3.1.1 Vergleich der dynamischen Wirkung von Vibrationsplatten und Vibrationswalzenzügen . . . 39
3.1.2 Nichtlineare Dynamik der Vibrationsplatte . . . 40
3.2 Technische Weiterentwicklung AHM . . . 41
3.2.1 Experimentelle Voruntersuchung anhand eines Plattenverdichters im Betrieb der AHM . . . 41
3.2.2 Experimentelle Grundsatzuntersuchung anhand eines separaten Plattenverdichters . . . 41
3.2.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse . . . 43

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

3.3 Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern 43

4 Experimentelle Untersuchungen zur dynamischen Tragschichtverdichtung 45
4.1 Motivation der Versuche 45
4.2 Aufbau und Ausstattung des Plattenverdichters 45
4.2.1 Führung und Steuerung des Plattenverdichters 45
4.2.2 Anordnung der Beschleunigungssensoren auf Grundplatte und Rahmen . 46
4.2.3 Positionsbestimmung der Unwuchtmasse 47
4.3 Messtechnik zur Erfassung des Bewegungsverhaltens 47
4.3.1 Beschleunigungssensoren auf Grundplatte und Rahmen 47
4.3.2 Positionssensoren am Erregersystem 47
4.3.3 Kraftmessdose in der Aufhängung des Plattenverdichters und Öldrucksensoren in der Hydraulik 48
4.3.4 Messwerterfassungssystem zur Aufzeichnung der Signale 48
4.4 Aufbau des Versuchsfeldes in der Kiesgrube 48
4.5 Ablauf der Feldversuche 50
4.5.1 Ablauf der Nullmessungen 51
4.5.2 Ablauf der Messfahrten 51

5 Theoretische Grundlagen zur Messdatenerhebung und Auswertung 53
5.1 Arten der Schwingungsmessung 53
5.2 Numerische Integration von Beschleunigungssignalen 53
5.3 Signalfilterung mittels digitaler Filter 54
5.4 Transformation eines Beschleunigungssignals in den Frequenzbereich 57

6 Aufbereitung der Messdaten 59
6.1 Übersicht über die gesammelten Messdaten 59
6.2 Durchführen der Messdatenaufbereitung 60
6.2.1 Analyse der Beschleunigungssignale im Frequenzbereich 60
6.2.2 Definition der digitalen Filter 60
6.2.3 Filterung und Integration der Beschleunigungssignale 64

7 Auswertung und Analyse der aufbereiteten Messdaten 67
7.1 Auswertung der Unwuchtanregung 67
7.1.1 Bestimmung des Unwuchtdrehwinkels anhand der Positionssensoren . . . 67
7.1.2 Ermittlung der Anregungsfrequenz und Erregerkraft 68
7.2 Bewegungsanalyse des Plattenverdichters 69
7.2.1 Auswertung der Nullmessungen 69
7.2.2 Empirische Bestimmung der Exzentrizität der Unwucht 73
7.2.3 Ermittlung der Bodenkontaktkraft 80
7.2.4 Auswertung der Messfahrten 81
7.2.5 Erstellung von Arbeitsdiagrammen 98

8 Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse 101
8.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse 101
8.1.1 Ergebnisse der Nullmessungen 101
8.1.2 Ergebnisse der Messfahrten 101
8.2 Interpretation der Ergebnisse 102
8.2.1 Interpretation der Ergebnisse der Nullmessungen 102
8.2.2 Interpretation der Ergebnisse der Messfahrten 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

8.2.3 Interpretation der Arbeitsdiagramme 108
8.3 Schlussfolgerungen der Interpretation 109

9 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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

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 1

Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Aufbereitung, Auswertung und Interpretation der Messdaten, die im Zuge eines Feldversuchs im November 2019 zur dynamischen Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichter erhoben wurden. Der bei den Versuchen eingesetzte Plattenverdichter entspricht jenem Modell, das auf der Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R eingesetzt wird. Die AHM 800-R ist eine der in Österreich verwendeten Maschinen zur gleisgebundenen Unterbausanierung.

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Die gleisgebundene Unterbausanierung wird in Österreich seit ca. 25 Jahren eingesetzt, um das alternde Streckennetz effizient zu sanieren und zu modernisieren. In den letzten 20 Jahren wurde die Technologie in diesem Bereich nur geringfügig weiterentwickelt. Auf den mittels AHM 800-R sanierten Streckenabschnitten treten vereinzelt Stellen auf, an denen die Verdichtungsanforderungen für den Einbau von Tragschichten nach RVS 08.03.01 [41] nicht erreicht werden. Da diese Stellen nur punktuell auftreten, ist die Sicherheit des Streckennetzes nicht gefährdet und sie können in Bezug auf die Verkehrssicherheit vernachlässigt werden. Jedoch senkt eine unzureichende Verdichtung der Tragschicht, auch wenn diese nur punktuell auftritt, die Lebensdauer eines Streckenabschnitts deutlich. Um in Zukunft eine gleichmäßigere Verdichtung mit ausreichendem Verdichtungsgrad zu erreichen und diesen auch flächendeckend überprüfen zu können, begann die Fa. *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik der TU Wien an dem Forschungsprojekt „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ [7] zu arbeiten. Im Zuge dieses Forschungsprojekts sollte die Verdichtung mittels Plattenverdichtern effizienter gestaltet werden. Der Fokus dieses Projekts lag dabei auf der Analyse des Tragschichtmaterials. Darüber hinaus wurde ein Plattenverdichter der AHM 800-R im Betrieb untersucht und anschließend eine Reihe an Feldversuchen mit einem gesonderten Plattenverdichter durchgeführt, um dessen Schwingungsverhalten zu analysieren [7].

Als weiterführende Forschung im Bereich der dynamischen Tragschichtverdichtung startete die Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik der TU Wien am 1. Juli 2019 ein neues Forschungsprojekt mit dem Titel „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ [37]. Im Zuge dieses Forschungsprojekts wurden am 20. November 2019 weitere Feldversuche mit einem Plattenverdichter durchgeführt, dabei wurden die Erkenntnisse des Forschungsprojekts „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ [7] im Versuchsaufbau berücksichtigt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf den Feldversuchen, die am 20. November 2019 im Zuge des Forschungsprojekts „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ [37] durchgeführt wurden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die im Zuge der Feldversuche erhobenen Daten des Plattenverdichters aufzubereiten und das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters zu untersuchen. Darüber hinaus wird der Fragestellung nachgegangen, ob der Plattenverdichter als Messinstrument zur

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

Entwicklung einer arbeitsintegrierten flächendeckenden Verdichtungskontrolle eingesetzt werden kann. Zu diesem Zweck wird eine Bewegungsanalyse des Plattenverdichters auf Basis der erhobenen Daten durchgeführt und anschließend die Interaktion zwischen Plattenverdichter und Boden untersucht.

1.2 Aufbau und Inhalt

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert. In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Bahnbaus und der Aufbau eines Bahndamms beschrieben. Dabei wird der Aufbau und die Zusammensetzung der Tragschicht besonders behandelt. Weiters wird die Vorgehensweise bei einer Tragschichtsanierung im Zuge der Unterbausanierung vorgestellt, mit besonderem Fokus auf die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R. Mit diesem Gerät wird ein Großteil der gleisgebundenen Unterbausanierung in Österreich durchführt. Die AHM 800-R ist mit sechs der zuvor erwähnten Plattenverdichtern ausgestattet, die für die Verdichtung der Tragschicht nach dem Einbau verantwortlich sind. Um eine umfassende Bewegungsanalyse eines Plattenverdichters durchführen zu können, wurden Feldversuche durchgeführt. Kapitel 4 behandelt die an einem Plattenverdichter durchgeführten Feldversuche zur Tragschichtverdichtung. Hier werden der genaue Aufbau des Plattenverdichters und die verwendete Sensorik sowie der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung detailliert beschrieben. Die Feldversuche bauen auf dem Forschungsprojekt „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ [7] auf, welches in Kapitel 3 beschrieben wird. Die für die Aufbereitung notwendigen theoretischen Grundlagen der Signalverarbeitung werden in Kapitel 5 beschrieben. Wichtige Aspekte der theoretischen Grundlagen sind die numerische Integration von Beschleunigungssignalen und die Transformation von Beschleunigungssignalen in den Frequenzbereich sowie die Signalfilterung mittels digitaler Filter. Die Definition der digitalen Filter und die dazu durchgeführte Konvergenzstudie sind ein Teil von Kapitel 6, das sich der Aufbereitung der ermittelten Daten widmet. Die Auswertung der aufbereiteten Messdaten erfolgt in Kapitel 7. Die Bestimmung der Unwuchtanregung und die dazu notwendige stückweise Ermittelung und Zusammensetzung der Unwuchtbewegung stellen einen wichtigen Teil der Auswertung dar. Mit der ermittelten Unwuchtanregung wird in weiterer Folge die Bewegungsanalyse des Plattenverdichters durchgeführt. Die Bewegungsanalyse beschränkt sich dabei auf die Detailbetrachtung mehrerer kurzer Messausschnitte unterschiedlicher Betriebskonfigurationen. Für diese Ausschnitte werden die Verläufe der gemessenen Beschleunigungen und der ermittelten Bewegungsgrößen gegenübergestellt. Zusätzlich werden daraus abgeleitete Größen, wie z.B. die Bodenkontaktkraft, in eigenen Abbildungen dargestellt. Im Anschluss an die Auswertung werden in Kapitel 8 die Ergebnisse zusammengefasst und die erstellten Abbildungen interpretiert. Im abschließenden Kapitel 9 werden die wichtigsten Schritte der Arbeit zusammengefasst und ein Fazit der Bewegungsanalyse gezogen sowie ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte in Bezug auf 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 der Unterbausanierung und Tragschichtverdichtung

Im folgenden Kapitel werden einige Grundlagen aus den Themengebieten Bahnbau und Bodenverdichtung beschrieben. Dabei wird genauer auf den Aufbau von Bahnkörpern und der Tragschicht sowie die Möglichkeiten zur Sanierung dieser eingegangen. Darüber hinaus werden verschiedene Arten der Bodenverdichtung, darunter speziell der Plattenverdichter und die Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle erläutert. Die in Kapitel 7 ausgewerteten Daten basieren auf Versuchen, die dieses Grundwissen voraussetzen.

2.1 Allgemeines zum Bahnkörper

Die Eisenbahn ist aus dem heutigen Landschaftsbild nicht mehr wegzudenken. Durch das große Schienennetzwerk der Bahn sind beinahe überall Bahnstrecken zu finden. Dies beschränkt sich nicht nur auf Städte, sondern zieht sich auch durch die ländlichen Gebiete. Abbildung 2.1 zeigt einen Bahnstrecke in Deutschland, die sich durch einen Wald in der Nähe von Dresden zieht. Schienen sind, wie in der Abbildung zu sehen, meist auf einem explizit dafür hergestellten Untergrund, dem Bahndamm, gelagert.

Abb. 2.1: Bahndamm Wallroda in Deutschland [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

2.1.1 Aufbau des Bahnkörpers

Der Begriff Bahnkörper umfasst den Bahnquerschnitt in seiner Gesamtheit. Er lässt sich in Oberbau, Tragschicht, Unterbau und den darunterliegenden Untergrund aufteilen (im Einschnittbereich entfällt der Unterbau) [41]. Der Untergrund beinhaltet das gesamte angrenzende Erdreich (oder auch den angrenzenden Fels). In Abbildung 2.2 ist der Aufbau eines Bahnkörpers in Dammlage und die Unterteilung des Bahnkörpers in dessen Bereiche zu sehen [33].

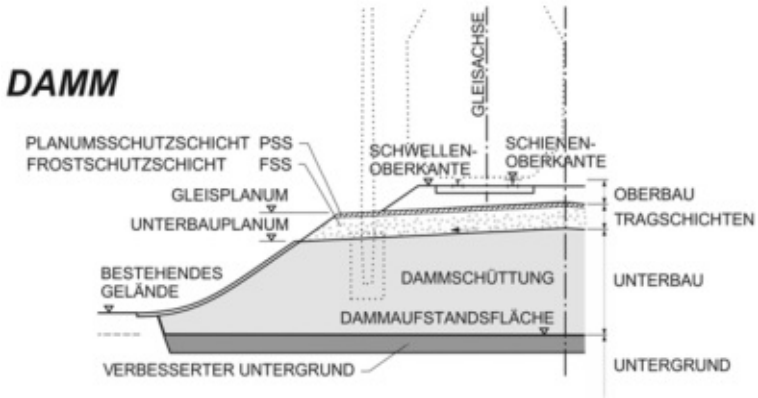


Abb. 2.2: Aufbau eines Bahndamms nach RVS 08.03.01 [41]

Die Steifigkeit der Schichten eines Bahnkörpers nehmen nach oben hin zu. Der Untergrund (ausgenommen Fels) ist in der Regel die am wenigsten steife Schicht, danach nimmt die Steifigkeit im Unterbau, in der Tragschicht und im Schotterbett immer weiter zu. Tendenziell gilt, dass ein weicherer Untergrund eine steifere Tragschicht erfordert, jedoch kann ein nicht ausreichend steifer Untergrund nicht durch eine stärker verdichtete Tragschicht ausgeglichen werden [8].

2.1.2 Aufbau des Unterbaus

Der Unterbau besteht in Dammlage aus der Dammschüttung. Per Definition handelt es sich beim Unterbau um ein Erd- oder Kunstbauwerk, welches sich zwischen Tragschicht und Untergrund befindet. Nach oben hin ist der Unterbau durch das Unterbauplanum begrenzt. Das Unterbauplanum muss mit einer Querneigung von mindestens 5% ausgeführt werden, um eine ausreichende Entwässerung sicherzustellen [33].

2.1.3 Aufbau der Tragschicht

Die Tragschicht befindet sich zwischen Ober- und Unterbau. Bei einem Neubau oder einer konventionellen Sanierung der Tragschicht wird die Tragschicht in zwei Teile unterteilt. In Abbildung 2.1 ist der konventionelle Schichtaufbau dargestellt, er besteht aus [41]:

- Der Frostschutzschicht (FSS): Diese bezeichnet den unteren Teil der Tragschicht und wird in der Regel mit einer Mächtigkeit von ca. 30 cm ausgeführt.
- Der Planumsschutzschicht (PSS): Diese bezeichnet den oberen Teil der Tragschicht und wird in der Regel als ungebundene Tragschicht mit einer Mächtigkeit von ca. 10 cm ausgeführt. Alternativ kann sie auch als gebundene Tragschicht ausgeführt werden.

Im Falle einer gleisgebundenen Unterbausanierung in Österreich wird die Tragschicht oft als einzelne, 40 cm mächtige, ungebundene Schicht eingebaut. Dies ist auf die technischen Beschränkungen der in Österreich verwendeten Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R zurückzuführen

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

(siehe Abschnitt 2.3) [40]. Bei der Ausführung als einzelne Tragschicht wird nicht zwischen den Bezeichnungen Planumsschutzschicht und Tragschicht unterschieden. Die zwei Bezeichnungen sind in diesem Fall als Synonyme füreinander zu verwenden.

2.1.4 Aufgaben der Tragschicht

Die Tragschicht hat, unabhängig von ihrer Ausführungsform, unterschiedliche Funktionen zu erfüllen. Diese werden durch den anstehenden Untergrund beeinflusst und müssen bei der Planung berücksichtigt werden. Die Aufgaben der Tragschicht sind mit folgenden Stichworten zu kategorisieren [8, 28–31, 46]:

- Lastverteilung
- Frostschutz
- Trennen
- Filtern
- Ausgleichen
- Dichten
- Versiegeln
- Dränen
- Federn und Dämpfen

2.1.4.1 Wirkung als Tragschicht

Eine der wichtigsten Aufgaben der Tragschicht ist ihre lastverteilende Wirkung. Bei älteren Gleiskörpern wurde z.T. auf die Tragschicht verzichtet. Die Lastabtragung läuft in diesem Fall von den Schwellen über das Schotterbett direkt in den Untergrund. Im Falle eines Gleiskörpers mit Tragschicht wird die Last durch die vorhandene Tragschicht und den größeren Abstand zwischen Schwellenunterkante und Unterbauplanum auf einen größeren Bereich aufgeteilt. Abbildung 2.3 zeigt einen direkten Vergleich der Lastableitung eines Bahndamms ohne Tragschicht (links) und mit Tragschicht (rechts). Der rote bzw. grüne Kegel symbolisiert die Lastausbreitung im jeweiligen Fall. Durch die Tragschicht vergrößert sich der Abstand zwischen Schwelle und Unterbauplanum. Bedingt durch den annähernd konstanten Lastausbreitungswinkel, ergibt sich bei der Ausführung mit Tragschicht eine größere Fläche zur Einleitung der Lasten in den Untergrund. Die Tragschicht trägt somit auch dazu bei, dass bei der Lasteinleitung in den Untergrund geringere Spannungen auftreten [29].

2.1.4.2 Wirkung als Frostschutzschicht

Unabhängig davon, ob die Tragschicht ein- oder zweischichtig ausgeführt ist, muss sie den Untergrund gegen eindringenden Frost schützen. In einer mehrschichtigen Ausführung wird dies durch eine explizite Frostschutzschicht (FSS) in der Tragschicht erfüllt. Bei frostempfindlichen Böden ist diese Schutzwirkung besonders relevant und fließt auch in die Bemessung der Tragschicht mit ein. Frostempfindliche Böden weisen häufig einen hohen Anteil an Feinkorn auf. Um die Frostempfindlichkeit eines Bodens zu ermitteln, wird das Frostkriterium nach Casagrande verwendet. Als Alternative kann auch ein Frostschutz durch den Einbau von Wärmedämmplatten erzielt werden [29, 33].

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

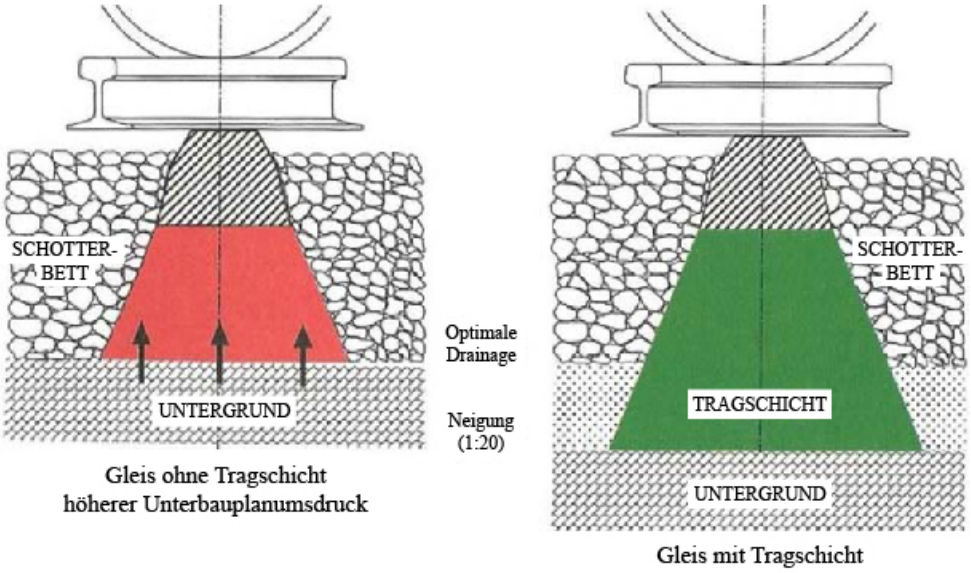


Abb. 2.3: Lastableitung in einem Bahndamm mit und ohne Tragschicht. Adaptiert nach [29]

2.1.4.3 Wirkung als Filter- und Trennschicht

Unter dynamischen Belastungen kann es zwischen angrenzenden Bodenschichten zu einem Austausch von Bodenmaterial kommen. Falls keine Tragschicht vorhanden ist, vermischen sich dadurch der Gleisschotter und der anstehende Untergrund. Die Vermischung des Schotters hat eine deutlich kürzere Lebensdauer des Gleiskörpers zur Folge. Außerdem kommt es durch Kontakterosion zu einem Aufsteigen der Feinanteile aus dem Untergrund und zu einer Verunreinigung des Schotters. Die Verunreinigung führt zu einer Reduktion des inneren Reibungswinkels des Schotters und so zu einer geringeren Lastausbreitung. Mit dem Einbau einer Tragschicht kann die Vermischung des Bodens und das Aufsteigen der Feinanteile deutlich reduziert werden. Die Dimensionierung und notwendige Kornzusammensetzung der Tragschicht wird durch die Filterregel nach Terzaghi bestimmt [7, 8, 29, 46].

Die ÖBB untersuchten 1998 die Wirkung der Tragschicht als Filter- und Trennschicht [30]. Dazu wurde eine Strecke analysiert, die aus Abschnitten ohne Tragschicht, mit Tragschicht und mit Tragschicht inklusive eingebautem Geokunststoff bestand. In Abbildung 2.4 ist der Vergleich der Verunreinigungen der verschiedenen Ausführungsweisen nach 28 Jahren dargestellt. Der Abschnitt ohne Tragschicht weist eine fast vollständige Durchmischung der Schichten auf. Im Abschnitt mit Tragschicht ist die Verunreinigung des Schotters deutlich kleiner, aber klar erkennbar. Im Abschnitt mit Tragschicht und Geotextil ist sogar nach 28 Jahren eine klar erkennbare Schichtgrenze zu sehen. Die Ausführung als Tragschicht mit Geotextil erhöht die Filterstabilität, und somit auch die Lebensdauer des Oberbaus, deutlich.

2.1.4.4 Wirkung als Dicht- und Versiegelungsschicht

Um ein Eindringen von Wasser in den Boden zu verhindern, ist es notwendig die Tragschicht als gering wasserdurchlässige Dichtschicht auszuführen. Dies ist speziell bei wasserempfindlichen (oftmals bindigen) Böden relevant. Außerdem muss das eindringende Oberflächenwasser auf dem Planum abfließen können. Oberflächenwasser tritt durch das Schotterbett ein, sammelt sich auf dem Tragschichtplanum und wird von dort durch das vorhandene Quergefälle seitlich abgeleitet [28, 29].

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

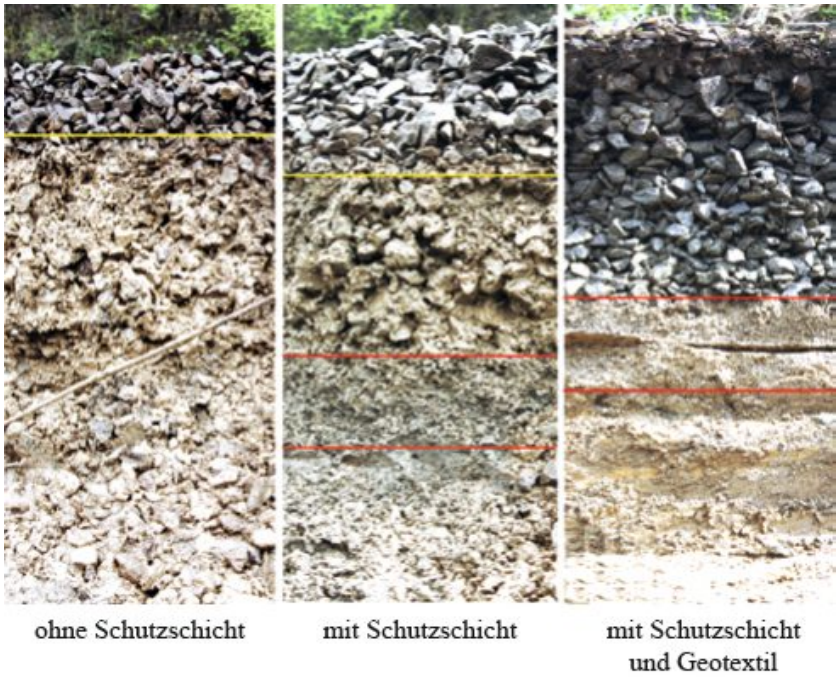


Abb. 2.4: Vergleich unterschiedlicher Schichtsysteme in Bezug auf deren Filterwirkung. Adaptiert nach [30]

2.1.4.5 Wirkung als Dränschicht

Im Falle von hohem Grundwasser, muss die Tragschicht aufsteigendes Bodenwasser aufnehmen können. Dieses soll durch das vorhandene Quergefälle abgeleitet werden. Die Dimensionierung einer Dränschicht widerspricht teilweise den Kriterien für Filterstabilität nach Darcy, da die Dränschicht gänzlich andere Anforderungen an die Kornverteilung stellt, als die Filterstabilität nach Darcy verlangt [30, 46].

2.1.4.6 Aufgabenteilung Tragschicht – Schotterbett

Einen Teil der Aufgaben der Tragschicht (z.B. Lastabtragung und Frostschutz) könnte ein Schotterbett mit größerer Mächtigkeit problemlos übernehmen. Die übrigen Funktionen sind jedoch an den Aufbau und das Material der Tragschicht gekoppelt. Vor allem die genauer beschriebenen Funktionen als Filter- und Trennschicht, sowie als Dicht- und Dränschicht setzen eine sehr spezielle Körnungslinie voraus. Da das Schotterbett primär einen anderen Zweck erfüllt und bei der Kornverteilung an andere Richtlinien gebunden ist, ist die Ausführung einer Tragschicht unumgänglich [28].

2.1.4.7 Einbau von Geokunststoffen

Mit der gleisgebundenen Unterbausanierung wurde der Einbau von Geokunststoffen in der Tragschicht großflächig vorangetrieben [13]. Geokunststoffe werden zwischen dem anstehenden Boden und der Tragschicht verbaut, um Spannungsspitzen zu verteilen und Verformungen abzubauen. So soll die Tragfähigkeit der Tragschicht unterstützt werden und das Langzeitverhalten auf Hochleistungsstrecken gewährleisten werden [29]. Um die Tragfähigkeit weiter zu erhöhen, können auch mehrere Lagen Geokunststoffe in der Tragschicht eingebaut werden. Bei einem Streckenausbau in Südwestdeutschland wurde z.B. die Tragschichtdicke von den üblichen 40 cm

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

bis 50 cm auf 60 cm erhöht und zusätzlich eine zweite Schicht Geokunststoffe in der Mitte der Tragschicht eingebaut, um den Belastungen auf der Strecke standhalten zu können [21]. Die Erhöhung der Tragfähigkeit ist jedoch nicht die einzige Aufgabe der Geokunststoffe in der Tragschicht. Zusätzlich zur Unterstützung der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit, sollen die eingebauten Geokunststoffe als Frostschutzschicht dienen und die anstehenden Böden vor dem Eindringen des Frosts schützen. Weiters sollen sie das Oberflächenwasser, in Verbindung mit dem Quergefälle der Schicht, ableiten und so als Dichtschicht gegenüber dem Untergrund fungieren. Um das zu ermöglichen werden hohe hydraulische Anforderungen an die Geokunststoffe gestellt. Aus diesem Grund werden vor allem Vliese für den Einbau verwendet. Vliese dienen auch als zusätzliche Filterschicht, um die Vermischung zwischen Schotterbett und Untergrund zu verhindern (siehe Abbildung 2.4) [30].

2.1.5 Anforderungen an die Tragschicht

In den geltenden Normen und Regelwerken werden Anforderungen an die Tragschicht gestellt, die bei der Ausführung erfüllt werden müssen. Diese Regelungen beinhalten sowohl das Tragschichtmaterial, als auch den Prozess der Herstellung. Wichtige Regelwerke für den Einbau einer Tragschicht sind unter anderem: RVS 08.03.01 [41], RVS 08.03.02 [42], RVS 08.03.04 [43], RVS 08.15.01 [44], Technische Lieferbedingungen der ÖBB TL 07.09.18 [34].

2.1.5.1 Anforderungen an das Tragschichtmaterial

Beim Material von ungebundenen Tragschichten muss es sich um ein qualitätsgesichertes Korngemisch handeln, das den Technischen Lieferbedingungen TL 07.09.18 [34] der ÖBB und der RVS 08.15.01 [44] entspricht. In der RVS 08.15.01 ist unter anderem festgelegt, wie die Kornverteilung des Tragschichtmaterials auszusehen hat (siehe Abbildung 2.5). Die Sieblinie des eingebauten Materials muss zwischen den zwei abgebildeten Kurven liegen. Bei der vorgegebenen

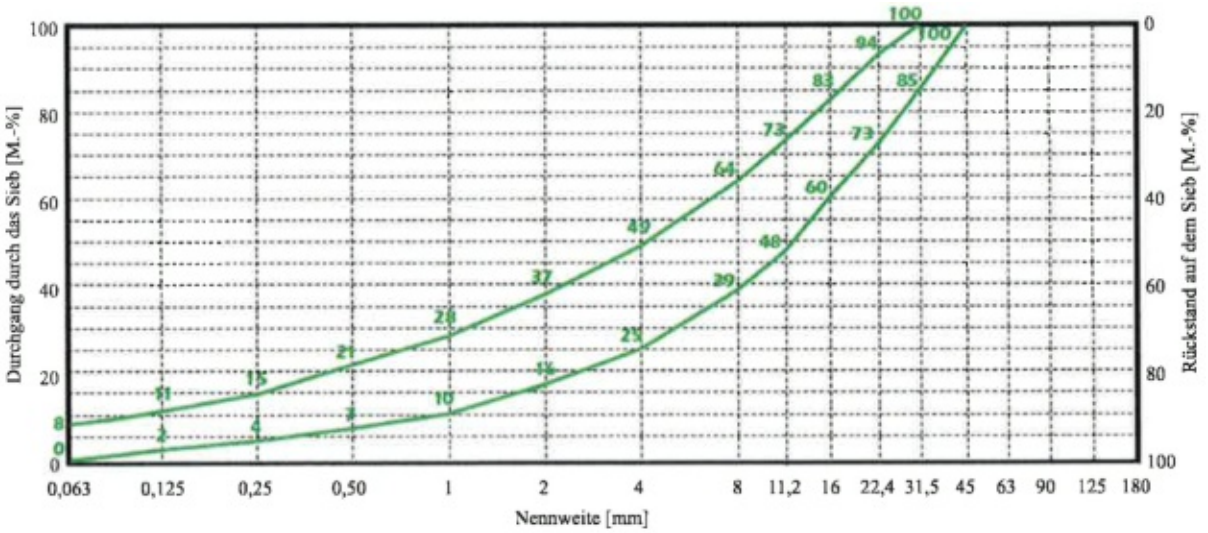


Abb. 2.5: Sieblinie für ungebundenen Obere Tragschichten 0/32 (im Anlieferungszustand) nach [44]

Sieblinie des Tragschichtmaterials handelt es sich um sandige Kiese mit einem sehr geringen Feinkornanteil. Der maximale Anteil an Körnern $< 0{,}03$ mm darf 3% der Gesamttrockenmasse nicht überschreiten und zumindest 90% des Materials muss aus Brechkorn bestehen, da Brechkorn

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

zu einer größeren Verzahnung im Boden führt [13]. Zusätzlich müssen die Korngemische frostsicher sein und eine ausreichende Verdichtbarkeit aufweisen. Außerdem müssen sie der Beanspruchung bei Einbau und unter Verkehr standhalten. Um die Frostsicherheit zu gewährleisten, ist ein sehr geringer Anteil an Feinkörnern notwendig. Im Gegensatz dazu steht die Verdichtbarkeit, die durch einen gewissen, jedoch nicht zu großen Anteil an Feinkörnern deutlich verbessert wird. Im optimalen Fall wird durch eine gut abgestufte Sieblinie die Verdichtungsfähigkeit erhöht und eine höhere Lagerungsdichte erreicht [7]. Das gesamte Tragschichtmaterial, welches im Bereich der Strecken der ÖBB eingebaut wird, muss aus einem von der ÖBB zugelassenen Werk stammen. Grundsätzlich gilt, je geringer die Tragfähigkeit des anstehenden Untergrundes, desto größer muss die Tragfähigkeit der Tragschicht sein [13, 29].

2.1.5.2 Anforderungen an die Herstellung der Tragschicht

Genauso wie die Materialzusammensetzung, ist auch die Herstellung der Tragschicht an genaue Vorgaben gebunden. Aufgrund der in Österreich üblichen Annahme einer Frosteindringtiefe von 80 cm bis 100 cm, ergibt sich die notwendige Mächtigkeit einer Tragschicht von ≥ 40 cm. In Sonderfällen und bei frostunempfindlichem Untergrund ist es möglich die Tragschichtmächtigkeit auf bis zu 20 cm zu reduzieren. Üblicherweise wird die Tragschicht mit einer Mächtigkeit von 40 cm bis 50 cm ausgeführt [13]. Während der Herstellung der Tragschicht muss darauf geachtet werden, dass das Unterbauplanum tragfähig ist. Bei einem aufgeweichten Unterbauplanum darf keine Tragschicht eingebaut werden. In einem solchen Fall sind Maßnahmen nach RVS 08.03.01 [41] zu setzen.

Um die Entwässerung zu gewährleisten, muss eine Planumsquerneigung von 5% jederzeit gegeben sein. Das Planum muss eben sein und ein gleichmäßiges Tragverhalten aufweisen. Falls ein Geokunststoff unter der Tragschicht eingebaut wird, muss dieser um mindestens 10 cm über das seitliche Ende der Tragschicht hinausragen [7, 13]. Das Tragschichtmaterial muss während des Einbaus den optimalen Wassergehalt haben. Dieser wird in Proctor-Versuchen zuvor ermittelt. Das einzubauende Tragschichtmaterial wird im Werk bereits befeuchtet und mit dem optimalen Wassergehalt auf die Baustelle gebracht.

Auch nach dem Einbau stellen die ÖBB Anforderungen an die Tragschicht. Die in Tabelle 2.1 angegebenen Werte beziehen sich auf den Verdichtungsgrad D_{Pr}, den Verformungsmodul E_{v1} und den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} und müssen nach dem Einbau erreicht werden.

Tab. 2.1: Verdichtungsanforderungen für den Einbau von Tragschichten für die Unterbauherstellung von bestehenden Eisenbahnstrecken nach RVS 08.03.01 [41]

Unterbauherstellung	$\mathbf{D_{Pr}}$ [%]	$\mathbf{E_{v1}}$ [MN/m^2]	$\mathbf{E_{vd}}$ [MN/m^2]
Obere Tragschicht	97	35	38
Untere Tragschicht	97	30	34
Unterbauplanum*	–	20	24

* Bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit ≤ 160 km/h

2.1.6 Aufbau des Oberbaus

Der Oberbau lässt sich in mehrere Bestandteile unterteilen. Er besteht, wie in Abbildung 2.2 zu sehen, aus dem Gleisrost, welcher sich aus Schienen und Schwellen zusammensetzt, und der Bettung. Es gibt zwei verschiedene Fahrwegsysteme, auf denen die Schwellen gelagert werden können: Die Feste Fahrbahn und das Schotterbett. Bei der Festen Fahrbahn wird der Gleisrost 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

die Tragplatte aus Beton einbetoniert. Diese Variante wird oft in Tunneln in städtischen Gebieten verwendet [33, 35]. Da das Thema dieser Arbeit die Tragschichtverdichtung eines Bahnkörpers mit Schotteroberbau ist, wird die Ausführung einer Festen Fahrbahn als Oberbaukonstruktion nicht weiter berücksichtigt. Die andere Möglichkeit der Lagerung des Gleisrostes ist der Schotteroberbau. Dabei wird der Gleisrost in eine Schotterschicht gebettet bzw. „schwimmt“ in dieser. Die Gleislagestabilität wird dadurch ein wenig verschlechtert, jedoch kann die Gleislage bei dieser Lagerungsart maschinell relativ leicht berichtigt werden. Die wichtigsten Anforderungen an das Schotterbett sind die elastische Bettung des Gleisrostes, die Sicherung der Lage der Gleisschwellen, die gleichmäßige Weiterleitung des Schwellendrucks an den Untergrund und eine ausreichende Wasser- und Luftdurchlässigkeit, um ein schnelles Abfließen von Oberflächenwasser auf dem Gleisplanum zu ermöglichen [28, 33].

2.2 Tragschichtsanierung im Zuge der Unterbausanierung

2.2.1 Allgemeines zur Gleiskörpersanierung

Um die Funktionsfähigkeit von Gleiskörpern aufrecht zu erhalten, müssen diese in regelmäßigen Abständen gewartet werden. Aufgrund der vielen äußeren Einflüsse, denen Gleiskörper ausgesetzt sind, ist es unvermeidbar, dass diese Abnutzungserscheinungen zeigen. Zu den größten Einflüssen zählen die statischen und dynamischen Belastungen durch die Benutzung der Strecke und die Belastungen durch Witterung. Um dem Versagen bzw. dem Verlust der Gebrauchstauglichkeit entgegenzuwirken ist es notwendig, in regelmäßigen Abständen Wartungsarbeiten durchzuführen und Abschnitte zu erneuern. Da sich die verschiedenen Bestandteile eines Gleiskörpers unterschiedlich schnell abnutzen, wurde für die einzelnen Komponenten eine Lebensdauer festgelegt, auch Durcharbeitungszyklus genannt. Diese entspricht der Zeit nach der die Komponenten ausgetauscht oder saniert werden müssen. Einige Beispiele für die Lebensdauer verschiedener Komponenten bei normal beanspruchten Hauptgleisen sind in Tabelle 2.2 gegeben [29, 31].

Tab. 2.2: Ausgewählte Instandhaltungsmaßnahmen für Gleiskörper [29]

Maßnahme	Lebensdauer
Stopfen	4 – 5 Jahre
Schienenerneuerung	12 – 15 Jahre
Betonschwellenerneuerung	30 – 40 Jahre
Schottererneuerung	20 – 30 Jahre
Sanierung Untergrund	> 40 Jahre

Da der Großteil des österreichischen Streckennetzes aus dem 19. Jahrhundert stammt und die heutigen Streckengeschwindigkeiten und Achslasten durch moderne technische Mittel deutlich höher sind, als zur Zeit der Erbauung üblich war, sind diese deutlich höheren Belastungen ausgesetzt, als bei der Herstellung geplant waren [40]. Die meisten Instandhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen bis Mitte des 20. Jahrhundert bezogen sich jedoch nur auf die Ertüchtigung des Oberbaus. Der Unterbau wurde bei diesen Ausbauten häufig vernachlässigt und bedarf in vielen Fällen einer dringenden Modernisierung [31].

2.2.2 Zustandsbewertung des Fahrwegs

Um einen Überblick über das Streckennetz zu behalten und die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen einteilen zu können, führt die ÖBB Zustandsbewertungen des erweiterten Fahrwegs durch. Der erweiterte Fahrweg ist ein Sammelbegriff für alle Ober- und Unterbauanlagen mit Einfluss

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

auf die Gleislage [13]. Das Streckenband wird dazu in jeweils 100 m lange Abschnitte unterteilt. Diese werden in Folge einzeln bewertet. In die Bewertung fließen verschiedene Parameter wie Gleiszustand, Oberbauqualität und Unterbauzustand mit ein. Anhand der Bewertung werden die Streckenabschnitte in Klassen von I bis IV unterteilt, wobei Klasse I für keinen Handlungsbedarf und Klasse IV für unmittelbaren Handlungsbedarf steht. Klasse IV bedeutet jedoch nicht, dass ein Sicherheitsrisiko vorliegt, sondern dass rasche Maßnahmen zur Sanierung getroffen werden sollen [13].

2.2.3 Einfluss des Unterbauplanums

Der Zustand des Unterbaus und des Unterbauplanums haben einen hohen Einfluss auf die Veränderung der Gleislage und wie häufig diese saniert werden muss. Schäden am Unterbau senken somit die Lebensdauer der Gleisanlage und erhöhen im gleichen Maße die Instandhaltungskosten [22]. Dabei ist es weniger relevant, ob dieser Schaden eine Frosthebung ist oder es aufgrund von Kontakterosion zu einer Vermischung der Schichten kommt. Jegliche, die Tragfähigkeit mindernde, Schäden ziehen einen deutlich erhöhten Instandhaltungsaufwand nach sich [29].

2.2.4 Konventionelle Unterbausanierung

Bei einer konventionellen Unterbausanierung wird der Gleisrost abgebaut, danach wird der bestehende Unterbau mit Planierraupen zusammengeschoben. Das zusammengeschobene Material wird anschließend auf Eisenbahnwaggons oder LKWs geladen und abtransportiert. Das neue Tragschichtmaterial wird aus dem Werk mittels Eisenbahnwaggons oder LKWs auf die Baustelle transportiert, dort eingebaut und mit Walzen verdichtet. Danach wird das Schotterbett hergestellt und der Gleisrost wieder aufgebaut. Bei Anwendung dieser Methode wird die Tragschicht oft mehrschichtig (mit Frostschutzschicht und Planumsschutzschicht) eingebaut [29]. Durch das Befahren des Planums mit den Erdbaufahrzeugen, können schon während der Bauphase leichte Beschädigungen des Planums, wie z.B. Rillen im Planum, auftreten. Rillen fördern eine Ansammlung von Wasser und könnten unter Umständen zu Frostschäden führen. Prinzipiell ist jede Abweichung von einem leicht geneigten, perfekt ebenen Planum mit einer Reduktion der Lebensdauer des Unterbaus gekoppelt. Falls die zu sanierende Strecke in einem schwer zugänglichen Stück der Landschaft liegt, wird der Aufwand einer konventionellen Unterbausanierung durch die schwere Erreichbarkeit deutlich höher oder macht eine konventionelle Ausführung unter Umständen unmöglich [29].

2.3 Gleisgebundene Unterbausanierung mittels AHM 800-R

Die Alternative zur konventionellen Unterbausanierung ist die gleisgebundene Unterbausanierung. Bei dieser Methode wird anstatt der Erdbaufahrzeuge, eine vollautomatisierte Maschine verwendet, die den Unterbau aushebt und neu einbaut, ohne den Gleisrost abbauen zu müssen. Es gibt verschiedene Maschinensysteme, um eine gleisgebundene Unterbausanierung durchzuführen. In Österreich wird dafür vorwiegend die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R von *Plasser & Theurer* verwendet (siehe Abbildung 2.6).

2.3.1 Entstehung der gleisgebundenen Unterbausanierung

Schon in den Anfängen des Bahnbaus war bekannt, dass die Qualität der Ausführung des Erdbaus (zu diesem Zeitpunkt gab es die genaue Unterteilung in Unter- und Oberbau noch nicht) maßgebend zu den Kosten, aber auch zur Lebensdauer einer Bahnstrecke beiträgt [31]. Durch den

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: Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R im Einsatz. Foto: *Karl Heinz Ferk*

starken Anstieg der Lasten und Geschwindigkeiten ab dem 20. Jahrhundert war es notwendig, die alten Bahndämme zu ertüchtigen und zu modernisieren. Die nachträgliche Verbesserung des Unterbaus ist jedoch mit einem großen Aufwand verbunden, da der gesamte Gleisrost abgebaut werden muss (siehe Abschnitt 2.2.4). Um dieses Problem zu vermeiden, wurden Möglichkeiten und Techniken gesucht, die es ermöglichen den Unterbau zu ertüchtigen, ohne den Gleisrost abbauen zu müssen. Im Zuge dessen wurden Maschinen entwickelt, welche das Einbauen einer Tragschicht ohne Gleisabbau ermöglichen. Ab Ende 1960 war es in Österreich erstmals möglich, mittels einer Bettungsreinigungsmaschine eine Tragschicht aus einem Kies-Sand-Gemisch einzubauen, ohne den Gleisrost abbauen zu müssen. Diese Methode wird heute gleisgebundene Unterbausanierung genannt [31, 45]. Die Methode der gleisgebundenen Unterbausanierung wurde in den folgenden Jahren weiterentwickelt. Anfang der achtziger Jahre wurden die ersten kontinuierlich arbeitenden Maschinen zur Planumsverbesserung entwickelt [22].

2.3.2 Entwicklung der AHM 800-R

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ wurde 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung im Zuge des Brundtland Berichts neu definiert [52]:

> *„Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“*

In den folgenden Jahren begann der Begriff der Nachhaltigkeit an Relevanz zu gewinnen und war einer der wichtigsten Punkte im Zuge der UNO-Klimakonferenz 1992 in Rio de Janeiro [50]. Der Gedanke der Nachhaltigkeit war in dieser Zeit durch die Klimakonferenz sehr breit vertreten, dies regte auch im Bahnbau zur Entwicklung von nachhaltigen Konstruktionsmethoden und Verfahren an. Außerdem zeigte sich, dass die Wiederverwendung von Altschotter neben der Nachhaltigkeit auch ein großes Kosteneinsparungspotential mit sich brachte [14].

Der laufende Fortschritt in der gleisgebundenen Unterbausanierung führte dazu, dass die ÖBB in den neunziger Jahren eine leistungsstarke Gleisbaumaschine zum Einbau der Tragschicht entwickeln ließ, um diese im österreichischen Schienennetz zu verwenden. Die grundlegenden

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

Anforderungen der ÖBB an die Gleisbaumaschine setzte ein Recycling von Gleisschotter voraus. Die genauen Eckpunkte, welche die Maschine erfüllen sollte, waren [14, 45]:

- Möglichst kurze Maschinenbaulänge
- Durchschnittliche Einbauleistung: 40 m/h bei einer Tragschichtmächtigkeit von 45 cm
- Höchste Verdichtungsanforderungen an die Tragschicht
- Recycling des Oberbauschotters
- Befahren auf der Tragschicht liegenden Gleises (vor Einbau des Schotterbetts)

Plasser & Theurer konstruierte 1994 auf Basis dieser Angaben die AHM 800-R (dargestellt in Abbildung 2.6). Die größte Neuerung dieser Gleisbaumaschine im Vergleich zu den Vorgängern war die Integration des Recyclings von Altschotter in das Konzept der Aushubmaschine. Dieses Konzept ist heute zu einem zentralen Element der Planumsverbesserungsmaschinen geworden und wird in beinahe allen neueren Varianten von Planumsverbesserungsmaschinen weiterhin verwendet [22].

2.3.3 Aufbau und technische Daten der AHM 800-R

Die AHM 800-R besteht aus mehreren Sektionen, die zusammen einen über 50 m langen Zug ergeben. Abbildung 2.7 zeigt die Arbeitsweise und den Aufbau der AHM 800-R. Die verschiedenen Bereiche dienen dem Aushub und Einbau und der Aufbereitung des recycelten Materials. Zusätzlich gibt es im vorderen Bereich des Zugs noch eine Material-, Förder- und Siloeinheit (MFS) sowie im hinteren Bereich einen Antriebswagen und einen Behälterwagen für die Materialzufuhr. Im Bereich des Einbaus sind außerdem sechs Plattenverdichter angebracht, welche im Fokus dieser Arbeit stehen. Die Plattenverdichter sind in Abbildung 2.7 mit einem schwarzen Kreis markiert [20].

Die AHM 800-R kann mit einer Spitzenleistung von 60 m/h betrieben werden. Die Leistung einer 12-Stunden Schicht wird mit ca. 300 m angegeben. Die maximale Aushubtiefe beträgt 140 cm, die Aushubbreite ist variabel zwischen 4 m und 6 m wählbar. Die maximalen Einbauhöhen der Schichten sind 50 cm für die Planumsschutzschicht und 30 cm für den Oberbauschotter [20].

2.3.4 Arbeitsweise der AHM 800-R

Die AHM 800-R besitzt zwei unterschiedliche Aushubketten, die für den Aushub von Schotterbett (Schotteraushubkette) und Planum (Planumsaushubkette) verantwortlich sind. Durch diese Trennung ist die Wiederverwertung des Schotterbetts als Tragschichtmaterial möglich [20, 22].

Der Arbeitsverlauf ist in Abbildung 2.7 dargestellt und lässt sich folgendermaßen beschreiben: Der Gleisrost wird im Bereich der Aushubmaschine angehoben, damit die zwei Aushubketten darunter ausgerichtet werden können, um das vorhandene Material zu entfernen. Die erste Aushubkette (Schotteraushubkette) nimmt die ca. 30 cm starke Schicht Oberbauschotter (dargestellt in blau) auf und befördert diese in den vorderen Teil der Maschine. Im vorderen Bereich befindet sich der Recyclingteil, in dem der Schotter in einer Schotterbrechanlage zerkleinert wird. Die zweite Aushubkette (Planumsaushubkette) nimmt das restliche Material bis zu einer Tiefe von 140 cm unter der Schienenoberkante auf (dargestellt in braun) und befördert das Material zur Zugspitze, wo es in der MFS-Einheit gelagert und für den Abtransport verladen wird [20, 22]. Abbildung 2.8 zeigt die Aushubketten beim Abtragen des Oberbaus.

Der recycelte Oberbauschotter (dargestellt in braun) wird nach der Aufbereitung in den hinteren Bereich transportiert. Dort wird der gebrochene Schotter mit dem neuen, zugelieferten,

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

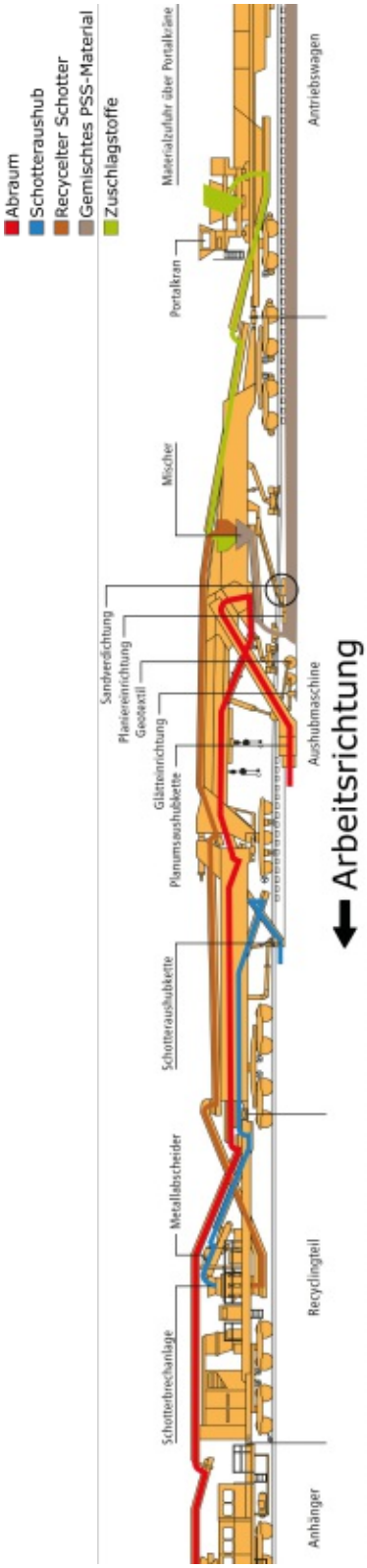


Abb. 2.7: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Arbeitsweise der AHM 800-R. Adaptiert nach [20]

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: Aushubketten beim Abtragen des Oberbaus [2]

qualitätsgesicherten Tragschichtmaterial (dargestellt in gelb) vermischt. Im Mischer gibt es die Möglichkeit, dem Material Wasser hinzuzufügen, um den Wassergehalt für den Einbau zu optimieren. Das gemischte Tragschichtmaterial (dargestellt in hellbraun) wird unter dem Gleisrost eingebracht, gleichmäßig verteilt und mit den sechs Plattenverdichtern verdichtet. Abbildung 2.9 zeigt die Plattenverdichter beim Verdichtungsvorgang unter dem Gleisrost. Vor dem Einbringen des Materials besteht die Möglichkeit für den Einbau von Geotextilien oder Hartschaumplatten. In diesem Fall wird das Tragschichtmaterial auf die eingebauten Geotextilien aufgebracht. Nach der Verdichtung wird der Gleisrost auf der Planumsschutzschicht abgelegt. Der Einbau des neuen Oberbauschotters erfolgt in einem separaten, zweiten Arbeitsgang. Der gesamte Materialtransport in der Maschine erfolgt mittels Förderbändern [20, 22, 45].

2.3.5 Material für den Einbau mittels AHM 800-R

Durch die Aufbereitung des Oberbauschotters im Zuge des Einbaus, kann der Bedarf an neuem Tragschichtmaterial um bis zu 50% reduziert werden. Durch das Recycling des Oberbauschotters werden jedoch höhere Anforderungen an das einzubauende Tragschichtmaterial gestellt, als das bei der konventionell hergestellten Tragschichten der Fall ist. Die erforderliche Kornverteilung des gemischten Materials für den Einbau mittels AHM 800-R ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Erwähnenswerte Punkte sind [13]:

- Maximaler Anteil von Körngrößen $< 0{,}03\,\mathrm{mm}$ beträgt 3%
- Brechkornanteil von 90%
- Neues Tragschichtmaterial nur aus von der ÖBB zugelassenen Werken
- Neues Tragschichtmaterial wird bereits mit optimalem Wassergehalt geliefert

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

2.3.6 Vorteile der gleisgebundenen Unterbausanierung

Die gleisgebundene Unterbausanierung bietet einige Vorteile im Vergleich zur konventionellen Unterbausanierung. Die Vorteile reichen von einer höheren Produktivität und Materialeinsparung bis hin zu einem nachhaltigeren Herstellungsprozess und einer höheren Qualität der Tragschicht [13–15, 40, 45]:

- Kein Abbau des Gleisrosts notwendig
- Bei zweigleisigen Strecken ist die Betriebsabwicklung am Nachbargleis möglich
- Hohe Arbeitsleistung (im Mittel 40 m/h), da der gesamte Einbau (Tragschicht und Geotextil) in einem Arbeitsschritt ausgeführt werden kann
- Dadurch eine geringere Umbauzeit und eine Verringerung der Sperrzeit von bis zu 50%
- Nur kurzzeitig offene Baugrube mit geringen Abmessungen (ca. 6 m lang und 1 m tief). Dadurch ist kein seitlicher Verbau der Baugrube notwendig
- Einsparung von bis zu 50% Neumaterial durch das Recycling von altem Gleisschotter
- Verringerung der notwendigen Tragschichtstärke durch den Einbau von Geokunststoffen
- Qualitativ hochwertige Tragschicht mit einer hohen Lebensdauer durch den Einbau von Geokunststoffen
- Gleichmäßige Verdichtung des Unterbauplanums und der Tragschicht und damit eine höhere Qualität der Tragschicht
- Guter Ausgleich zu weicher oder zu steifer Stellen im Unterbau
- Optimaler Wassergehalt des Tragschichtmaterials beim Einbau und Verdichten

Abb. 2.9: Plattenverdichter beim Verdichten des eingebrachten Tragschichtmaterials [13]

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

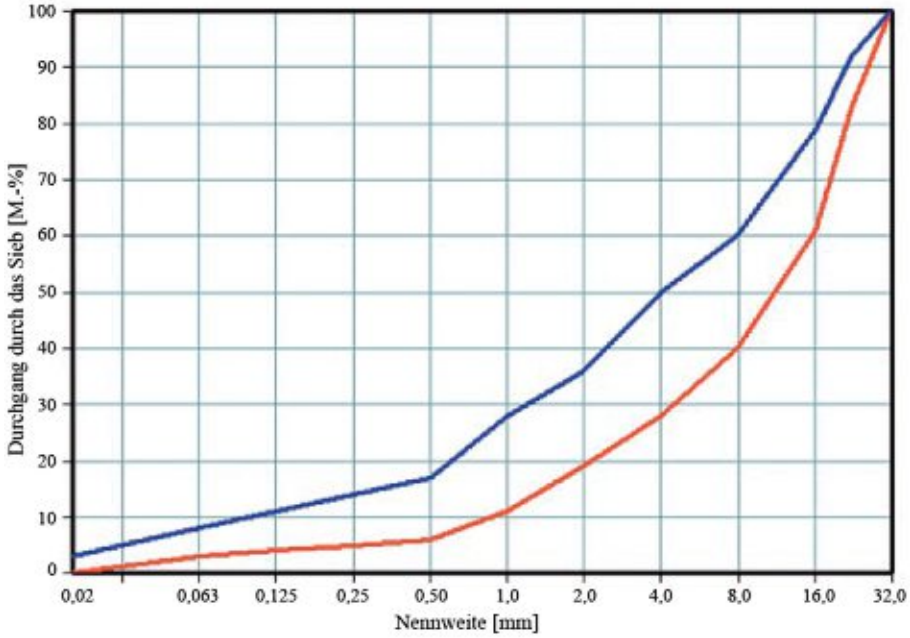


Abb. 2.10: Sieblinie des Tragschichtmaterials bei Einbau mittels AHM 800-R. Adaptiert nach [13]

- Verdichten des Unterbauplanums über die gesamte Breite und an den Böschungskanten möglich
- Kein Befahren des Unterbauplanums notwendig
- Keine Zufahrtsstraßen notwendig
- Keine stationäre Materialaufbereitungsanlage vor Ort notwendig
- Gesamter Materialtransport erfolgt im Bahngleis
- Auch bei Streckenabschnitten im schwierigen Gelände möglich

2.4 Verdichten von Böden als Verfahren zur Bodenverbesserung

An den Untergrund unter einem Bauwerk werden besondere Anforderungen gestellt. Diese geforderten Eigenschaften können sich, je nach Art des Bauwerks, unterscheiden und beziehen sich im Allgemeinen auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Durchlässigkeit. Wenn ein Boden diese Anforderungen nicht erfüllen kann, dann ist es möglich den Untergrund durch Bodenverbesserungsmaßnahmen zu optimieren [4]. Die durch diese Maßnahmen erwünschten Effekte sind [8]:

- Erhöhung der Tragfähigkeit
- Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit (Verringerung bzw. Vorwegnahme der Setzungen und Homogenisieren der Setzungen)
- Verringerung oder Erhöhung der Durchlässigkeit

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

- Verringerung des Verflüssigungspotenzials

In Tabelle 2.3 sind einige Maßnahmen der Bodenverbesserung aufgelistet und nach deren Prinzipien kategorisiert.

Bei Linienbauwerken, wie Bahntrassen oder Straßen, wird vor allem die Bodenverdichtung angewendet, um die geforderten Eigenschaften des Bodens zu erreichen.

Tab. 2.3: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren [5]

PRINZIP	VERFAHREN
Boden-ERSATZ	Bodenaustausch, Bodenaushub, Bodenverdrängung
Boden-ENTWÄSSERUNG	Flächendrainagen, Filterbrunnen, Vorbelastung ohne/mit Vertikaldrains, Vakuumkonsolidation
Boden-VERDICHTUNG (mechanisch)	Oberflächenverdichtung, Tiefenverdichtung (Rütteldruckverfahren, Rüttelstopfverfahren), Impulsverdichtung, Dynamische Intensivverdichtung
Boden-VERÄNDERUNG (hydraulisch)	Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, Injektionen, Düsenstrahlverfahren, Tiefreichende Bodenstabilisierung, Bodenvernadelung, Bodenvereisung
Boden-BEWEHRUNG	Bewehrungslagen (Geokunststoffe)

2.4.1 Verfahren zur Verdichtung von Böden

Da die Bodenverdichtung für den Bahnbau die relevanteste Art der Bodenverbesserung darstellt, liegt der Fokus dieses Kapitels auf den verschiedenen Verfahren zur Verdichtung von Böden.

Bei der Bodenverdichtung werden die Untergrundeigenschaften durch ein Aufbringen mechanischer Einwirkungen verbessert. Das Aufbringen mechanischer Einwirkungen hat eine Verringerung des Porenanteils zur Folge. Die daraus resultierenden Effekte sind eine Vorwegnahme der Setzungen, eine Homogenisierung der Untergrundeigenschaften, eine Erhöhung der Tragfähigkeit und eine Reduktion der Durchlässigkeit. Die Verfahren zur Verdichtung von Böden können in oberflächennahe und tiefreichende Verdichtungsverfahren eingeteilt werden. Abbildung 2.11 zeigt eine Übersicht gängiger Verdichtungsverfahren in Abhängigkeit von ihrer Tiefenwirkung. Zusätzlich ist es möglich die Verfahren in statische und dynamische Verfahren einzuteilen [4].

Als Verfahren mit hoher Tiefenwirkung werden Rütteldruck- und Rüttelstopfverdichtung (abhängig von der Bodenart) eingesetzt. Dabei wird ein Rüttler in den Boden eingeführt, welcher in bis zu 50 m Tiefe den Boden verdichtet. Bei der Impulsverdichtung bzw. der Dynamischen Intensivverdichtung wird in regelmäßigen Abständen ein Impuls in den Boden eingebracht. Bei der Impulsverdichtung prallt ein Fallgewicht aus einer geringen Höhe mit einer relativ hohen Schlagfrequenz auf eine Verdichtungsplatte und erzeugt dadurch die notwendige Verdichtungsenergie. Bei der Dynamischen Intensivverdichtung wird ein schweres Gewicht mehrmals aus großer Höhe fallen gelassen um die notwendige Verdichtungsenergie zu erzeugen [16, 39].

2.4.1.1 Oberflächennahe Bodenverdichtung mittels Walzen

Eine Möglichkeit oberflächennahe Bodenschichten großflächig zu verdichten, ist die Verwendung von Walzen, wobei zwischen statischen und dynamischen Walzen unterschieden wird. Bei statischen Walzen trägt ausschließlich das Eigengewicht zur aufgebrachten Verdichtungsenergie bei.

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

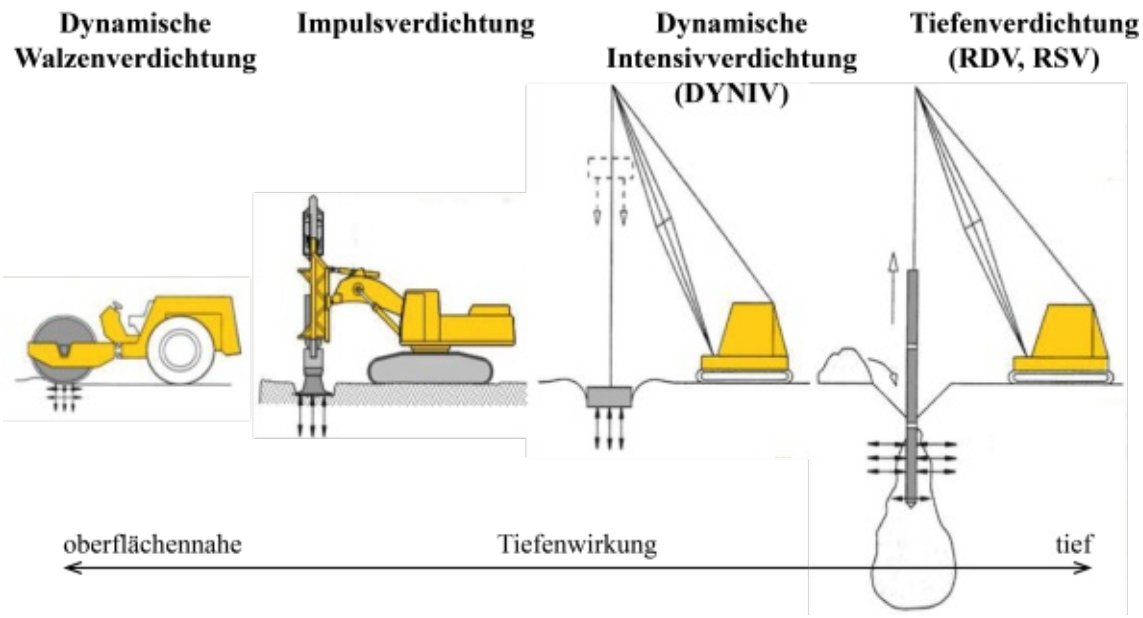


Abb. 2.11: Darstellung ausgewählter Verdichtungsverfahren. Adaptiert nach [5]

Um eine ausreichende Verdichtung zu erzielen, sind daher sehr große Massen notwendig. Aus diesem Grund kommen statische Walzen nicht mehr so häufig bzw. nur für spezielle Anwendungen zum Einsatz [27].

Dynamische Walzen unterscheiden sich von statischen Walzen vor allem durch die Bandage, welche beim Verdichten in Schwingung versetzt wird. Durch das Schwingen der Bandage wird auch der Untergrund in Schwingung versetzt, was zu einer Reduktion der Korn-zu-Korn-Spannung führt und so eine erleichtere Kornumlagerung ermöglicht. Es gibt mehrere Arten dynamischer Walzen: Vibrationswalzen, Oszillationswalzen, Walzen mit Richtschwinger und selbstregelnde Walzen. Diese unterscheiden sich durch die Art der Bandagenanregung und das Bewegungsverhalten der Bandage [4]. Abbildung 2.12 zeigt die Darstellung einer dynamischen Walze, ausgestattet mit einer Vibrationsbandage (links) und einer Oszillationsbandage (rechts).

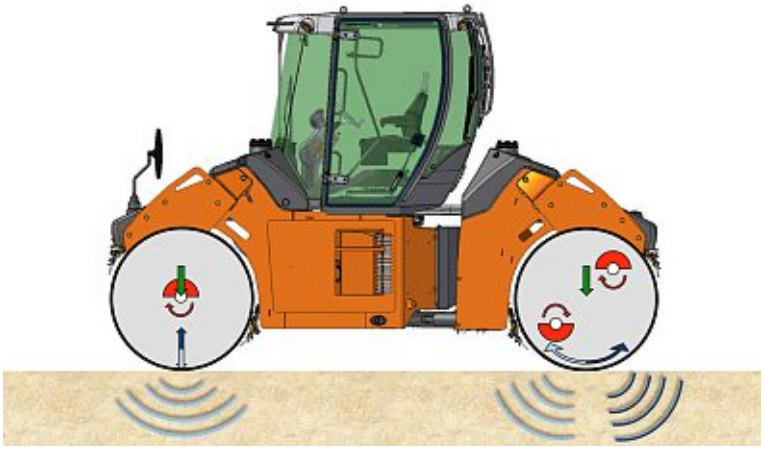


Abb. 2.12: Darstellung einer dynamischen Walze mit einer Vibrationsbandage (links) und einer Oszillationsbandage (rechts) [38]

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

Vibrationswalzen

Vibrationswalzen sind die weltweit am häufigsten verwendeten Walzen. Die Bandage wird durch eine um die Bandagenachse rotierende Unwuchtmasse in Schwingung versetzt (siehe Abbildung 2.12, linke Bandage). Die Richtung der aus der Schwingung resultierenden Kraft ändert sich zu jedem Zeitpunkt. Auf den Untergrund wirken dabei vorwiegend vertikal gerichtete Schläge der Bandage, die die Verdichtungswirkung unterstützen. Daraus resultieren die ausgeprägte Tiefenwirkung (bis max. 1 m) von Vibrationswalzen und die vergleichsweise großen Erschütterungen in der Umgebung der Walze. Der von der Bandage angeregte Untergrund interagiert während der Verdichtung mit der Bandage. Der Boden wird durch die Bandage in Schwingung versetzt, gleichzeitig beeinflusst die Reaktion des Bodens das Bewegungsverhalten der Bandage. Das Verhalten des Interaktionssystems zwischen Bandage und Boden wird von den Parametern Bodensteifigkeit, Fahrgeschwindigkeit, Erregeramplitude, Erregerfrequenz und dem Verhältnis zwischen Rahmen- und Bandagenmasse maßgeblich beeinflusst. Die durch diese Interaktion hervorgerufenen Bewegungsmuster werden Betriebszustände genannt [4]. Abbildung 2.13 zeigt die Definition der Betriebszustände nach *Adam* [3].

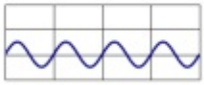
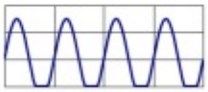
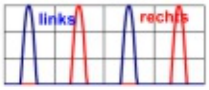
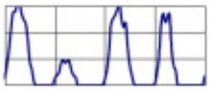
Bewegung der Bandage	Interaktion Bandage - Boden	Betriebs-zustand	Verlauf der Bodenkontaktkraft	Anwendung der FDVK	Boden-steifigkeit	Fahrge-schwindig-keit	Erreger-amplitude
periodisch	ständiger Kontakt	KONTAKT		ja	gering	hoch	klein
	periodischer Kontaktverlust	ABHEBEN		ja	↓	↑	↓
		SPRINGEN		ja			
		TAUMELN		nein			
chaotisch	aperiodischer Kontaktverlust	CHAOS		nein	hoch	niedrig	groß

Abb. 2.13: Betriebszustände einer Vibrationswalze [3]

Oszillationswalzen

Oszillationswalzen unterscheiden sich von Vibrationswalzen durch die Anordnung der Unwuchtmassen in der Bandage. Die zwei Unwuchtmassen in der Bandage sind um 180° gedreht punktsymmetrisch zur Bandagenachse angeordnet und besitzen dieselbe Masse und Exzentrizität (siehe Abbildung 2.12, rechte Bandage). Sie rotieren gleichsinnig, was zu einer Vorwärts-Rückwärts-Rotation der Bandage führt, ohne dass die Bandage in vertikaler oder horizontaler Richtung schwingt. Die Verdichtung des Untergrundes erfolgt somit durch Schubkräfte, die über die Reibung zwischen Bandagenmantel und Boden übertragen werden. Bedingt durch die Anregungsart, haben Oszillationswalzen eine geringere Tiefenwirkung als vergleichbare Vibrationswalzen. Dafür entstehen bei einer Bodenverdichtung mit Oszillationswalzen deutlich geringere Erschütterungen, als bei der Verwendung von Vibrationswalzen. Oszillationswalzen werden vor allem im Asphaltbau

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

eingesetzt, da dort die geringere Tiefenwirkung aufgrund der geringeren Schichtstärke keine Rolle spielt. Zusätzlich werden Oszillationswalzen auch in erschütterungsempfindlichen Bereichen eingesetzt. Die Interaktion der Oszillationswalze mit dem Boden unterscheidet sich aufgrund der Wirkungsrichtung der Kräfte deutlich von der Vibrationswalze. Aus diesem Grund sind unterscheiden sich auch die Betriebszustände von Oszillationswalzen und Vibrationswalzen [4]. Die Betriebszustände von Oszillationswalzen sind in Abbildung 2.14 zusammengefasst.

Interaktion Bandage-Boden	Betriebszustand	Verlauf der horizontalen Lagerbeschleunigung	Anw. d. FDVK	Fahr-geschw.	Boden-steifigkeit	Erreger-amplitude	Erreger-frequenz
ständiger Kontakt	Haften		ja	niedrig	gering (Haften)	klein (Haften)	gering (Haften)
periodischer Kontaktverlust	Einseitiges Gleiten		ja				
	Asymmetrisches Gleiten		ja		hoch (Gleiten)	groß (Gleiten)	hoch (Gleiten)
	Symmetrisches Gleiten		ja	hoch			

Abb. 2.14: Betriebszustände einer Oszillationswalze [36]

2.4.1.2 Oberflächennahe Bodenverdichtung mittels Vibrationsplatten

Vibrationsplatten zählen, genauso wie dynamische Walzen, zu den dynamischen Verdichtungsgeräten. Im Vergleich zu Walzen sind Vibrationsplatten handlicher und für die Verdichtung von kleineren Flächen konzipiert (z.B. überschaubare Flächen im Wegebau oder auf Rohrleitungs- und Kabelbaustellen). Vibrationsplatten werden in der Regel handgeführt und sind sehr flexibel einsetzbar. Abbildung 2.15 zeigt den Aufbau einer Vibrationsplatte. Sie bestehen aus einer Grundplatte, auf der ein Unwuchtsystem angebracht ist. Darüber befindet sich die Antriebseinheit, welche durch Gummielemente mit der Grundplatte verbunden ist. Die Gummielemente wirken schwingungsdämpfend und entkoppeln die zwei Massen weitgehend voneinander. Die Schwingung der Grundplatte wird durch eine Rotation der Unwuchtmasse um die Achse erzeugt. Durch die geringen Massen von Vibrationsplatten, besitzen diese zumeist eine geringe Tiefenwirkung [27].

Anbauvibrationsplatten

Mehrere Vibrationsplatten können zu einer Vibrationsplatten-Einheit zusammengeschlossen werden und daraufhin an einem Fahrzeug angebracht werden. Das ermöglicht einerseits eine größere Arbeitsbreite bei gleichem Personaleinsatz und andererseits eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit und einen höheren Arbeitskomfort durch die Koppelung der Platten mit einem Fahrzeug. Die so an ein Fahrzeug angebrachten Vibrationsplatten werden als Anbauvibrationsplatten bezeichnet. Da Vibrationsplatten, im Vergleich zu Walzenzügen, mit einer höheren Frequenz, aber einer geringeren Amplitude arbeiten, wird dieses System verwendet, wenn es sich beim zu verdichtenden Untergrund um einen Boden handelt, der zu Wiederauflockerung neigt. Zusätzlich kann auf die Anbauvibrationsplatten ein abwärts gerichteter Hydraulikdruck aufgebracht werden, um die Verdichtungswirkung zu erhöhen [27, 39].

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

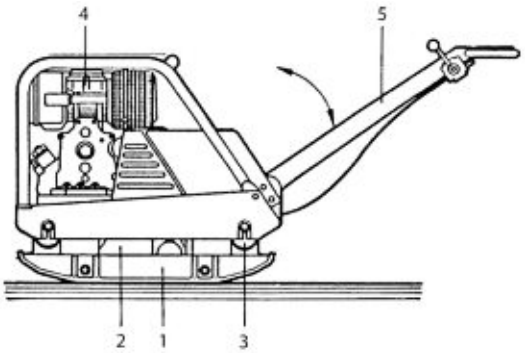


Abb. 2.15: Schematische Darstellung einer Vibrationsplatte [27]

2.4.2 Plattenverdichter WBB530 als Anbauverdichter

Der Plattenverdichter WBB530 [51] der Fa. *Wimmer* wird bei gleisgebundenen Unterbausanierungsmaschinen der Fa. *Plasser & Theurer* verwendet. Die AHM 800-R ist mit sechs parallel laufenden Plattenverdichtern dieses Typs ausgestattet, um die eingebaute Tragschicht zu verdichten. Da das Verdichtungsgerät der Unterbausanierungsmaschine, aufgrund des angehobenen Gleisrosts, nur eine sehr geringe Bauhöhe aufweisen darf, eignet sich der Plattenverdichter WBB530 mit 38 cm Höhe gut für diese Aufgabe. Vier der sechs Plattenverdichter der AHM 800-R sind über einen Führungsbalken mit der Maschine verbunden. Über den Führungsbalken kann ein konstanter Anpressdruck auf die Plattenverdichter ausgeübt werden [7]. Tabelle 2.4 fasst die technischen Daten des Plattenverdichters zusammen.

Tab. 2.4: Technische Maschinendaten des Plattenverdichters WBB530 [51]

MASCHINENDATEN Plattenverdichter Wimmer WBB530	
Höhe	0,380 m
Länge Grundplatte	0,635 m
Breite Grundplatte	1,000 m
Grundfläche	0,635 m^2
Masse (Eigengewicht)	650 kg
Frequenz	43,3 Hz
Zentrifugalkraft	52 kN
Amplitude lt. Messung*	ca. 2,75 mm

* Vertikale Freischwingung ohne Bodenkontakt

2.5 Verdichtungskontrollen im Feld

Verdichtungskontrollen können in Prüfungen im Feld und Prüfungen im Labor unterteilt werden. Während im Labor Versuche an Bodenproben unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt

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, deren Ziel die Analyse einer Bodenprobe in Bezug auf z.B. Korngrößenverteilung, Verdichtungsfähigkeit oder lockerste und dichteste Lagerung ist, werden die Prüfungen im Feld durchgeführt, um Aussagen über die örtlichen Gegebenheiten zu liefern. Zusätzlich können Versuche im Feld zeitnahe vor Ort durchgeführt werden und eignen sich dadurch zur laufenden Kontrolle des Verdichtungserfolges. Die häufigsten Verdichtungskontrollen im Feld sind [4]:

- Statischer Lastplattenversuch
- Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät
- Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)

Bei den angeführten Verdichtungskontrollen wird im Zuge eines Feldversuches ein Parameter ermittelt, von dem auf den Verdichtungserfolg geschlossen werden kann. Diese Prüfmethoden werden als indirekte Prüfverfahren bezeichnet. Weitere Beispiele von indirekten Prüfverfahren sind u.A. Druck- und Rammsondierungen [4].

2.5.1 Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät

Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät ist ein punktueller Feldversuch zur indirekten Verdichtungskontrolle. Im Zuge des Versuchs wird der dynamische Verformungsmodul E_{vd} des Bodens oder der Schüttlage bestimmt. Zusätzlich eignet sich der Versuch auch zur Bewertung der Tragfähigkeit des Untergrundes [4]. Der dynamische Lastplattenversuch ist in der RVS 08.03.04:2008 [43] geregelt.

Das Leichte Fallgewichtsgerät und seine Komponenten sind in Abbildung 2.16 dargestellt. Es besteht aus einer Stahlplatte mit einem Durchmesser von 30 cm, die bei der Versuchsdurchführung auf den Boden aufgesetzt wird. Darauf ist (auf einer Zentrierkugel) eine Stange als Leitvorrichtung für das Fallgewicht (10 kg) befestigt. Am unteren Ende der Stange befindet sich ein Feder-Dämpfer-Element, welches den Stoß des Fallgewichts dämpft und weitergibt. Im oberen Bereich der Stange ist eine Auslösevorrichtung angebracht. In der Platte ist ein Beschleunigungssensor eingebaut, dessen Signale direkt an das angeschlossene Messgerät geleitet werden und dort in den Verformungsmodul E_{vd} umgerechnet werden. Die Messtiefe des Dynamischen Lastplattenversuchs liegt bei maximal 60 cm [4, 6].

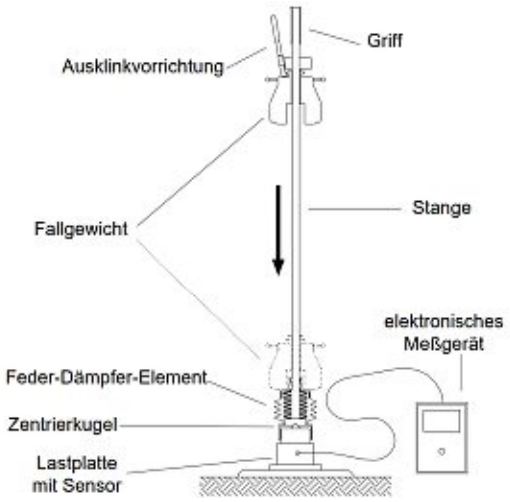


Abb. 2.16: Komponenten des Leichten Fallgewichtsgeräts [4]

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

Bei der Versuchsdurchführung muss die Grundplatte kraftschlüssig auf dem Boden aufliegen. Es ist möglich die Platte auf ein dünnes Sandbett aufzulegen, um einen möglichst kraftschlüssigen Kontakt zum Untergrund zu erhalten. Daraufhin wird die Ausklinkvorrichtung bedient und das Fallgewicht fällt auf das Feder-Dämpfer-Element. Dadurch wird ein genau definierter Stoß auf die Platte ausgeübt, der eine normierte Kontaktspannung von $\sigma_{const} = 0{,}1\,\mathrm{MN/m^2}$ in der Kontaktfläche erzeugt. Der Beschleunigungssensor misst die durch den Stoß entstehenden Beschleunigungen der Platte. Aus der gemessenen Beschleunigung ermittelt das Gerät die Vertikalverschiebung. Auf Basis der ermittelten Verschiebung kann mithilfe der normierten Kontaktspannung und des definierten Plattenradius der dynamischen Verformungsmodul E_{vd} ermittelt werden (Gleichung 2.1). Um eine gültige Messung durchzuführen, müssen an jedem Messpunkt drei Vorbelastungsstöße und drei Messstöße durchgeführt werden. Nach einer gültigen Messung wird der Verformungsmodul E_{vd} umgehend auf dem Display des Geräts angezeigt [6].

Die Gleichung, die der Berechnung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} zugrunde liegt, ist zufolge [6]:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{const}}{z_{max}} \tag{2.1}$$

Durch Einsetzen der genormten Werte $r = 0,15\,\mathrm{m}$ und $\sigma_{const} = 0,1\,\mathrm{MN/m^2}$ in Gleichung 2.1 folgt Gleichung 2.2, welche ausschließlich von der Vertikalverschiebung z_{max} abhängt. z_{max} ist dabei als Mittelwert der Vertikalverschiebung der drei Messstöße in mm definiert.

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} [\mathrm{MN/m^2}] \tag{2.2}$$

Ein großer Vorteil des dynamischen Lastplattenversuchs ist der einfache Versuchsaufbau und das vergleichsweise leichte und handliche Gerät. Dies erlaubt einer einzelnen Person die rasche und unkomplizierte Durchführung mehrerer aufeinanderfolgender Messungen. Außerdem kann das Gerät auch in engen Arbeitsräumen problemlos verwendet werden [6].

2.5.2 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) ist eine walzenintegrierte, indirekte Verdichtungskontrolle für dynamische Walzen. Die Walze fungiert dabei nicht nur als Verdichtungsgerät, sondern auch als Messgerät. Durch den Einsatz eines FDVK-Systems ist es möglich, den Verdichtungserfolg während des Verdichtungsvorgangs zu ermitteln und zu optimieren.

Das Prinzip der FDVK ist die Analyse der Interaktion zwischen Bandage und Untergrund. Das Bewegungsverhalten der Bandage lässt sich im frei schwingenden Zustand mit einer Sinusschwingung beschreiben. Durch die Interaktion zwischen Bandage und Boden wird diese Sinusschwingung beeinflusst. Werden während einer Verdichtungsfahrt sowohl die Maschinen- (Masse, Geometrie) als auch die Prozessparameter (Erregerfrequenz, Erregeramplitude, Fahrtrichtung, Fahrgeschwindigkeit) konstant gehalten, ist eine Änderung des Bewegungsverhaltens der Bandage nur durch eine Änderung der Bodeneigenschaften bzw. Untergrundverhältnisse möglich. Um den Verdichtungserfolg auf Basis der Änderung des Bewegungsverhaltens der Bandage zu bestimmen, werden die Beschleunigungen der Bandage gemessen, und daraus eine steifigkeitsproportionale Kenngröße – ein FDVK-Wert – errechnet, die Aufschluss über den aktuellen Verdichtungszustand gibt. Es gibt derzeit vier etablierte FDVK-Messwerte für Vibrationswalzen, die auf unterschiedliche Weise den Verdichtungszustand ermitteln. Bei drei der vier FDVK-Werten erfolgt die Ermittlung des Wertes durch die Analyse des Arbeitsdiagramms im Zeitbereich. Der vierte FDVK-Wert wird durch eine Analyse der Beschleunigungssignale im Frequenzbereich ermittelt. In Abbildung 2.17 ist ein Arbeitsdiagramm einer dynamischen Walzenverdichtung

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

dargestellt [4, 6]. Für Oszillationswalzen wurde 2016 das erste funktionierende FDVK-System entwickelt [36].

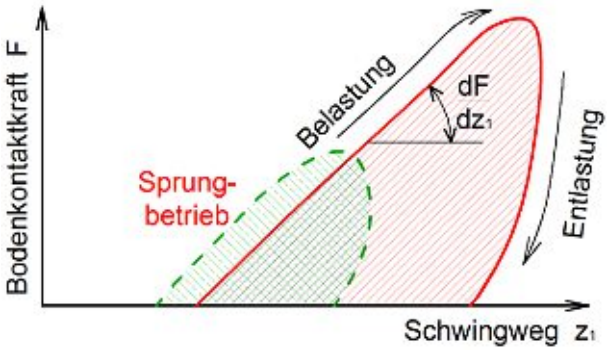


Abb. 2.17: Arbeitsdiagramm einer dynamischen Walzenverdichtung. Adaptiert nach [6]

FDVK-Werte sind keine bodenphysikalischen Eigenschaften und repräsentieren somit nicht direkt den Verdichtungszustand des Bodens. Sie hängen teilweise stark vom Betriebszustand, der Fahrgeschwindigkeit, der Erregerfrequenz und der Erregeramplitude ab. Um aus einem FDVK-Wert auf den Zustand des Bodens schließen zu können, muss im Vorfeld eine Kalibrierung erfolgen, bei der die FDVK-Werte anhand der Werte einer konventionellen Verdichtungskontrolle kalibriert werden. Diese Kalibrierung ist ausschließlich für die eingesetzte Kombination aus Walze und FDVK-System gültig und ist in der RVS 08.03.02 [42] geregelt [4, 6].

Bei der Anwendung der FDVK wird während der Verdichtungsfahrt von einem Computer der FDVK-Werte der aktuellen Postion der Walze errechnet. Daraufhin wird auf einem Bildschirm angezeigt, welche Stellen des Feldes ausreichend verdichtet sind und wo noch Überfahrten erforderlich sind. Abbildung 2.18 zeigt (links oben) eine Vibrationswalze mit der benötigten Ausstattung eines FDVK-Systems. Links unten sind die gemessenen Beschleunigungen während einer Verdichtungsfahrt zu sehen und auf der rechten Seite zwei Beispiele für den Verdichtungsfortschritt eines Feldes [4].

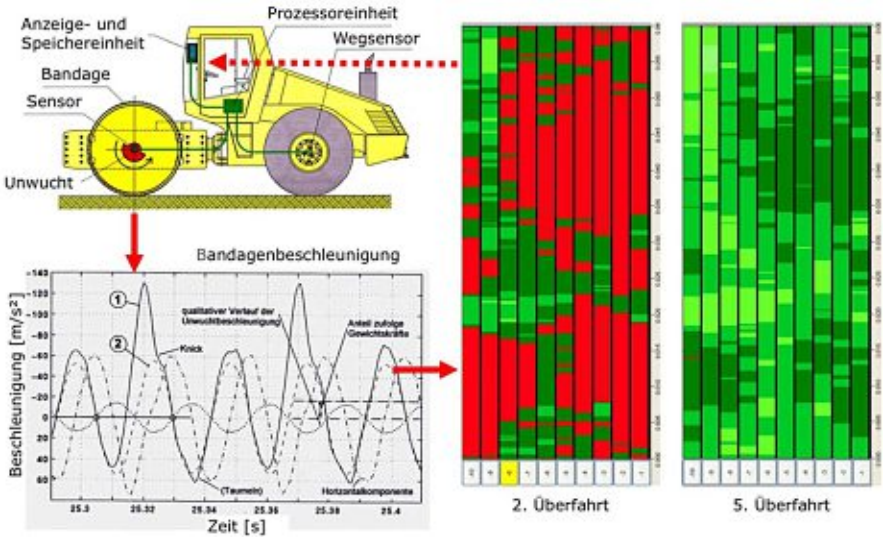


Abb. 2.18: Links oben: Vibrationswalze mit der benötigten Ausstattung eines FDVK-Systems. Links unten: Gemessene Beschleunigungen während einer Verdichtungsfahrt. Rechts: Zwei Beispiele für den Verdichtungsfortschritt eines Feldes [4]

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 3

Stand der Forschung

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit dem aktuellen Stand der Forschung zum Thema Vibrationsplatten. Dieses Thema wurde insbesondere von *Anderegg* in mehreren Publikationen [10–12] behandelt wurde. Darüber hinaus werden die bisherigen Forschungen der TU Wien zur technischen Weiterentwicklung der AHM und die im Zuge des Forschungsprojekts durchgeführten Feldversuche an einem Plattenverdichter [7] zusammengefasst.

3.1 Bewegungsverhalten von Vibrationsplatten

Anderegg, *von Felten* und *Kaufmann* analysieren in „Die Dynamik von Vibrationsplatten“ [11] das Bewegungsverhalten von Vibrationsplatten. Im Zuge dessen wird die messbare dynamische Wirkung bzw. die Verdichtungsleistung von Vibrationsplatten mit der eines Walzenzuges verglichen und die Nichtlinearität der Dynamik zur Optimierung der Verdichtungswirkung thematisiert. Die nichtlineare Dynamik von Verdichtungsgeräten (u.a. Vibrationsplatten) wird in [10] genauer behandelt. In [12] befassen sich *Anderegg* und *Recher* mit der Erhöhung der Verdichtungswirkung von Vibrationsplatten und Walzenzügen durch die Nutzung autoparametrischer Resonanzen.

3.1.1 Vergleich der dynamischen Wirkung von Vibrationsplatten und Vibrationswalzenzügen

Der Vergleich der Wirkungsweisen von Vibrationsplatten und Vibrationswalzenzügen mit einer Masse von 11 to in [11] basiert auf zuvor durchgeführten Feldversuchen. Dabei zeigt sich, dass sich Vibrationsplatten und Vibrationswalzenzügen derselben Dynamik bedienen, um die Erregerenergie in den Boden zu transferieren. Weiters zeigt sich, dass Vibrationsplatten und Walzenzüge einen vergleichbar starken Impuls pro Meter Maschinenbreite in den Boden einleiten und beide Maschinen dadurch eine ähnliche dynamische Wirkung in einer Messtiefe von 40 cm aufweisen. Die Vibrationsplatte weist eine stark ausgeprägte subharmonische Schwingung auf, die der halben Erregerfrequenz entspricht (siehe Abbildung 3.1). Der obere Teil (Oberwagen) der Vibrationsplatte wird durch die subharmonische Schwingung angeregt. Dabei befindet sich die Vibrationsplatte in einem stabilen Schwingungszustand bei dem sie nur bei jeder zweiten Unwuchtumdrehung auf den Boden aufschlägt. Durch die stark ausgeprägte subharmonische Schwingung und den beschriebenen Schwingungszustand treten sehr hohe Schlagkräfte auf, die das 13-fache des Eigengewichts der Vibrationsplatte erreichen können. Verglichen mit einem Walzenzug weist die Vibrationsplatte eine in etwa fünffach höhere massenbezogene dynamische Leistungsdichte auf. Ein Grund für die höhere Effizienz der Vibrationsplatte ist, dass bei der Vibrationsplatte der Oberwagen als aktives Element an der Verdichtung teilnimmt während beim Walzenzug das Chassis nicht vibrieren darf. Die in Abbildung 3.2 dargestellte Periodenverdopplung ist in der Praxis erwünscht, da sie zu hohen Bodenkontaktkräften und einer hohen Verdichtungswirkung führt. Ein fast-periodisches Schwingen soll hingegen vermieden 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

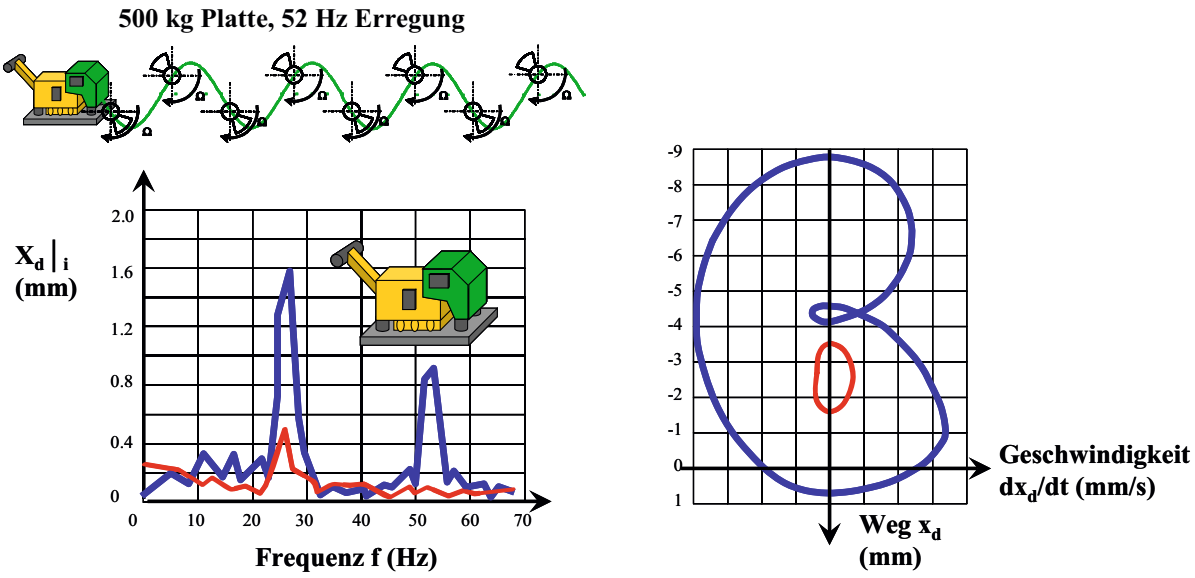


Abb. 3.1: Fourieranalyse der Vertikalschwingungen der Vibrationsplatte. Der obere Teil der Vibrationsplatte ist rot dargestellt, der untere in blau. Adaptiert nach [11]

3.1.2 Nichtlineare Dynamik der Vibrationsplatte

Das System aus Vibrationsplatte und Boden wird in [8] als 2-Freiheitsgrad-Schwinger modelliert (siehe Abbildung 3.1). Das dynamische Verhalten wird sowohl durch die Massenverhältnisse des oberen und unteren Teils als auch durch die Steifigkeiten und Dämpfungskonstanten der Gummipuffer sowie des Bodens bestimmt [11].

In [10] und [12] wird die nichtlineare Dynamik von Vibrationsplatten weiter analysiert und aufgezeigt, dass die Ausnutzung der autoparametrischen Resonanz zu einer deutlichen Erhöhung von bis zu 400% der Verdichtungskraft führen kann. Außerdem wird hervorgehoben, dass die Dynamik eines solchen Systems stark nichtlinear bzw. chaotisch ist und ausschließlich in der 1:1- und 2:1-Resonanzzone für den praktischen Betrieb funktioniert. Um das zu erreichen, ist eine Regelung der Maschinenparameter erforderlich [10].

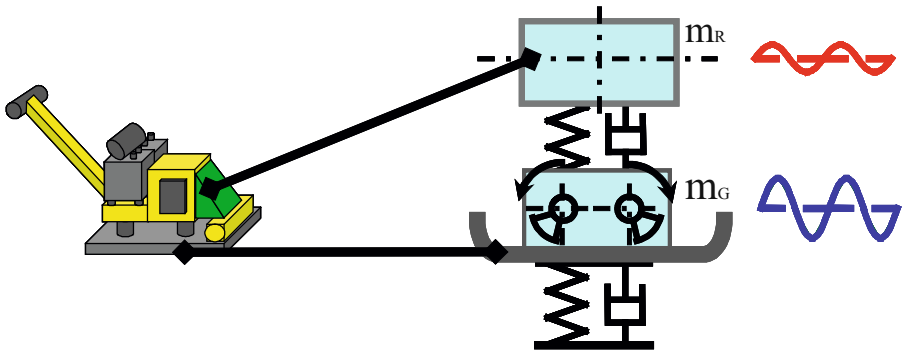


Abb. 3.2: Mechanisches 2-Freiheitsgrad-Modell der Maschinen-Boden-Interaktion. Adaptiert nach [11]

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

3.2 Forschungsprojekt Technische Weiterentwicklung AHM der TU Wien

Der Forschungsbericht „Technische Weiterentwicklung AHM“ [7] wurde 2018 vom Institut für Geotechnik der TU Wien veröffentlicht. Der Forschungsbericht wurde im Zuge des FFG-Forschungsprojekts „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ erarbeitet, welches in einer Kooperation zwischen der *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* und dem Institut für Geotechnik der TU Wien durchgeführt wurde. Dieses Forschungsprojekt und der daraus entstandene Bericht können als Vorprojekt für die in dieser Arbeit behandelten Feldversuche betrachtet werden. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung der in Kapitel 4 beschriebenen Feldversuche bauen auf den Erkenntnissen des Forschungsberichts [7] auf.

Im Fokus des Forschungsprojekts standen die Untersuchung des Tragschichtmaterials anhand von Laboruntersuchungen der auf AHM-Baustellen entnommenen Proben und separaten Verdichtungsversuchen des Tragschichtmaterials der Fa. *Hengl* sowie die Bewegungsanalyse von Plattenverdichtern anhand von durchgeführten Feldversuchen. Diese unterteilen sich in eine Voruntersuchung, die während dem Betrieb direkt an der AHM durchgeführt wurde und eine Grundsatzuntersuchung, welche einen separaten Feldversuch der Bodenverdichtung mittels Plattenverdichter umfasst [7].

3.2.1 Experimentelle Voruntersuchung anhand eines Plattenverdichters im Betrieb der AHM

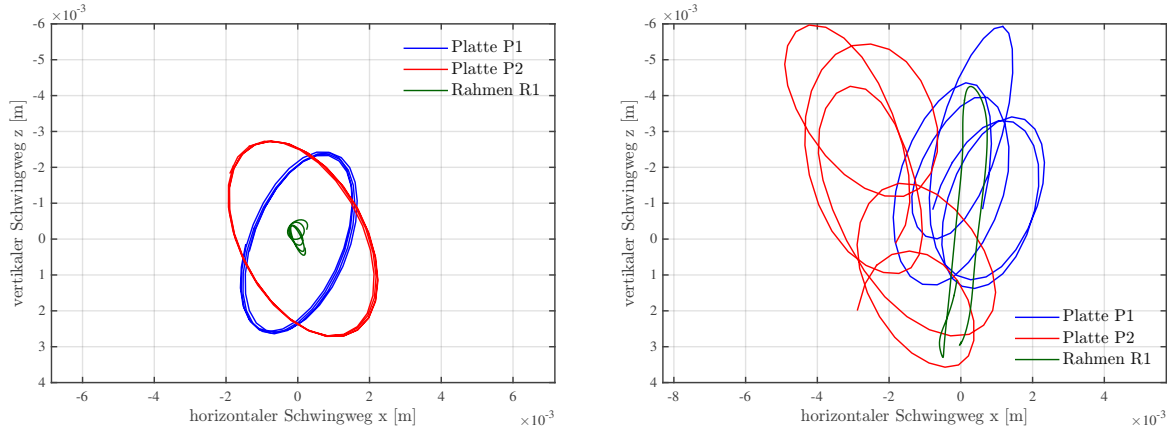
Die durchgeführte Voruntersuchung umfasst die Analyse eines Plattenverdichters während des Baustellenbetriebs der AHM. Der Plattenverdichter der AHM wurde mit drei Beschleunigungssensoren ausgestattet, zwei auf der Grundplatte und einem am Rahmen, um die Beschleunigungen im Betrieb zu ermitteln. Aus den gemessenen Beschleunigungsdaten wurden, wie in Kapitel 5 beschrieben, durch zweimaliges Integrieren im Zeitbereich Schwingwege ermittelt und diese analysiert. Abbildung 3.3 zeigt die während einer Nullmessung und während des Baustellenbetriebes ermittelten Orbitalbewegungen des Plattenverdichters. Für die Messung der freien Schwingung wurde der Plattenverdichter während der Nullmessung angehoben. Das Bewegungsverhalten der Nullmessung stellt sich weitgehend gleichmäßig dar, jenes der Messfahrt ausgeprägt ungleichmäßig [7].

Im Forschungsbericht sind außerdem die gemessenen Vertikalbeschleunigungen über die Zeit dargestellt. Diese ergeben für die Nullmessung einen annähernd perfekten Sinus. Im Vergleich dazu weisen die Beschleunigungen der Messfahrt eine ungleichmäßige Verzerrung auf. Die zwei Hauptursachen für die starke Unterscheidung von Nullmessung und Messfahrt sind die Interaktion zwischen Platte und Boden und das unausgewogene Bewegungsverhalten der Platte. Um das Bewegungsverhalten ausgewogener zu gestalten wird ein Anpassen des Masseverhältnisses zwischen Grundplatte und Rahmen vorgeschlagen [7].

3.2.2 Experimentelle Grundsatzuntersuchung anhand eines separaten Plattenverdichters

Auf die Voruntersuchung aufbauend, wurde für die Optimierung des Plattenverdichters eine Versuchsreihe auf einem Testgelände in Fischamend durchgeführt. Der Plattenverdichter wurde dabei über eine Aufhängung an einem Bagger montiert, der als Trägergerät der Platte fungierte. Um das ungünstige Massenverhältnis zwischen schwingender Platte und statischer Auflast auszugleichen, wurden auf den Rahmen im Laufe der Versuchsreihe Zusatzgewichte aufgebracht. Abbildung 3.4 zeigt die ermittelte Orbitalbewegung der Feldversuche mit einer Zusatzmasse 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

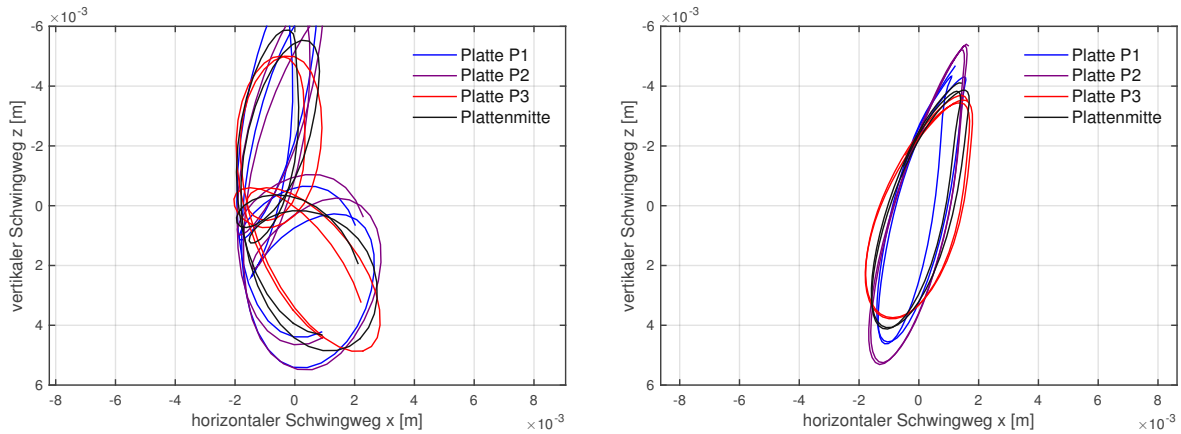


(a) Schwingwege des Plattenverdichters der AHM einer Nullmessung [7]

(b) Schwingwege des Plattenverdichters der AHM einer Messfahrt während dem Baustellenbetrieb [7]

Abb. 3.3: Darstellung der ermittelten Schwingwege eines Plattenverdichters der AHM in Form von Orbitalbewegungen

120 kg (Abbildung 3.4a) und 670 kg (Abbildung 3.4b). Das Bewegungsverhalten wird durch das Aufbringen weiterer Zusatzmassen gleichmäßiger, jedoch zeigt sich, dass sich der Plattenverdichter bei hoher zusätzlicher Auflast in das zu verdichtende Tragschichtmaterial einrüttelt und dadurch keine gleichmäßige Oberfläche hergestellt werden kann. Die gemessenen Beschleunigungen zeigen, dass die Bewegung bereits ab einer Zusatzmasse von 120 kg gleichmäßiger wird, was der Verdichtungswirkung und der Qualität der Oberfläche zuträglich ist. Die Beruhigung des Bewegungsverhaltens konnte anhand von dynamischen Messungen auch eindeutig nachgewiesen werden. Aus den Messungen ging auch hervor, dass Zusatzmassen nicht automatisch zu einem besseren Verdichtungsergebnis führen [7].



(a) Schwingwege des Plattenverdichters mit einer Zusatzmasse von 120 kg während einer Verdichtungsfahrt [7]

(b) Schwingwege des Plattenverdichters mit einer Zusatzmasse von 670 kg während einer Verdichtungsfahrt [7]

Abb. 3.4: Darstellung der im Zuge der Feldversuche ermittelten Schwingwege mit unterschiedlichen Zusatzmassen in Form von Orbitalbewegungen

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

3.2.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse der Feldversuche sind [7]:

- Eine zusätzliche statische Auflast von 100 bis 400 kg verbessert das Bewegungsverhalten und die Verdichtungswirkung des Plattenverdichters.
- Bei einer Zusatzmasse > 530 kg gräbt sich der Plattenverdichter in den Boden ein und muss aus diesem Grund angehoben geführt werden.
- Eine zweite Verdichtungsüberfahrt bei gleichbleibender Konfiguration führt nur zu einem geringfügig besseren Verdichtungserfolg.
- Die Erhöhung der Erregerfrequenz hat mit der vorliegenden Konfiguration des Plattenverdichters keine Auswirkungen auf das Verdichtungsergebnis.
- Durch das gleichmäßigere Bewegungsverhalten ist es möglich, bei konstanten Betriebsparametern lokale Schwachstellen und Steifigkeitsunterschiede im Untergrund zu lokalisieren. Damit ist die Voraussetzung für die Entwicklung eines FDVK-Systems für Plattenverdichter grundsätzlich gegeben.

3.3 Weitere Forschungen im Projekt Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern

Die Messdaten der Feldversuche, welche am 20. November 2019 im Zuge des Forschungsprojekts „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ [37] durchgeführt wurden, wurden im Vorfeld dieser Arbeit einer Vorauswertung unterzogen [9].

Zusätzlich wurde für die Bewegungsanalyse des Plattenverdichters von *Stefan* in [48] ein mechanisches Modell der Interaktion zwischen Plattenverdichter und Boden erstellt. Die Modellierung des Plattenverdichter erfolgte dabei als Zwei-Massen-Schwinger. Auf Basis dieses Modells wurden Simulationen mit variierenden Parametern durchgeführt, um das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters in vertikaler Richtung und die Bodenkontaktkraft zu ermitteln. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} ein Aufschlagen der Grundplatte in jeder zweiten Erregerperiode sowie größere Bodenkontaktkräfte zur Folge hat. Weiters bewirkt eine Erhöhung der zusätzlichen Auflast eine Vergrößerung der Bodenkontaktkraft und der in den Boden eingebrachten Arbeit. Die Kombination aus unterschiedlichen Federsteifigkeiten und Dämpfungsparametern für die Beschreibung des Bodenverhaltens resultiert in einer oftmals ungleichmäßigen und chaotischen Bewegung des Plattenverdichters. Darüber hinaus wird das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters von *Stefan* [48] in die Betriebszustände Kontakt, Abheben, Springen und Chaos eingeteilt, welche in Abbildung 3.5 dargestellt 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

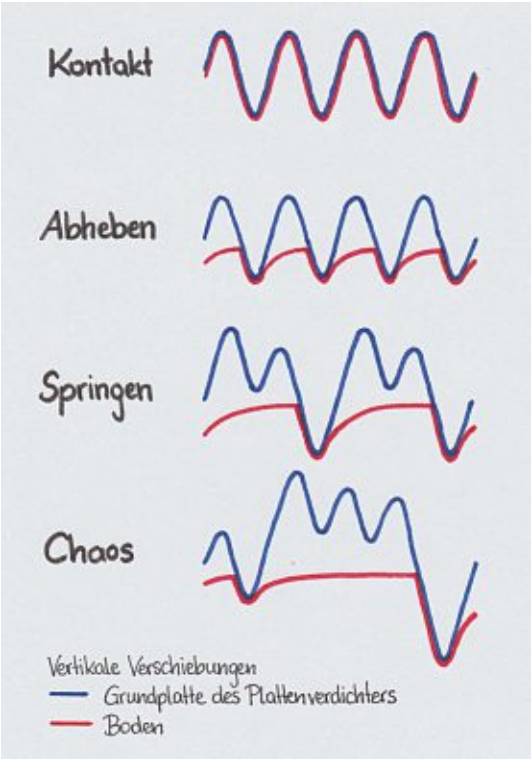


Abb. 3.5: Darstellung der Betriebszustände von Plattenverdichtern [48]

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen zur dynamischen Tragschichtverdichtung

4.1 Motivation der Versuche

Auf Basis der Erkenntnisse des Forschungsprojekts „Technische Weiterentwicklung der AHM“ [7] startete die Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik der TU Wien am 1. Juli 2019 ein neues Forschungsprojekt mit dem Titel „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ [37].

Im Zuge dieses Forschungsprojekts wurden am 20. November 2019 Feldversuche zur Tragschichtverdichtung durchgeführt. Das Ziel der Versuche war es, das Bewegungsverhalten eines Plattenverdichters messtechnisch zu erfassen und zu analysieren. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Tragschichtsanierung mittels AHM 800-R die einzelnen Prozesse sehr genau aufeinander abgestimmt sind, ist es nur schwer möglich, während einer laufenden Unterbausanierung Versuche mit einem der Plattenverdichter der AHM 800-R durchzuführen. Um die Freiheit zu haben, verschiedene Prozessparameter zu analysieren oder beispielsweise das Material in mehreren Übergängen zu verdichten, wurde ein einzelner Plattenverdichter, welcher nicht an einer AHM 800-R befestigt war, untersucht. Um das zu ermöglichen, wurde ein Plattenverdichter an einem Bagger befestigt und in einer Schottergrube ein, mit der Tragschicht eines Bahndammes vergleichbares Versuchsfeld hergestellt. Auf diesem Versuchsfeld konnten die geplanten Versuchte durchgeführt werden, ohne den Ablauf einer Tragschichtsanierung stören zu müssen.

Die Feldversuche wurden vom Institut für Geotechnik der TU Wien in Kooperation mit *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H*, *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H* und *FCP-Fritsch*, *Chiari & Partner ZT G.m.b.H* realisiert.

4.2 Aufbau und Ausstattung des Plattenverdichters

Für die Feldversuche wurde ein Plattenverdichter des Typs WBB530 [51] der Fa. *Wimmer* verwendet, wie er auch an der AHM 800-R zum Einsatz kommt. Der Zusammenbau des Plattenverdichters, der Einbau der Sensoren und die Vorbereitung der Messtechnik fanden im Vorfeld am Firmengelände der Firma *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H* in Fischamend statt.

4.2.1 Führung und Steuerung des Plattenverdichters

Für die Durchführung der Versuche wurde der Plattenverdichter auf das Schild eines Hydraulikbaggers montiert, um den Plattenverdichter über das Testfeld bewegen zu können und während der Versuche eine hydraulische Versorgung zu gewährleisten. Abbildung 4.1 zeigt den Plattenverdichter an einer, speziell für diesen Versuch konstruierten Aufhängung befestigt. Der untere Teil des Plattenverdichters besteht aus einer am Untergrund aufliegenden Platte (Grundplatte), auf der ein Unwuchterreger montiert ist, welcher die periodische Anregung erzeugt. Während

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

der Feldversuche wurde das Erregersystem von einem Hydraulikmotor betrieben, der über das Hydrauliksystem des Baggers gesteuert wurde. Die Grundplatte des Plattenverdichters wird von einem Rahmen gehalten und ist durch Feder-Dämpferelemente (in Form von vier Gummipuffern) von der Platte weitgehend dynamisch entkoppelt. Für die Feldversuche wurde der Rahmen am Schild des Baggers befestigt. Als Teil einer speziell angefertigten Befestigung des Plattenverdichters wurde ein Hydraulikzylinder in Kombination mit einer vorgespannten Feder zwischen Baggerschild und Rahmen eingebaut. Der Hydraulikzylinder war dazu gedacht, eine zusätzliche variable Auflast auf den Plattenverdichter aufzubringen. Die vorgespannte Feder war notwendig, damit der Plattenverdichter nicht starr mit der Belastungsvorrichtung verbunden, sondern noch in der Lage ist, Bewegungen auszuführen. Die Vorspannung der Feder wurde somit durch den Hydraulikzylinder geregelt. Bedingt durch die Konstruktion der Aufhängung wurde der Hydraulikzylinder horizontal ausgerichtet. Die dadurch horizontal wirkende Anpresskraft des Hydraulikzylinders musste umgelenkt werden, um als vertikale Auflast auf den Plattenverdichter zu wirken. Die Steuerung des Hydraulikzylinders erfolgte über das Hydrauliksystem des Baggers.

Abb. 4.1: Befestigung des Plattenverdichters am Schild des Baggers

4.2.2 Anordnung der Beschleunigungssensoren auf Grundplatte und Rahmen

Die vier Beschleunigungsaufnehmer auf der Grundplatte waren, wie in Abbildung 4.2 ersichtlich, versetzt zu den Mittelachsen angeordnet. Die Mittelachsen definieren sich durch die mittleren Bohrungen in Abbildung 4.2. Der Versatz der Sensoren in x-Richtung (Fahrtrichtung) betrug jeweils 155 mm nach vorne bzw. nach hinten und 240 mm nach links bzw. nach rechts in y-Richtung. Die Abstände zwischen den Sensoren betrugen somit 310 mm in x-Richtung und 480 mm in y-Richtung. Die Sensoren der Grundplatte wurden mit AP1 bis AP4 bezeichnet. Im hinteren Bereich des Rahmens wurde ebenfalls ein Beschleunigungsaufnehmer angebracht (unter anderem um die dynamische Entkopplung zwischen Platte und Rahmen zu überprüfen). Dieser wurde mit AR1 bezeichnet.

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. 4.2: Anordnung der Beschleunigungssensoren auf der Platte

4.2.3 Positionsbestimmung der Unwuchtmasse

Die Anordnung der vier Positionssensoren erfolgte, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, in den um 45° verdrehten Viertelpunkten des Erregersystems. Ihre Bezeichnung erfolgte mit Pos1 bis Pos4. Durch die Anzahl der Sensoren kann sowohl die Position der Unwucht, als auch deren Drehrichtung im Nachhinein bestimmt werden.

4.3 Messtechnik zur Erfassung des Bewegungsverhaltens

Um Informationen über das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters zu erhalten, wurde dieser mit verschiedenen Arten von Sensoren ausgestattet. Der Hydraulikbagger wurde mit einer GPS Antenne ausgestattet um eine örtliche Zuordnung der Messdaten in der Auswertung zu ermöglichen.

4.3.1 Beschleunigungssensoren auf Grundplatte und Rahmen

Um das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters möglichst umfassend zu ermitteln, wurden fünf triaxiale Beschleunigungsaufnehmer an den Plattenverdichter angebracht, vier davon an der Grundplatte und der fünfte Sensor am Rahmen. Bei den verwendeten Beschleunigungsaufnehmern handelte es sich um *K-Beam* Beschleunigungssensoren (kapazitive MEMS-Beschleunigungssensoren) vom Typ 8396A100 der Firma *Kistler*. Diese registrieren Beschleunigungen mit einer Sensitivität von ±100 g in drei Richtungen (x-, y-, z-Richtung) mit einer Frequenz von bis zu 5 kHz [26].

4.3.2 Positionssensoren am Erregersystem

Zusätzlich wurden, um die Position der rotierenden Unwuchtmasse bestimmen und ihren Verlauf auch nachträglich rekonstruieren zu können, vier Positionssensoren (Hall-Sensoren) am Gehäuse

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

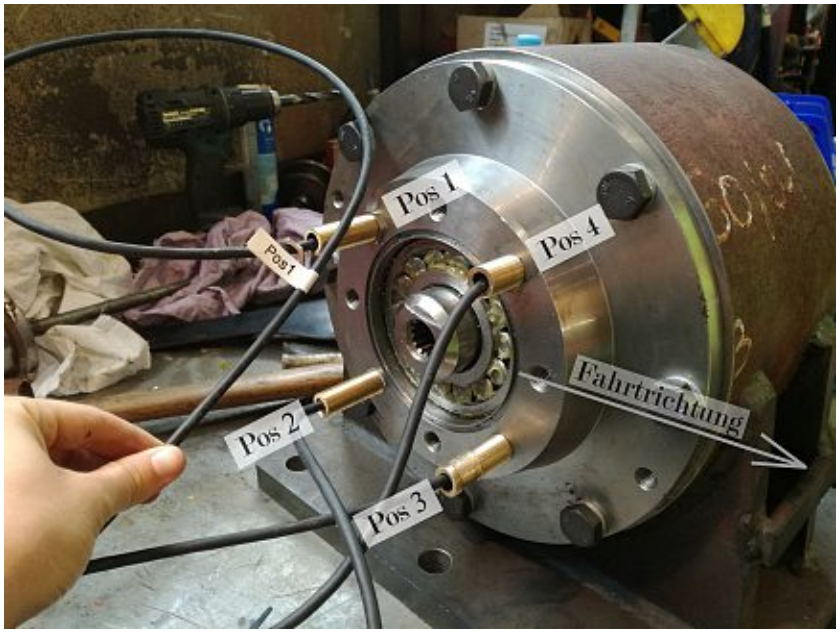


Abb. 4.3: Anordnung der Positionssensoren an der Unwucht

des Erregersystems angebracht und die Unwucht mit einem Magneten ausgestattet. Diese Sensoren registrieren die Stärke der magnetische Wellen, somit ergibt sich jedes Mal ein Ausschlag des Sensors, wenn die Unwuchtmasse die Position des jeweiligen Sensors passiert.

4.3.3 Kraftmessdose in der Aufhängung des Plattenverdichters und Öldrucksensoren in der Hydraulik

In der speziell angefertigten Aufhängung des Plattenverdichters, bestehend aus einem Hydraulikzylinder und einer vorgespannten Feder, wurde eine Kraftmessdose eingebaut, um die auf den Plattenverdichter zusätzlich aufgebrachte Kraft (Anpresskraft) messen zu können. Da der Hydraulikzylinder horizontal ausgerichtet war, entspricht die gemessene Anpresskraft einer Kraft in horizontaler Richtung. Zur Überwachung des Hydraulikdrucks wurden Öldrucksensoren an das Hydrauliksystem des Baggers angeschlossen.

4.3.4 Messwerterfassungssystem zur Aufzeichnung der Signale

Das Messwerterfassungssystem versorgt die Sensoren mit der notwendigen Spannung. Weiters werden die von den Sensoren registrierten Signale vom Messwerterfassungssystem aufgezeichnet, verarbeitet und abgespeichert. Durch das Anschließen eines Computers ist eine unverzügliche Visualisierung der verarbeiteten Signale möglich. Die mögliche Aufzeichnungsrate ist vom Typ des Messwerterfassungssystems abhängig und nicht zwangsläufig an die Grenzfrequenz der Sensoren gebunden. Als Messwerterfassungssystem wurde das System *imc CRONOSflex* der Firma *imc* verwendet [24]. Die Aufzeichnungsrate betrug während der Feldversuche 10 kHz. Abbildung 4.4 zeigt die Messkette für die Signalerfassung während der Feldversuche.

4.4 Aufbau des Versuchsfeldes in der Kiesgrube

Das Versuchsfeld befand sich in der Kiesgrube der Firma *HABAU Hoch und Tiefbaugesellschaft m.b.H* im niederösterreichischen Fischamend in direkter Nähe zum Flughafengelände des Flugha-

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

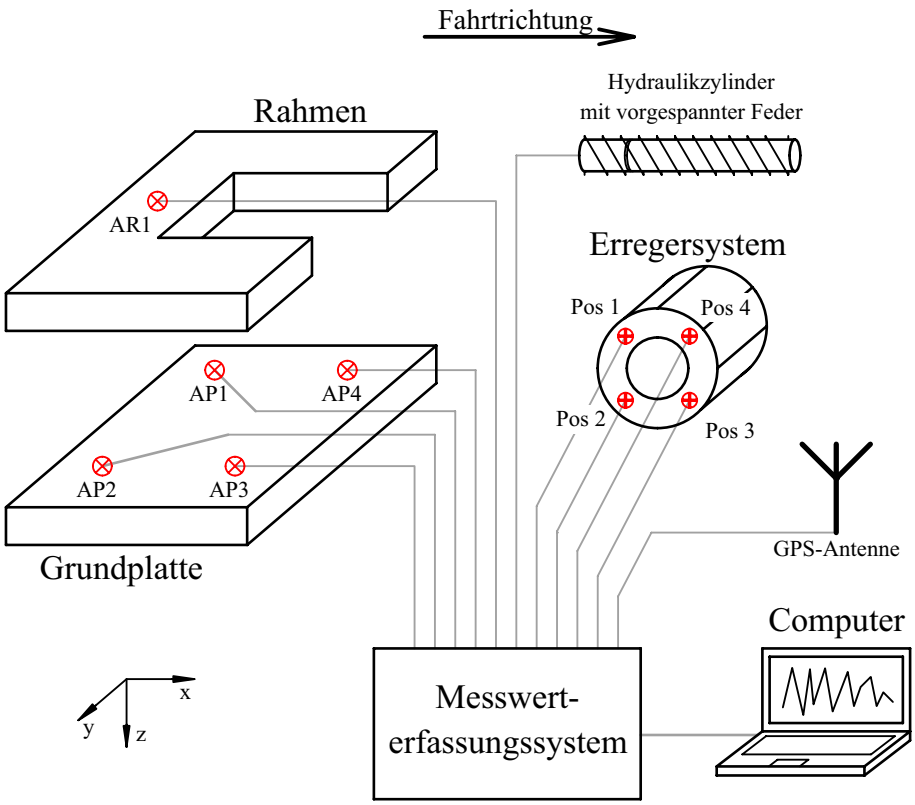


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der Messkette

fens Schwechat. Der Untergrund der Kiesgrube besteht aus sandigem Kies und bot aufgrund dessen und ob der großen verfügbaren Fläche, optimale Bedingungen und genügend Platz für die Durchführung der Versuche.

Am 19. November 2019 wurden die notwendigen Vorbereitungen getroffen und der Versuchsaufbau durchgeführt. Es wurden zwei Fahrspuren vorbereitet, welche parallel zueinander verliefen und jeweils 15 m lang waren (siehe Abbildung 4.5). Die Schichtdicke des lose geschütteten Tragschichtmaterials betrug 50 cm. Da das Material einer Verdichtungsspur im Bahnbau, aufgrund der größeren Breite des Bahndamms, vom Material der anderen Spuren seitlich gestützt wird, musste dies in den Feldversuchen berücksichtigt werden. Dazu wurden mit einem Löffelbagger Gräben ausgehoben, in denen die Tragschicht hergestellt wurde. Die Abmessungen der Gräben betrugen 105 cm in der Breite und 35 cm in der Tiefe. Die Tragschicht wurde bis zu einer Höhe von 15 cm über GOK eingebaut. Die Gräben hatten außerdem den Vorteil, dass der Bagger im Falle einer freien Aufschüttung der Tragschicht nicht genug Bodenfreiheit gehabt hätte. Durch die Herstellung der Tragschicht in den Gräben konnte der Bagger über die Versuchsspuren fahren, ohne diese zu berühren. Abbildung 4.6 zeigt den Einbau des Materials und die Herstellung der Spuren. Das eingebaute Tragschichtmaterial erfüllte die in den Richtlinien nach RVS 08.15.01 [44] festgelegten Anforderungen für ungebundene Tragschichten.

In Abbildung 4.5 ist eine Skizze zu sehen, welche den beschriebenen Versuchsaufbau schematisch darstellt. An den Markierungen bei fünf, zehn und 15 m wurden Messpunkte für Kontrollmessungen definiert. An diesen Punkten wurden noch vor dem Einbau der Tragschicht dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät durchgeführt, um den Verdichtungszustand des Untergrundes zu überprüfen. Zusätzlich wurden als Kontrolle vor und nach jeder Messfahrt ebenfalls dynamische Lastplattenversuche an den festgelegten Messpunkten durchge-

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

führt. Dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät eignen sich aufgrund ihrer einfachen und schnellen Durchführbarkeit optimal als begleitende Kontrolle. Abschnitt 2.5.1 liefert eine genaue Erklärung der Grundlagen der dynamischen Lastplattenversuche.

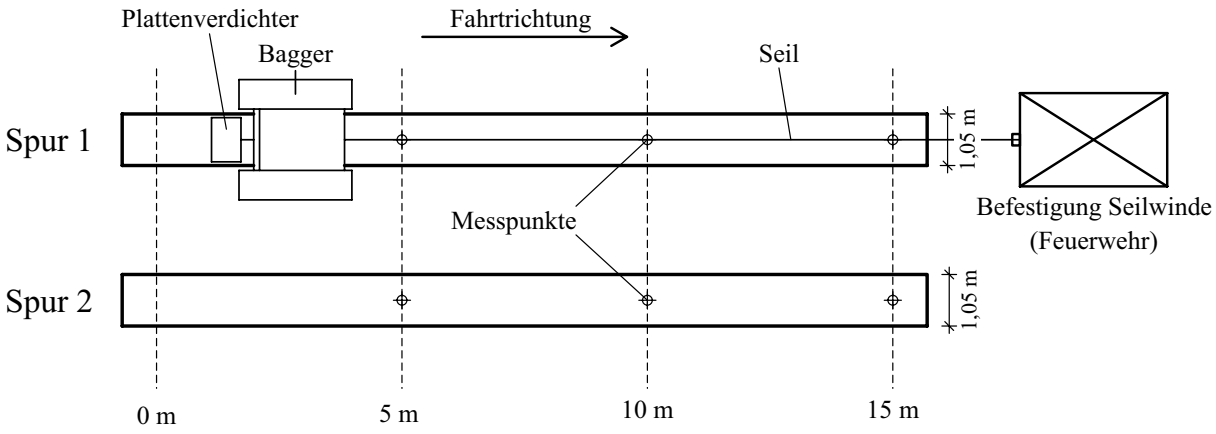


Abb. 4.5: Skizze der Anordnung der Spuren

Abb. 4.6: Einbau des Tragschichtmaterials in die zuvor ausgehobenen Spuren

4.5 Ablauf der Feldversuche

Die Versuche wurden am 20. November 2019 durchgeführt. Die Befürchtung, dass der Boden in der Kiesgrube im Laufe des Nachmittags gefrieren würde, trat nicht ein, somit konnte der geplante Ablauf, trotz leichten Regens, umgesetzt werden. Im Vorfeld der Messfahrten wurde das Tragschichtmaterial befeuchtet, um den regulären Einbaubedingungen mittels AHM 800-R zu entsprechen.

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

In Tabelle 4.1 ist eine Übersicht über die Abfolge der durchgeführten Messfahrten zu sehen, die um die Informationen Spur, Überfahrt, Betriebsart (bzw. Frequenz bei Nullmessungen) und Drehrichtung der Unwucht ergänzt wurde. Eine positive Drehrichtung bedeutet, dass sich die Unwucht in Fahrtrichtung dreht (die Positionssensoren werden von der Unwucht somit in absteigender Reihenfolge passiert), eine negative Drehrichtung bedeutet eine Drehung der Unwucht entgegen der Fahrtrichtung.

Tab. 4.1: Ablauf der durchgeführten Messungen

Messung	Abkürzung	Spur	Überfahrt	Frequenz [Hz]	Drehrichtung
Nullmessung 01	N01	—	—	45	–
Nullmessung 02	N02	—	—	37	–
Nullmessung 03	N03	—	—	55	–
Nullmessung 04	N04	—	—	—	
Messung	**Abkürzung**	**Spur**	**Überfahrt**	**Betriebsart**	**Drehrichtung**
Messfahrt 01	M01	2	1	Schwellbetrieb	–
Messfahrt 02	M02	2	2	ungesteuerter Betrieb	–
Messfahrt 03	M03	1	1	Schwellbetrieb/ungesteuert	+
Messfahrt 04	M04	1	2	ungesteuerter Betrieb	+
Messfahrt 05	M05	2	1	Schwellbetrieb	+
Messfahrt 06	M06	2	2	ungesteuerter Betrieb	+
Messfahrt 07	M07	1	1	Schwellbetrieb	–
Messfahrt 08	M08	1	2	ungesteuerter Betrieb	–

4.5.1 Ablauf der Nullmessungen

Vor den Messfahrten wurden vier Nullmessungen durchgeführt. Bei diesen wurde der Plattenverdichter frei schwingend in der Luft gehalten, um das reine Schwingungsverhalten ohne Bodeninteraktion aufzuzeichnen. Zusätzlich konnte damit die Funktionsfähigkeit der Sensoren überprüft werden. Die verschiedenen Nullmessungen unterscheiden sich durch ihre Anregungsfrequenz, welche während jeder Nullmessung jeweils konstant gehalten wurde. Nullmessung 04 verzeichnete einige Messfehler und ist deswegen in Tabelle 4.1 ohne weitere Details angeführt.

4.5.2 Ablauf der Messfahrten

Im Anschluss an die Nullmessungen konnte mit den eigentlichen Messfahrten gestartet werden. Der Versuchsablauf der acht Messfahrten war so geregelt, dass jeweils zwei Messfahrten hintereinander auf einer Spur stattfanden. Danach wurde die Spur gewechselt und die eben verdichtete Spur mit einem Löffelbagger wieder aufgelockert. Die Messfahrten selbst unterschieden sich einerseits durch die Drehrichtung der Unwucht, andererseits darin, dass die Anpresskraft entweder manuell gesteigert und abgesenkt (Schwellbetrieb) oder nicht gezielt verändert wurde (ungesteuerter Betrieb). In Tabelle 4.1 ist dies für jede Messfahrt übersichtlich dargestellt. Messfahrt 03 wurde unterbrochen, da es währenddessen zu einem Sensorausfall kam. Nachdem das Problem behoben war, konnte die Messfahrt wiederaufgenommen werden und wurde im ungesteuerten Betrieb fortgesetzt. Daher werden in der Tabelle beide Betriebszustände angeführt.

Die Messfahrten wurden mit einer Geschwindigkeit von 40 m/h geplant, da dies in etwa der Arbeitsgeschwindigkeit einer AHM 800-R entspricht. Diese langsame Geschwindigkeit konnte mit dem Hydraulikbagger nicht realisiert werden, weshalb der Bagger mit der Seilwinde eines Feuerwehrautos über das Versuchsfeld gezogen wurde. So konnte die benötigte Geschwindigkeit erzielt

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. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen den mit der Seilwinde gezogenen Hydraulikbagger während einer Messfahrt und den Plattenverdichter während des Verdichtungsprozesses.

Abb. 4.7: Der Hydraulikbagger wird mit einer Seilwinde über das Versuchsfeld gezogen

Abb. 4.8: Plattenverdichter während einer Messfahrt

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Kapitel 5

Theoretische Grundlagen zur Messdatenerhebung und Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Datenverarbeitung erklärt, welche notwendig sind, um die sinnvolle Weiterverwendung und Interpretation von Messdaten zu ermöglichen. Die hier beschrieben Grundlagen werden in der Datenaufbereitung im nachfolgenden Kapitel 6 angewendet.

5.1 Arten der Schwingungsmessung

Um Schwingungen eines Bauteils oder einer Maschine nachvollziehen zu können, benötigt es eine genaue Aufzeichnung der Bewegungen. Die am weitesten verbreitete Methode für das Messen von Bewegungen ist, zufolge *Hofmann* in [23], die Verwendung von Absolutbewegungsaufnehmern oder auch seismischen Aufnehmern. Diese Sensoren bestehen aus einem Sensorgehäuse, welches eine Masse beinhaltet. Diese Masse wird durch ein Feder-Dämpfer-System gedämpft und somit vom Rest des Sensors entkoppelt. Durch die Auslenkung, welche die Masse verzeichnet, kann auf die Schwingung rückgeschlossen werden. Ausschlaggebend für dieses Prinzip ist die Trägheit der gedämpften Masse. Da diese Masse jedoch relativ schwer sein muss, würde das die zu messenden Systeme beeinflussen. Daher werden für Schwingungsmessungen in der Regel Beschleunigungssensoren genutzt. Durch ihr geringes Gewicht beeinflussen diese das zu messende System in einem vernachlässigbar geringen Maß und bieten gleichzeitig eine hohe Empfindlichkeit und Robustheit. Das Prinzip der Datenaufnahme erfolgt piezoelektrisch.

5.2 Numerische Integration von Beschleunigungssignalen

Um aus den gemessenen Beschleunigungen Schwingwege zu erhalten, müssen die Beschleunigungsdaten noch zwei Integrationsschritten unterzogen werden. Erst dann ist es möglich, die Bewegung vollständig zu analysieren. Wie *Brandt* und *Brickner* in [18] anführen, gibt es verschiedene Möglichkeiten der numerischen Integration; unter anderem:

- Transformation in und Integration über den Frequenzbereich mit nachfolgender Rücktransformation in den Zeitbereich
- Integration über den Zeitbereich mittels Trapezregel oder Simpsonregel

Hofmann beschreibt die Integration in [23] mit folgenden Worten:

> *Mathematisch gesehen findet durch die Integration letztlich eine Umbewertung der Amplituden im Frequenzbereich statt. Der Integration im Zeitbereich entspricht [...] im Frequenzbereich die Multiplikation der Amplitude mit dem Kehrwert der zugehörigen Kreisfrequenz.*

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 Integration mittels Trapezregel kann, obwohl sie grundsätzlich als akkurate Integrationsmethode angesehen wird, zu großen Fehlern führen, wenn sie auf ein Zeitsignal angewendet wird. Dadurch kann es im Ergebnis zu deutlich verzerrten Geschwindigkeits- und Verschiebungsgrößen kommen. Aus diesem Grund ist diese Methode grundsätzlich für Beschleunigungssignale zu vermeiden. Ausgenommen davon ist der Fall, dass die Frequenz im Vergleich zur Aufzeichnungsfrequenz gering ist. Da die Abtastrate in diesem Fall ausreichend groß ist, ist es möglich eine gute Näherung an die Schwingung zu bilden, wie in [18] ausgeführt wird. *Kammeyer* und *Kroschel* führen dieses Fragestellung in [25] weiter aus und kommen zu dem Schluss, dass die Aufzeichnungsfrequenz mindestens dem Zweifachen der maximalen Frequenz des Signals entsprechen muss, um das so genannte Abtasttheorem zu erfüllen. Abbildung 5.1 zeigt eine numerische Integration mittels Trapezregel. Die grünen Linien zeigen eine ausreichend hohe Abtastrate für eine Integration mit geringem Fehler. Die strichlierte Linie hingegen würde bei einer Integration zu einem relativ großen Fehler führen.

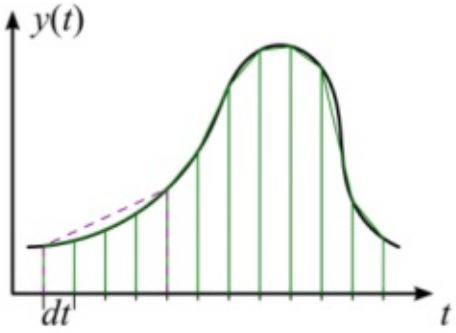


Abb. 5.1: Numerische Integration mittels Trapezregel [23]

Obwohl sie unter erwähnten Umständen zu erheblichen Fehlern führen kann, ist die numerische Integration mittels Trapezregel die am häufigsten angewendete Integrationsmethode für Beschleunigungssignale.

5.3 Signalfilterung mittels digitaler Filter

Das Messen von Schwingungen bzw. Beschleunigungen ist immer mit einer Messungenauigkeit bzw. mit einer leichten Abweichung von den tatsächlichen Beschleunigungen verbunden. Diese Ungenauigkeiten werden als „Messrauschen“ bezeichnet. Aufgrund dieser Störungen ist es nicht möglich, die Daten direkt weiter zu verarbeiten und sofort numerisch zu integrieren. Vor allem niederfrequente Schwingungen haben hier einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Integration. Grund dafür ist *„[...] die Multiplikation der Amplitude mit dem Kehrwert der zugehörigen Kreisfrequenz [...]“*, um nochmal auf das Zitat von Hofmann [23] aus dem vorherigen Abschnitt einzugehen. Da durch geringe Frequenzen nahe null dividiert wird, können sich sehr große Fehler ergeben. Niedrige Frequenzen werden somit deutlich stärker gewichtet und haben einen größeren Einfluss auf das integrierte Signal als hohe Frequenzen. Deswegen ist es notwendig, das Messrauschen, vor allem im niedrigen Frequenzbereich, zu entfernen. Es gibt in der Literatur unterschiedliche Ansätze, wie Messrauschen am besten entfernt werden kann (Vorschläge dazu werden u.A. in [23, 32] gebracht). Eine häufig vorgeschlagene Möglichkeit, ist die Anwendung eines digitalen Filters. Abbildung 5.2 zeigt den schematischen Ablauf einer digitalen Filterung,

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

das Eingangssignal $x(n)$ ist ein gestörtes Signal und das Ausgangssignal $y(n)$ das gefilterte und geglättete Signal.

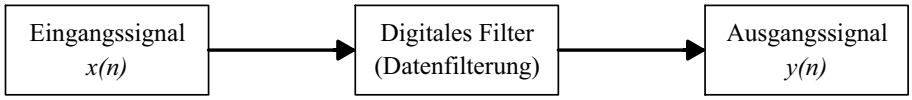


Abb. 5.2: Schematisch dargestellter Ablauf einer digitalen Filterung

Die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal kann mit der allgemeinen Differenzialgleichung für Filter nach [47, 49] wie folgt angegeben werden:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M} b_i x(n-i) - \sum_{j=0}^{N} a_j y(n-j) \tag{5.1}$$

Wobei $x(n)$ und $y(n)$ für das Eingangs- bzw. Ausgangssignal stehen und a_j und b_i Filterkoeffizienten sind, welche den digitalen Filter und seine Wirkungsweise definieren. Durch die Wahl dieser Koeffizienten können Eigenschaften von Amplitudengang und Phase geändert werden. Dadurch können Filter das Eingangssignal auf unterschiedlichste Arten beeinflussen. Allgemein können digitale Filter nach ihren Grundformen eingeteilt werden [25]:

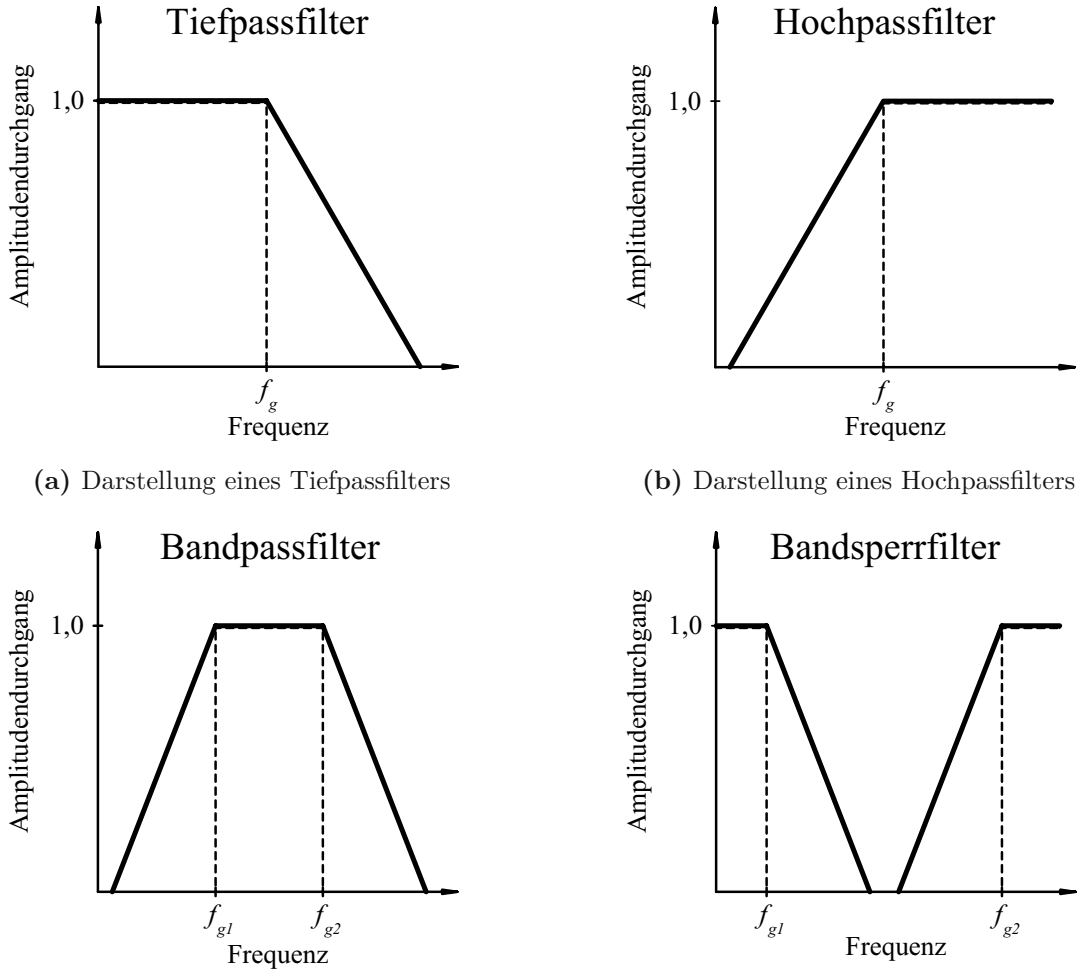
- Hochpassfilter
- Tiefpassfilter
- Bandpassfilter
- Bandsperrfilter

Diese Definition teilt die Grundformen aufgrund ihres Amplitudenganges ein. Der Amplitudengang bestimmt, welche Frequenzen durch den Filter aus dem Signal entfernt werden. In Abbildung 5.3 sind die Auswirkungen der vier Grundformen der digitalen Filter in Abhängigkeit von definierten Grenzfrequenzen f_g dargestellt. Bei der Darstellung eines Filters wird der Amplitudendurchgang über die Frequenz aufgetragen. Ein Amplitudendurchgang von 1,0 bedeutet, dass die jeweilige Frequenz zu 100% im Signal erhalten bleibt. Der Hoch- und Tiefpassfilter entfernen also jene Frequenzanteile des Signals, die tiefer bzw. höher als die Grenzfrequenz sind. Der Bandpassfilter entfernt alle Frequenzanteile außerhalb der zwei Grenzfrequenzen, der Bandsperrfilter entfernt die Frequenzanteile zwischen den Grenzfrequenzen. Die Steilheit der Flanken eines Filters definiert, welcher Anteil der nicht mehr „erwünschten“ Frequenzen noch im gefilterten Signal verbleibt (also derer, die durch den Filter entfernt werden sollten). Je flacher die Flanken sind, desto mehr unerwünschte Frequenzanteile bleiben erhalten. Die strichlierte Linie zeigt die, nach *Shenoi* [47], ideale Form der Filter mit vertikalen Flanken. Da eine größere Steilheit mehr Rechenleistung bei der digitalen Filterung benötigt, ist die Definition eines Filters immer abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen.

Die oben angeführte Einteilung der Filter bezieht sich, wie bereits erwähnt, auf den Amplitudengang eines Filter. Zusätzlich können Filters auch auf Basis ihrer Funktionsweise eingeteilt werden:

- Nicht-rekursive Filter (FIR-Filter)
- Rekursive Filter (IIR-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



(a) Darstellung eines Tiefpassfilters

(b) Darstellung eines Hochpassfilters

(c) Darstellung eines Bandpassfilters

(d) Darstellung eines Bandsperrfilters

Abb. 5.3: Symboldarstellungen der vier Grundformen digitaler Filter mit den jeweiligen Grenzfrequenzen f_g

Bei nicht-rekursiven Filtern, im Englischen als *„finite impulse response“*-Filter (FIR) bezeichnet, handelt es sich um digitale Filter, die zur Berechnung des Ausgangssignals $y(n)$ nur das Eingangssignal als Grundlage verwenden. Es kann sich dabei um das aktuelle Eingangssignal $x(n)$ und auch davor oder danach folgende Glieder des Eingangssignals (..., $x(n-1)$, $x(n)$, $x(n+1)$, ...) handeln. Um die Bestimmungsgleichung für einen FIR-Filter aus der allgemeinen Differentialgleichung (Gleichung 5.1) zu erhalten, wird der Term, welcher sich auf vorherige Ausgangssignale bezieht, weggelassen und es bleibt folgende Gleichung übrig [49]:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{K} b_i x(n-i) \tag{5.2}$$

Ein einfaches Beispiel für einen nicht-rekursiven Filter ist der gleitende Mittelwert, bei dem die Glieder vor und nach dem aktuellen Eingangssignal hergenommen werden und aus diesen ein Mittelwert gebildet wird.

Im Gegensatz dazu stehen die rekursiven Filter, im Englischen als *„infinite impulse response“*-Filter (IIR) bezeichnet. Bei diesen hängt das Ausgangssignals $y(n)$ nicht nur vom Eingangssi-

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

gnal, sondern auch von den zuvor bestimmten Gliedern des Ausgangssignals ($y(n-1)$, $y(n-2)$, ...) ab. Es werden also auch die rekursiven Terme mit in die Filterung einbezogen [49]. Die Bestimmungsgleichung für das Ausgangssignal eines rekursiven Filters entspricht der allgemeinen Differentialgleichung von digitalen Filter:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M} b_i x(n-i) - \sum_{j=0}^{N} a_j y(n-j) \tag{5.3}$$

Zu den wichtigsten Filterentwürfen gehören der *Butterworth*-, *Potenz*-, *Chebyshev*- und *Cauer*-Filter. Diese meist verwendeten IIR-Filter basieren auf den Entwurfskriterien eines dieser Standardentwürfe. Sie unterscheiden sich durch die zur Definition des Filters verwendeten Hilfsfunktionen und Koeffizienten [25]. Die Koeffizienten werden beim Entwurf des Filters an die erforderlichen Eigenschaften des Filters angepasst. IIR-Filter sind analogen Filtern nachempfunden und in ihrer Definition an diese angepasst.

Ob bei einer Filterung ein FIR- oder IIR-Filter verwendet wird, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab: unter anderem von den Eigenschaften des Eingangssignals, den Anforderungen an das Ausgangssignal und auch von der verfügbaren Rechenstärke. Jedoch hat der FIR-Filter durch das nicht-rekursive Verhalten einige Vorteile in der Implementierung, da Filterkoeffizienten im laufenden Betrieb geändert werden können. Auch mathematisch betrachtet ergeben FIR-Filter ein etwas stabileres Signal. Aus diesen Gründen werden in der modernen Nachrichtentechnik und Signalverarbeitung vor allem nicht-rekursive Filter genutzt [25].

5.4 Transformation eines Beschleunigungssignals in den Frequenzbereich

Die schnelle Fourier-Transfomation wird im Englischen „Fast Fourier Transform“, kurz FFT, genannt. Sie bezeichnet eine rechenoptimierte Variante der diskreten Fourier Transformation, kurz DFT. Die diskrete Fourier Transformation wird angewendet um ein Signal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich zu transformieren. Häufige Anwendungen einer Transformation in den Frequenzbereich sind Frequenzanalysen von Signalen (welche Frequenzen kommen in einem Signal vor und mit welcher Häufigkeit bzw. mit welchen Amplituden kommen diese vor?). Eine andere häufige Anwendung ist die Transformationen infolge Signalfilterungen. Die größten Anwendungsgebiete davon sind Audio- und Bildverarbeitung, sowie Kommunikationssysteme [47, 49].

Die diskrete Fourier Transformation ist in ihrer ursprünglichen Form sehr rechenaufwendig und mit hohem Ressourcenaufwand verbunden. Die Fast Fourier Transformation macht sich einen Algorithmus zunutze, sodass die vorher komplizierte Berechnung mit einem einfachen Rechner durchführbar ist. Die Idee dabei ist es, das Ursprungsproblem in viele kleine Berechnungen aufzuteilen. Es gibt verschiedene Algorithmen, welche die FFT ermöglichen. Der am häufigsten verwendete Algorithmus ist der so genannte *Radix-2*-Algorithmus. Die Gründe für die häufige Anwendung von *Radix-2* sind die einfache Möglichkeit zur Implementierung des Algorithmus und eine große Breite an möglichen Anwendungsfällen. Um die Effizienz eines FFT-Algorithmus zu beurteilen, kann die Anzahl der Berechnungsschritte evaluiert werden, die im Zuge einer Transformation mit DFT und FFT notwendig ist. Wenn N die zu transformierenden Werten sind, benötigt die DFT N^2 Rechenschritte. Bei der Transformation mittels FFT werden hingegen nur $N \cdot log_2(N)$ Schritte benötigt. Für den Fall von $N = 1024$ benötigt die DFT ca. 1 000 000 Rechenschritte, die FFT kann das Problem mit nur 10 000 Berechnungsschritten lösen. Das entspricht einer Einsparung von 99% der Rechenschritte. Je größer die zu verarbeitenden

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

Datenmengen werden, desto größer wird auch die Zeitersparnis durch die FFT. Durch die Arbeitsweise des FFT-Algorithmus, also das Aufteilen der Daten und Rechenschritte, ist die FFT nur möglich, wenn N möglichst viele gleichartige Teiler aufweist. Bei den meisten Algorithmen muss die Länge von N deshalb einer Potenz von 2 entsprechen, also $N = 2^x$. Es gibt jedoch auch Algorithmen, die mit anderen Teilern arbeiten und somit auch Vektoren mit mehr oder weniger Eingangsdaten transformieren können. Diese im allgemeinen nicht so effizient wie der oben beschriebene *Radix-2*-Algorithmus. Das Optimum wird also erreicht, wenn die Länge von N einer Potenz von 2 entspricht. Falls dies nicht der Fall ist, kann der Vektor N durch ein Erweitern bzw. Auffüllen auf die notwendige Länge gebracht werden. Die zusätzlichen Nullen ändern nichts am Ergebnis der Transformation. Dieses Vorgehen wird „Zero Padding“ genannt [17, 19, 25].

MATLAB beinhaltet die Funktion *fft*, diese beherrscht sowohl den *Radix-2*-Algorithmus für Vektoren der Länge 2^x, als auch andere Algorithmen, die nicht an einen Input von 2^x Daten gebunden sind. Somit ist es nicht notwendig, das Eingangssignal mit Nullen aufzufüllen und auf eine Länge von 2^x zu bringen. Es kann jedoch aufgrund der höheren Effizienz sinnvoll 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

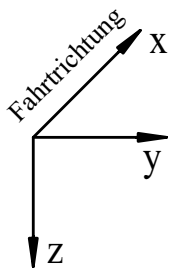
Kapitel 6

Aufbereitung der Messdaten

Während der in Kapitel 4 beschriebenen Versuche, wurden Messdaten in großem Umfang gesammelt, welche im Zuge dieser Arbeit aufbereitet und ausgewertet werden. In diesem Kapitel wird der Prozess der Auswertung Schritt für Schritt erläutert und die genaue Vorgehensweise erklärt. Die gesamte Datenaufbereitung und -auswertung wird mit MATLAB durchgeführt.

6.1 Übersicht über die gesammelten Messdaten

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurde der Plattenverdichter mit fünf Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet, wovon vier auf der Platte und einer auf dem Rahmen angebracht waren. Die Beschleunigungsaufnehmer haben für jede der acht Messfahrten sowie für die vier Nullmessungen Beschleunigungsdaten in x-, y- und z-Richtung mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 10 kHz aufgenommen. Die Definition der x-, y- und z-Richtung in Bezug zur Fahrtrichtung sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Die x-Achse zeigt in Fahrtrichtung, die y-Achse nach in Fahrtrichtung gesehen rechts und die z-Achse zeigt nach unten in Richtung Boden. Die vier Beschleunigungssensoren auf der Grundplatte wurden links und rechts der Mitte jeweils im vorderen und hinteren Bereich angebracht (siehe Abbildung 4.2). Im Laufe der Versuchsdurchführung fielen zwei dieser Sensoren (AP2 und AP3) aus. Glücklicherweise handelte es sich dabei um den vorderen und hinteren Sensor einer Seite, somit konnte zumindest das zweidimensionale Bewegungsverhalten durch die intakten Sensoren aufgezeichnet werden. Die Positionssensoren, mit welchen das Erregersystem ausgestattet wurde, detektierten die Unwucht in den Viertelpunkten des Erregersystems mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 10 kHz auf. Auch bei den Positionssensoren kam es während der Versuche zu Ausfällen: die Sensoren Pos1 und Pos2 registrierten mit fortschreitender Versuchsdauer keine verarbeitbaren Signale mehr. Weiters wurde der Hydraulikdruck im Hydraulikzylinder zwischen Bagger und Rahmen gemessen, um die Kraft zu ermitteln, welche zusätzlich auf den Plattenverdichter aufgebracht wurde. Außerdem wurden die GPS-Daten des Baggers aufgezeichnet um die Messdaten örtlich zuordnen zu können.



x-Richtung ... positiv in Fahrtrichtung

y-Richtung ... positiv in Fahrtrichtung gesehen rechts

z-Richtung ... positiv nach unten

Abb. 6.1: Ausrichtung des Koordinatensystems in Bezug zur Fahrtrichtung

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 Durchführen der Messdatenaufbereitung

Um die aufgezeichneten Messdaten interpretieren zu können, müssen sie in einem vorhergehenden Schritt aufbereitet werden. Danach können aus den Beschleunigungen durch einen Integrationsschritt Schwinggeschwindigkeiten und weiter Schwingwege ermittelt werden. Durch eine Ungenauigkeit des Messdatenerfassungssystems wurde während der Versuchsdurchführung eine unterschiedliche Anzahl an Datenpunkten je Richtung und Sensor aufgezeichnet. Um die Daten weiterverarbeiten zu können, müssen diese Ungenauigkeiten zuerst bereinigt werden. Hierbei wird mit Hilfe der MATLAB-Funktionen *linspace* und *interp1* jeder Beschleunigungsvektor und jedes Positionssignal neu abgetastet und auf die gleiche Anzahl an Datenpunkten gebracht.

6.2.1 Analyse der Beschleunigungssignale im Frequenzbereich

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, entstehen beim messen von Beschleunigungen bzw. Schwingungen unweigerlich Störfrequenzen, die ebenfalls aufgezeichnet werden. Diese Störfrequenzen würden das Messergebnis verfälschen und müssen daher herausgefiltert werden. Bevor eine Filterung durchgeführt wird, ist es notwendig zu überprüfen, ob relevante Informationen durch die Filterung verloren gehen. Dazu muss das Beschleunigungssignals im Frequenzbereich betrachtet werden. Die Transformation des Beschleunigungssignals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich ist mittels Fast Fourier Transformation, kurz FFT, möglich. In Kapitel 5.4 werden die Grundlagen der Fast Fourier Transformation genauer behandelt. Um in MATLAB eine FFT durchzuführen, kann der gleichnamige Befehl *fft* verwendet werden, wobei zuvor der Mittelwert des Signals von jedem einzelnen Wert abgezogen werden sollte, wie in [23] und [49] empfohlen. Abbildung 6.2 zeigt das in den Frequenzbereich transformierte Beschleunigungssignal des Sensors AP1 für Messfahrt 01. Um die Lesbarkeit zu verbessern, sind nur Frequenzanteile bis 200 Hz dargestellt, in den Signalen sind jedoch Frequenzanteile bis zu 5000 Hz vorhanden. Die Quantität dieser vorhandenen Frequenzanteile nimmt jedoch immer weiter ab. Es ist zu erkennen, dass die größten Schwingungsanteile im Bereich zwischen 20 und 90 Hz und dann wieder von 140 bis 160 Hz liegen. Im niederfrequenten Bereich sind keine nennenswerten Anteile vorhanden, daher ist eine Filterung mittels Hochpassfilter möglich, ohne dass aussagekräftige Daten verloren gehen. Bei der Frequenz-Analyse der übrigen Beschleunigungssignale zeigt sich ebenfalls, dass keine relevanten niederfrequenten Schwingungsanteile vorhanden sind. Das bedeutet, dass die Signale gefiltert werden können, ohne dass relevante Informationen verloren gehen. Weiters ist in Abbildung 6.2 ersichtlich, dass beim Aufzeichnen der Daten eine große Menge an Messrauschen im hohen Frequenzbereich entstanden ist, welches das Signal verzerrt und somit auch die Ergebnisse der numerischen Integration beeinflusst. Durch eine zweite Filterung der Signale mit einem Tiefpassfilters können diese hochfrequenten Störfrequenzen entfernt werden, ohne relevante Informationen zu verlieren.

6.2.2 Definition der digitalen Filter

Da die Analyse der Beschleunigungssignale die Zulässigkeit einer Filterung der Messdaten ergeben hat, sind im nächsten Schritt geeignete Filter zu definieren. Dabei gilt es vor allem die Grenzfrequenzen der Filter zu bestimmen. Da an Hoch- und Tiefpassfilter unterschiedliche Anforderungen gestellt werden, erfolgt die Konfiguration der Filter unabhängig voneinander.

6.2.2.1 Definition des Hochpassfilters mittels Konvergenzstudie

Wie von *Hofmann* in [23] empfohlen, wird als Hochpassfilter ein *Butterworth*-Filter sechster Ordnung gewählt. Um diesen richtig zu konfigurieren, muss eine Konvergenzstudie durchgeführt

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

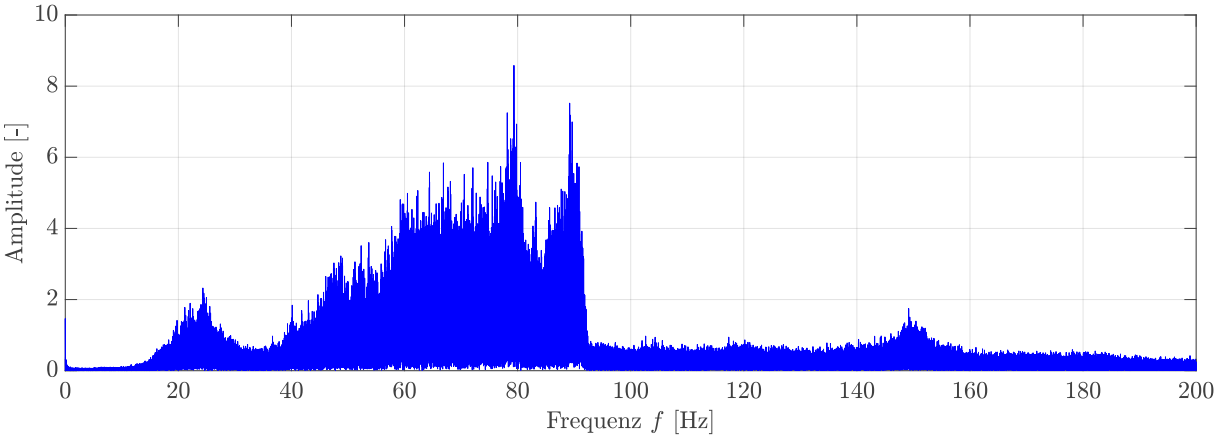


Abb. 6.2: Frequenzspektrum des Beschleunigungssignal des Sensors AP1 in z-Richtung von Messfahrt 01

werden. Im Zuge der Konvergenzstudie wird die Grenzfrequenz des Filters schrittweise um 1 Hz erhöht und das zu analysierende Beschleunigungssignal jeweils gefiltert und numerisch integriert. Danach werden die Differenzen zwischen den integrierten Beschleunigungen (= Schwinggeschwindigkeiten) des aktuellen Schrittes n (mit der Grenzfrequenz f_n) und des Schrittes $(n-1)$ davor (mit der Grenzfrequenz f_{n-1}) gebildet. Diese Differenzen werden mit den Differenzen der Schwinggeschwindigkeiten zwischen dem ersten Schritt n_1 (mit der Grenzfrequenz $f_1 = 1\,\text{Hz}$) und zweiten Schritt n_2 (mit der Grenzfrequenz $f_2 = 2\,\text{Hz}$) verglichen. Um die Analyse zu erleichtern, werden zwei Kriterien definiert, welche den Vergleich ermöglichen:

1. Vergleich des Mittelwerts der Differenzen
2. Vergleich der Fläche, welche von den Umhüllenden der zuvor errechneten Differenzen eingeschlossen wird

Abbildung 6.3 zeigt einen Ausschnitt der Differenzen zwischen dem mit 13 Hz und 14 Hz gefilterten Beschleunigungssignal der Messfahrt 01. Die obere Umhüllende ist in grün dargestellt, die untere Umhüllende in rot. Die Differenzen der Schwinggeschwindigkeitssignale sind in blau zu sehen.

Die Veränderungen jedes einzelnen Schrittes zwischen 3 Hz und 20 Hz werden für jeden Sensor (pro Richtung und Messfahrt) zusammengefasst. Abbildung 6.4 zeigt eine Zusammenfassung des Sensors AP1 für die z-Richtung der Messfahrt 01. Die Methode der Umhüllenden führt zu einem Minimum von 11 Hz, während die Methode der Mittelwerte im Bereich bis zu 20 Hz kein eindeutiges Ergebnis liefert. Da die Grenzfrequenz aufgrund der teilweise niedrigen Anregungsfrequenz nicht über 20 Hz gewählt werden kann, wird der Betrachtungsbereich nur bis 20 Hz ausgewertet.

Dieser Prozess wird für jeden der vier Sensoren auf der Platte, jede der drei Richtungen und jede der acht Messfahrten durchgeführt. Daraufhin werden die Ergebnisse der beschädigten Sensoren entfernt und die verbliebenen aussagekräftigen Ergebnisse ausgewertet. In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse aller Sensoren und Messfahrten für die z-Richtung zusammengefasst. Auf der Abszisse sind die Messfahrten aufgetragen, auf der Ordinate die für die Messfahrten ermittelten Grenzfrequenzen. Da die Daten in z-Richtung in Bezug auf die Versuchsauswertung von größerer Bedeutung sind als x- und y-Richtung, werden diese bei der Festlegung der Grenzfrequenz gesondert betrachtet. Die erste Spalte in Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse der Konvergenzstudie für Messfahrt 01 in z-Richtung. Für drei der vier Sensoren ergibt die Methode der Umhüllenden eine Grenzfrequenz von 11 bzw. 13 Hz. Der vierte Sensor verzeichnete eine Störung und wird somit nicht berücksichtigt. Da bei einigen Messfahrten die Methode der Mittelwerte ein

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

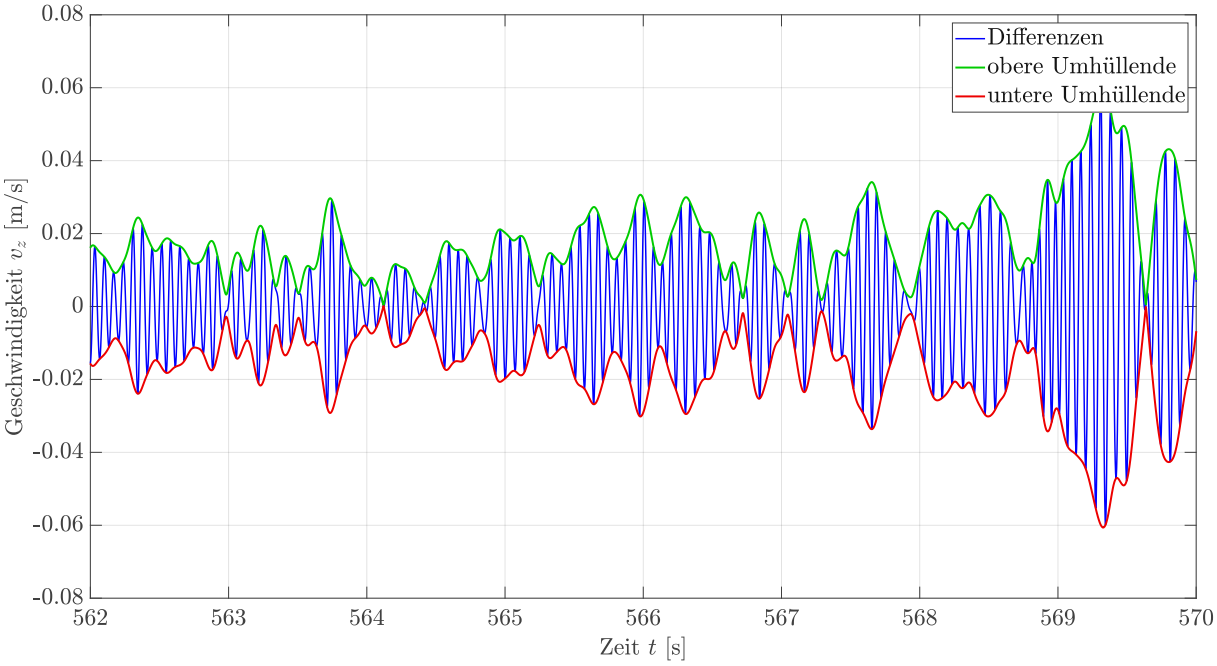


Abb. 6.3: Darstellung der Differenzen des, mit zwei unterschiedlich definierten Filtern, gefilterten Beschleunigungssignals der Messfahrt 01. Die Grenzfrequenzen der Filter betragen 13 Hz bzw. 14 Hz

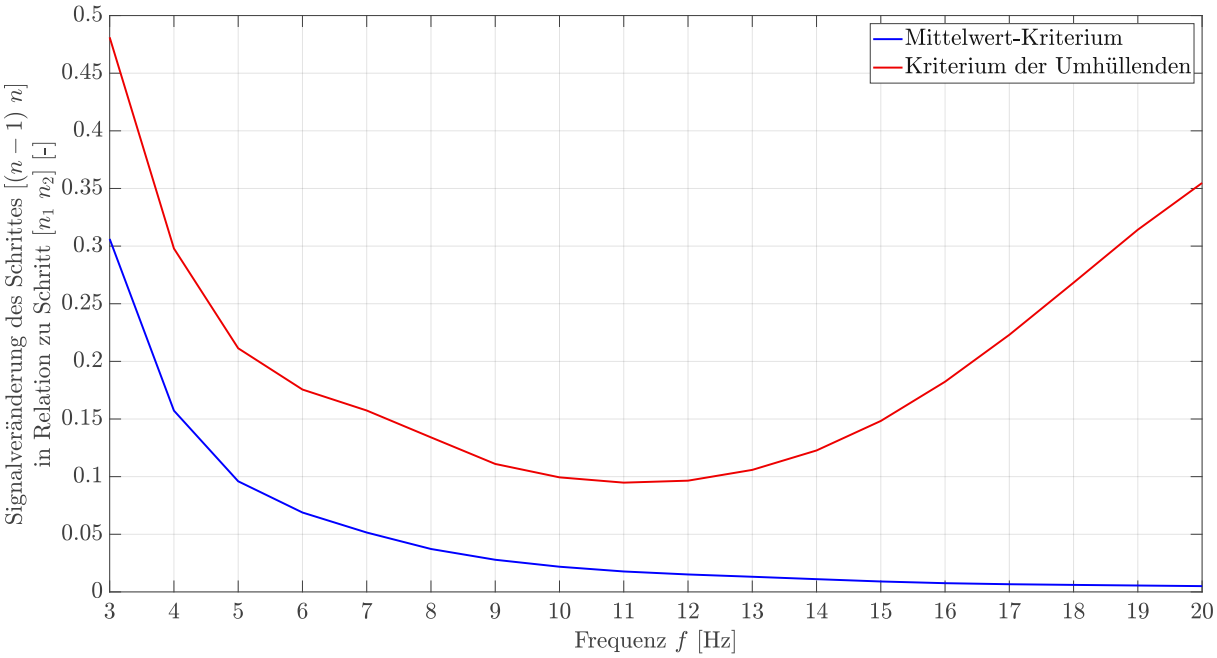


Abb. 6.4: Vergleich der Konvergenzkriterien des Mittelwerts und der Umhüllenden. Die Abszisse gibt die Frequenz des Schrittes n an. Die Ordinate gibt die Signalveränderung des Schrittes $[(n-1)\ n]$ in Relation zum ersten Schritt $[n_1\ n_2]$ für das jeweilige Kriterium an. Darstellung für Sensor AP1 und Messfahrt 01

Ergebnis außerhalb des Betrachtungsbereichs liefert, wird für diese Messfahrten die Methode der Umhüllenden herangezogen. Die Analyse aller Messfahrten nach diesem Prinzip führt zu keinem

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

eindeutigen Ergebnis. Die Grenzfrequenz wird daher mit 13 Hz als größtmögliche ermittelte Grenzfrequenz im Rahmen der Ergebnisse der Konvergenzstudie gewählt.

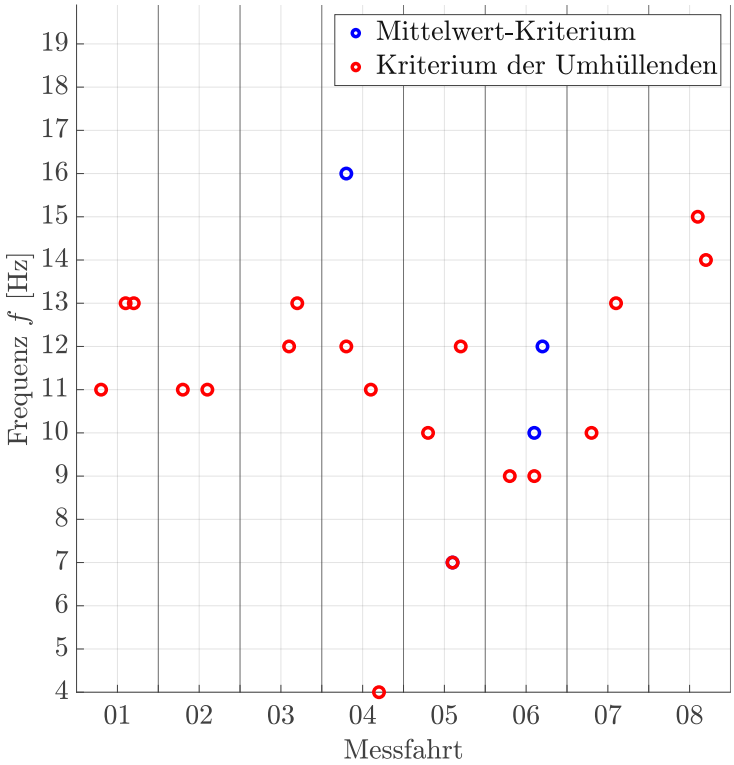


Abb. 6.5: Darstellung der nach den zwei aufgestellten Konvergenzkriterien ermittelten Grenzfrequenzen jedes Sensors für alle Messfahrten in z-Richtung

6.2.2.2 Definition des Tiefpassfilters

Eine Möglichkeit, hochfrequentes Messrauschen aus Signalen zu entfernen, ist das Filtern mithilfe eines Tiefpassfilters. Um den Tiefpassfilter richtig definieren zu können, werden mehrere Vergleichsstudien an den vorhandenen Beschleunigungsdaten durchgeführt. Bei diesen wird das ungefilterte Beschleunigungssignal und das ungefilterte, numerisch integrierte (Geschwindigkeits-)Signal mit dem gefilterten bzw. dem gefilterten und dann numerisch integrierten Signal verglichen. Anschließend werden die Filter anhand der Differenzen zueinander und anhand der Abweichung vom Ursprungssignal bewertet. Dieses Verfahren wird für verschiedene Frequenzen und verschiedene Filtertypen durchgeführt. Abbildung 6.6 zeigt einen Vergleich zwischen den, mittels eines FIR-Filters gefilterten Daten und den mittels eines IIR-Filters gefilterten Daten (blaue Linie) mit ähnlichen Konfigurationen und einer Grenzfrequenz von 450 Hz. In grün ist die Differenz der beiden gefilterten Signale dargestellt. Die hellblaue Linie zeigt den ungefilterten Beschleunigungsverlauf. Der in der Abbildung gezeigte FIR-Filter ergibt, über alle Testfahrten betrachtet, die geringste Abweichung vom ursprünglichen Signal und eine ausreichende Filterung des Messrauschens. Zusätzlich benötigt er eine deutlich geringere Rechenzeit, als der vergleichbare IIR-Filter. Aus diesem Grund wird der FIR-Filter in weiterer Folge für die Filterung der Signale verwendet.

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

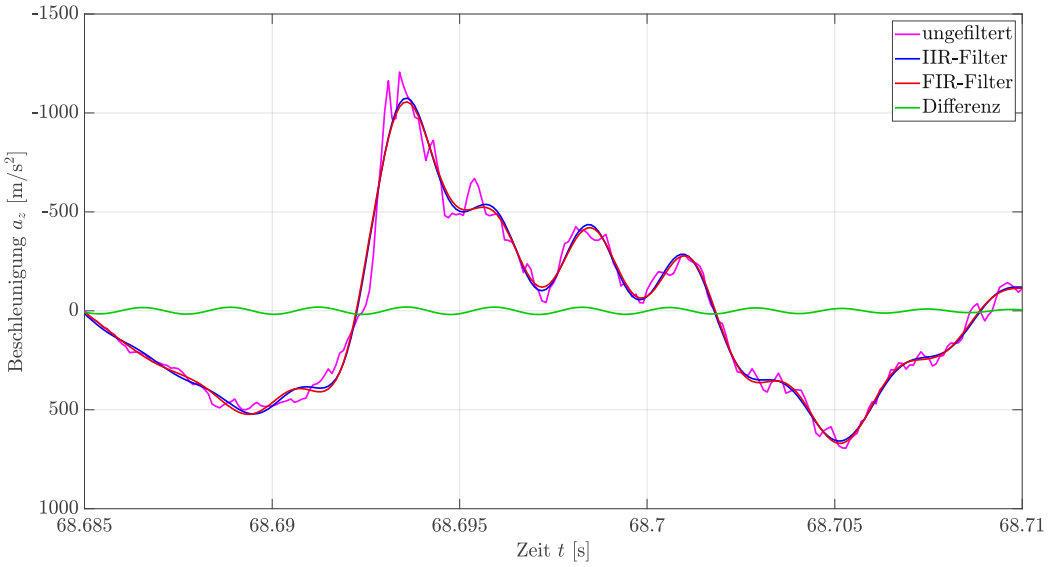


Abb. 6.6: Ausschnitt eines Beschleunigungssignals, welches einmal mittels FIR- und einmal IIR-Tiefpassfilter gefilterten wird

6.2.3 Filterung und Integration der Beschleunigungssignale

Mit den definierten Filtern ist es möglich, die Beschleunigungssignale zu filtern und daraufhin numerisch zu integrieren, um Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege zu erhalten. *Hofmann* empfiehlt in [23] vor dem Integrieren zwei Schritte, um einen konstanten Drift und eine Phasenverschiebung durch die Integration zu vermeiden. Zum einen soll der Mittelwert vom gesamten Signal abgezogen werden, zum anderen soll das Signal mit jedem Filter doppelt gefiltert werden, einmal vorwärts und einmal rückwärts. In MATLAB ist die doppelte Filterung durch den Befehl *filtfilt* möglich. Nach der Filterung erfolgt die numerische Integration. Der gewählte Ablauf ist somit:

1. Abziehen des Mittelwerts vom Beschleunigungssignal
2. Doppeltes Filtern des Beschleunigungssignals jeweils mit Hoch- und Tiefpassfilter
3. Numerisches Integrieren des Beschleunigungssignals (= Schwinggeschwindigkeitssignal)
4. Abziehen des Mittelwerts vom Schwinggeschwindigkeitssignals
5. Doppeltes Filtern des Schwinggeschwindigkeitssignals jeweils mit Hoch- und Tiefpassfilter
6. Numerische Integrieren des Schwinggeschwindigkeitssignals (= Schwingwegsignal)

In Abbildung 6.7 sind die Ergebnisse der numerischen Integration anhand der Beschleunigungsdaten des Sensors AP4 für Messfahrt 01 in z-Richtung dargestellt. Die erste Grafik der Abbildung zeigt das ungefilterte Beschleunigungssignal, die zweite Grafik das gefilterte Beschleunigungssignal. Die dritte Grafik stellt das Signal nach dem ersten Schritt der numerischen Integration dar (also das Schwinggeschwindigkeitssignal) und die vierte Grafik der Abbildung zeigt das Schwingwegsignal. Es ist zu beachten, dass die Charakteristika des Beschleunigungssignals erhalten bleiben und große Beschleunigungen im Regelfall große Verschiebungen herbeiführen. Mit diesem Ablauf werden alle Beschleunigungssignale integriert und so die zugehörigen Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege 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

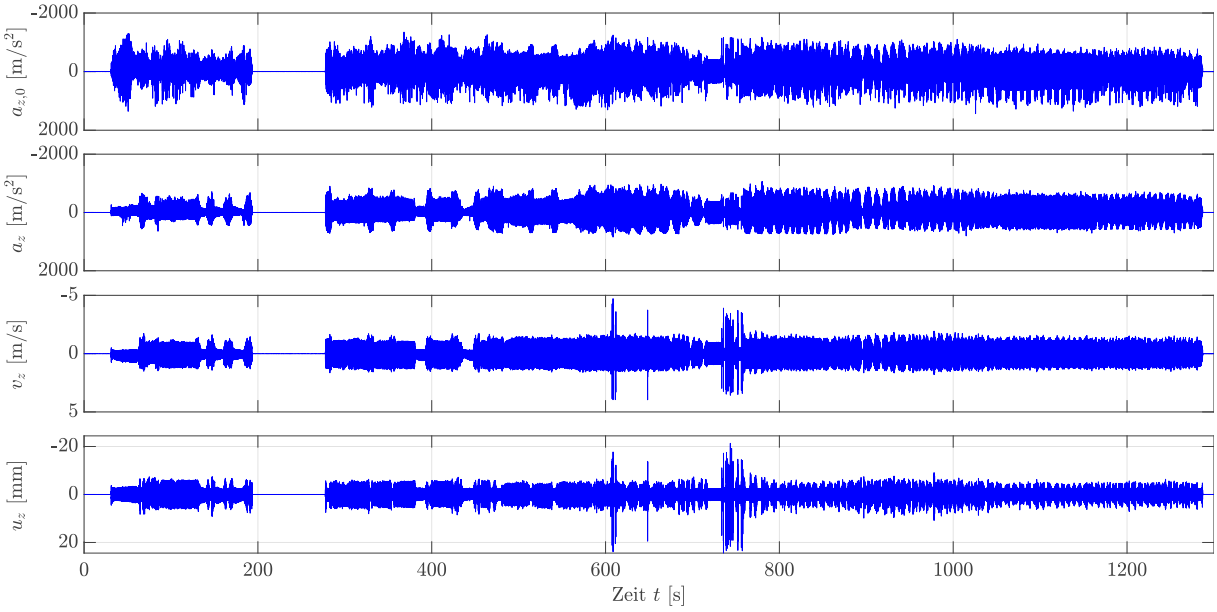


Abb. 6.7: Gegenüberstellung der ungefilterten Beschleunigungen $a_{z,0}$, der gefilterten Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des Sensors AP4 für Messfahrt 01

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

Auswertung und Analyse der aufbereiteten Messdaten

Nach der abgeschlossenen Aufbereitung der Messdaten erfolgt im nächsten Schritt die Auswertung der integrierten Signale, um aus der großen Menge an Daten interpretierbare Ergebnisse zu erhalten. Wichtige Zwischenschritte sind das Bestimmen des Bewegungsverhaltens der Unwucht, die Ermittelung des Erregerkraftverlaufs und die Ermittlung der Bodenkontaktkraft.

7.1 Auswertung der Unwuchtanregung

7.1.1 Bestimmung des Unwuchtdrehwinkels anhand der Positionssensoren

Für die Bestimmung des Unwuchtdrehwinkels müssen die Daten der Positionssensoren ausgelesen werden. Die verwendeten Hall-Sensoren geben einen Ausschlag im Signalverlauf wieder, sobald der, an der Unwucht angebrachte Magnet, die Stelle des Sensors an der Außenseite des Erregersystems passiert. Ein Ausschlag eines Positionssignals gibt den Unwuchtdrehwinkel zu diesem Zeitpunkt an. Da die Hall-Sensoren in den Viertelpunkten angebracht sind, kann dadurch auf den Drehwinkel der Unwucht geschlossen werden. Die Drehwinkel der Positionssensoren sind: Pos1 = $3\pi/4$, Pos2 = $5\pi/4$, Pos3 = $7\pi/4$ und Pos4 = $\pi/4$. Die Unwucht durchläuft in einer Umdrehung also die Drehwinkel von 0 bis 2π. Durch die Reihenfolge der Ausschläge aller vier Sensoren kann zusätzlich die Drehrichtung der Unwucht bestimmt werden. Auf Basis des ermittelten Drehwinkels ist es möglich die Bewegung der Unwucht zu rekonstruieren. Da für die weitere Auswertung nur die Vertikalkomponente der Unwuchtbewegung von Relevanz ist, kann der Bewegungsverlauf der Unwucht durch eine sinusähnliche Funktion beschrieben werden, die einen Drehwinkel von 0 bis 2π durchläuft und an den Stellen der Viertelpunkte definiert ist.

Da die Umdrehungsgeschwindigkeit der Unwucht während der Versuche nicht konstant war, muss die gesuchte sinusähnliche Funktion aus vielen kleinen Teilen zusammengesetzt werden. Die Einzelteile beschreiben jeweils eine Viertelperiode einer reinen Sinus-Funktion, die zwischen zwei gemessenen Positionssignalen interpoliert wird. Die Unwuchtbewegung wird so jeweils für eine Vierteldrehung rekonstruiert. Richtig angewendet auf die gemessenen Positionsdaten ergibt sich eine durchgehende sinusähnliche Funktion, die entlang der Zeitachse gestreckt oder gestaucht wird, je nachdem ob sich die Unwucht schneller bzw. langsamer dreht. Erschwerend kommt hinzu, dass die Positionssensoren Pos1 und Pos2 im Laufe der Messfahrten ausgefallen sind und nicht mehr zur Positionsermittlung verwendet werden können. Aus diesem Grund werden bei einem Großteil der Messfahrten nur die Sensoren Pos3 und Pos4 zur Rekonstruktion der Unwuchtbewegung berücksichtigt. Abbildung 7.1 zeigt die beschriebenen Ausschläge der Positionssensoren und darunter die interpolierte sinusähnliche Funktion. An den Punkten, an denen die Positionssensoren Maxima haben, durchläuft die sinusähnliche Funktion einen der Winkel $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ oder $7\pi/4$.

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

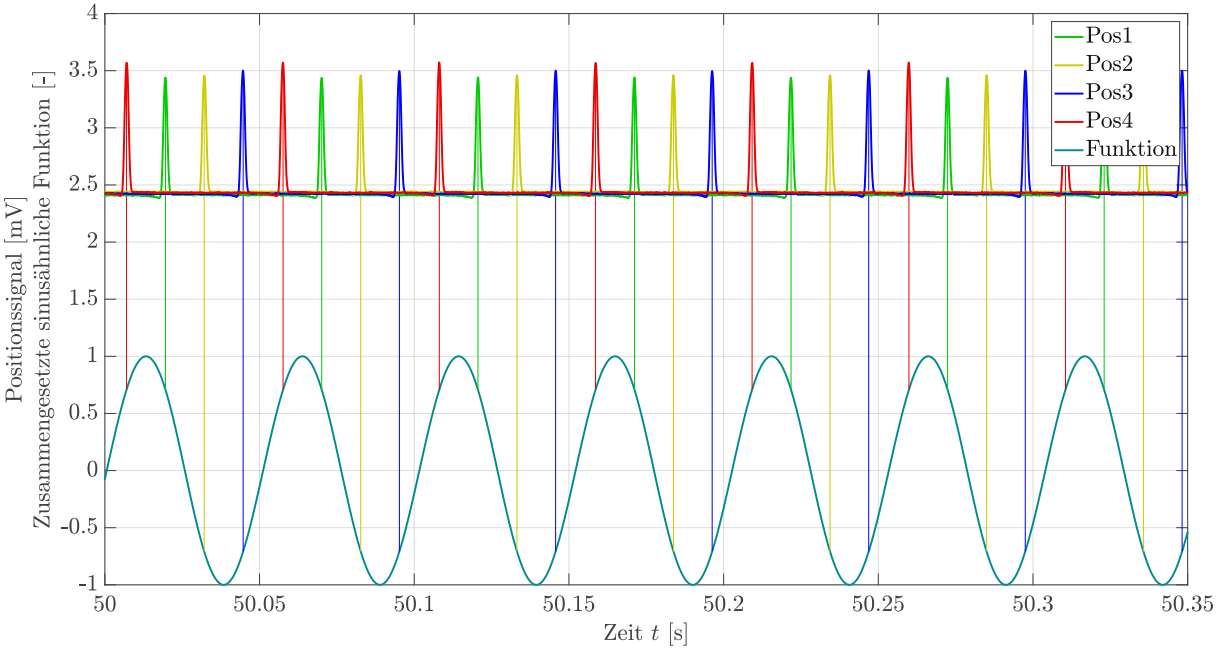


Abb. 7.1: Darstellung des Verlaufs der Positionssignale und der ermittelten Sinusfunktion, welche den Verlauf der Unwucht beschreibt und durch die Positionssensoren definiert wird (Ausschnitt aus Messfahrt 01)

7.1.2 Ermittlung der Anregungsfrequenz und Erregerkraft

Durch den ermittelten Bewegungsverlauf der Unwucht kann auf die Anregungsfrequenz des Erregersystems geschlossen werden. Da die Anregungsfrequenz während einer Messfahrt nicht konstant ist, muss die Berechnung derselben ebenfalls abschnittsweise durchgeführt werden. Als ein Berechnungsabschnitt wird eine gesamte Unwuchtumdrehung gewählt, da die Frequenz damit ausreichend genau bestimmt werden kann. Gleichung 7.1 gibt die zur Ermittlung der Anregungsfrequenz verwendete Formel an, wobei für t_1 und t_2 jeweils der Start- und Endzeitpunkt einer vollständigen Unwuchtrotation (gestartet bei $\pi/4$) einzusetzen ist.

$$f = \frac{1}{t_2 - t_1} \tag{7.1}$$

Die Frequenz ist eine wichtige Zusatzinformation in der Auswertung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters, da sie die Drehgeschwindigkeit der Unwucht angibt. Für die Ermittelung der Erregerkraft ist eine Umrechnung der Frequenz f (Gleichung 7.1) in die Eigenkreisfrequenz θ notwendig. Die Eigenkreisfrequenz lässt sich durch folgende Gleichung aus der Frequenz ermitteln:

$$\theta = 2\pi f \tag{7.2}$$

Die ermittelte Eigenkreisfrequenz θ ist eine maßgebende Größe für die Bestimmung der Erregerkraft, welche durch den bekannten mechanischen Zusammenhang zwischen Erregerfrequenz, Masse, Exzentrizität und Phasenverschiebung ermittelt werden kann. Die mathematische Beziehung dieser Größen zur Ermittlung der Erregerkraft ist in Gleichung 7.3 angegeben.

$$F_{err} = m_e \cdot e \cdot \theta^2 \cdot sin(\theta \cdot t + \varphi_0) \tag{7.3}$$

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

Dabei steht m_e für die Masse und e für die Exzentrizität der Unwucht. Für θ ist die Eigenkreisfrequenz aus Gleichung 7.2 einzusetzen. $sin(\theta \cdot t + \varphi_0)$ wird durch die in Abschnitt 7.1.1 ermittelte zusammengesetzte sinusähnliche Funktion des Unwuchtverlaufs ersetzt.

Die ermittelte Erregerkraft F_{err} folgt somit dem Verlauf der zusammengesetzten sinusähnlichen Funktion, wobei die Größe der Erregerkraft durch die Frequenz der Unwuchtumdrehung bestimmt wird. In Abbildung 7.2 sind die Verläufe der Unwuchtumdrehung (zusammengesetzte sinusähnliche Funktion) und der Erregerkraft F_{err} dargestellt.

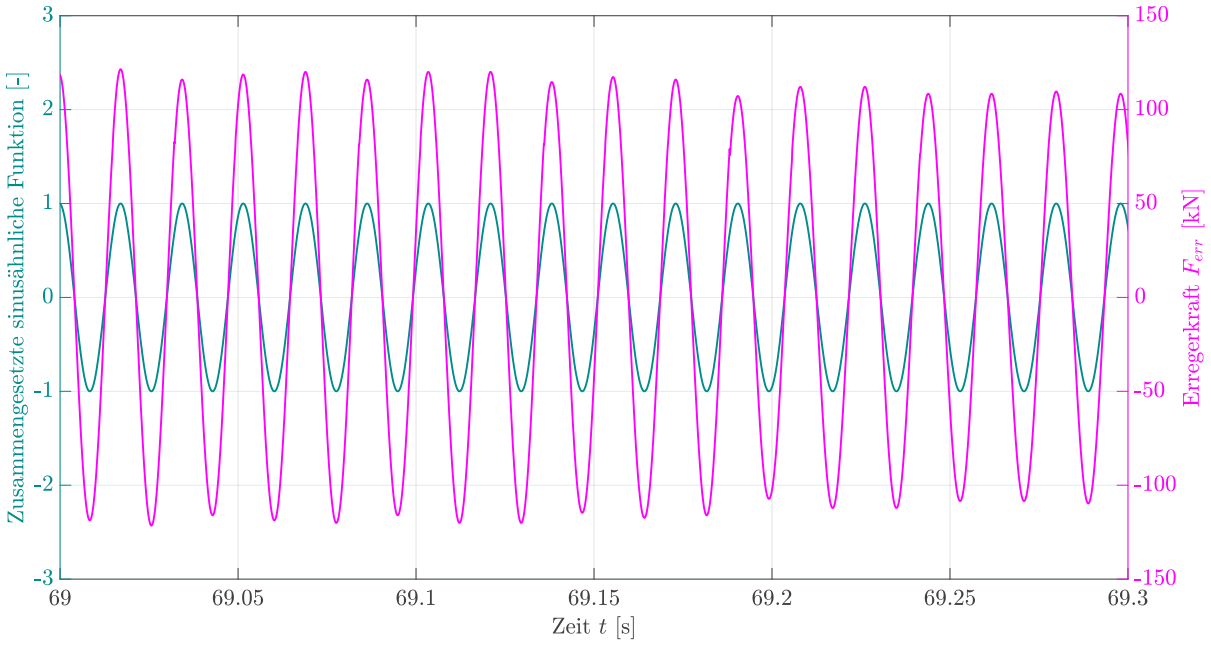


Abb. 7.2: Gegenüberstellung der zusammengesetzten sinusähnlichen Funktion (Verlauf der Unwuchtumdrehung) aus Abschnitt 7.1.1 und der ermittelten Erregerkraft F_{err} für einen Ausschnitt aus Messfahrt 01

7.2 Bewegungsanalyse des Plattenverdichters

Nach der Ermittlung der Erregerfrequenz und -kraft folgt im nächsten Schritt die Analyse des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters. Speziell die Analysen von Beschleunigungs- und Verschiebungsverläufen liefern wichtige Aussagen über das Bewegungsverhalten. Da sich diese Informationen aus der Gesamtheit der großen Datenmenge nur schwer ermitteln lassen, sind dafür Detailbetrachtungen von wenigen Erregerperioden notwendig. In dem geringen Betrachtungszeitraum einer Detailbetrachtung können, aufgrund der überschaubaren Anzahl an Datenpunkten, auch visuelle Analysen des Bewegungsverhaltens zuverlässig durchgeführt werden.

Es ist außerdem notwendig bei der Bewegungsanalyse zwischen Nullmessungen und Messfahrten zu unterscheiden, da bei den Nullmessungen bekannte Bewegungsmuster eintreten sollten, die bei den Messfahrten durch die Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden deutlich schwächer bzw. gar nicht mehr zu erkennen sind.

7.2.1 Auswertung der Nullmessungen

Im Zuge der Feldversuche wurden die vier Nullmessungen vor den Messfahrten durchgeführt. Sie dienten unter anderem als Funktionskontrolle der Sensorik und zur Messung des unbeeinflussten

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

Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters (ohne Interaktion mit dem Boden). Um die Interaktion zwischen Boden und Plattenverdichter ausschließen zu können, wurde der Plattenverdichter während den Nullmessungen angehoben und hing freischwingend in der Luft.

Es wurden vier Nullmessungen durchgeführt, die sich hauptsächlich durch die Anregungsfrequenz unterschieden. In Abbildung 7.3 sind die Frequenzverläufe der Nullmessungen 01 bis 03 abgebildet. Aufgrund eines Messfehlers kann Nullmessung 04 nicht ausgewertet werden. Nach einer kurzen Startphase, die das Erregersystem für das Erreichen der Zielfrequenz benötigt, bleiben die Frequenzen bis zum Ende der Messungen konstant. Ebenfalls abgebildet ist der Verlauf der Erregerkraft während der Nullmessungen. Es zeigt sich, dass Erregerkraft und Frequenz qualitativ einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Das führt bei einer höheren Frequenz zu einer dementsprechend größeren Erregerkraft. Im Umkehrschluss bedeutet das wiederum, dass bei jeder Nullmessung (und auch Messfahrt) eine unterschiedliche Erregerkraft für die periodische Anregung sorgt.

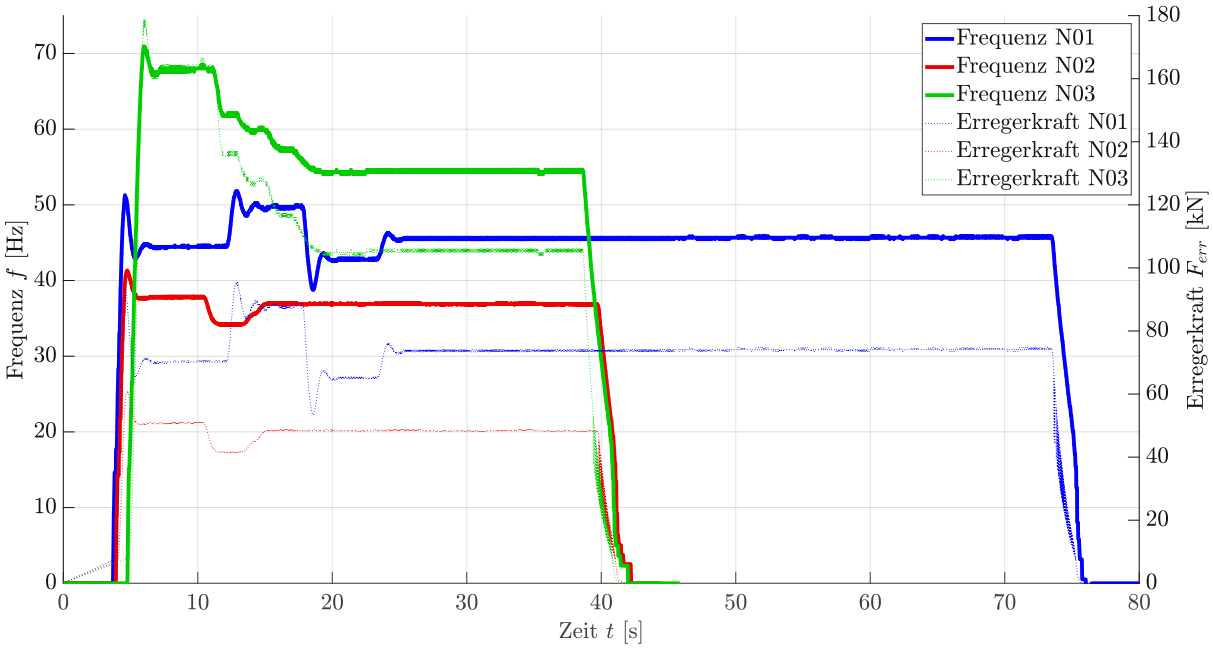


Abb. 7.3: Frequenz- und Erregerkraftverläufe der Nullmessungen

In Tabelle 7.1 sind die in Abbildung 7.3 dargestellten Frequenzverläufe f und Erregerkräfte F_{err} ausgewertet.

Tab. 7.1: Frequenz f und Erregerkraft F_{err} der Nullmessungen

Messung	Frequenz f [Hz]	Erregerkraft F_{err} [kN]
Nullmessung 01	45	74
Nullmessung 02	37	48
Nullmessung 03	55	106

Der signifikante Einfluss der Erregerfrequenz auf den Verlauf der Erregerkraft wird in Abbildung 7.4 dargestellt. Eine Frequenz von 55 Hz (Nullmessung 01) ergibt in einem Zeitraum von 0,2 Sekunden 11 Unwuchtumdrehungen. Verglichen dazu ergibt eine Frequenz von 37 Hz (Nullmessung 02) im selben Zeitraum nur etwa 7,5 Umdrehungen. Zusätzlich tritt während Nullmessung 03 (F_{err} = 106 kN) eine mehr als doppelt so große Erregerkraft wie bei Nullmessung 01

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

($F_{err} = 48\,\text{kN}$) auf. Da Frequenz und Erregerkraft einen großen Einfluss auf die in den Boden eingebrachte Energie haben, sind diese bei der Verdichtung in jedem Fall zu berücksichtigen.

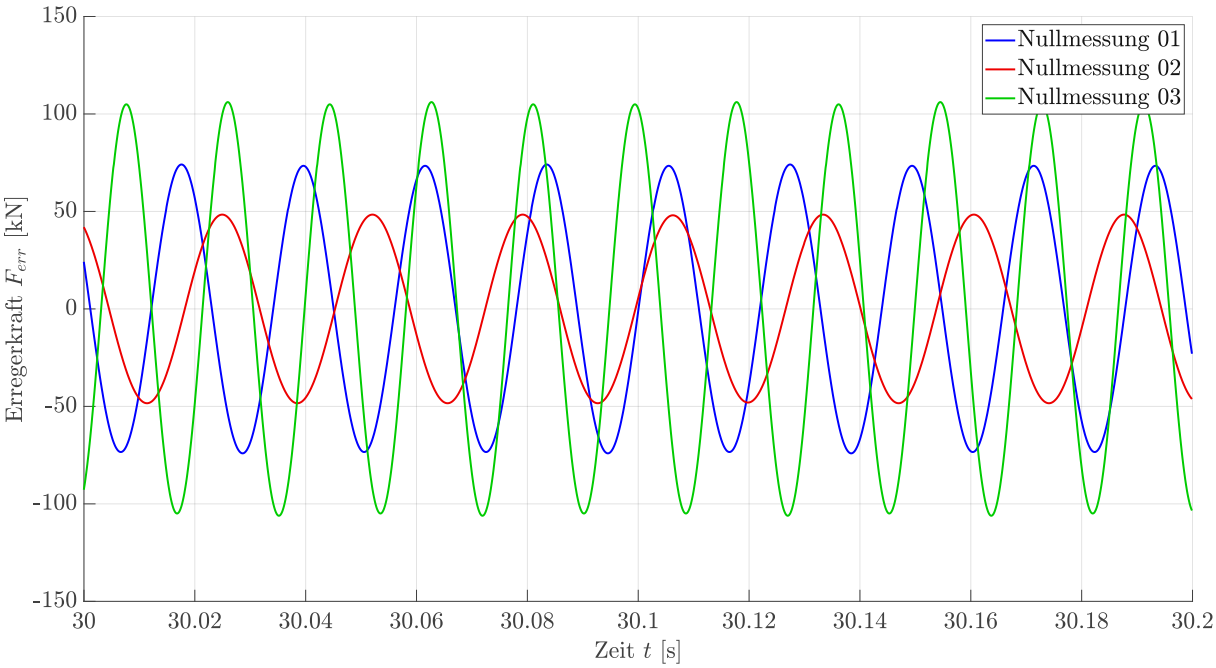


Abb. 7.4: Vergleich der Erregerkraftverläufe der Nullmessungen für einen Zeitausschnitt von 0,2 Sekunden

Die folgende Auswertung der Nullmessungen beschränkt sich großteils auf Nullmessung 03, repräsentativ für alle anderen. Die betrachteten Zeitfenster sind aus Abschnitten mit konstanter Frequenz bzw. Erregerkraft ausgewählt.

Auswertung der Bewegungsgrößen in z-Richtung

Im Zuge der Analyse der Bewegungsgrößen werden die Beschleunigungssignale der vier Sensoren miteinander verglichen. Weiters werden die Beschleunigungssignale den integrierten Bewegungsgrößen gegenübergestellt und die Schwingwege in der x-z-Ebene betrachtet.

In Abbildung 7.5 ist eine Gegenüberstellung der Beschleunigungssignale a_z der unterschiedlichen Sensoren auf Platte und Rahmen dargestellt. Wie in Kapitel 4.2 dokumentiert ist, befanden sich die Sensoren AP1 (grüne Linie) und AP2 (grün strichlierte Linie) im hinteren Teil und die Sensoren AP3 (rot strichlierte Linie) und AP4 (rote Linie) im vorderen Teil der Grundplatte (siehe Abbildung 4.2). Weiters zeigt Abbildung 7.5, dass die Sensoren AP1 und AP2, sowie die Sensoren AP3 und AP4 denselben Verlauf aufweisen. Das bedeutet, dass die linke und rechte Seite der Grundplatte, und somit auch die Mitte der Grundplatte, beinahe denselben Bewegungsverlauf haben. Die minimal größeren Beschleunigungen der rechten Seite sind auf den Schwerpunkt des Erregersystems zurückzuführen, welcher sich nicht exakt in der Mitte der Platte befindet. Der symmetrische Beschleunigungsverlauf zwischen rechter und linker Seite ist eine wertvolle Erkenntnis, da die Sensoren AP2 und AP3 (also die gesamte rechte Seite) während den Messfahrten ausgefallen ist. Die Ergebnisse der linken Seite sind daher während der Nullversuche definitiv und während der Messfahrten zumindest bedingt repräsentativ für die gesamte Platte. In weiterer Folge wird die Bewegungsanalyse mit den Sensoren AP1 und AP4 durchgeführt. Ein anderes Detail, welches aus Abbildung 7.5 hervorgeht ist, dass sich durch die unterschiedliche Position der Sensoren in Fahrtrichtung eine Phasenverschiebung im Beschleunigungssignal zwischen den vorderen und den hinteren Sensoren zeigt. Jede Bewegung 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

abhängig von der Drehrichtung der Unwucht, von den Sensoren im vorderen oder hinteren Bereich der Platte registriert. Dies ist auf die kreisförmig, translatorische Anregung des Erregersystems zurückzuführen. Um die Bewegungsanalyse jedoch so nahe wie möglich dem Schwerpunkt der Grundplatte in Plattenmitte durchführen zu können, ist es notwendig die beiden Sensoren zu mitteln. $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ (blaue Linie) ist die gemittelte Beschleunigung der Sensoren AP1 und AP4 und entspricht einem fiktiver Sensor in Plattenmitte. Die Beschleunigungen des Rahmens (graue Linie) sind durch die weitgehende dynamische Entkopplung zwischen Rahmen und Platte um den Faktor Zehn kleiner. Zusätzlich zeigt Abbildung 7.5 die Erregerkraft in Magenta, welche in derselben Phase (ohne Phasenverschiebung) wie die Beschleunigung wirkt. Der qualitativ nahezu gleiche Verlauf von Erregerkraft und Beschleunigung zeigt, dass die Schwingung der Grundplatte von der Erregerkraft dominiert wird.

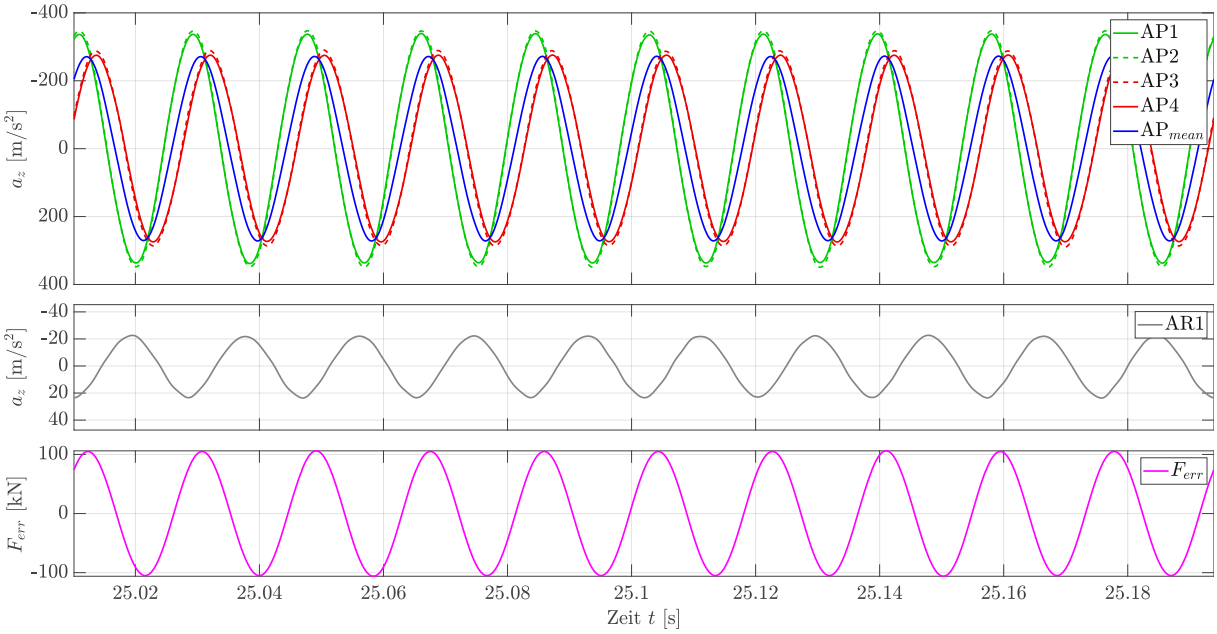


Abb. 7.5: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1 bis AP4 und AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 03

In der weiteren Auswertung wird, wenn nicht anders angegeben, die gemittelte Beschleunigung und der gemittelte Schwingweg für die Analyse verwendet. Die Mittelung dieser Bewegungsgrößen erfolgt jeweils nach der Integration von AP1 bzw. AP4 und wird somit für Beschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg unabhängig voneinander bestimmt.

Abbildung 7.6 zeigt den Vergleich zwischen Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z. Der Schwingweg u_z weist eine Phasenverschiebung von ca. 180° zu Beschleunigung a_z und Erregerkraft auf, die Maxima treten jeweils an der Stelle der Minima der Beschleunigung auf. Die Schwinggeschwindigkeit v_z selbst ist zu den beiden anderen Bewegungsgrößen jeweils um ca. 90° phasenverschoben. Somit sind auch die bei der Integration gegebenen Grundregeln eingehalten, wie z.B. ein Nulldurchgang an der Stelle eines lokalen Maximums. Der regelmäßige periodische Schwingweg bestätigt ebenfalls die aus den Beschleunigungen abgeleitete Annahme, dass es sich bei den Nullmessungen um eine ungestörte Schwingung handelt, die keinen äußeren Einflüssen ausgesetzt war.

Eine weitere, für die Bewegungsanalyse aussagekräftige, Darstellung ist die Orbitalbewegung, d.h. eine Darstellung in der die Verschiebungen in x- und z-Richtung gegeneinander aufgetragen

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

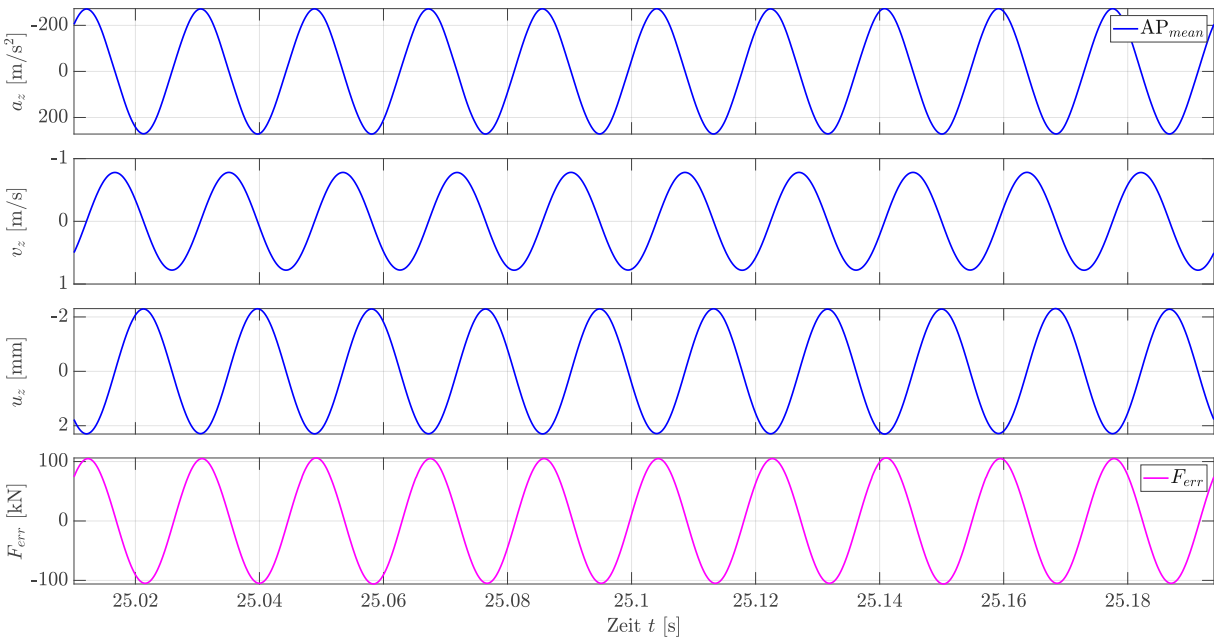


Abb. 7.6: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 03

werden. Diese Darstellung entspricht der Betrachtung des Objekts von der Seite. Abbildung 7.7 zeigt eine solche Darstellung der Verschiebungen u_x und u_z für die Nullmessung 03. Es zeigt sich wie zuvor, dass der hintere Teil der Platte (AP1) eine deutlich größere Bewegung vollzieht, als der vordere (AP4). Bezogen auf die Plattenmitte, also auf $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$, zeigt sich, dass die Platte in einer, um die y-Achse symmetrischen, elliptischen Bewegung um den Ursprungspunkt schwingt, wobei die Schwingung in z-Richtung größer als jene in x-Richtung ist. Die Unwucht dreht während dieser Nullmessung in negativer Richtung, was in dieser Darstellung eine Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn bedeutet. Das führt dazu, dass der Mittelpunkt der Platte während der Abwärtsbewegung nach hinten schwingt. Sobald der Tiefpunkt erreicht ist und die Aufwärtsbewegung beginnt, schwingt die Platte in Fahrtrichtung und beendet die Umdrehung am Hochpunkt in der Ausgangslage. Auch in dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Schwingung ohne eine Beeinflussung stattfindet, welche die periodische, elliptische Schwingung verändern könnte.

Auswertung der Bewegungsgrößen in y-Richtung

Obwohl das primäre Interesse dieser Arbeit auf den Bewegungen in vertikaler Richtung liegt, ist es notwendig auch die horizontale Bewegungen, quer zur Fahrtrichtung, zu beachten. In Abbildung 7.8 ist ein Vergleich zwischen den Schwingwegen in y- und z-Richtung dargestellt. Die Schwingungen in horizontaler Richtung machen im Vergleich nur einen Bruchteil der vertikalen Schwingungen aus. Dies führt zu dem Schluss, dass die Bewegungen quer zur Fahrtrichtung, selbst bei größerer äußerer Beeinflussung (z.B. durch den Boden), so klein sind, dass sie vernachlässigt werden können. Dementsprechend werden sie in der weiteren Analyse nicht mehr behandelt.

7.2.2 Empirische Bestimmung der Exzentrizität der Unwucht

In Tabelle 7.2 sind die Variablen definiert, welche für die Bestimmung der Exzentrizität der Unwucht auf Basis der Erregerkraft und die darauffolgende Ermittlung der Bodenkontaktkraft benötigt 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

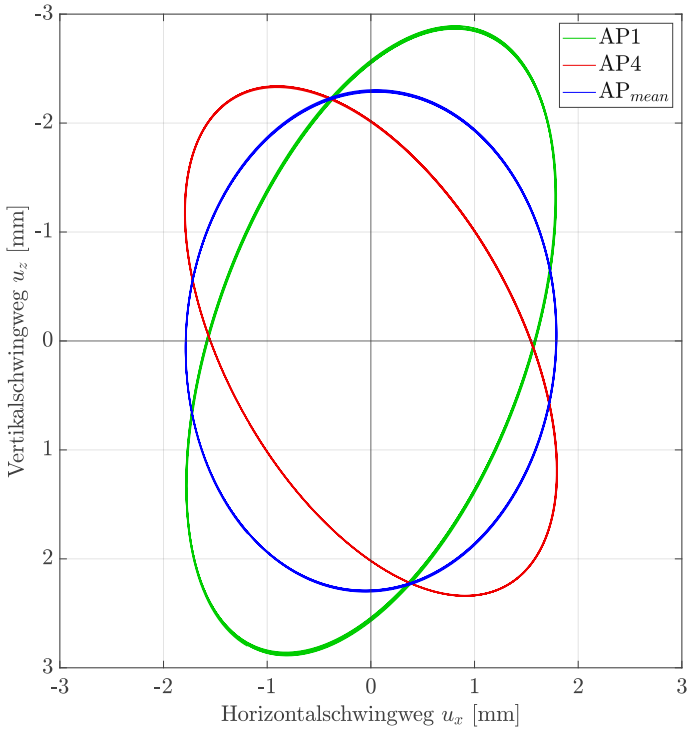


Abb. 7.7: Orbitalbewegung der verschiedenen Sensoren für Nullmessung 03

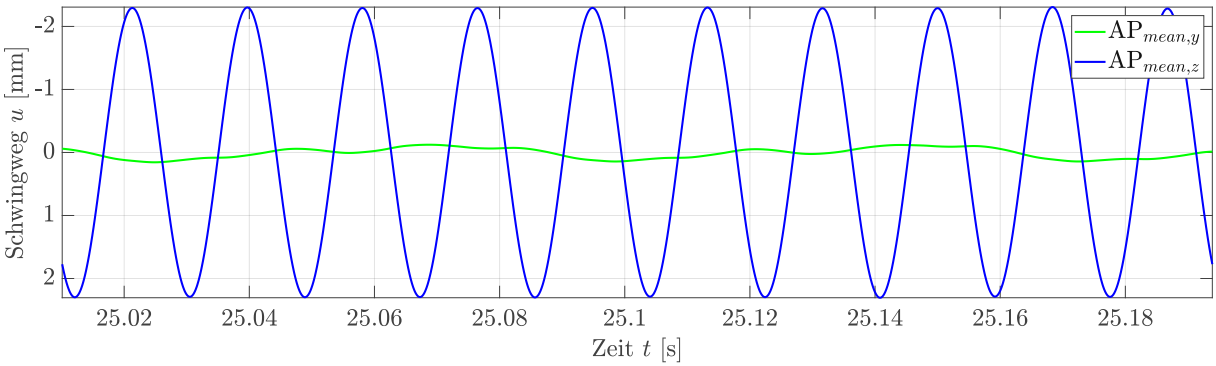


Abb. 7.8: Vergleich der Schwingwege in y- und z-Richtung für Nullmessung 03

Nachdem die unbeeinflussten Bewegungen des Plattenverdichters erfasst worden sind, wird im nächsten Schritt die Erregerkraft des Erregersystems empirisch ermittelt. Die Exzentrizität der Unwuchtmasse wurde im Vorfeld der Versuche nicht exakt bestimmt, dadurch ist eine empirische Überprüfung bzw. Bestimmung der Erregerkraft erforderlich.

Eine mögliche Vorgehensweise für die empirische Bestimmung der Erregerkraft ist eine Gegenüberstellung der Erregerkraft und der Trägheitskraft während einer Nullmessung. Da die Grundplatte während der Nullmessungen in der Luft gehalten wird, muss jede gemessene Bewegung durch die Erregerkraft hervorgerufen worden sein. Dieser Gedankengang führt zu dem Schluss, dass die Trägheitskraft der Grundplatte und des Rahmens genau so groß sein muss wie die Erregerkraft. Die mathematische Beziehung der Trägheitskraft ist Gleichung 7.4 zu entnehmen und setzt sich aus den Beschleunigungen der Grundplatte und des Rahmens sowie aus deren Massen zusammen.

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. 7.2: Definition der verwendeten Variablen

Variable	Bezeichnung	Größe	Einheit
e	Exzentrizität der Unwucht	0,045	[m]
g	Erdbeschleunigung	9,81	[m/s^2]
m_E	Masse der Unwucht	20	[kg]
m_G	Masse der Grundplatte	295	[kg]
m_R	Masse des Rahmens	385	[kg]
m_Z	Zusatzmasse	0	[kg]
f	Anregungsfrequenz		[Hz]
F_a	Trägheitskraft		[N]
F_{an}	Anpresskraft		[N]
F_b	Bodenkontaktkraft		[N]
F_{err}	Erregerkraft		[N]
F_g	Statische Last		[N]
t	Zeit		[s]
$\ddot{z}_P$	Vertikale Beschleunigung der Grundplatte		[m/s^2]
$\ddot{z}_R$	Vertikale Beschleunigung des Rahmens		[m/s^2]
θ	Eigenkreisfrequenz ($\theta = 2\pi f$)		[rad/s]
φ_0	Phasenverschiebung		[rad]

$$F_a = -(m_R \cdot \ddot{z}_R + (m_G + m_E) \cdot \ddot{z}_P) \tag{7.4}$$

Die ausgeführte Überlegung führt dazu, dass die Trägheitskraft und die Erregerkraft im Falle einer freien Schwingung zu jedem Zeitpunkt gleich groß sein müssen, es gilt somit Gleichung 7.5. Einsetzen der Erregerkraft aus Gleichung 7.3 und der Trägheitskraft aus Gleichung 7.4 in Gleichung 7.5 führt auf Gleichung 7.6.

$$F_{err} = F_a \tag{7.5}$$

$$m_E \cdot e \cdot \theta^2 \cdot sin(\theta \cdot t + \varphi_0) + (m_R \cdot \ddot{z}_R + (m_G + m_E) \cdot \ddot{z}_P) = 0 \tag{7.6}$$

7.2.2.1 Einführung eines Reduktionsfaktors zur Bestimmung der Erregerkraft

Um Gleichung 7.5 an einer Nullmessung zu überprüfen, wird der zuvor analysierte Abschnitt der Nullmessung 03 verwendet. In Abbildung 7.9 sind Erregerkraft, Trägheitskraft und deren Differenz über der Zeit dargestellt. Die errechnete Erregerkraft ist mit 106 kN um ca. 30% größer als die aus den gemessenen Beschleunigungen ermittelte Trägheitskraft mit 80 kN. Das führt zu dem Schluss, dass bei der Bestimmung der Erregerkraft ein falscher Eingangswert vorliegen könnte. Da die Lage des Massenmittelpunktes der Unwucht nicht exakt bestimmt wurde, die Exzentrizität aber linear in die Bestimmungsgleichung der Erregerkraft eingeht, ist an dieser Stelle ein großes Fehlerpotential gegeben. Um diesen potentiellen Fehler zu erkennen und korrigieren zu können, wird ein Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ definiert, der die geringere tatsächliche Exzentrizität berücksichtigt. Die angepasste Gleichung zur Überprüfung der Erregerkraft ergibt sich dadurch wie folgt:

$$F_{err} \cdot X_{F,err} = F_a \tag{7.7}$$

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

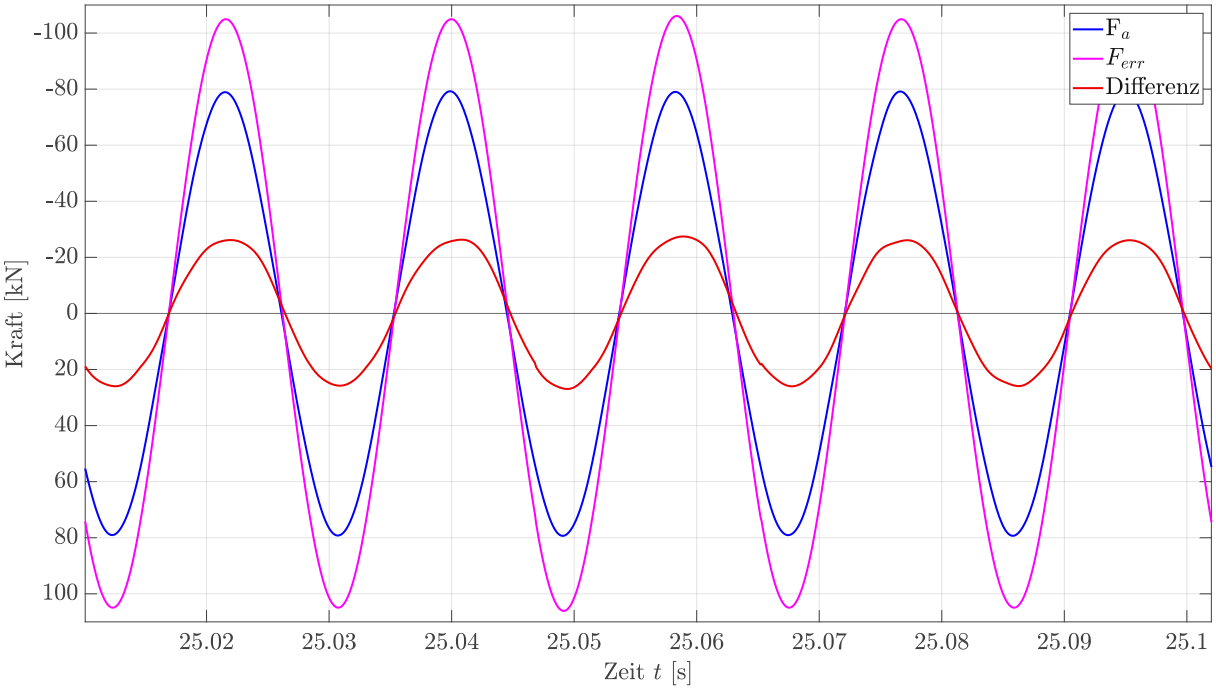


Abb. 7.9: Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 03 ohne Reduktion der Erregerkraft

Zur Berechnung des Reduktionsfaktors $X_{F,err}$ werden für Nullmessung 03 die Erregerkraft und Trägheitskraft für einen Bereich mit konstanter Frequenz bestimmt und daraus $X_{F,err}$ errechnet. Mithilfe des Reduktionsfaktors werden die Maxima der Erregerkraft an die Maxima der Trägheitskraft angepasst. Angewendet auf Nullmessung 03 ergibt das einen Reduktionsfaktor von $X_{F,err} = 0,75$. Eine erneute Gegenüberstellung von Erregerkraft und Trägheitskraft zeigt, dass die Differenz zwischen Erregerkraft und Trägheitskraft durch den Reduktionsfaktor deutlich reduziert werden kann (siehe Abbildung 7.10).

Um den Reduktionsfaktor zu überprüfen, werden für die Nullmessungen 01 und 02 die jeweiligen Trägheitskräfte und zugehörigen Erregerkräfte, abgemindert mit dem ermittelten Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$, gegenübergestellt. Wenn der Reduktionsfaktor exakt bestimmt worden ist, sollte derselbe Effekt wie bei Nullmessung 03 eintreten und die Differenzen zwischen Erregerkraft und Trägheitskraft sollte nahe bei Null sein. Abbildung 7.11 zeigt das Ergebnis dieser Überprüfung für $X_{F,err} = 0,75$. Angewendet auf Nullmessung 01 (siehe Abbildung 7.11a) zeigt sich, dass der Reduktionsfaktor für diese Messung nicht korrekt ist, da die Trägheitskraft größer ist als die Erregerkraft. Außerdem ist die Differenz phasenverschoben, was auf eine Phasenverschiebung zwischen den zwei Kraftgrößen hindeutet. Die Erregerkraft von Nullmessung 02 wird durch den Reduktionsfaktor korrekt abgemindert, sodass die Erregerkraft und Trägheitskraft gleich groß sind. Jedoch ergeben sich, trotz gleich großer Kräfte, Differenzen, welche durch eine Phasenverschiebung entstehen. Demzufolge gibt es zwei zu behandelnde Aufgabenstellungen:

- Die Bestimmung eines allgemeinen Reduktionsfaktors
- Die Beseitigung der Phasenverschiebung

Bei einer getrennten Bestimmung der Reduktionsfaktoren für die Nullmessungen nach den zuvor beschriebenen Verfahren, ergeben sich die in Tabelle 7.3 angeführten Reduktionsfaktoren. Es zeigt sich, dass die Reduktionsfaktoren bei allen drei Messungen variieren. Weiters zeigte sich

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

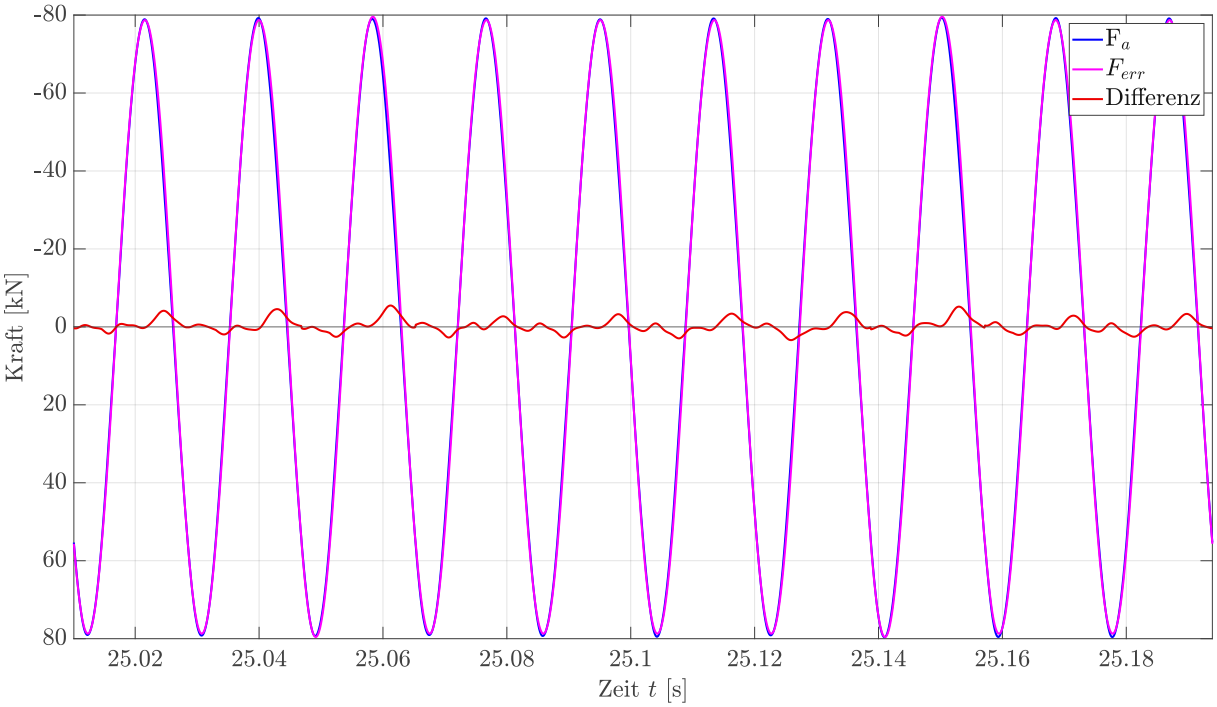
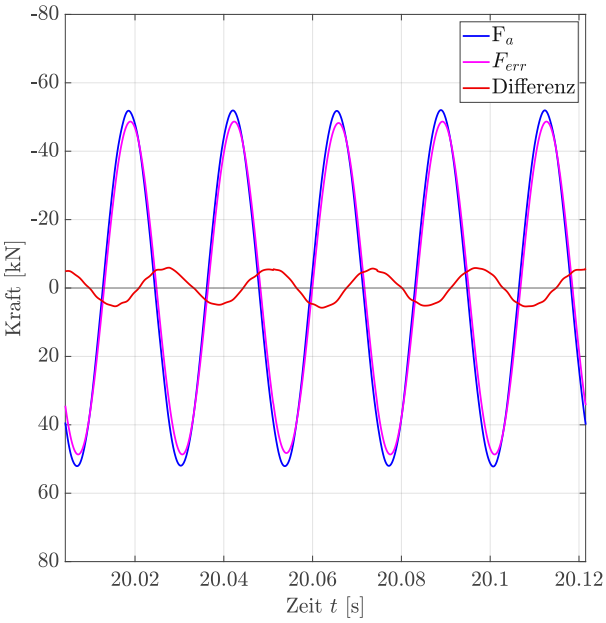
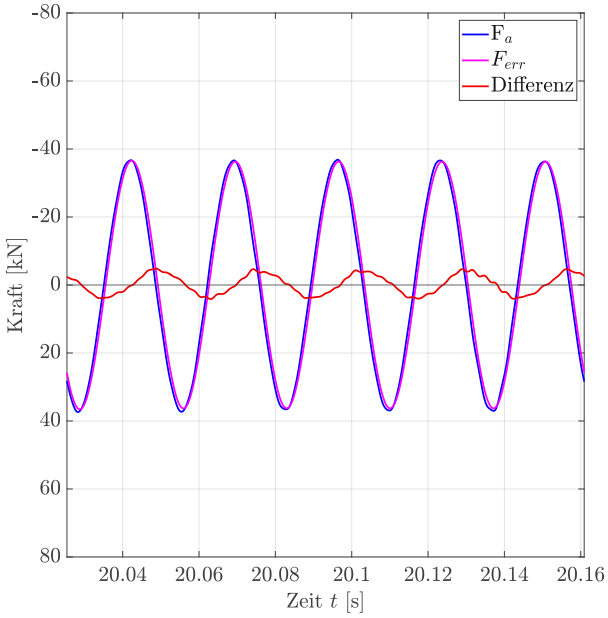


Abb. 7.10: Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 03 mit einem Reduktionsfaktor von $X_{F,err} = 0,75$



(a) Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 01 mit $X_{F,err} = 0,75$



(b) Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 02 mit $X_{F,err} = 0,75$

Abb. 7.11: Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessungen 01 und 02 mit dem aus Nullmessung 03 bestimmten Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$

während der Analyse, dass der Reduktionsfaktor im Falle einer Änderung der Frequenz während einer Nullmessung nicht mehr das gewünschte Ergebnis liefert. Im Bereich der geänderten

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

Frequenz unterscheiden sich Erregerkraft und Trägheitskraft deutlich. Das legt nahe, dass der Reduktionsfaktor sowohl von der Korrektur der Exzentrizität abhängt, welche konstant ist, als auch von der Anregungsfrequenz. Um einen allgemein gültigen Reduktionsfaktor zu

Tab. 7.3: Ermittelte Reduktionsfaktoren der Nullmessungen

Messung	Frequenz f [Hz]	Reduktionsfaktor
Nullmessung 01	45	0,79
Nullmessung 02	37	0,76
Nullmessung 03	55	0,75

bestimmen, müssten somit zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Darunter fallen die Abweichung der Exzentrizität e vom geschätzten Ursprungswert und die Anregungsfrequenz f. Der Reduktionsfaktor kann somit als Funktion $X_{F,err} = f(e, f)$ definiert werden. Der exakte Zusammenhang zur Bestimmung eines Reduktionsfaktors ist auf Basis der vorliegenden Datenlage nicht zu ermitteln.

7.2.2.2 Verschiebung des virtuellen Sensors zur Kompensation der Phasenverschiebung

Abbildung 7.12 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Abbildung 7.11b (Nullmessung 02 mit $X_{F,err} = 0,75$), in welchem die Phasenverschiebung der Kraftverläufe eindeutig erkennbar ist.

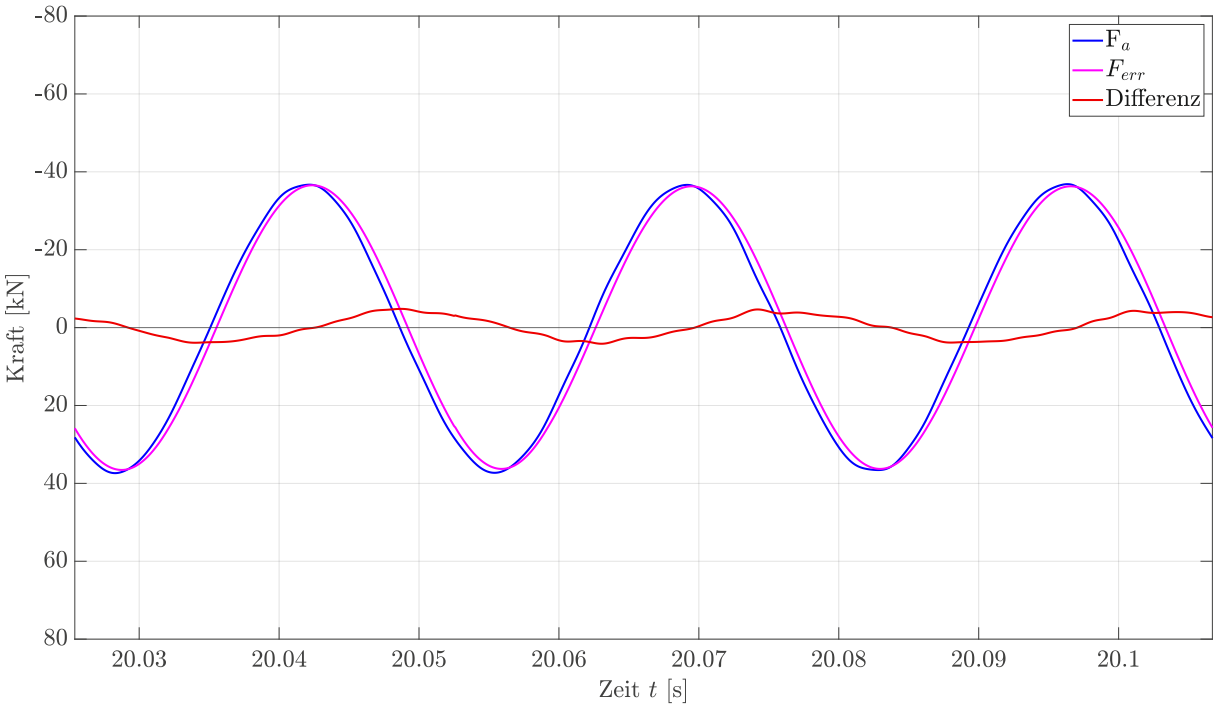


Abb. 7.12: Gegenüberstellung von Trägheitskraft F_a und Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 02 mit dem in Nullmessung 03 bestimmten Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$

Ein möglicher Grund für die Phasenverschiebung ist die Position der Schwerachse der Grundplatte. Die Schwerachse der Grundplatte wurde in der geometrischen Mittelachse des Erregersystems angenommen, exakt in der Mitte zwischen den vorderen und hinteren Sensoren. Die tatsächliche Lage der Schwerachse wurde im Zuge des Versuchsaufbaus jedoch nicht ermittelt. Der virtuelle (gemittelte) Sensor $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ bezieht sich auf die angenommene Schwerachse. Falls die tatsächliche

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

Schwerachse der Grundplatte von der angenommenen Schwerachse (und dadurch von der Position des virtuellen Sensors) abweicht, kann eine Phasenverschiebung zwischen der Erregerkraft und der Trägheitskraft die Folge sein. Um die Phasenverschiebung zu kompensieren, kann die Position des virtuellen Sensors variiert und in die tatsächliche Schwerachse der Grundplatte verschoben werden.

In den bisherigen Analysen befand sich der virtuelle Sensor exakt zwischen AP1 und AP4, deren Beschleunigungssignale jeweils mit einer Gewichtung von 50% berücksichtigt wurden. In der folgenden Untersuchung wird die Gewichtung der Sensoren schrittweise verändert, um die Phasenverschiebung so weit wie möglich zu reduzieren. Abbildung 7.13 zeigt die, durch die Verschiebung des virtuellen Sensors, behobene Phasenverschiebung am Beispiel von Nullmessung 02. Die geringste Phasenverschiebung (und somit auch die minimale Differenz) stellt sich bei einer Gewichtung von 41,6% für AP1 und 58,4% für AP4 ein. Das entspricht einer geometrischen Verschiebung des virtuellen Sensors (und der angenommenen Schwerachse) von 26 mm gegen die Fahrtrichtung in Richtung Sensor AP4. Nachträglich ist es notwendig den Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ zu überprüfen, da sich durch die veränderte Gewichtung der Sensoren die Trägheitskraft des virtuellen Sensors ändern kann. Die Überprüfung ergibt einen Reduktionsfaktor von $X_{F,err} = 0,75$.

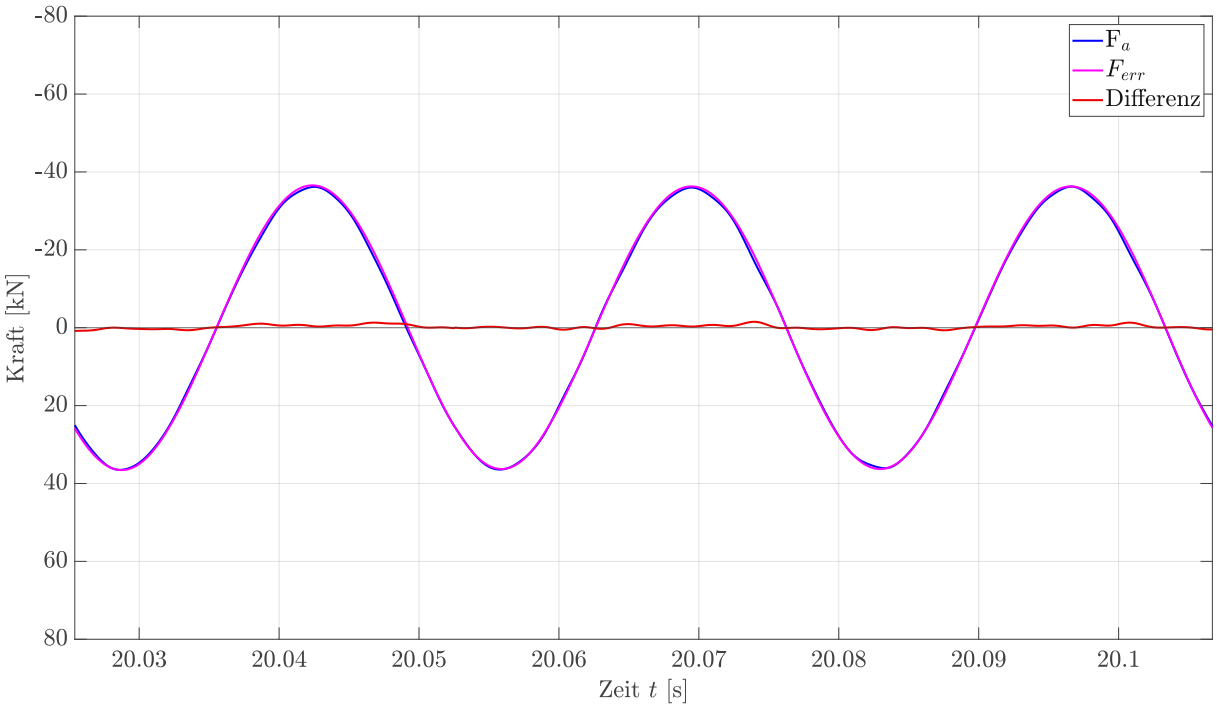


Abb. 7.13: Darstellung der Kompensation der Phasenverschiebung durch die Änderung der Gewichtung der Beschleunigungssignale der Sensoren AP1 und AP4 für Nullmessung 02. Gewichtung AP1 = 0,416, Gewichtung AP4 = 0,584, Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$

In weiterer Folge wird diese Untersuchung auch für die Nullmessungen 01 und 03 durchgeführt. Die ermittelten Gewichtungen der Sensoren sowie die geometrische Verschiebung w_x des virtuellen Sensors und der Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Der Schwerpunkt des Erregersystems (und somit der Angriffspunkt der Erregerkraft) liegt nicht in der geometrischen Plattenmitte, sondern ist in Richtung Heck der Platte verschoben. Die exakte Verschiebung der Schwerachse ist auf Basis der Datenlage nicht eindeutig ermittelbar. 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

Tab. 7.4: Ermittelte Parameter zum Angleichen der Erregerkraft F_{err} an die Trägheitskraft F_a und zur Kompensation der Phasenverschiebung: Frequenz f, Gewichtung der Sensoren, geometrische Verschiebung der Schwerachse in Fahrtrichtung w_x, Reduktionsfaktor $X_{F,err}$

Messung	Frequenz f [Hz]	Gewichtung AP1	Gewichtung AP4	Verschiebung in Fahrtrichtung w_x [mm]	$X_{F,err}$
Nullmessung 01	45	0,425	0,515	-23,3	0,79
Nullmessung 02	37	0,416	0,584	-26,0	0,75
Nullmessung 03	55	0,485	0,575	-3,1	0,75

aus den Nullversuchen ermittelte Verschiebung der Schwerachse ergibt eine Verschiebung zwischen 3,1 mm und 26,0 mm. Weiters zeigt sich, dass der zuvor eingeführte Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ auch vom Bezugspunkt des virtuellen Sensors und somit auch von der Phasenverschiebung abhängt. Um einen allgemeingültigen Reduktionsfaktor zu ermitteln, ist es somit notwendig, zusätzlich zu Frequenz und Exzentrizität, die Phasenverschiebung miteinzubeziehen. Demnach kann der Reduktionsfaktor als Funktion $X_{F,err} = f(e, f, \varphi_0)$ definiert werden. Anhand der vorhandenen Datenlage ist die exakte Bestimmung von $X_{F,err}$ nicht eindeutig durchführbar.

Nach der Bestimmung der Reduktionsfaktoren und der Kompensation der Phasenverschiebung wird die Auswertung der Bewegungsgrößen für die Nullmessungen erneut durchgeführt. Die Verläufe sind qualitativ ident mit den in Abschnitt 7.2.1 dargestellten. Die quantitativen Größen sind Tabelle 7.5 zu entnehmen.

Tab. 7.5: Ergebnisse der Auswertung der Nullmessungen mit korrigierter Erregerkraft und kompensierter Phasenverschiebung. Dargestellt sind Frequenz f, Erregerkraft F_{err}, Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z

Messung	Frequenz f [Hz]	Erregerkraft F_{err} [kN]	Beschleunigung a_z [m/s^2]	Schwinggeschwindigkeit v_z [m/s]	Schwingweg u_z [mm]
Nullmessung 01	45	65	168	0,7	2,3
Nullmessung 02	37	49	129	0,6	2,4
Nullmessung 03	55	106	271	0,8	2,2

7.2.3 Ermittlung der Bodenkontaktkraft

Mit der angepassten Erregerkraft ist es möglich, im nächsten Schritt die Bodenkontaktkraft F_b zu ermitteln, welche die Interaktionskraft zwischen Boden und Plattenverdichter beschreibt. Die notwendigen Komponenten zur Ermittlung der Bodenkontaktkraft sind die statische Last F_g, die Trägheitskräfte von Platte und Rahmen F_a und die Erregerkraft F_{err}. Gleichung 7.8 ist die Bestimmungsgleichung der Bodenkontaktkraft zu entnehmen. Die Herleitung ergibt sich aus dem Schwerpunktsatz. In Abbildung 7.14 sind die auf den Plattenverdichter wirkenden Kräfte dargestellt.

$$F_b = F_g - F_a + F_{err} \tag{7.8}$$

Die statische Auflast F_g setzt sich aus den Massen des Plattenverdichters und der Erdbeschleunigung sowie der Anpresskraft F_{an} zusammen (siehe Gleichung 7.9). Die Gewichtskräfte

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

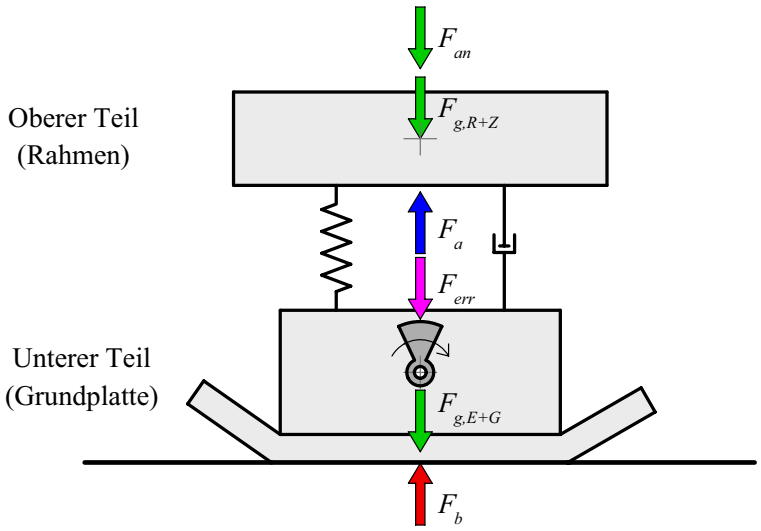


Abb. 7.14: Schematische Darstellung der auf den Plattenverdichter wirkenden Kräfte. Dargestellt sind die Bodenkontaktkraft F_b, die Trägheitskraft F_a, die Erregerkraft F_{err} und die statische Auflast F_g, bestehend aus der Gewichtskraft des oberen Teils $F_{g,R+Z}$ und des unteren Teils $F_{g,E+G}$ sowie der Anpresskraft F_{an}

können dabei in einen oberen Teil $F_{g,R+Z}$ und einen unteren Teil $F_{g,G+P}$ aufgeteilt werden. Die Trägheitskräfte sind Gleichung 7.4 zu entnehmen.

$$F_g = F_{g,R+Z} + F_{g,E+G} + F_{an} = (m_R + m_Z + m_E + m_G) \cdot g + F_{an} \tag{7.9}$$

7.2.4 Auswertung der Messfahrten

Für die Auswertung der Messfahrten ist es notwendig, die Messfahrten in unterschiedliche Betriebsarten einzuteilen. Bei Messfahrten der Betriebsart *Schwellbetrieb* wird die Anpresskraft manuell gesteuert und wechselt in kurzen Abständen zwischen einer geringen und einer hohen Anpresskraft. Bei Messfahrten der Betriebsart *ungesteuerter Betrieb* wird die Verdichtungsfahrt ohne die manuelle Steuerung der Anpresskraft durchgeführt. Die Anpresskraft bleibt dadurch bei diesen Messfahrten über längere Abschnitte konstant. Für die Betriebsart Schwellbetrieb werden drei Fälle gesondert betrachtet: ein Ausschnitt mit niedriger Anpresskraft, ein Ausschnitt mit hoher Anpresskraft und ein Ausschnitt im Übergangsbereich. Für die Betriebsart ungesteuerter Betrieb wird ein Ausschnitt mit konstanter, hoher Anpresskraft betrachtet. Die Dauer eines Ausschnitts entspricht jeweils zehn Erregerperioden. In Tabelle 7.6 ist eine Übersicht über die auszuwertenden Messausschnitte mit Betriebsart, Zeit und herrschender Frequenz dargestellt. In Abbildung 7.15 und 7.16 sind Ausschnitte der Verläufe von Frequenz und Anpresskraft von den Messfahrten 01 und 04 dargestellt. Die zu analysierenden Abschnitte sind mit schwarzen Kreisen markiert.

Außerdem zeigen die Abbildungen den Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Erregerfrequenz. Das Hydrauliksystem, welches die Baggerhydraulik versorgt, wird auch für die Steuerung der Anpresskraft durch den Hydraulikzylinder verwendet. Zusätzlich wird mit demselben Hydrauliksystem auch der Hydraulikmotor versorgt, der die Unwucht antreibt. Der Hydraulikzylinder nimmt bei hoher Anpresskraft viel Hydraulikdruck in Anspruch, das führt zu einer geringeren Leistung des Hydraulikmotors für die Bewegung der Unwucht. Dies hat einen direkten Zusam-

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

menhang zwischen Frequenz und Anpresskraft zur Folge: je höher die Anpresskraft, desto geringer die Frequenz und umgekehrt.

Tab. 7.6: Übersicht über Zeitpunkt t, Frequenz f, Anpresskraft F_{an} und Betriebsart der analysierten Messausschnitte

Messung	Zeit t [s]	Frequenz f [Hz]	Anpresskraft F_{an}	Betriebsart
Messfahrt 01	1000	50	hoch	Schwellbetrieb
Messfahrt 01	1062	61	mittel	Schwellbetrieb
Messfahrt 01	1066	78	niedrig	Schwellbetrieb
Messfahrt 04	415	35	hoch	ungesteuerter Betrieb

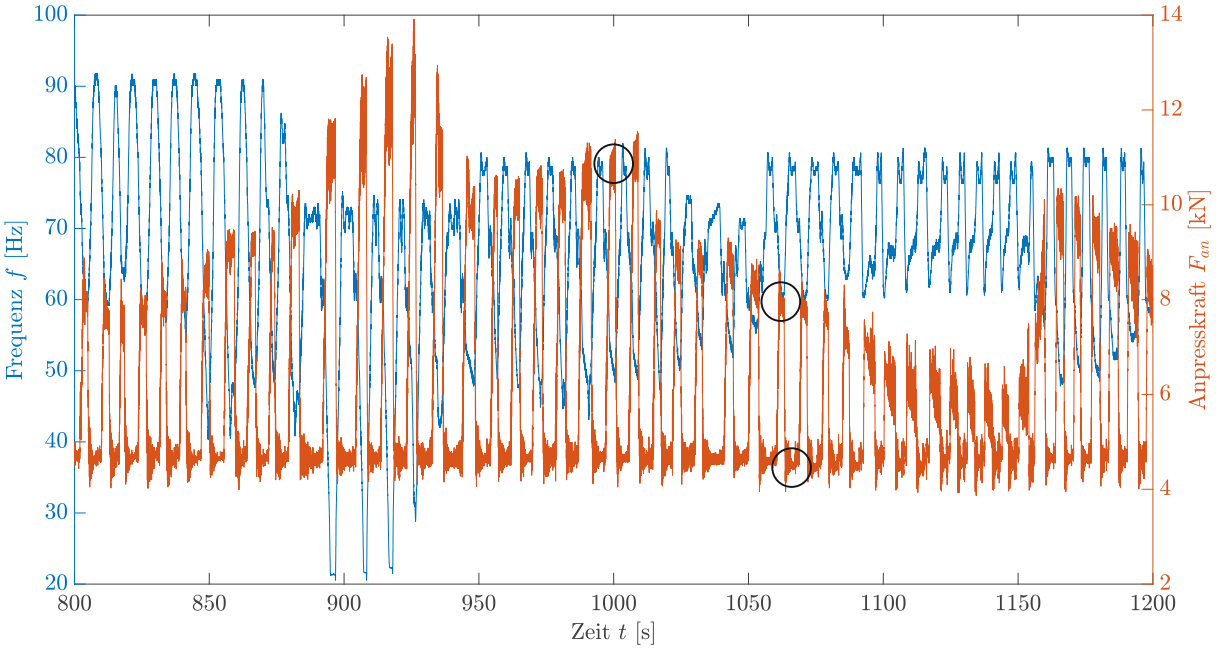


Abb. 7.15: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz und Anpresskraft von Messfahrt 01. Die zu analysierenden Ausschnitte sind mit schwarzen Kreisen markiert

7.2.4.1 Ermittlung des Reduktionsfaktors $X_{F,err}$ und der Verschiebung des virtuellen Sensors für die Messfahrten

In den Abschnitten 7.2.2.1 und 7.2.2.2 wurde die Problematik des Reduktionsfaktors und der Verschiebung des virtuellen Sensors eingeführt und diese für die Nullversuche ermittelt. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse der Nullversuche, wird für die Messfahrten eine erneute Bestimmung dieser Werte durchgeführt. Ein möglicher Messausschnitt für die Überprüfung ist der in Tabelle 7.6 angeführte Ausschnitt mit Schwellbetrieb und niedriger Anpresskraft (Messfahrt 01, t = 1066 s), da bei niedriger Anpresskraft die Boden-Plattenverdichter-Interaktion geringer ausgeprägt ist und das Schwingungsverhalten des Plattenverdichters dem der Nullmessungen ähnelt (siehe Abschnitt 7.2.4.2).

Die Bestimmung des Reduktionsfaktors erfolgt auf Basis der Bodenkontaktkraft (Gleichung 7.8). Die Annahme die Bestimmung zugrunde liegt ist, dass zwischen Boden und Plattenverdichter auf dem höchsten Punkt des Schwingwegs keine Interaktion entsteht und die Bodenkontaktkraft

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

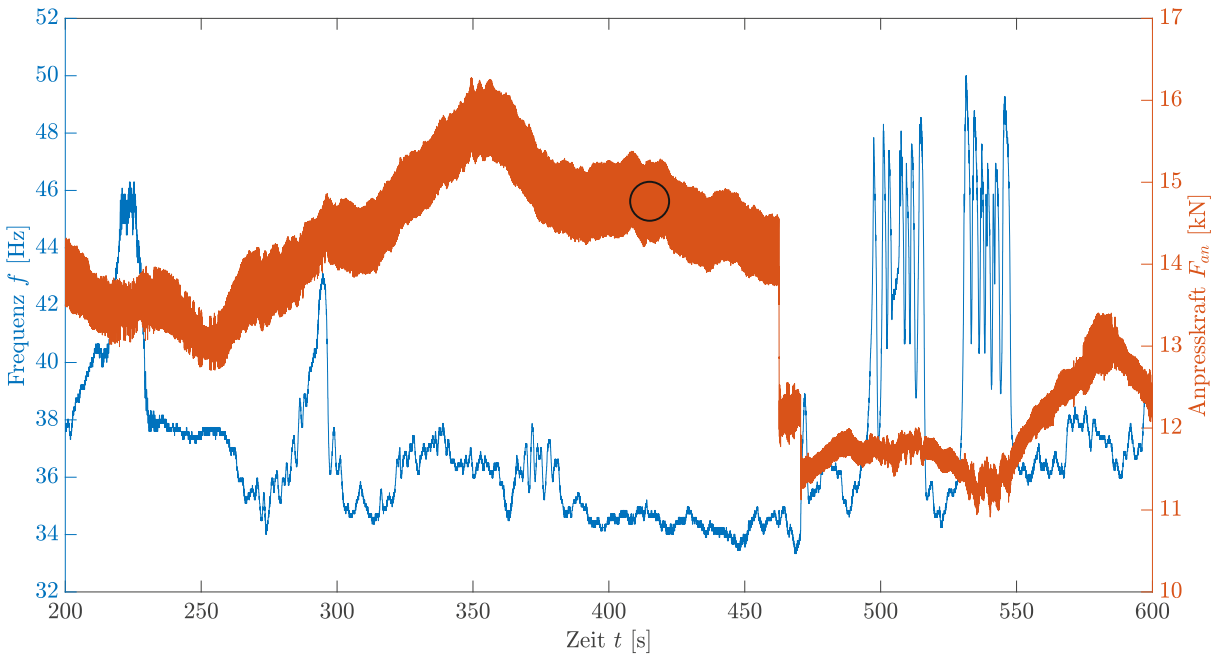


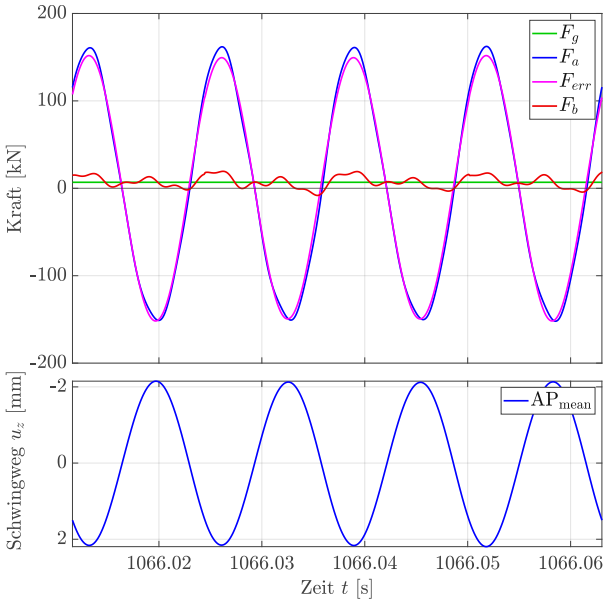
Abb. 7.16: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz und Anpresskraft von Messfahrt 04. Der zu analysierende Ausschnitt ist mit einem schwarzen Kreis markiert

zu diesem Zeitpunkt null ist. Gleichung 7.10 ist der mathematische Zusammenhang für die Bestimmung von $X_{F,err}$ zu entnehmen.

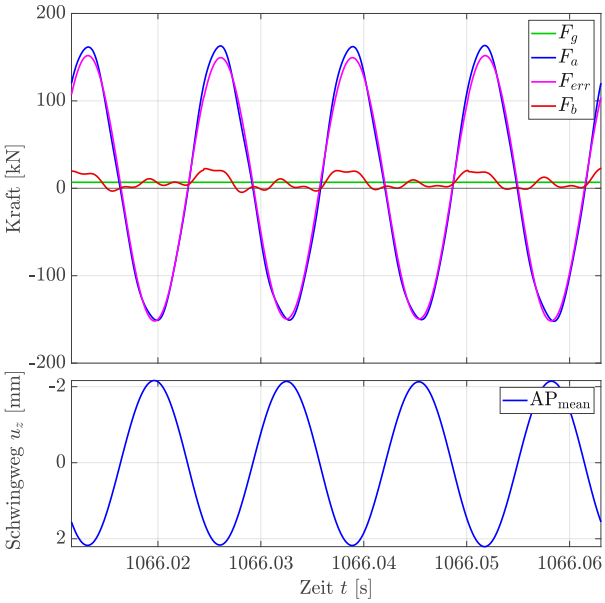
$$F_b = 0 = F_g - F_a + F_{err} \cdot X_{F,err} \text{ für } u_z = \text{Minimum} \tag{7.10}$$

Um die Phasenverschiebung zu kompensieren wird, wie in Abschnitt 7.2.2.2, die Position des virtuellen Sensors verschoben. Abbildung 7.17 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen der Sensoren AP1 und AP4. Der ermittelte Reduktionsfaktor beträgt in allen Fällen $X_{F,err} = 0{,}7$. Für die Auswertung wird eine Gewichtung von AP1 = 0,45 und AP4 = 0,55 gewählt (siehe Abbildung 7.17b). Diese Konfiguration ergibt in der Entlastungsphase eine Bodenkontaktkraft von ca. 0 und in der Belastungsphase während des Durchlaufens des neutralen Punktes der Schwingung ($u_z = 0$) eine Bodenkontaktkraft, die in etwa gleich groß ist wie die statische Last F_g. Außerdem führt die gewählte Konfiguration zu keinen negativen Bodenkontaktkräften. In den anderen Fällen ist entweder die Bodenkontaktkraft im Entlastungsfall größer als im Belastungsfall (Abbildung 7.17a) oder es treten nicht vernachlässigbare negative Bodenkontaktkräften auf (Abbildung 7.17c und 7.17d).

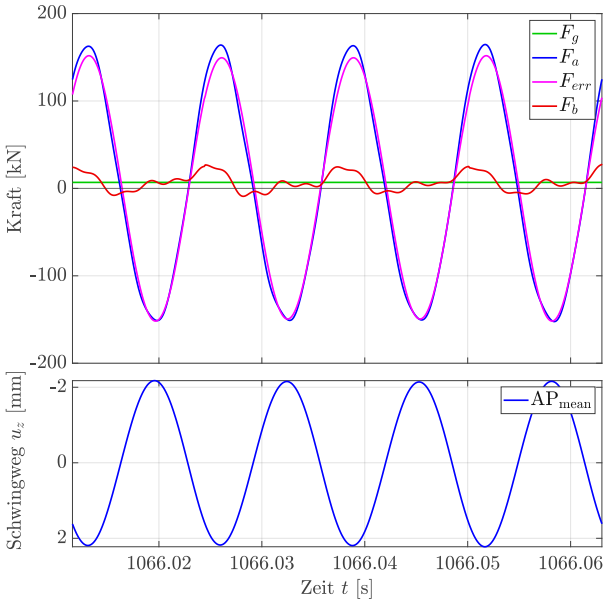
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub



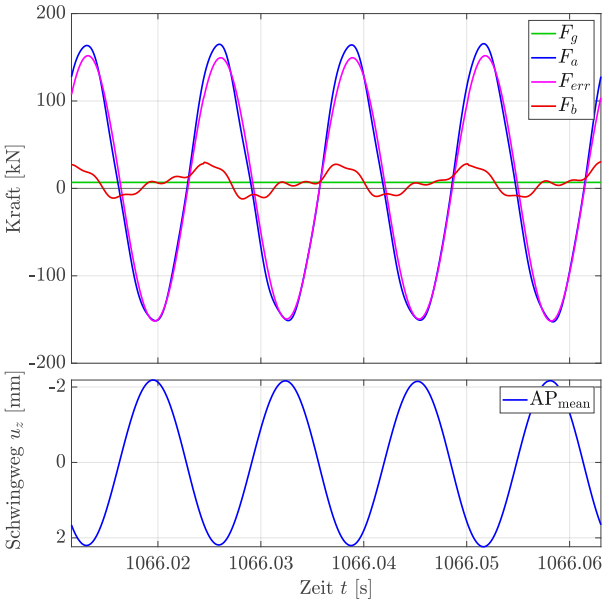
(a) Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,42 und AP4 = 0,58



(b) Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,45 und AP4 = 0,55



(c) Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,48 und AP4 = 0,52



(d) Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,50 und AP4 = 0,50

Abb. 7.17: Vergleich der Bodenkontaktkraft und deren Komponenten von Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft für eine unterschiedliche Gewichtung der Sensoren AP1 und AP4 mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$

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

7.2.4.2 Auswertung des Messausschnitts mit niedriger Anpresskraft im Schwellbetrieb

Der gewählte Messausschnitt mit niedriger Anpresskraft beginnt bei t = 1066 s von Messfahrt 01. Abbildung 7.18 zeigt die Verläufe von Erregerfrequenz f und Anpresskraft F_{an} von Messfahrt 01. Der Zeitpunkt des auszuwertenden Ausschnitts ist mit einem schwarzen Kreis markiert. Die gemessene Anpresskraft zu diesem Zeitpunkt beträgt 4,5 kN, die ermittelte Frequenz 78 Hz. Die Drehrichtung der Unwucht ist entgegen der Fahrtrichtung.

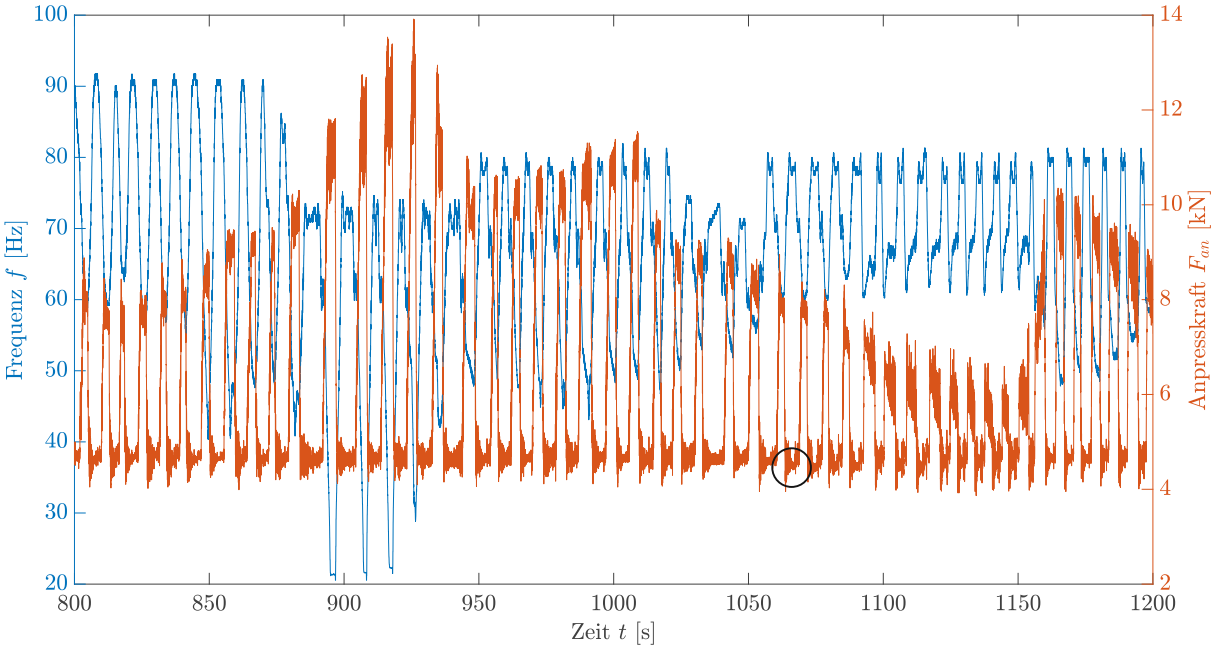


Abb. 7.18: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit niedriger Anpresskraft

Auswertung der Bewegungsgrößen

Abbildung 7.19 zeigt den Vergleich zwischen den Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4 und des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$. Zusätzlich ist die Beschleunigung des Sensors am Rahmen (AR1) und die Erregerkraft F_{err} dargestellt. Durch das Verschieben des virtuellen Sensors in Abschnitt 7.2.4.1 ist die Phasenverschiebung zwischen $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft kompensiert worden. Aufgrund der weitgehend dynamischen Entkoppelung zwischen Grundplatte und Rahmen ist die Anregung des Rahmens vergleichsweise gering. Die minimalen und maximalen Beschleunigungen von Grundplatte und Rahmen sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst.

In Abbildung 7.20 sind die Beschleunigung a_z sowie die Schwinggeschwindigkeit v_z und der Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ dargestellt. Zusätzlich ist die Erregerkraft F_{err} abgebildet. Der Plattenverdichter bewegt sich bei niedriger Anpresskraft in einer sinusartigen, zyklischen Bewegung, ähnlich der Bewegung während der Nullversuche. Die maximalen Bewegungsgrößen sind in Tabelle 7.7 angegeben.

Abbildung 7.21 zeigt die Orbitalbewegung für die Zeit des Messausschnitts. Die Orbitalbewegung veranschaulicht die Schwingwege des Plattenverdichters in der x-z-Ebene und entspricht damit einer Betrachtung von der Seite. Die Bewegungen entsprechen einer reproduzierbaren, elliptischen Bewegung, die im hinteren Bereich des Plattenverdichters zu größeren Schwingwegen führt. Die negative Drehrichtung der Unwucht entspricht einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Die dominierende Schwingung ist die Vertikalschwingung u_z. Minimaler und maximaler Schwingweg von $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sind in Tabelle 7.7 dokumentiert.

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

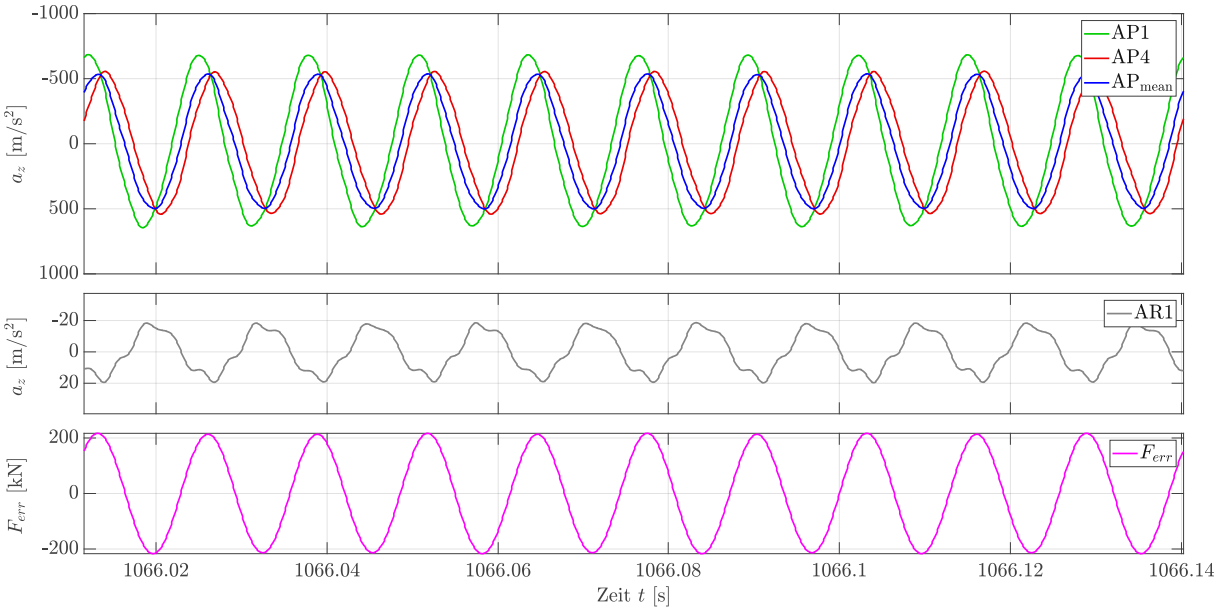


Abb. 7.19: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 und des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft

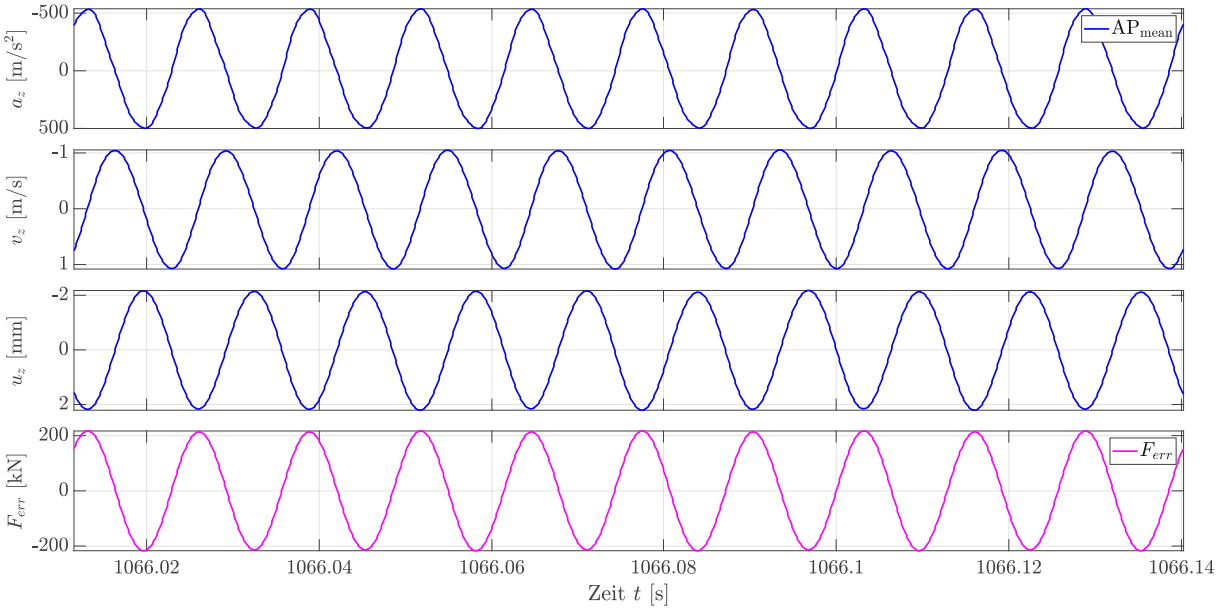


Abb. 7.20: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft

Auswertung der Bodenkontaktkraft

Die Bodenkontaktkraft F_b wird nach Gleichung 7.8 ermittelt. Abbildung 7.22 zeigt die Bodenkontaktkraft F_b sowie ihre Komponenten, die Erregerkraft F_{err}, die statische Last F_g und die Trägheitskraft F_a. Zusätzlich ist der Schwingweg u_z dargestellt. Der Ausschnitt mit niedriger

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

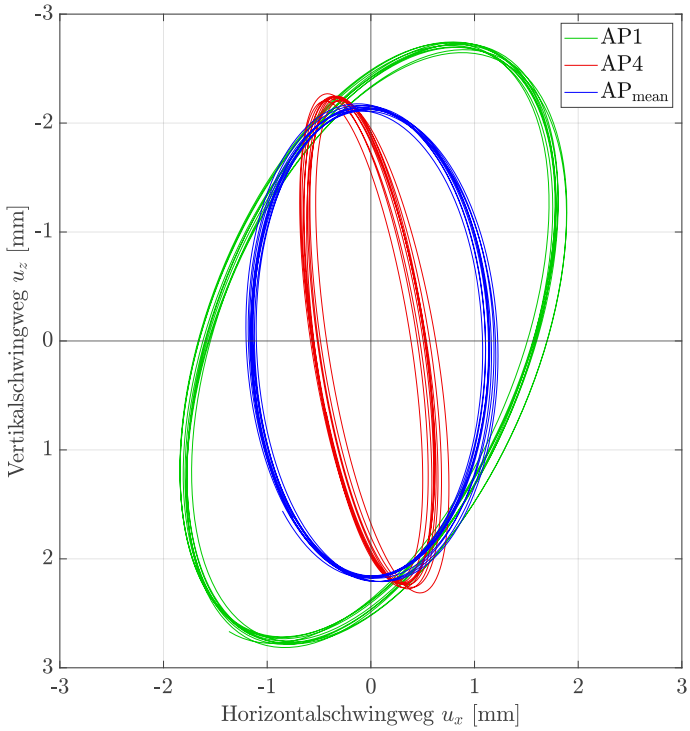


Abb. 7.21: Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und AP$_{mean}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft

Tab. 7.7: Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft. Angegeben sind die Minima und Maxima der Beschleunigung a_z, der Schwinggeschwindigkeit v_z, des Vertikalschwingwegs u_z, des Horizontalschwingwegs u_x, der Beschleunigung des Rahmens $a_{z,AR1}$ und der Bodenkontaktkraft F_b

Messung Anpresskraft	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]	u_x [mm]	$a_{z,AR1}$ [m/s^2]	F_b [kN]
Messfahrt 01	501	1,1	2,2	1,2	15	25
niedrig	–538	–1,0	–2,2	–1,2	–19	–5

Anpresskraft wurde in Abschnitt 7.2.4.1 für die Bestimmung des Reduktionsfaktors und die Gewichtung der Sensoren untersucht. Die Bodenkontaktkraft entspricht während der Belastung am neutralen Punkt der statischen Last und wird im Zuge der Entlastung beinahe zu Null. Die minimale bzw. maximale Bodenkontaktkraft F_b beträgt –5 bzw. 25 kN.

7.2.4.3 Auswertung des Messausschnitts mit hoher Anpresskraft im Schwellbetrieb

Der gewählte Ausschnitt mit hoher Anpresskraft startet bei t = 1000 s von Messfahrt 01. Abbildung 7.23 zeigt die Verläufe von Erregerfrequenz f und Anpresskraft F_{an} von Messfahrt 01, wobei der Zeitpunkt des auszuwertenden Ausschnitts mit einem schwarzen Kreis markiert ist. Die gemessene Anpresskraft zu diesem Zeitpunkt beträgt 10,8 kN, die ermittelte Frequenz 50 Hz. Die Drehrichtung der Unwucht ist entgegen der Fahrtrichtung.

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

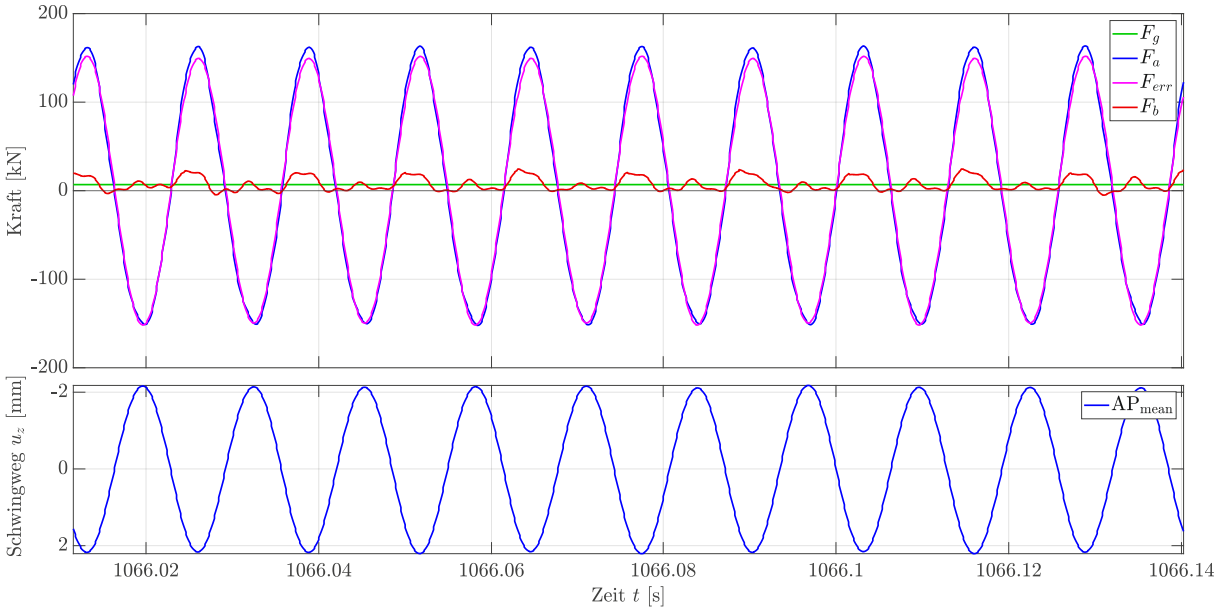


Abb. 7.22: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft

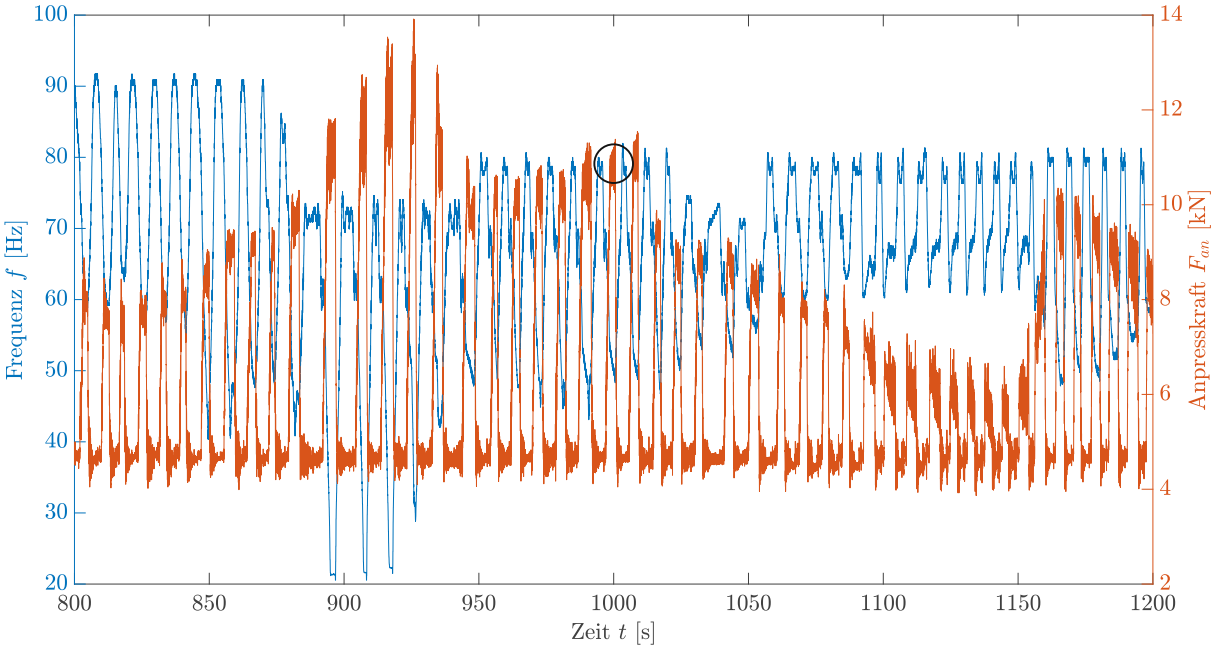


Abb. 7.23: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit hoher Anpresskraft

Auswertung der Bewegungsgrößen

Abbildung 7.24 zeigt den Vergleich zwischen den Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4 und des virtuellen Sensors AP_{mean}. Zusätzlich ist die Beschleunigung des Sensors am Rahmen (AR1) und die Erregerkraft F_{err} dargestellt. Die Gewichtung der Sensoren aus Abschnitt 7.2.4.1 ist für den Ausschnitt mit hoher Anpresskraft beibehalten worden. Aufgrund der starken Inter-

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

aktion zwischen Plattenverdichter und Boden ist die Verifizierung der Gewichtung erschwert. Die Beschleunigungssignale der Sensoren AP1 und AP4 unterscheiden sich durch die regelmäßigen Aufschläge der Plattenhinterkante auf dem Boden stark voneinander. Die minimalen und maximalen Beschleunigungen von Grundplatte und Rahmen sind Tabelle 7.8 zu entnehmen.

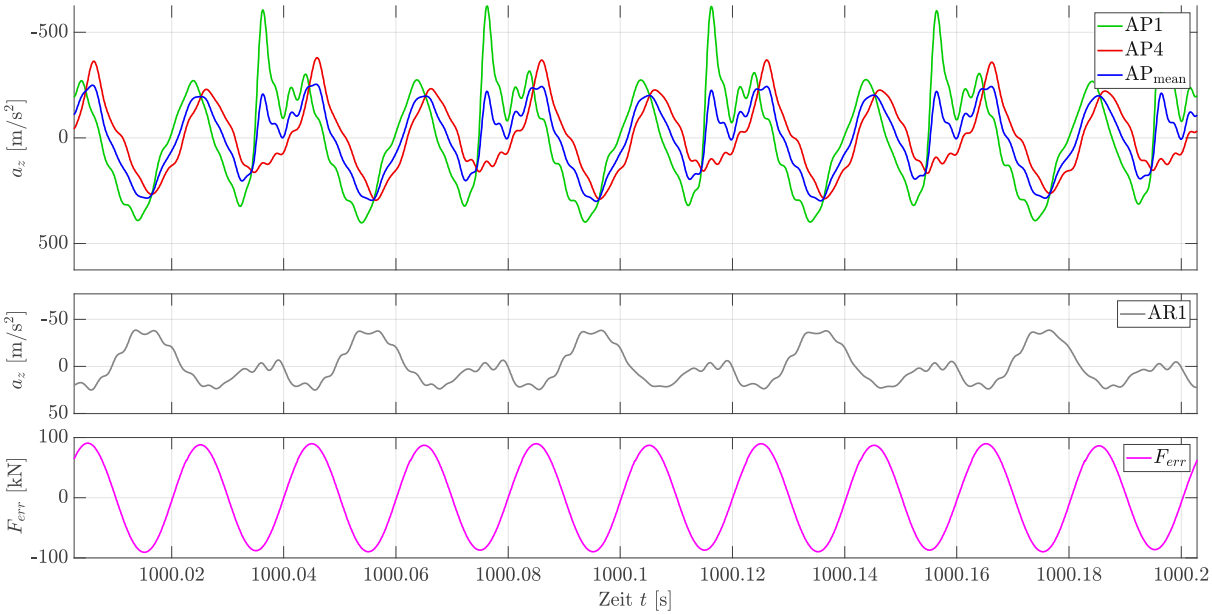


Abb. 7.24: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 und des virtuellen Sensors AP$_{\text{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft

In Abbildung 7.25 sind die Beschleunigung a_z sowie die Schwinggeschwindigkeit v_z und der Schwingweg u_z des virtuellen Sensors AP$_{\text{mean}}$ dargestellt. Zusätzlich ist die Erregerkraft F_{err} abgebildet. Der Plattenverdichter bewegt sich bei hoher Anpresskraft in einem sich über zwei Anregungsperioden wiederholenden Muster. Die minimalen und maximalen Bewegungsgrößen sind Tabelle 7.8 zu entnehmen,

Abbildung 7.21 zeigt die Orbitalbewegung des Messausschnitts mit hoher Anpresskraft. Die negative Drehrichtung der Unwucht entspricht einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Die Bewegungen zeigen ein tiefes Eindringen in den Boden, vor allem im hinteren Bereich der Grundplatte, gefolgt von einem Ausschwung nach oben. Die Vertikalschwingung u_z ist in diesem Fall um ein Vielfaches größer als die Horizontalschwingung u_x. Der minimale bzw. maximale Schwingweg für AP$_{\text{mean}}$ ist Tabelle 7.8 zu entnehmen.

Tab. 7.8: Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft. Angegeben sind die Minima und Maxima der Beschleunigung a_z, der Schwinggeschwindigkeit v_z, des Vertikalschwingwegs u_z, des Horizontalschwingwegs u_x, der Beschleunigung des Rahmens $a_{z,AR1}$ und der Bodenkontaktkraft F_b

Messung Anpresskraft	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]	u_x [mm]	$a_{z,AR1}$ [m/s^2]	F_b [kN]
Messfahrt 01	300	0,9	3,9	1,2	25	136
hoch	–254	–1,2	–5,6	–1,5	–39	–24

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

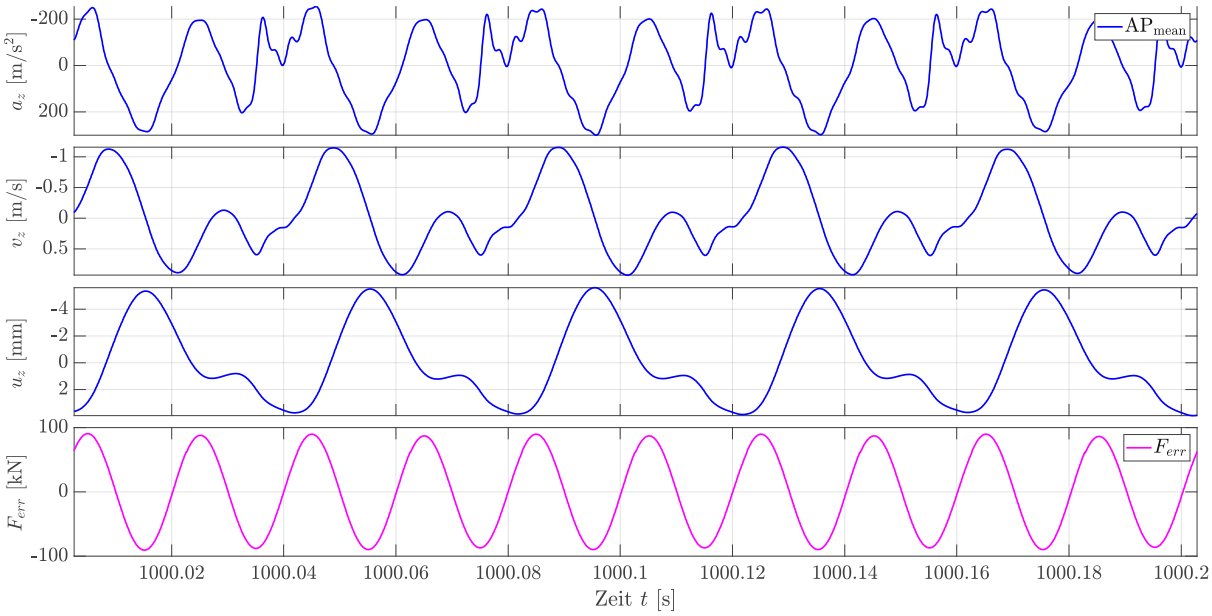


Abb. 7.25: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft

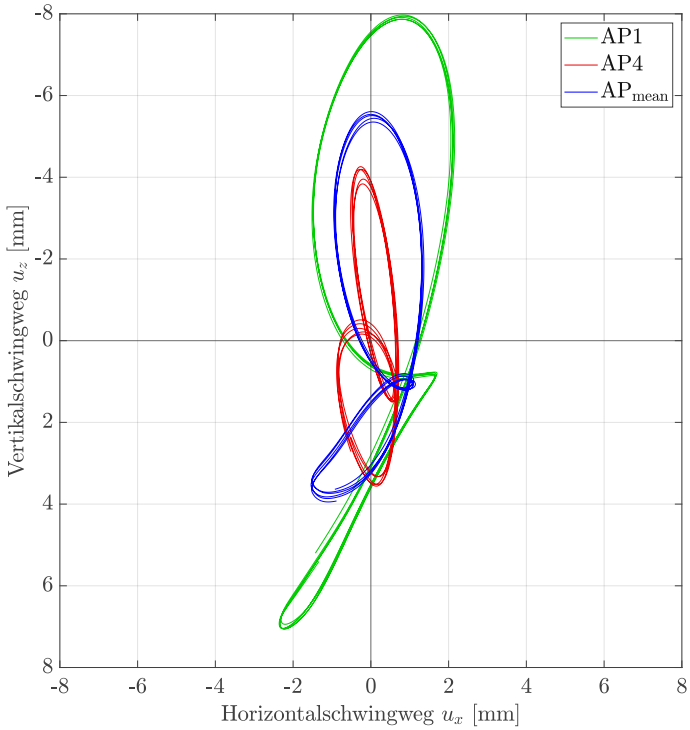


Abb. 7.26: Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft

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

Auswertung der Bodenkontaktkraft

Die Bodenkontaktkraft F_b wird nach Gleichung 7.8 ermittelt. Abbildung 7.27 zeigt die Bodenkontaktkraft F_b sowie ihre Komponenten, die Erregerkraft F_{err}, die statische Last F_g und die Trägheitskraft F_a. Zusätzlich ist der Schwingweg u_z dargestellt. Die während dem Eindringen der Grundplatte in den Boden auftretenden Beschleunigungsspitzen erzeugen große Bodenkontaktkräfte, ansonsten ergeben sich im Messausschnitt nur sehr geringe Bodenkontaktkräfte. Die minimale bzw. maximale Bodenkontaktkraft F_b beträgt –24 bzw. 136 kN.

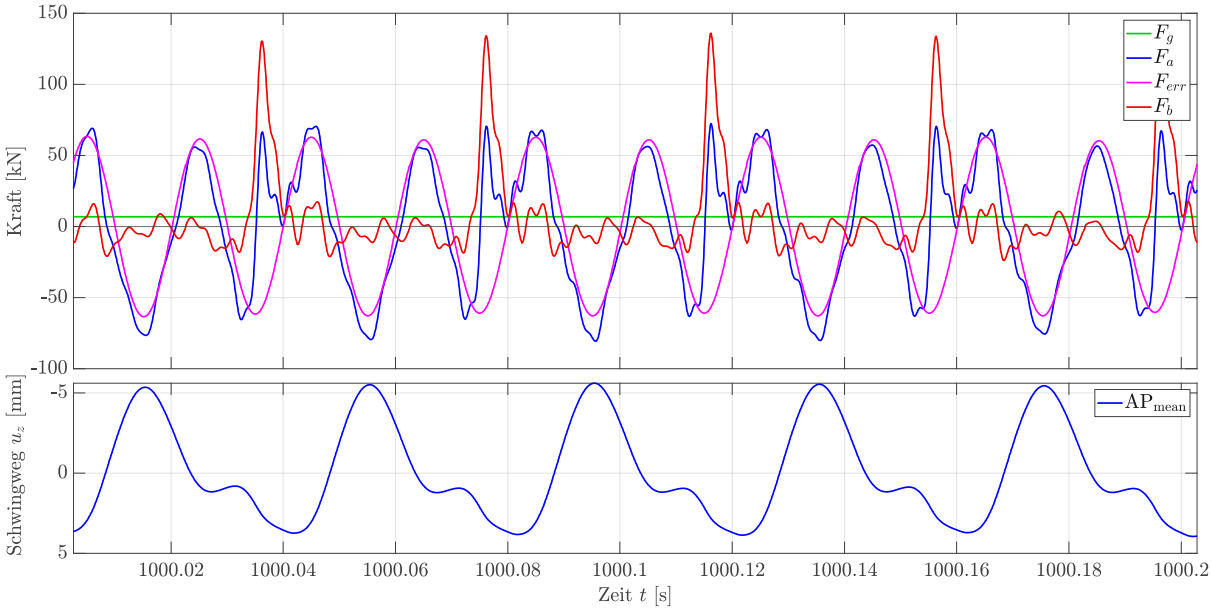


Abb. 7.27: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft

7.2.4.4 Auswertung des Messausschnitts mit mittlerer Anpresskraft im Schwellbetrieb

Der gewählte Ausschnitt mit mittlerer Anpresskraft beginnt bei t = 1062 s von Messfahrt 01. Abbildung 7.28 zeigt die Verläufe von Erregerfrequenz f und Anpresskraft F_{an} von Messfahrt 01, wobei der Zeitpunkt des auszuwertenden Ausschnitts ist mit einem schwarzen Kreis markiert ist. Die gemessene Anpresskraft zu diesem Zeitpunkt beträgt 7,9 kN, die ermittelte Frequenz 60 Hz. Die Drehrichtung der Unwucht ist entgegen der Fahrtrichtung.

Auswertung der Bewegungsgrößen

In Abbildung 7.29 sind die Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1 und AP4 sowie des virtuellen Sensors AP_{mean} und des Sensors am Rahmen (AR1) dargestellt, weiters ist die Erregerkraft F_{err} abgebildet. Wie im Messausschnitt mit hoher Anpresskraft wird die Gewichtung der Sensoren aus Abschnitt 7.2.4.1 aufgrund der starken Interaktion zwischen Plattenverdichter und Boden beibehalten. Die Beschleunigungssignale der Sensoren AP1 und AP4 unterscheiden sich durch die unregelmäßigen Aufschläge der Plattenhinterkante auf dem Boden stark voneinander. Außerdem sind die registrierten Maxima der Beschleunigungen im hinteren Plattenbereich (AP1) deutlich ausgeprägter als in den anderen Messausschnitten. Die Verläufe von AP1 und AP4 unterscheiden sich dadurch maßgeblich. Die minimalen und maximalen Beschleunigungen von Grundplatte und Rahmen sind in Tabelle 7.9 angegeben.

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

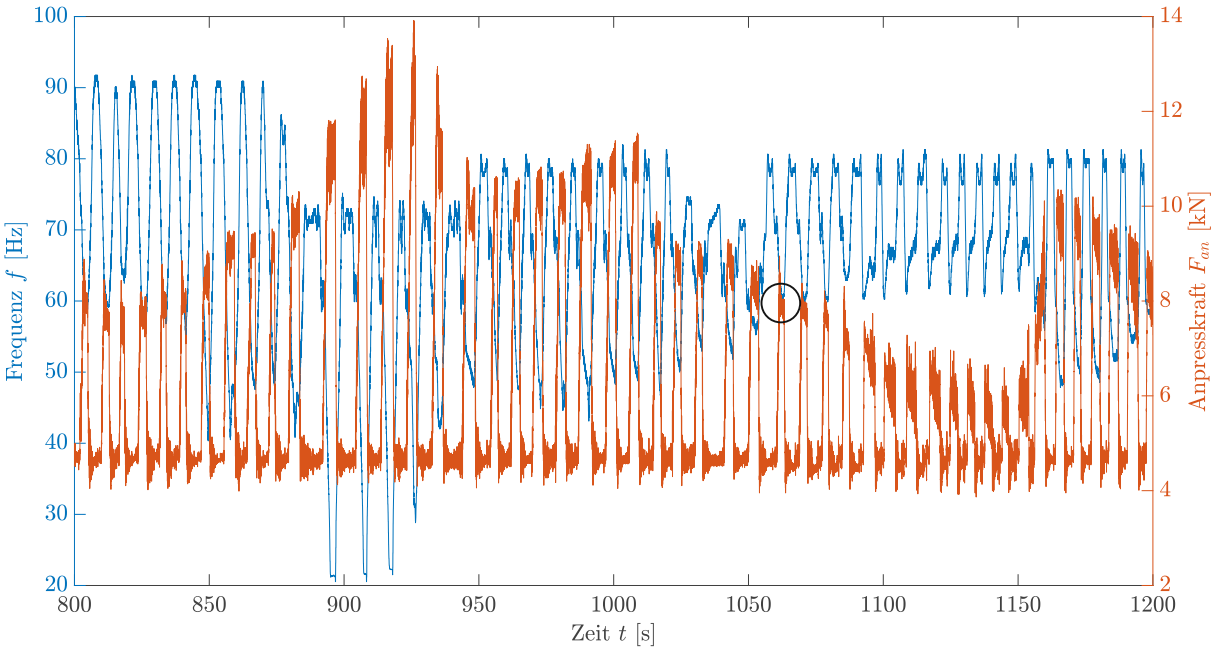


Abb. 7.28: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit mittlerer Anpresskraft

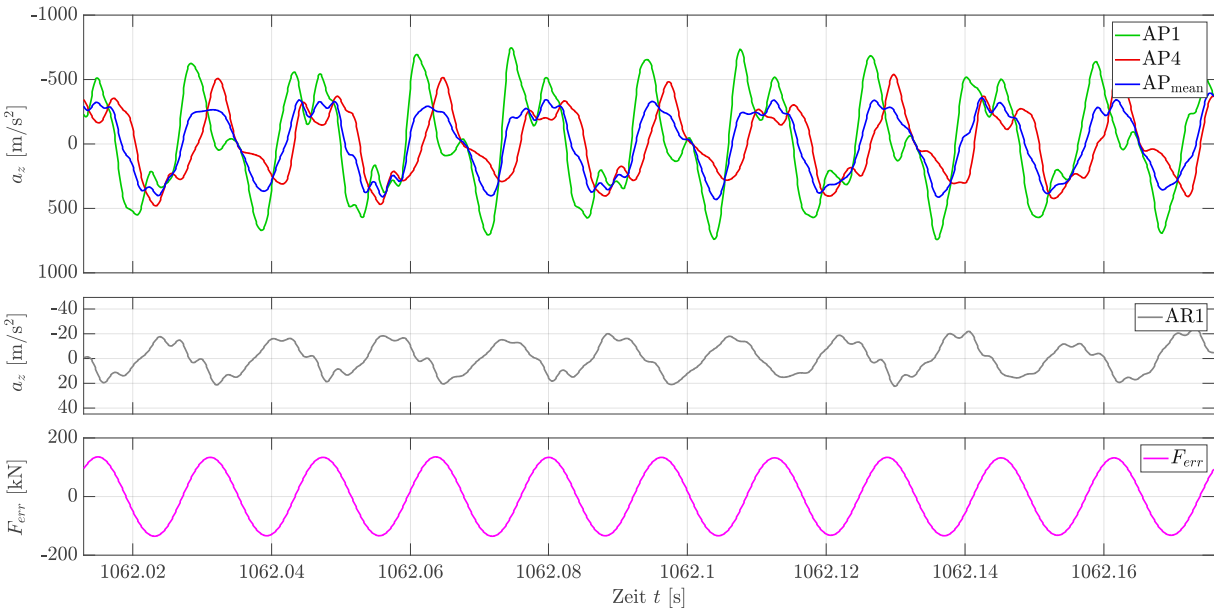


Abb. 7.29: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 sowie des virtuellen Sensors AP_{mean} und der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft

In Abbildung 7.30 sind die Beschleunigung a_z sowie die Schwinggeschwindigkeit v_z und der Schwingweg u_z des virtuellen Sensors AP_{mean} dargestellt. Zusätzlich ist die Erregerkraft F_{err} abgebildet. Der Verlauf der Beschleunigungen lässt eine Wiederholung der Bewegungsabläufe mit jeder zweite Periode vermuten, Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege verdeutlichen, dass eine Regelmäßigkeit vorliegt. Die Bewegungsverläufe sind in diesem Fall reproduzierbar, jedoch

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

nicht so klar ausgeprägt wie in den Messausschnitten zuvor. Die minimalen und maximalen Bewegungsgrößen der Grundplatte sind in Tabelle 7.9 dokumentiert.

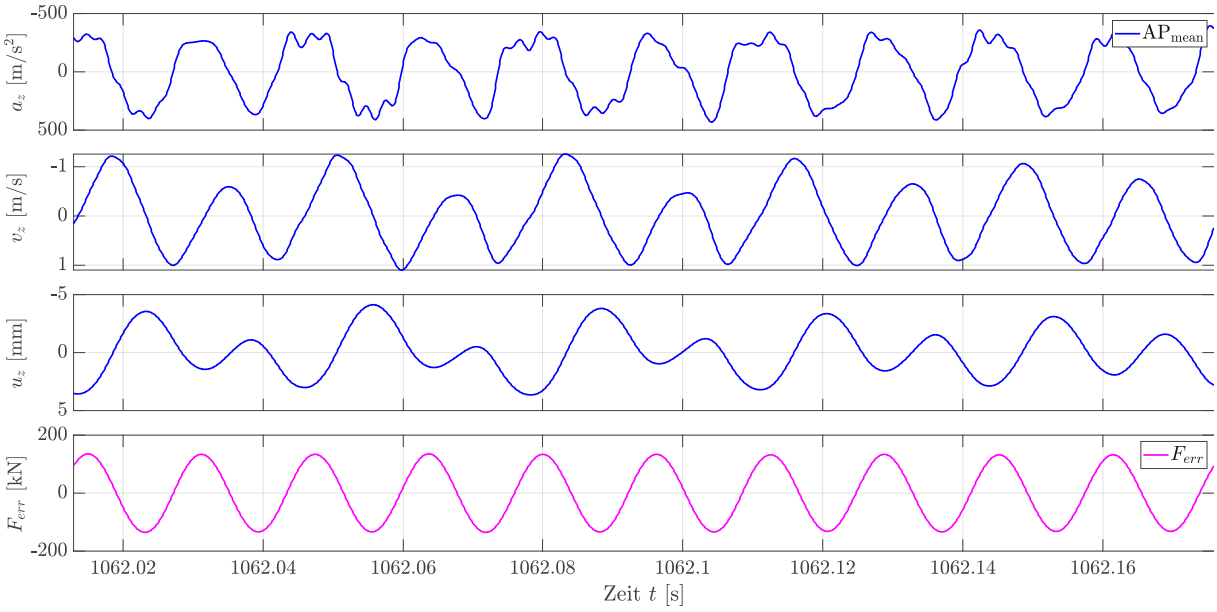


Abb. 7.30: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors AP$_{\text{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft

Abbildung 7.31 zeigt die Orbitalbewegung des Messausschnitts mit mittlerer Anpresskraft. Die negative Drehrichtung der Unwucht entspricht einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Die Schwingwege weisen während dieser Betriebsart kein ausgeprägtes Bewegungsverhalten des Plattenverdichters auf. Die Vertikalschwingung u_z ist deutlich größer als die Horizontalschwingung u_x, der minimale bzw. maximale Schwingweg ist in Tabelle 7.9 dokumentiert.

Tab. 7.9: Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft. Angegeben sind die Minima und Maxima der Beschleunigung a_z, der Schwinggeschwindigkeit v_z, des Vertikalschwingwegs u_z, des Horizontalschwingwegs u_x, der Beschleunigung des Rahmens $a_{z,AR1}$ und der Bodenkontaktkraft F_b

Messung Anpresskraft	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]	u_x [mm]	$a_{z,AR1}$ [m/s^2]	F_b [kN]
Messfahrt 01	431	1,1	3,6	2,0	18	125
mittel	–394	–1,3	–4,1	–1,8	–33	–48

Auswertung der Bodenkontaktkraft

Die Bodenkontaktkraft F_b wird nach Gleichung 7.8 ermittelt. Abbildung 7.32 zeigt die Bodenkontaktkraft F_b sowie ihre Komponenten, die Erregerkraft F_{err}, die statische Last F_g und die Trägheitskraft F_a. Zusätzlich ist der Schwingweg u_z dargestellt. Die Maxima im Verlauf der Bodenkontaktkraft treten durch das unregelmäßigere Bewegungsverhalten in variierender Größe auf. Außerdem ergeben sich zwischen den Maxima auch deutliche Minima im Verlauf der Bodenkontaktkraft. Die minimale bzw. maximale Bodenkontaktkraft F_b beträgt –48 bzw. 125 kN.

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

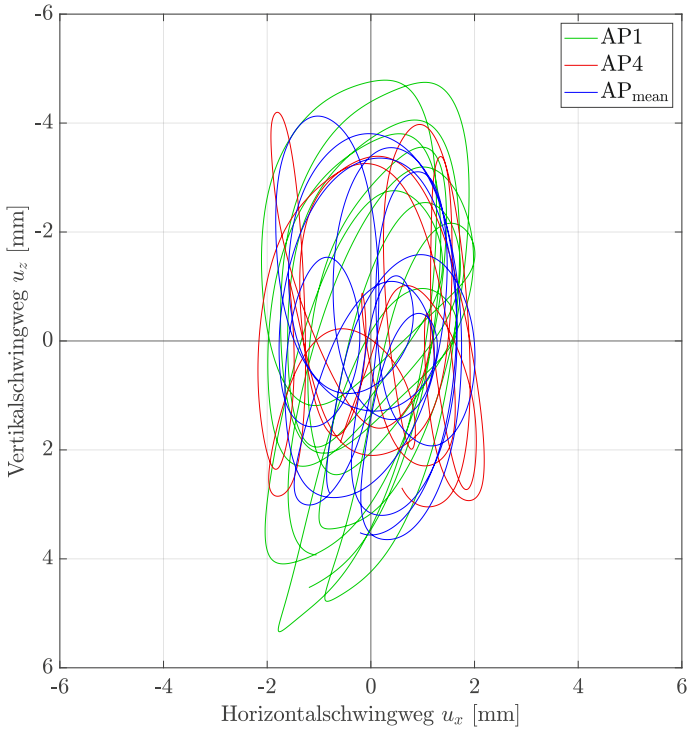


Abb. 7.31: Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und AP$_{mean}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft

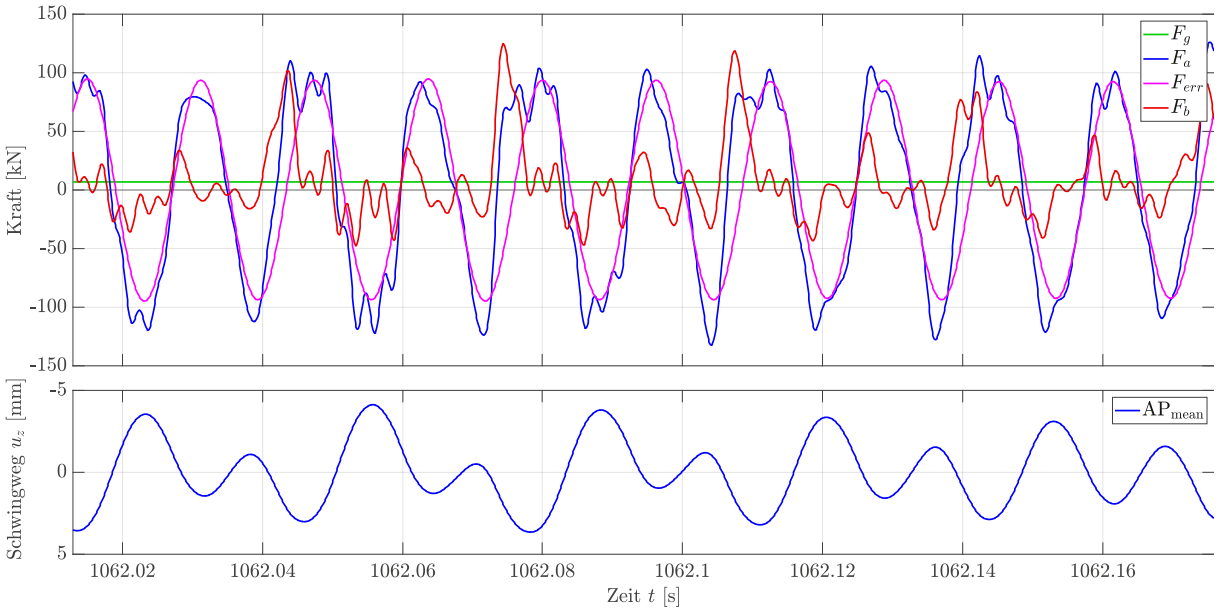


Abb. 7.32: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft

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

7.2.4.5 Auswertung des Messausschnitts im ungesteuerten Betrieb

Im Gegensatz zu Messfahrt 01, bei der die Anpresskraft manuell gesteigert und wieder gesenkt wurde, wurde die Anpresskraft bei Messfahrt 04 nicht kontrolliert geregelt. Dies führt zu konstanteren Verläufen der Anpresskraft F_{an} und der Frequenz f. Abbildung 7.33 zeigt die Verläufe von Erregerfrequenz f und Anpresskraft F_{an} von Messfahrt 04, wobei der Zeitpunkt des ausgewerteten Ausschnitts mit einem schwarzen Kreis markiert ist. An dieser Stelle sind sowohl die Anpresskraft, als auch die Frequenz über längere Zeit konstant. Die Anpresskraft beträgt 14,8 kN und ist damit, im Vergleich zu den gesteuerten Versuchen aus Messfahrt 01, sehr hoch. Die Frequenz ist dementsprechend niedrig und beträgt nur 35 Hz. Die Drehrichtung der Unwucht ist in Fahrtrichtung.

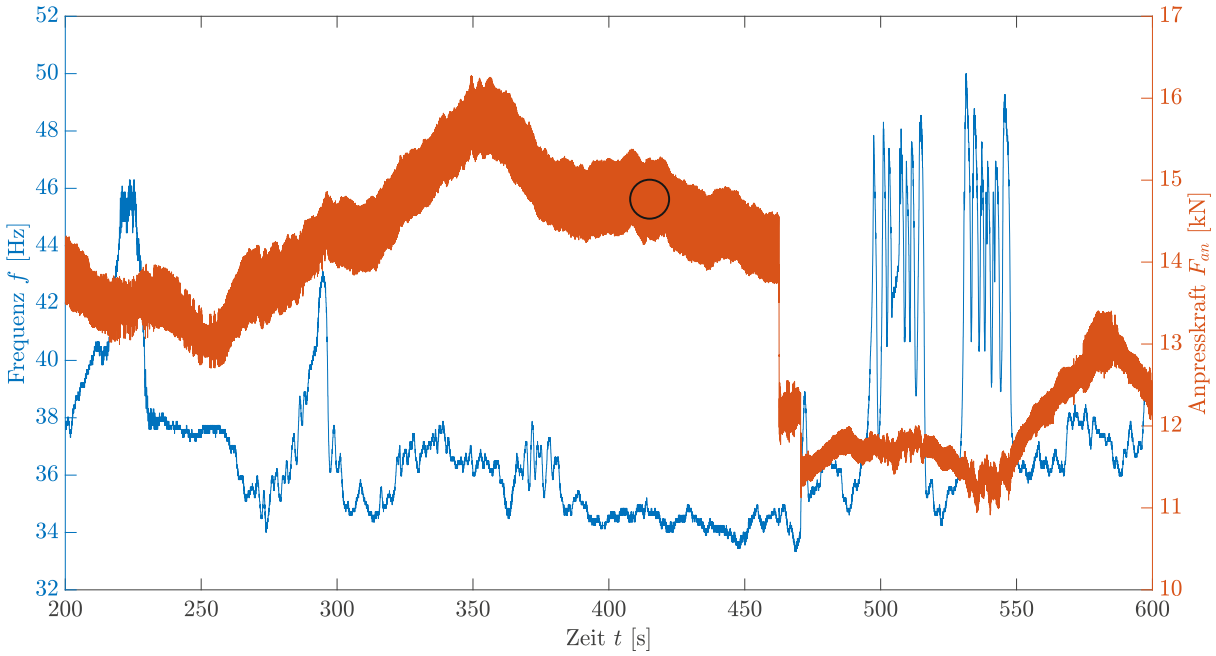


Abb. 7.33: Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 04. Der ausgewertete Abschnitt ist mit einem schwarzen Kreis markiert. Entspricht Abbildung 7.16

Auswertung der Bewegungsgrößen

Abbildung 7.34 zeigt den Vergleich zwischen den Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4 und des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$. Zusätzlich ist die Beschleunigung des Sensors am Rahmen (AR1) und die Erregerkraft F_{err} dargestellt. Wie bei den Messausschnitten mit mittlerer bzw. hoher Anpresskraft konnte die in Abschnitt 7.2.4.1 ermittelte Gewichtung der Sensoren nicht verifiziert bzw. neu ermittelt werden, weshalb die in Abschnitt 7.2.4.1 ermittelte Gewichtung der Sensoren für diesen Messausschnitt beibehalten wird. Durch die Umkehrung der Drehrichtung der Unwucht schlägt die Grundplatte zuerst im vorderen Bereich auf den Boden auf. Die dadurch entstehenden Beschleunigungen werden vom Sensor im vorderen Bereich (AP4) registriert. Die minimalen und maximalen Beschleunigungen von Grundplatte und Rahmen sind Tabelle 7.10 zu entnehmen.

In Abbildung 7.25 sind die Beschleunigung a_z sowie die Schwinggeschwindigkeit v_z und der Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ dargestellt. Zusätzlich ist die Erregerkraft F_{err} abgebildet. Ähnlich wie beim Messausschnitt mit hoher Anpresskraft bewegt sich die Grundplatte

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

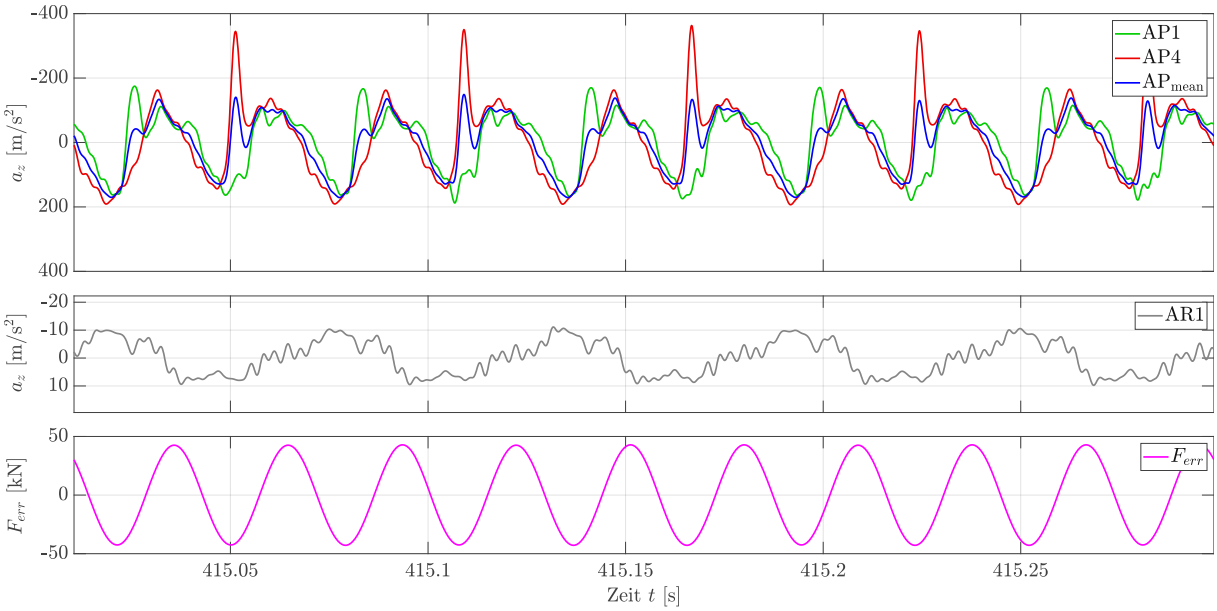


Abb. 7.34: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Anpresskraft 04 im Bereich mit konstanter Anpresskraft

in einem sich nach zwei Anregungsperioden wiederholenden Muster. Die minimalen und maximalen Bewegungsgrößen der Grundplatte sind in Tabelle 7.10 angegeben.

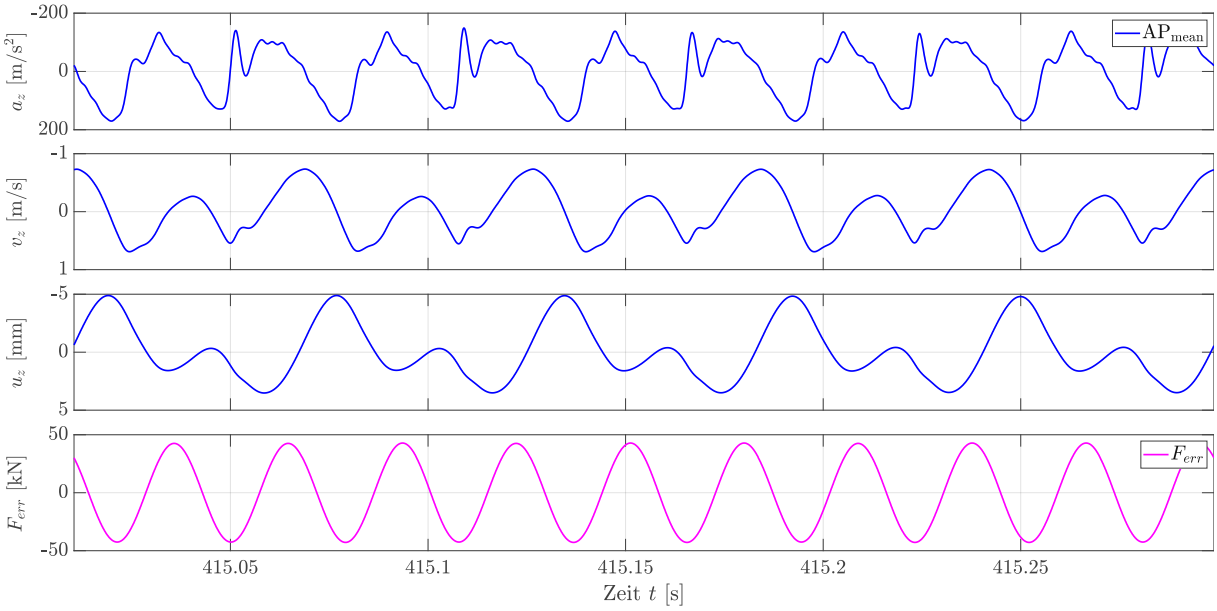


Abb. 7.35: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 04 im Bereich mit konstanter Anpresskraft

Abbildung 7.21 zeigt die Orbitalbewegung des Messausschnitts. Die positive Drehrichtung der Unwucht entspricht einer Drehung im Uhrzeigersinn. Die Bewegungen zeigen ein tiefes Eindringen

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

des Plattenverdichters in den Boden, vor allem im hinteren Bereich der Grundplatte, gefolgt von einem Ausschwung nach oben. Das Schwingungsverhalten ähnelt dem des Ausschnitts mit hoher Anpresskraft aus Messfahrt 01. Die Horizontalschwingung u_x des Sensors AP1 ist deutlich größer, als bei den anderen Ausschnitten, dennoch ist die Vertikalschwingung u_z dominant. Der minimale bzw. maximale Schwingweg ist Tabelle 7.10 zu entnehmen.

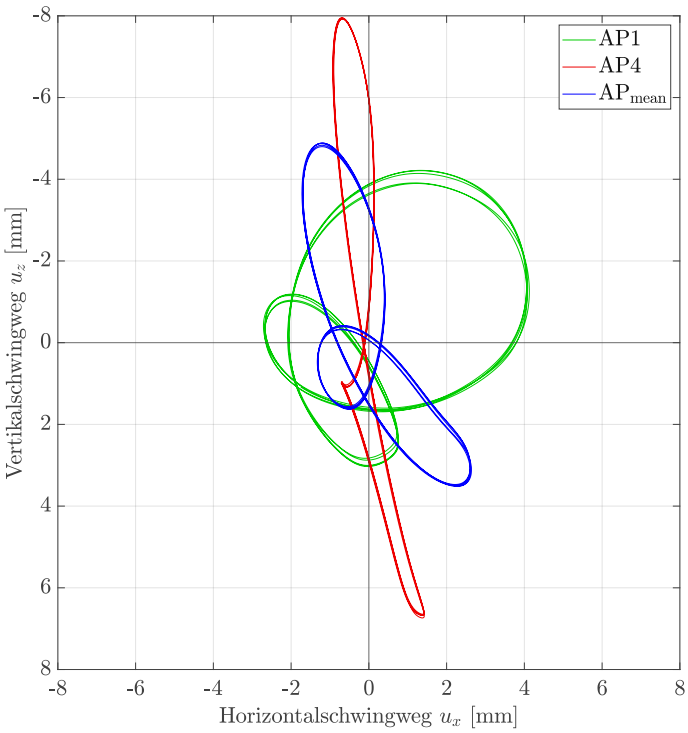


Abb. 7.36: Orbitalbewegung der verschiedenen Sensoren für Messfahrt 04 im Bereich mit konstanter Anpresskraft

Tab. 7.10: Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 04 bei konstanter, hoher Anpresskraft im ungesteuerten Betrieb. Angegeben sind die Minima und Maxima der Beschleunigung a_z, der Schwinggeschwindigkeit v_z, des Vertikalschwingwegs u_z, des Horizontalschwingwegs u_x, der Beschleunigung des Rahmens $a_{z,AR1}$ und der Bodenkontaktkraft F_b

Messung Anpresskraft	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]	u_x [mm]	$a_{z,AR1}$ [m/s^2]	F_b [kN]
Messfahrt 04 hoch	170 –149	0,7 –0,7	3,5 –4,9	2,6 –1,7	10 –11	79 –18

Auswertung der Bodenkontaktkraft

Die Bodenkontaktkraft F_b wird nach Gleichung 7.8 ermittelt. Abbildung 7.37 zeigt die Bodenkontaktkraft F_b sowie ihre Komponenten, die Erregerkraft F_{err}, die statische Last F_g und die Trägheitskraft F_a. Zusätzlich ist der Schwingweg u_z dargestellt. Die sich alle zwei Perioden wiederholenden Beschleunigungsspitzen während des Eindringens der Grundplatte in den Boden erzeugen deutliche Maxima im Verlauf der Bodenkontaktkraft. Die großen, leicht phasenverschobenen, negativen Beschleunigungen führen jedoch auch zu regelmäßig auftretenden negativen

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

Bodenkontaktkräften. Die minimale bzw. maximale Bodenkontaktkraft F_b beträgt –18 bzw. 79 kN.

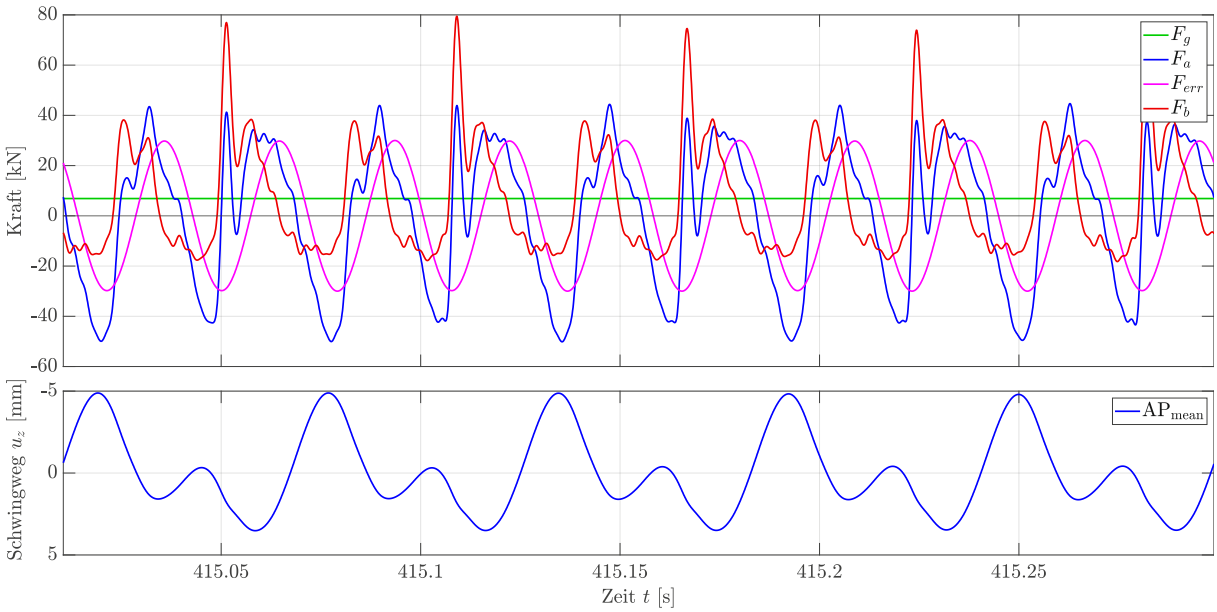
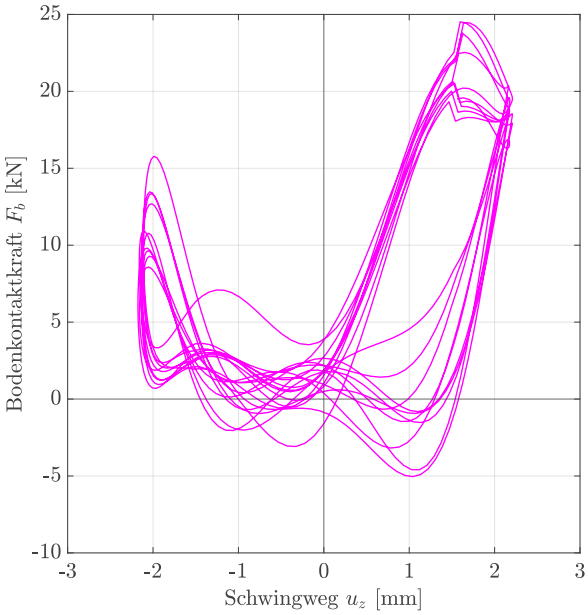


Abb. 7.37: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 04 bei ungesteuertem Betrieb und hohem Anpressdruck

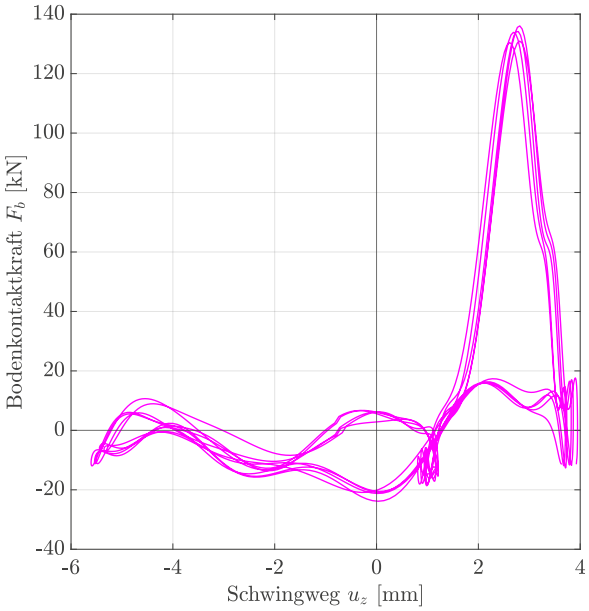
7.2.5 Erstellung von Arbeitsdiagrammen

Bei der Entwicklung des FDVK-Systems für Walzenverdichtung hat sich gezeigt, dass Arbeitsdiagramme eine wichtige Rolle in der arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle spielen. Im Bestreben ein arbeitsintegriertes FDVK-System für Plattenverdichter zu entwickeln, werden Arbeitsdiagramme der vier ausgewerteten Messausschnitte erstellt (siehe Abbildung 7.38). Dabei wird die Bodenkontaktkraft F_b über die Verschiebung in z-Richtung u_z aufgetragen. Aufgrund der Datenlage unterscheidet sich die Form der Arbeitsdiagramme von der in der dynamischen Walzenverdichtung üblichen Form (siehe Abbildung 2.17).

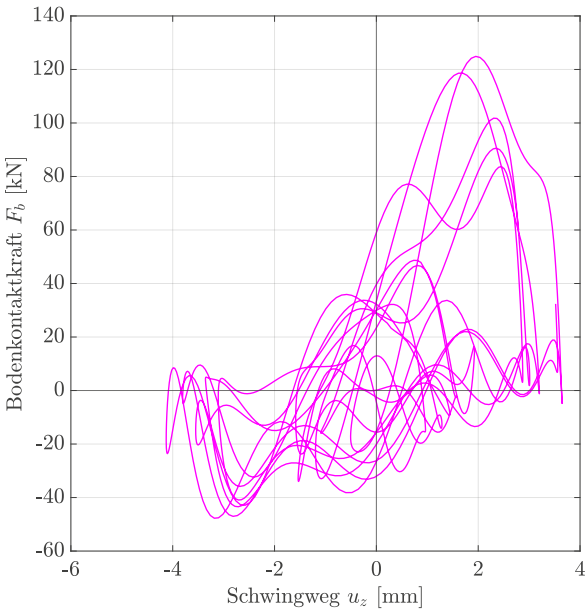
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



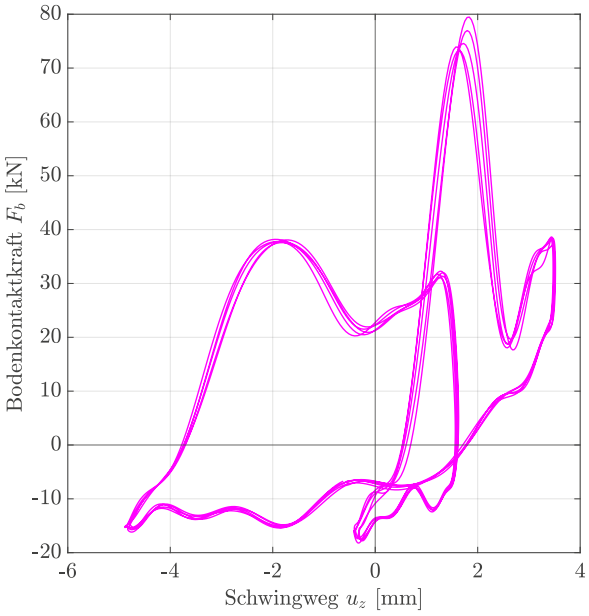
(a) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit niedriger Anpresskraft



(b) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit hoher Anpresskraft



(c) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit mittlerer Anpresskraft



(d) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 04 mit hoher Anpresskraft

Abb. 7.38: Arbeitsdiagramme der vier analysierten Messausschnitte

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 8

Gegenüberstellung und Interpretation der durchgeführten Messdatenauswertung

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 7 gewonnen Erkenntnisse und Ergebnisse der Messdatenauswertung zusammengefasst und die Ergebnisse der einzelnen Messausschnitte gegenübergestellt und interpretiert.

8.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse

8.1.1 Ergebnisse der Nullmessungen

Im Zuge der Auswertung der Nullmessungen wurden die Parameter für die Abminderung der Erregerkraft und die Kompensation der Phasenverschiebung (Frequenz f, Gewichtung der Sensoren, geometrische Verschiebung der Schwerachse in Fahrtrichtung w_x, Reduktionsfaktor $X_{F,err}$, Erregerkraft F_{err}) sowie die Bewegungsgrößen (Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z) der Nullmessungen ermittelt. Die Auswertung der Messdaten war bei drei der vier durchgeführten Nullmessungen möglich, die vierte Nullmessung konnte aufgrund von Messfehlern nicht ausgewertet werden. In Tabelle 8.1 sind die Ergebnisse der ausgewerteten Nullmessungen zusammengefasst.

Tab. 8.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der Nullmessungen. Angegeben sind die Frequenz f, die Gewichtung der Sensoren, die geometrische Verschiebung der Schwerachse in Fahrtrichtung w_x, der Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ und die Erregerkraft F_{err} sowie die ermittelten Bewegungsgrößen, Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z

Messung	f [Hz]	Gewichtung AP1	Gewichtung AP4	w_x [mm]	$X_{F,err}$	F_{err} [kN]	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]
Nullmessung 01	45	0,425	0,515	-23,3	0,79	65	168	0,7	2,3
Nullmessung 02	37	0,416	0,584	-26,0	0,75	49	129	0,6	2,4
Nullmessung 03	55	0,485	0,575	-3,1	0,75	106	271	0,8	2,2

8.1.2 Ergebnisse der Messfahrten

Im Zuge der Auswertung der Messfahrten wurden vier Messausschnitte aus zwei verschiedenen Messfahrten (Messfahrt 01 und 04) betrachtet. Der Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ und die Gewichtung der Sensoren wurden für die Messfahrten aus dem Messausschnitt mit niedriger Anpresskraft ermittelt. Die Gewichtungen der Sensoren betragen AP1 = 0,45 und AP4 = 0,55, der Reduktionsfaktor beläuft sich auf $X_{F,err} = 0{,}7$.

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

Tabelle 8.2 stellt die Ergebnisse der ausgewerteten Messausschnitte gegenüber: Anpresskraft F_{an}, Erregerfrequenz f, Erregerkraft F_{err}, Minima und Maxima der Bewegungsgrößen (Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z), Bodenkontaktkraft F_b sowie die Periodizität des jeweiligen Messausschnitts.

Tab. 8.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der Messfahrten. Dargestellt sind Anpresskraft F_{an}, Erregerfrequenz f, Minima und Maxima der Bewegungsgrößen (Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z), Erregerkraft F_{err}, Minimum und Maximum der Bodenkontaktkraft F_b und Periodizität des jeweiligen Messausschnitts

Messung	t [s]	F_{an} [kN]	f [Hz]	F_{err} [kN]	a_z [m/s^2]	v_z [m/s]	u_z [mm]	F_b [kN]	Periodizität [Perioden]
Messfahrt 01	1066	4,5 niedrig	78	217	501 –538	1,1 –1,0	2,2 –2,2	25 –5	1
Messfahrt 01	1062	7,9 mittel	60	135	431 –394	1,1 –1,3	3,6 –4,1	125 –48	2
Messfahrt 01	1000	10,8 hoch	50	91	300 –254	0,9 –1,2	3,9 –5,6	136 –24	2
Messfahrt 04	415	14,8 hoch	35	43	170 –149	0,7 –0,7	3,5 –4,9	79 -18	2

8.2 Interpretation der Ergebnisse

8.2.1 Interpretation der Ergebnisse der Nullmessungen und des Reduktionsfaktors

Im Vorfeld der Messfahrten wurden vier Nullmessungen durchgeführt, um die Sensorik zu überprüfen und das Bewegungsverhalten des frei schwingenden Plattenverdichters aufzuzeichnen. Die Auswertung der Nullmessungen (siehe Abschnitt 7.2.1) zeigt, dass die Exzentrizität der Unwucht im Vorfeld der Auswertung nicht exakt ermittelt wurde. Um das zu korrigieren wurde ein Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ eingeführt, der die aus der Unwuchtumdrehung resultierende Erregerkraft F_{err} abmindert. Die Ermittlung der Reduktionsfaktoren der Nullmessungen zeigt, dass der Reduktionsfaktor nicht nur von der Exzentrizität abhängt, sondern auch einen frequenzabhängigen Anteil aufweist. Außerdem zeigt der Vergleich zwischen Erregerkraft und Trägheitskraft, dass die Schwerachse des Systems aus Grundplatte und Erregersystem nicht in der Mittelachse des Erregersystems liegt. Die Verschiebung der Schwerachse hat eine Phasenverschiebung zwischen der gemessenen Trägheitskraft und der ermittelten Erregerkraft zufolge (siehe Abbildung 8.1). Um diese Phasenverschiebung auszugleichen, ist es möglich, den gemittelten, virtuellen Sensor zu verschieben. Dazu wird die Gewichtung der Beschleunigungssignale der Sensoren AP1 und AP4 geändert. Die Ermittlung der Gewichtungen der Sensoren für die Nullmessungen ergibt eine Frequenzabhängigkeit der Gewichtungen (siehe Tabelle 8.1). Durch die Änderung der Gewichtung ist eine erneute Anpassung des Reduktionsfaktors notwendig. Der Reduktionsfaktor besitzt somit einen konstanten Anteil, der die Exzentrizität korrigiert und einen variablen Anteil, der die Frequenzabhängigkeit und die frequenzabhängige Phasenverschiebung berücksichtigt. Die exakte Ermittlung des Reduktionsfaktors ist auf Basis der vorhandenen Datenlage schwer durchzuführen. Eine Erklärung der Frequenzabhängigkeit des Reduktionsfaktors könnte 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

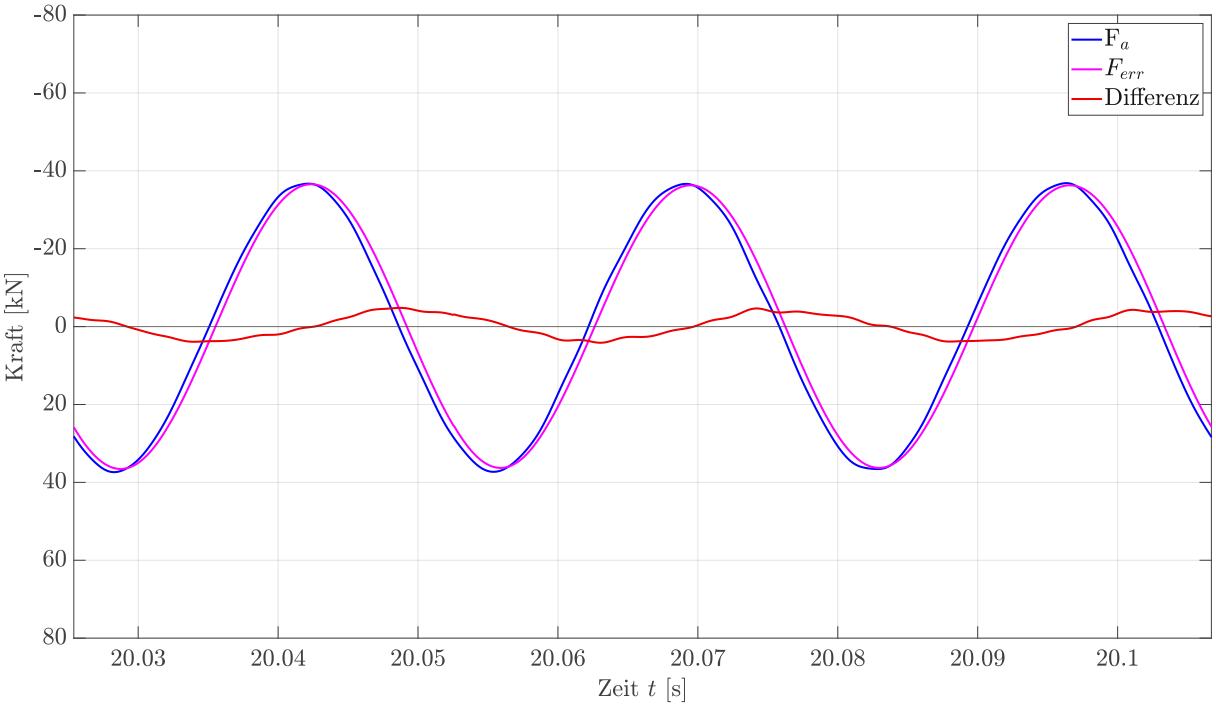


Abb. 8.1: Darstellung der Phasenverschiebung aufgrund der Verschiebung der Schwerachse. Abgebildet sind die Trägheitskraft F_a und die Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 02. Entspricht Abbildung 7.12

genauere Untersuchung der verwendeten Gummipuffer liefern, die für eine weitgehende dynamische Entkopplung von Grundplatte und Rahmen des Plattenverdichters sorgen.

8.2.2 Interpretation der Ergebnisse der Messfahrten

Aus den Daten der Messfahrten wurden vier repräsentative Messausschnitte gewählt, die in Abschnitt 7.2.4 ausgewertet wurden. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Um eine Aussage über das Bewegungsverhalten zu treffen ist es notwendig, zusätzlich zu den Maxima und Minima eines Messausschnitts, die Verläufe der Bewegungsgrößen und der Bodenkontaktkraft zu analysieren.

8.2.2.1 Analyse des Messausschnitts mit Schwellbetrieb bei niedriger Anpresskraft

Der Messausschnitt mit niedriger Anpresskraft von Messfahrt 01 (Schwellbetrieb) ab $t = 1066\,\mathrm{s}$ weist eine Reproduzierbarkeit mit jeder Erregerperiode auf. Die quantitativen Ergebnisse des Ausschnitts sind Tabelle 8.2 zu entnehmen. Die niedrige Anpresskraft ($F_{an} = 4{,}5\,\mathrm{kN}$) hat eine hohe Frequenz ($f = 78\,\mathrm{Hz}$) zur Folge, dies führt zu einer großen Erregerkraft ($F_{err} = 217\,\mathrm{kN}$) im vorliegenden Messausschnitt. Abbildung 8.2 zeigt die Bewegungsgrößen, Beschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg sowie die Erregerkraft.

Aus dem Verlauf der Beschleunigungen sind keine offensichtlichen äußeren Einflüsse auf den Plattenverdichter zu erkennen. Die Bewegungsgrößen verhalten sich qualitativ sehr ähnlich zu den Bewegungsgrößen der frei schwingenden Nullmessungen (siehe Abbildung 7.6). Daraus folgend ist eine starke Interaktion zwischen Boden und Plattenverdichter auszuschließen, da eine Interaktion das Schwingverhalten des Plattenverdichters beeinflussen würde. Durch die auf den Rahmen aufgebrachte Anpresskraft wird die Schwingung des Rahmens beeinflusst, die Bewegung 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

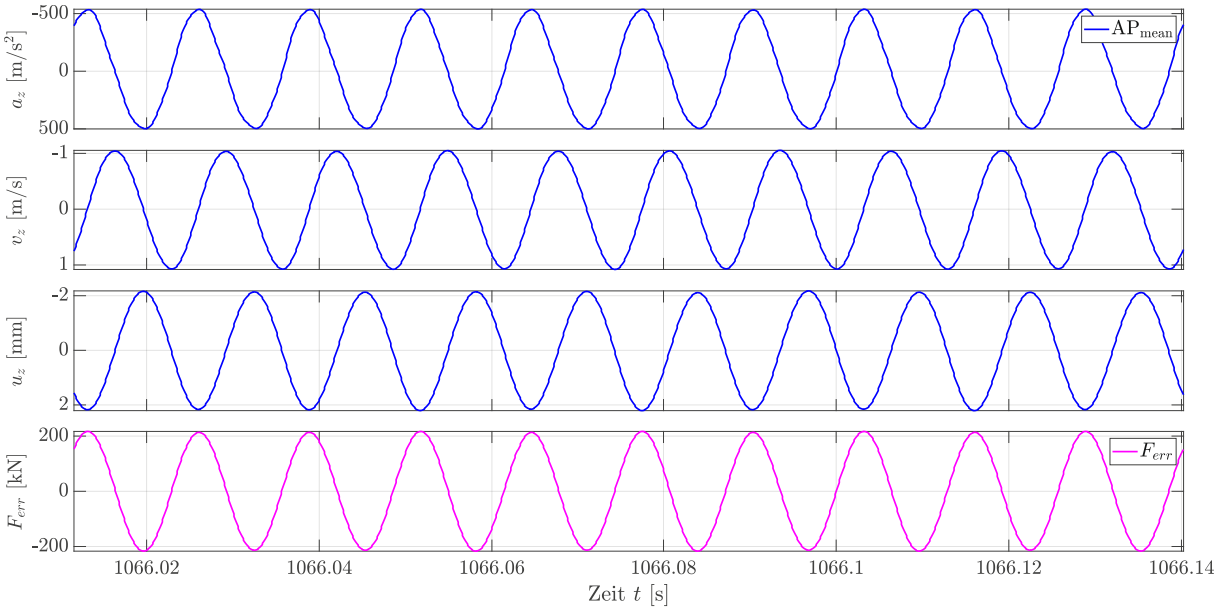


Abb. 8.2: Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors AP$_{\text{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.20

Grundplatte bleibt davon jedoch weitgehend unbeeinflusst (siehe Abbildung 7.19). Die Bodenkontaktkraft (Abbildung 8.3) zeigt, dass die Interaktion zwischen Boden und Plattenverdichter bei niedriger Anpresskraft sehr gering ist.

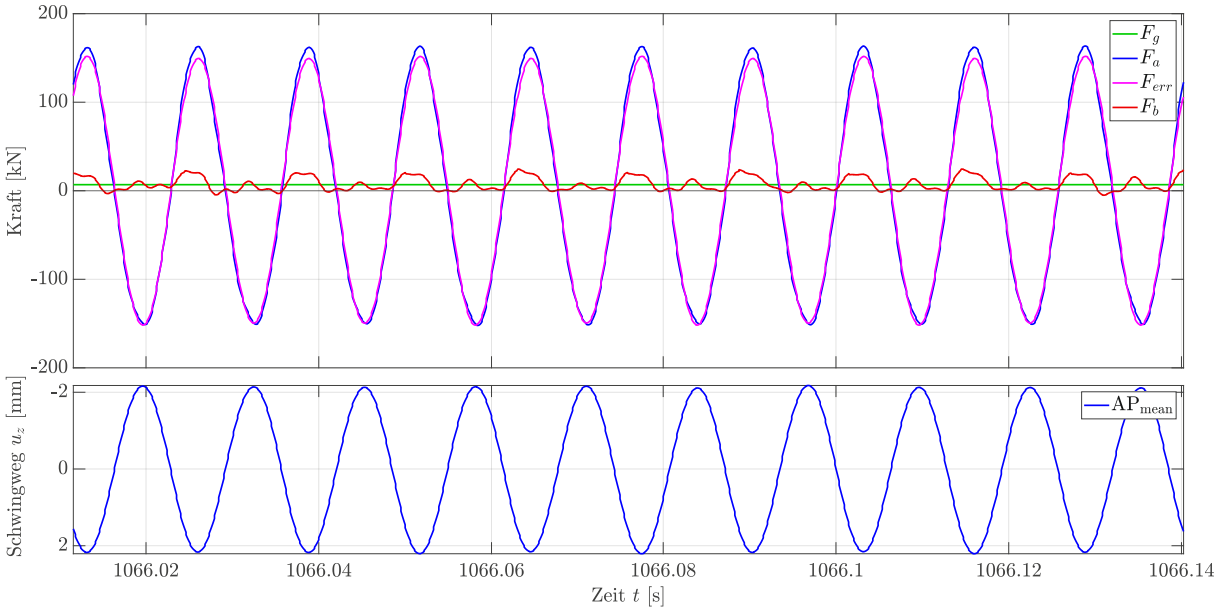


Abb. 8.3: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.22

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

Eine mögliche Erklärung für die geringe Interaktion zwischen Boden und Plattenverdichter – und der daraus resultierenden geringen Bodenkontaktkraft – ist, dass der Plattenverdichter während dem Messausschnitt mit niedriger Anpresskraft nicht am Untergrund auflag, sondern durch die spezielle Aufhängung angehoben wurde. Dadurch lassen sich die ähnlichen Bewegungsverläufe zwischen dem Messausschnitt mit geringer Anpresskraft und den frei schwingenden Nullmessungen erklären. Da das Modell zur Ermittlung der Bodenkontaktkraft von einem vollen Aufliegen des Plattenverdichters ausgeht, ist der Verlauf der Bodenkontaktkraft für Messausschnitte mit niedriger Anpresskraft mit Vorbehalt zu betrachten.

Frühere Untersuchungen an Plattenverdichtern, wie im Forschungsbericht „Technische Weiterentwicklung AHM“ [7] ausgeführt, haben gezeigt, dass sich das Bewegungsverhalten der Grundplatte mit einer Auflast von 120 kg sehr deutlich vom Bewegungsverhalten einer frei schwingenden Nullmessung unterscheidet (siehe Abbildung 3.4a). Ab einer Auflast von 530 kg begann der Plattenverdichter sich bei den Versuchen in den Boden einzurütteln. Verglichen mit den vorliegenden Daten zeigt sich ein eklatanter Unterschied des Bewegungsverhaltens bei einer ähnlichen Konfiguration des Versuchs. Die Anpresskraft des vorliegenden Feldversuchs kann mit der zusätzlichen Auflast der in [7] beschriebenen Versuche verglichen werden. Die in diesem Messabschnitt wirkende Anpresskraft von 4,5 kN ergibt somit eine zusätzliche Auflast von 450 kg und fällt dadurch in den Bereich der Auflast, die das unruhige Bewegungsverhalten des Plattenverdichters verbessert (siehe Abschnitt 3.2.3). Dies führt zu einem weiteren Problem im vorliegenden Versuchsaufbau: die Ermittlung der Anpresskraft erfolgte durch eine Kraftmessdose im Hydraulikzylinder, der, bedingt durch die Konstruktion der Aufhängung, horizontal zwischen Baggerschild und Plattenverdichter angeordnet war. Um eine vertikale Anpresskraft zu erzeugen, musste die Anpresskraft um ca. 90° umgelenkt werden. Die Übersetzung der Umlenkung von einer horizontalen auf eine vertikale Kraft wurde im Vorfeld der Untersuchungen nicht ermittelt, somit ist die Größe der Anpresskraft unter Vorbehalt zu betrachten. Außerdem wurden während den Nullmessungen Anpresskräfte von bis zu 8 kN im Hydraulikzylinder registriert, die aufgrund der freien Schwingung keinen Einfluss auf das Schwingungsverhalten haben. Auf Basis dieser Erkenntnisse sind die Ergebnisse des Messausschnitts mit geringem Anpressdruck nur bedingt aussagekräftig. Es ist davon auszugehen, dass der Ausschnitt eine größtenteils freie Schwingung darstellt.

Zur Bodenkontaktkraft ist außerdem anzumerken, dass die ermittelte Bodenkontaktkraft aufgrund der notwendigen Anpassungen der Erregerkraft und der Kompensation der Phasenverschiebung unter Vorbehalt zu betrachten ist. Dies gilt vor allem für Bereiche mit geringer Bodenkontaktkraft, da eine nicht exakt kompensierte Phasenverschiebung eine rechnerische Bodenkontaktkraft zur Folge hat.

8.2.2.2 Analyse des Messausschnitts mit Schwellbetrieb bei hoher Anpresskraft

Der Messausschnitt mit hoher Anpresskraft von Messfahrt 01 (Schwellbetrieb) ab $t = 1000\,\mathrm{s}$ weist eine Reproduzierbarkeit mit jeder zweiten Erregerperioden auf. Die quantitativen Ergebnisse des Ausschnitts sind Tabelle 8.2 zu entnehmen. Die hohe gemessene Anpresskraft ($F_{an} = 10{,}8\,\mathrm{kN}$) führt zu einer vergleichsweise niedrigen Frequenz ($f = 50\,\mathrm{Hz}$), dadurch wirkt in diesem Messausschnitt eine deutlich niedrigere Erregerkraft ($F_{err} = 91\,\mathrm{kN}$) als im Messausschnitt mit geringer Anpresskraft. Abbildung 8.4 stellt die Bodenkontaktkraft und ihre Komponenten sowie den Schwingweg der Grundplatte dar. Die Trägheitskraft F_a entspricht dabei auch dem qualitativen Verlauf des Beschleunigungssignals.

Im Vergleich zu den weitgehend unbeeinflussten Bewegungsgrößen des Messausschnitts mit niedriger Anpresskraft, sind äußere Einflüsse in diesem Abschnitt klar zu erkennen. Es zeigt sich, dass ein Anstieg der aufgebrachten Anpresskraft (trotz Umlenkung) eine Veränderung

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

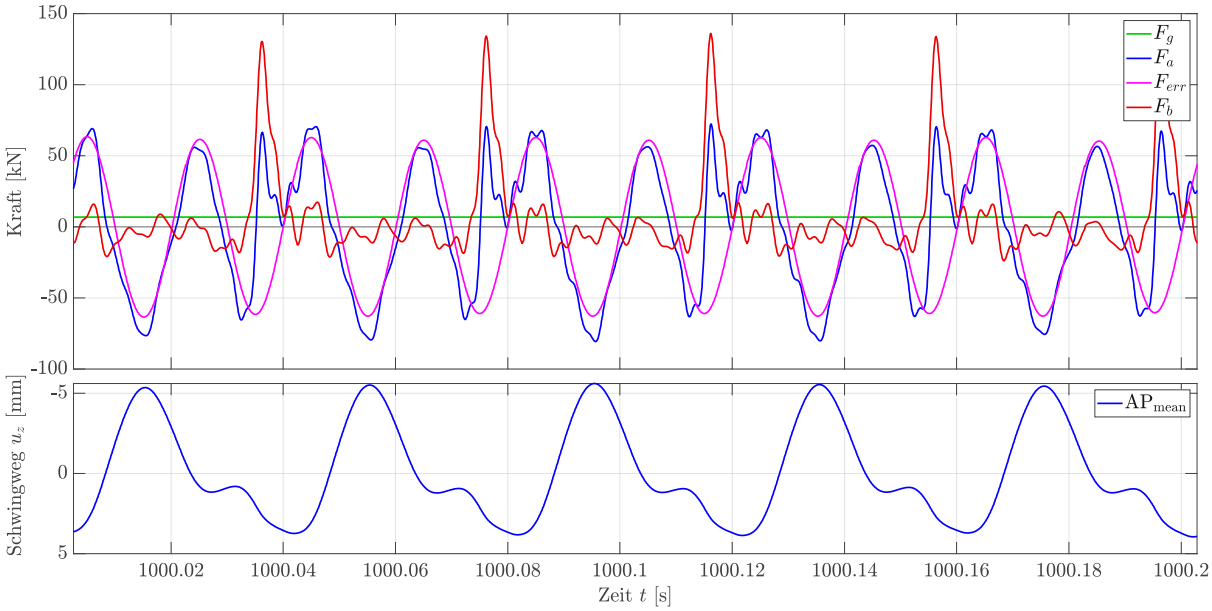


Abb. 8.4: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.27

des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters zufolge hat. Die ausgeprägten Maxima der Bodenkontaktkraft deuten auf einen Aufschlag der Grundplatte auf dem Boden hin. Eine mögliche Interpretation des Bewegungsablaufs stellt sich folgendermaßen dar: zum Zeitpunkt eines Maximums im Verlauf der Bodenkontaktkraft schlägt die Grundplatte auf dem Boden auf, die Grundplatte wird weiter in den Boden eingedrückt (bis zu 3,9 mm im Vergleich zu 2,2 mm für den Fall mit niedriger Anpresskraft). Durch den starken Aufschlag prallt die Grundplatte anschließend nach oben zurück und schwingt bis zu einer Höhe von 5,6 mm aus (maximaler Ausschwung bei niedriger Anpresskraft: 2,2 mm). Durch den großen Ausschwung bleibt die Grundplatte für eine ganze Erregerperiode in der Luft, bevor sie den Untergrund wieder berührt und der nächste starke Aufschlag erfolgt. Die Grundplatte befindet sich dabei in einem Betriebszustand, der sich mit dem Springen von Vibrationswalzen bei dynamischer Walzenverdichtung vergleichen lässt (siehe Kapitel 2.4.1.1 bzw. Abbildung 2.13 für vergleichbare Betriebszustände von Vibrationswalzen). Die Orbitalbewegung in Abbildung 7.26 zeigt, dass sich dieses Bewegungsmuster mit einer großen Regelmäßigkeit wiederholt. Zusätzlich zeigt sich, dass der hintere Teil der Grundplatte eine deutlich größere Bewegung vollzieht als der vordere Teil. Dies kann auf die Drehrichtung der Unwucht entgegen der Fahrtrichtung zurückgeführt werden.

8.2.2.3 Analyse des Messausschnitts mit ungesteuertem Betrieb bei hoher Anpresskraft

Wie der Messausschnitt mit hoher Anpresskraft im Schwellbetrieb, weist auch der Messausschnitt von Messfahrt 04 bei ungesteuertem Betrieb mit hoher Anpresskraft ab $t = 415\,\mathrm{s}$ eine Reproduzierbarkeit mit jeder zweiten Erregerperiode auf. Die quantitativen Ergebnisse des Ausschnitts sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Die höhere Anpresskraft ($F_{an} = 14{,}8\,\mathrm{kN}$) führt zu einer vergleichsweise sehr niedrigen Frequenz ($f = 35\,\mathrm{Hz}$) und dadurch zu einer deutlich geringeren Erregerkraft ($F_{err} = 43\,\mathrm{kN}$) als während des Schwellbetriebs. Abbildung 8.5 stellt die Bodenkontaktkraft und ihre Komponenten sowie den Schwingweg der Grundplatte dar. Die Trägheitskraft F_a entspricht dabei auch dem qualitativen Verlauf des Beschleunigungssignals.

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

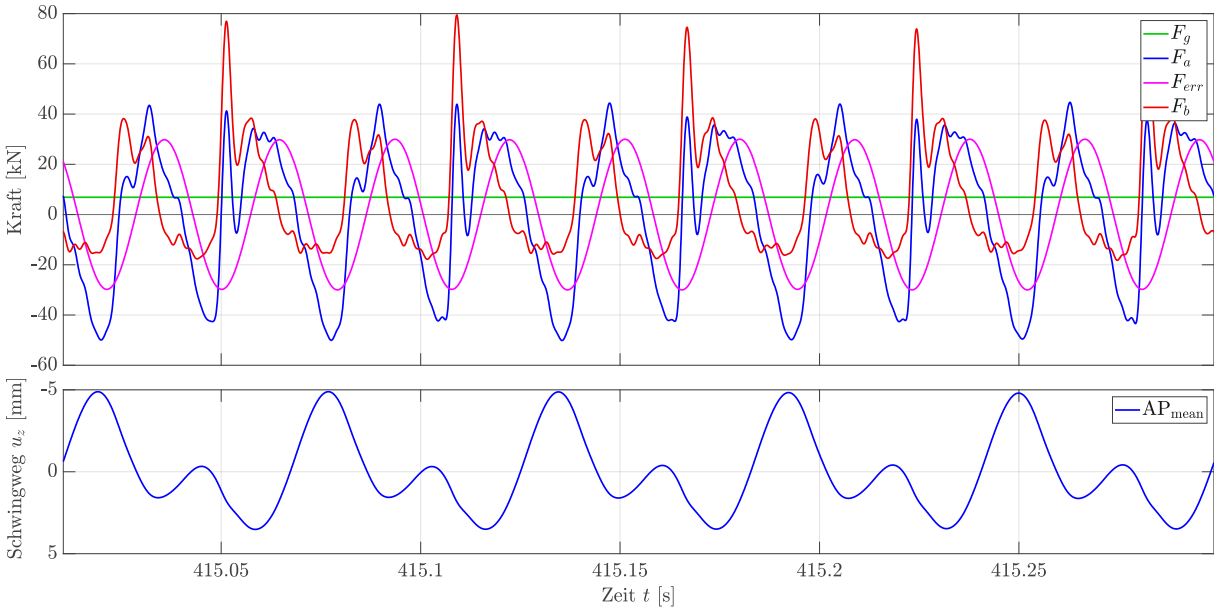


Abb. 8.5: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 04 bei ungesteuertem Betrieb und hoher Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.37

Wie auch im Messausschnitt mit hoher Anpresskraft von Messfahrt 01 deuten die ausgeprägten Maxima im Verlauf der Bodenkontaktkraft auf einen Aufschlag der Grundplatte auf dem Boden hin. Ein möglicher Bewegungsablauf stellt sich folgendermaßen dar: Die Grundplatte schlägt in jeder Erregerperiode einmal auf, jedoch mit wechselnder Stärke. Alle zwei Erregerperioden kommt es zu einem starken Aufschlag, der einen starken Rückprall zufolge hat. Der Ausschwung fällt jedoch kürzer aus als während des Schwellbetriebs zuvor. Die negativen Maxima der Bodenkontaktkraft können ein Anschlagen der Grundplatte am Rahmen bedeuten. Nachdem die Grundplatte den Boden wieder berührt, erfolgt ein schwächerer Aufprall, gefolgt von einem kleineren Rückprall. Auch in diesem Fall befindet sich die Grundplatte in einem Betriebszustand, der mit dem Springen von Vibrationswalzen bei dynamischer Walzenverdichtung (siehe Kapitel 2.4.1.1) verglichen werden kann. Die Orbitalbewegung in Abbildung 7.36 zeigt, dass sich dieses Bewegungsmuster mit einer großen Regelmäßigkeit wiederholt. Zusätzlich zeigt sich, dass aufgrund der umgekehrten Drehrichtung der Unwucht der vordere Teil der Grundplatte zuerst auf den Boden aufschlägt und dadurch einen deutlich größeren Schwingweg aufweist.

8.2.2.4 Analyse des Messausschnitts mit Schwellbetrieb bei mittlerer Anpresskraft

Der Messausschnitt mit mittlerer Anpresskraft von Messfahrt 01 (Schwellbetrieb) bei $t = 1062\,\mathrm{s}$ zeigt alle zwei Erregerperioden ein sich wiederholendes, jedoch leicht variierendes Bewegungsmuster. Die quantitativen Ergebnisse des Ausschnitts sind Tabelle 8.2 zu entnehmen. Durch die geringere Anpresskraft ($F_{an} = 7{,}9\,\mathrm{kN}$) ist die Erregerfrequenz ($f = 60\,\mathrm{Hz}$) – und damit auch die Erregerkraft ($F_{err} = 135\,\mathrm{kN}$) – in diesem Messausschnitt größer, als in den zwei Messausschnitten zuvor. Abbildung 8.6 stellt die Bodenkontaktkraft und ihre Komponenten sowie den Schwingweg der Grundplatte dar. Die Trägheitskraft F_a entspricht dabei auch dem qualitativen Verlauf des Beschleunigungssignals.

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

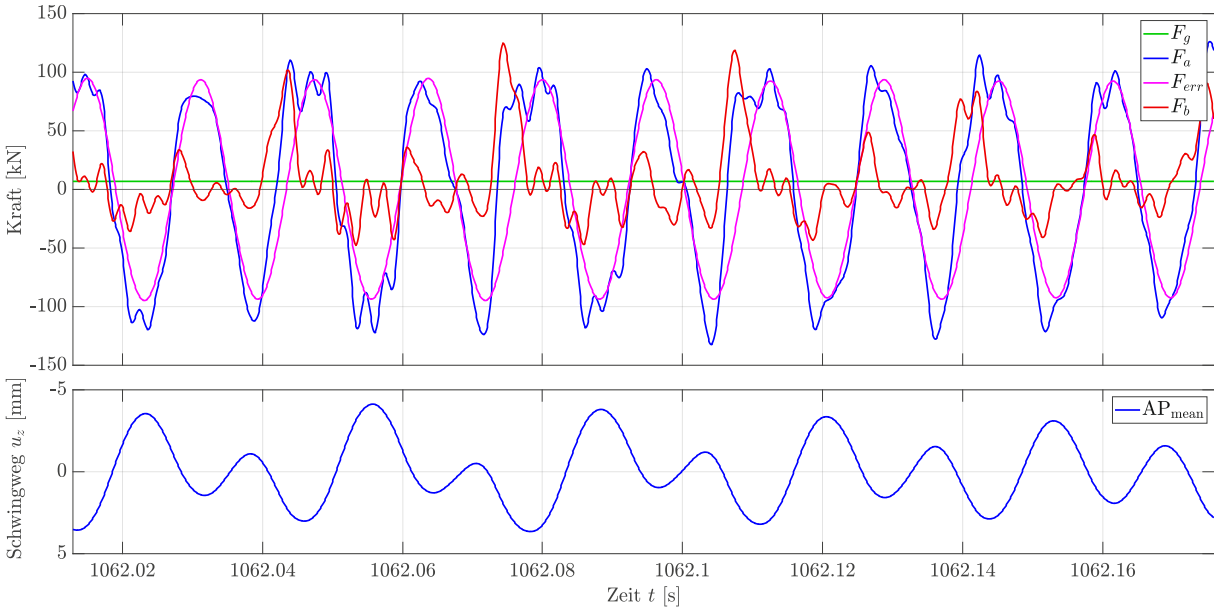


Abb. 8.6: Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.32

Im Gegensatz zu den anderen analysierten Messausschnitten, weist dieser Ausschnitt zwar eine Periodizität auf, jedoch unterscheidet sich das Bewegungsverhalten der einzelnen Zyklen voneinander. Ähnlich wie im ungesteuerten Betrieb, schlägt die Grundplatte einmal pro Erregerperiode mit wechselnder Stärke auf dem Boden auf, jedoch variieren der exakte Zeitpunkt und die Ausprägung der Aufschläge der Platte auf dem Boden. Die Orbitalbewegung des Messausschnitts ist in Abbildung 8.7 dargestellt und zeigt den unregelmäßigen Verlauf des Schwingwegs in der x-z-Ebene über die zehn ausgewerteten Erregerperioden.

Anhand des Schwingwegs in Abbildung 8.6 ist eine Regelmäßigkeit des Bewegungsmusters erkennbar, jedoch zeigt die Orbitalbewegung (Abbildung 8.7), dass sich, im Gegensatz zu den anderen Messausschnitten, kein ausgeprägtes Bewegungsverhalten einstellt. Das Bewegungsverhalten ist durch die abwechselnden starken und schwachen Schläge dennoch dem Betriebszustand des Springens zuzuordnen.

8.2.3 Interpretation der Arbeitsdiagramme

Die in Abschnitt 7.2.5 erstellten Arbeitsdiagramme sind in Abbildung 8.8 dargestellt und zeigen für die jeweiligen Messausschnitte die ermittelte Bodenkontaktkraft über die Vertikalverschiebung aufgetragen.

Das Arbeitsdiagramm der Messfahrt mit niedriger Anpresskraft (links oben, Abbildung 8.8a) zeigt einen Verlauf, der dem Verlauf eines Arbeitsdiagramms einer Walzenverdichtung ähnelt (siehe Abbildung 2.17). In der Belastungsphase dringt der Plattenverdichter immer weiter in den Boden ein bis ein Maximum der Bodenkontaktkraft F_b erreicht ist. Der Punkt der Maximalen Verschiebung stellt sich aufgrund der Massenträgheit unmittelbar nach dem Beginn der Entlastungsphase ein. In der Entlastungsphase verringert sich der Schwingweg und der Plattenverdichter schwingt wieder zurück, bis die Bodenkontaktkraft zu Null wird und die Grundplatte vom Boden abhebt. Die Bodenkontaktkräfte beim Ausschwingen können auf eine Dämpfung der Bewegung durch den Hydraulikzylinder oder auf eine nicht exakt kompensierte

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

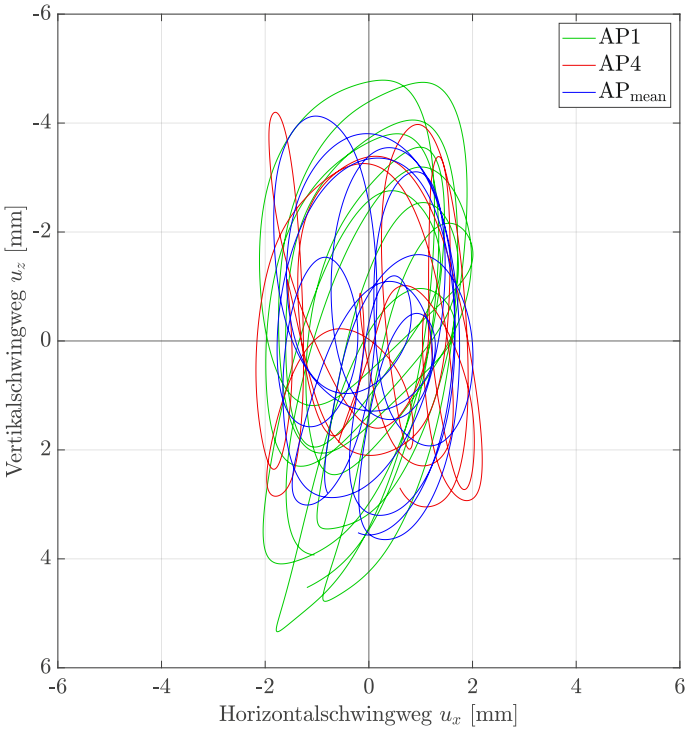


Abb. 8.7: Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und AP$_{mean}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.31

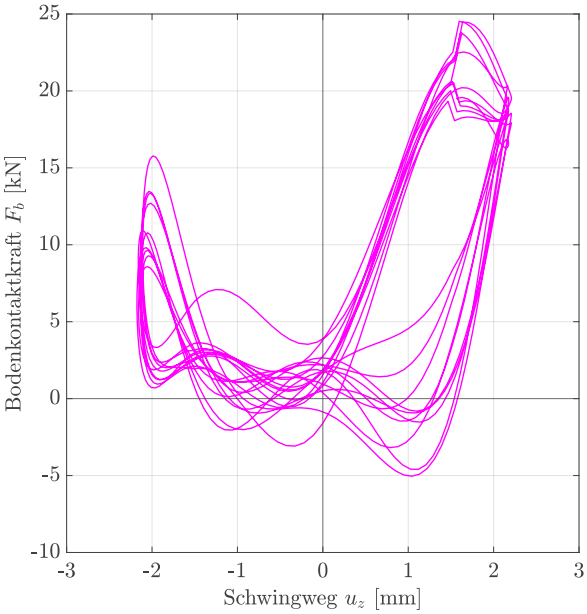
Phasenverschiebung zurückzuführen sein. Die Arbeitsdiagramme der anderen Messfahrten zeigen ein Eindringen des Plattenverdichters in den Boden während der Belastungsphase. Der Punkt der Maximalen Belastung stellt in diesem Fall jedoch nicht die maximale Vertikalverschiebung dar. Im Zuge der Entlastungsphase bewegt sich der Plattenverdichter nicht wie erwartet zurück, sondern dringt weiter in den Boden ein. Aufgrund bekannter physikalischer und mechanischer Grundlagen, kann ein fortschreitendes Eindringen in den Boden bei gleichzeitiger Entlastung des Bodens, wie in den vorliegenden Diagrammen dargestellt, nicht der Realität entsprechen. Eine mögliche Ursache für die Ungenauigkeit der Arbeitsdiagramme ist die nicht exakt kompensierte Phasenverschiebung für die Messausschnitte mit mittlerer bzw. hoher Anpresskraft sowie die große Anzahl an notwendigen Aufbereitungsschritten im Zuge der Datenaufbereitungen.

Bei der Entwicklung der FDVK für dynamische Walzenverdichtung hat sich gezeigt, dass Arbeitsdiagramme ein zentrales Element einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle darstellen. Die FDVK-Werte, aus welchen sich der Verdichtungsfortschritt des Bodens bestimmen lässt, werden meist auf Basis von Arbeitsdiagrammen ermittelt. Somit ist die Ermittlung aussagekräftiger Arbeitsdiagramme ein wichtiger Schritt im Zuge der Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle.

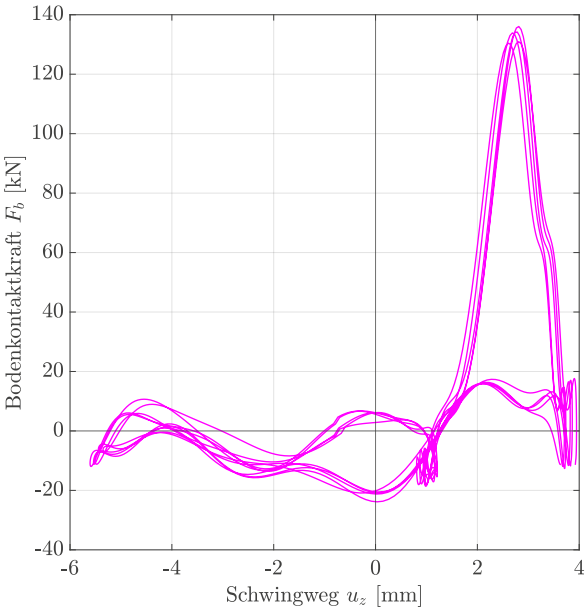
8.3 Schlussfolgerungen der Interpretation

Die vier analysierten Messausschnitte weisen unterschiedliche Bewegungsverhalten und Interaktionen zwischen Grundplatte und Boden auf, wobei der Ausschnitt mit niedriger Anpresskraft im Schwellbetrieb eine sehr gering ausgeprägte zwischen Verdichtungsgerät und Boden nahelegt. Dies zeigt sich in einem Bewegungsverhalten, das jenem der Nullversuche gleicht und zu sehr geringen Bodenkontaktkräften führt. Das Bewegungsverhalten in diesem Messausschnitt ist möglicherweise

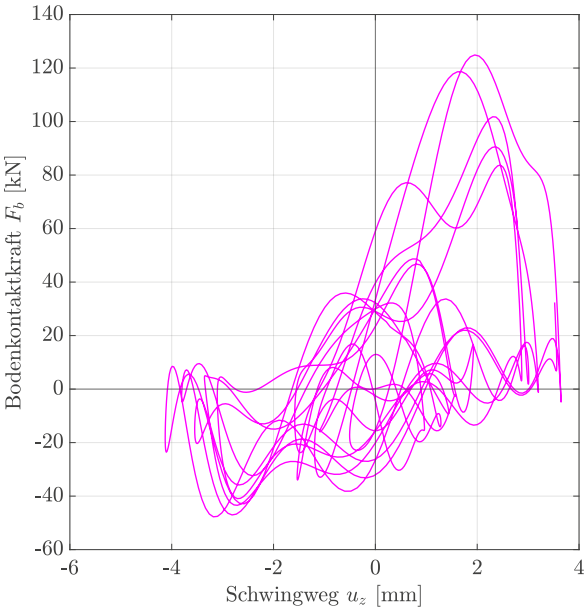
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN



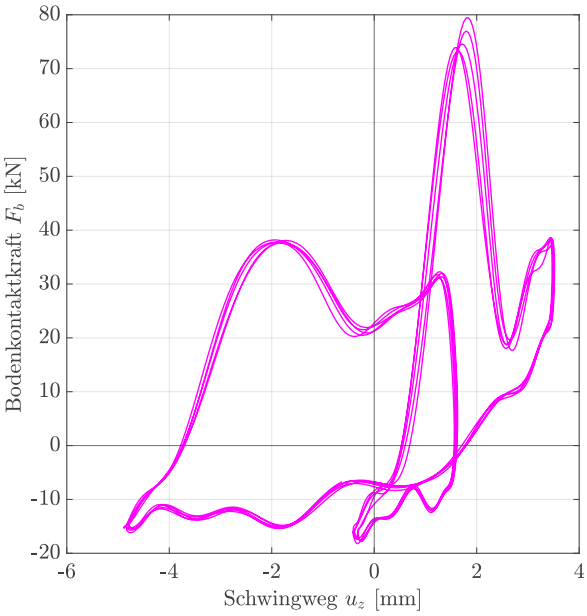
(a) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit niedriger Anpresskraft



(b) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit hoher Anpresskraft



(c) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit mittlerer Anpresskraft



(d) Arbeitsdiagramm der Messfahrt 04 mit hoher Anpresskraft

Abb. 8.8: Arbeitsdiagramme der vier analysierten Messausschnitte. Entspricht Abbildung 7.38

darauf zurückzuführen, dass die Grundplatte nicht wie vorgesehen mit ihrer gesamten Masse auf dem Boden aufgelegen ist, sondern durch die Aufhängung des Plattenverdichters angehoben wurde. Dadurch stellte sich eine nahezu freie Schwingung ein. Vergleichbare Feldversuche, die im Forschungsbericht „Technische Weiterentwicklung AHM“ [7] beschrieben werden, zeigen, dass der Plattenverdichter unter Eigengewicht bei geringer Auflast ein Bewegungsverhalten aufweist, welches sich von dem einer freien Schwingung deutlich unterscheidet. Im Falle des ausgewerteten

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

Messausschnitts ist somit davon auszugehen, dass das gemessene Bewegungsverhalten einer weitgehend freien Schwingung entspricht.

Der Messausschnitt mit hoher Anpresskraft im Schwellbetrieb zeigt ein Bewegungsverhalten, das mit dem Betriebszustand Springen von Vibrationswalzen vergleichbar ist (siehe Abbildung 2.13 für vergleichbare Betriebszustände von Vibrationswalzen). Auf einen harten Schlag folgt eine Erregerperiode, in der der Plattenverdichter den Boden nicht berührt. Dieses Bewegungsmuster wiederholt sich nach jeder zweiten Erregerperiode. Das Bewegungsverhalten in diesem Messausschnitt stellt sich sehr regelmäßig und ausgeprägt dar.

Auch im ungesteuerten Betrieb stellt sich ein Betriebszustand ein, der mit dem Betriebszustand Springen von Vibrationswalzen vergleichbar ist. Im Gegensatz zum Messausschnitt mit hoher Anpresskraft bei Schwellbetrieb, folgt in dieser Betriebskonfiguration auf einen harten Schlag ein Schlag mit geringerer Ausprägung. Es stellt sich ein regelmäßiges und ausgeprägtes Bewegungsverhalten dar. Die Anpresskraft während dieses Messausschnitts ist höher als während der analysierten Messausschnitte des Schwellbetriebs. Die regelmäßigen negativen Maxima der Bodenkontaktkraft deuten darauf hin, dass die Grundplatte in dieser Betriebskonfiguration einmal pro Erregerperiode am Rahmen anschlägt.

Der Messausschnitt mit mittlerer Anpresskraft im Schwellbetrieb zeigt ein Bewegungsverhalten, welches nicht eindeutig ausgeprägt ist, jedoch eine Periodizität von zwei Erregerperioden aufweist. Wie im ungesteuerten Betrieb, folgt auf einen harten Schlag ein Schlag mit geringerer Ausprägung. Das Bewegungsmuster stellt sich als reproduzierbar, jedoch nicht ausgeprägt dar, was sich in einer Variation des Zeitpunktes und der Qualität der Aufschläge zeigt. Trotz des nicht ausgeprägten Bewegungsverhaltens ist der sich einstellende Betriebszustand dem Springen zuzuordnen.

Weiters zeigt der Vergleich der vier Messausschnitte, dass vor allem die aufgebrachte Anpresskraft und die Frequenz ausschlaggebend für das Bewegungsverhalten bzw. den Betriebszustand des Plattenverdichters sind. Die Betriebsart (Schwellbetrieb oder ungesteuerter Betrieb) nimmt dabei keinen primären Einfluss auf das Bewegungsverhalten.

Für die Interpretation der aufbereiteten Messdaten ist zu beachten, dass die ermittelte Bodenkontaktkraft aufgrund der notwendigen Anpassungen der Erregerkraft und der Kompensation der Phasenverschiebung unter Vorbehalt zu betrachten ist. Dies gilt vor allem für Bereiche mit geringer Bodenkontaktkraft, da eine nicht exakt kompensierte Phasenverschiebung eine rechnerische Bodenkontaktkraft zur Folge hat und zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Bodenkontaktkraft führen kann. Weiters ist davon auszugehen, dass die Phasenverschiebung nur für den Messausschnitt mit niedriger Anpresskraft exakt kompensiert wurde. Aufgrund des nahezu ungestörten Schwingungsverhaltens in diesem Messausschnitt ist dieser Ausschnitt für die Kompensation der Phasenverschiebung geeignet. Durch die Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung und die variierenden Bewegungsmuster ist eine exakte Kompensation für die anderen Messausschnitten deutlich erschwert. Aus diesem Grund ist von einer Phasenverschiebung und dadurch von einer Abweichung zwischen realer und ermittelter Bodenkontaktkraft bei den Messausschnitten mit mittlerer und hoher Anpresskraft auszugehen.

Die Ungenauigkeit, die sich beim Erstellen der Arbeitsdiagramme zeigt, kann auch auf die nicht exakt kompensierte Phasenverschiebung dieser Messausschnitte zurückgeführt werden.

In Bezug auf die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle stellt sich bei entsprechender Betriebsart ein reproduzierbares, periodisches Bewegungsverhalten des Plattenverdichters dar, das während des Verdichtens auftritt. Dadurch ist eine der Grundvoraussetzungen für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle 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

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 9

Zusammenfassung und Ausblick

Das Streckennetz in Österreich bedarf aufgrund der immer größer werdenden Belastungen im Bahnbetrieb und der zum Teil sehr alten Unterbauten in vielen Abschnitten einer Sanierung und Modernisierung des Unterbaus [29]. Um diesem Problem entgegenzusteuern, ließ die ÖBB Anfang der neunziger Jahre eine gleisgebundene Unterbausanierungsmaschine entwickeln. Dabei wird der Gleisrost mit einer Maschine angehoben und der darunter liegende Gleisschotter sowie die Tragschicht abgeräumt und erneut eingebaut. Die hohe Effizienz der gleisgebundenen Unterbausanierung ergibt sich durch die Möglichkeit, die Tragschicht einzubauen, ohne den Gleisrost abbauen zu müssen. Darüber hinaus ist durch das Anheben des Gleisrostes ein kontinuierlicher Betrieb möglich. Ein weiterer Vorteil der gleisgebundenen Unterbausanierung ist die Verfügbarkeit des Zweitgleises für den regulären Bahnbetrieb. Zusätzlich ist die gleisgebundene Unterbausanierung nicht von den Geländebedingungen der Umgebung abhängig und kann auch auf schwer erreichbaren Streckenabschnitten durchgeführt werden [13–15, 40, 45].

Auf Basis der von den ÖBB gestellten Anforderungen entwickelte die Fa. *Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R, die seit 1994 im Einsatz ist. Die damals neu konzipierte Schotteraufbereitungsanlage der AHM 800-R erlaubt es, den Gleisschotter zu recyceln und als Teil des Tragschichtmaterial wiederzuverwerten. Vor dem Einbau wird der recycelte Gleisschotter mit neuem, zugeliefertem Tragschichtmaterial aus einem Werk vermischt. Um die eingebaute Tragschicht zu verdichten, ist die AHM 800-R mit sechs Plattenverdichtern ausgestattet. Diese sollen für ein ebenes und gut verdichtetes Tragschichtplanum sorgen auf dem in weiterer Folge das Schotterbett und der Gleisrost aufgebracht werden können [45]. Die Tragschicht erfüllt mehrere Funktionen im Bahndamm, wobei die Lastverteilung, die Trennung von Gleisschotter und Untergrund und die Wirkung als Drainageschicht zu den wichtigsten zählen [28–30]. Aufgrund der vielseitigen Anforderungen an die Tragschicht, muss das Tragschichtmaterial sehr strengen Kriterien entsprechen, die in den Technischen Lieferbedingungen TL 07.09.18 der ÖBB [34] und der RVS 08.15.01 [44] festgelegt sind. Durch das Recycling von Gleisschotter werden im Zuge der Unterbausanierung mittels AHM 800-R noch strengere Anforderungen an das einzubauende Korngemisch gestellt [13]. Damit die Tragschicht ihre Aufgaben erfüllen kann, ist eine sachgemäße Verdichtung der Tragschicht notwendig. Zusätzlich erhöht eine hohe und gleichmäßige Verdichtung die Lebensdauer des gesamten Bahndamms deutlich. Schon eine kleine Unebenheit auf dem Tragschichtplanum kann zu einer Reduktion der Lebensdauer führen [29]. Um die ordnungsgemäße Verdichtung der Tragschicht sicherzustellen, wird seitens der ÖBB die Erfüllung gewisser Verdichtungsanforderungen für den Einbau der Tragschicht gefordert. Diese Anforderungen sind in der RVS 08.03.01 [41] festgelegt (siehe Tabelle 2.1).

Beim Einbau des Tragschichtmaterials mittels AHM 800-R werden die gestellten Verdichtungsanforderungen in der Regel ausreichend erfüllt. Jedoch treten in der eingebauten Tragschicht vereinzelt Stellen auf, an denen die Grenzwerte der Verdichtungskriterien punktuell unterschritten werden. Da diese Bereiche nur vereinzelt und punktuell auftreten, ist die Sicherheit des Bahnbetriebs nicht gefährdet, jedoch verringert sich dadurch die Lebensdauer des Streckenabschnitts. Um den Verdichtungsprozess der AHM 800-R zu analysieren und weiterzuentwickeln,

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

begann die Fa. *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik am Forschungsprojekt „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ [7] zu arbeiten. Das Ziel des Projektes sollte die Verdichtung der Tragschicht mittels Plattenverdichter effizienter zu gestalten. Der Fokus des Forschungsprojekts lag auf der Analyse des Tragschichtmaterials. Darüber hinaus wurden Messungen an einem Plattenverdichter der AHM 800-R bei laufendem Baustellenbetrieb durchgeführt. Anschließend wurden weitere Feldversuche an einem separaten Plattenverdichter auf einem Versuchsfeld in Fischamend durchgeführt. Die Messungen wurden im Zuge des Forschungsprojekts hinsichtlich des Bewegungsverhaltens der Plattenverdichter ausgewertet. Der Endbericht des Forschungsprojekts wurde im November 2018 unter dem Titel „Technische Weiterentwicklung der AHM“ [7] veröffentlicht.

Um die Forschung in diesem Bereich weiterzuführen, startete die Fa. *Plasser und Theurer, Export von Bahnbaumaschinen Gesellschaft m.b.H* in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik der TU Wien am 1. Juli 2019 ein neues Forschungsprojekt mit dem Titel „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ [37]. Im Zuge dieses Forschungsprojekts wurden am 20. November 2019 Feldversuche mit einem Plattenverdichter des Typs WBB530 der Fa. *Wimmer*, wie er auf der AHM 800-R eingesetzt wird, durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde auf Basis der aus dem Forschungsprojekt „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ [7] gewonnenen Erkenntnisse geplant. Der Plattenverdichter wurde mit fünf Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet, wobei vier davon am unteren Teil des Plattenverdichters, der Grundplatte, und der fünfte am oberen Teil des Plattenverdichters, dem Rahmen, angebracht wurden. Zusätzlich wurde das Erregersystem mit vier Positionssensoren ausgestattet, um die Position und Drehrichtung der Unwucht während den Messfahrten bestimmen zu können. Um den Plattenverdichter über das Testfeld zu führen, wurde er mit einer speziellen Aufhängung an einem Bagger befestigt, der sich entlang der Testspuren bewegte. Insgesamt wurden bei den Feldversuchen vier Nullmessungen und acht Messfahrten durchgeführt. Für jede Nullmessung und jede Messfahrt wurden die Beschleunigungen der Sensoren in x-, y- und z-Richtung aufgezeichnet sowie die Position der Unwucht. Weiters wurden die zusätzliche Anpresskraft, welche auf den Plattenverdichter aufgebracht wurde und der Druck im Hydrauliksystem des Baggers gemessen. Bedingt durch die Konstruktion wurde die Anpresskraft in horizontaler Richtung aufgebracht und umgelenkt, um als Auflast zu wirken.

Die anhand der Versuche gewonnenen Messdaten wurden für die Analyse mittels MATLAB aufbereitet. Da für die Analyse neben Beschleunigungsdaten auch deren integrierte Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg benötigt wurden, mussten die Beschleunigungsdaten zweimal numerisch im Zeitbereich integriert werden, wobei die numerische Integration nach der Trapezregel erfolgte. Damit sich bei der Integration aufgrund von Messrauschen keine Fehler ergeben, mussten die Beschleunigungsdaten vor der Integration digital gefiltert werden. Eine Analyse der Daten im Frequenzbereich zeigte, dass die Daten keine nennenswerten Anteile im niederfrequenten Bereich aufweisen und dass beim Aufzeichnen der Daten eine große Menge an Messrauschen im hochfrequenten Bereich entstanden ist. Aus diesem Grund war es notwendig, die Daten einmal mit einem Hochpassfilter zu filtern, um das langwellige, niederfrequente Messrauschen zu entfernen und einmal mit einem Tiefpassfilter, um das hochfrequente Messrauschen zu entfernen. Der digitale Hochpassfilter wurde als *Butterworth*-Filter 6. Ordnung definiert. Die Grenzfrequenz wurde anhand einer Konvergenzstudie aller Messfahrten mit 13 Hz gewählt. Der digitale Tiefpassfilter wurde anhand einer Vergleichsstudie der gefilterten Signale festgelegt und wurde als FIR-Filter mit einer Grenzfrequenz von 450 Hz definiert.

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

Als erster Schritt der Auswertung wurde aus den Daten der Positionssensoren der Unwuchtdrehwinkel ermittelt, um daraus die Unwuchtbewegung in vertikaler Richtung rekonstruieren zu können. Da die Erregerfrequenz über den Verlauf einer Messfahrt nicht konstant war, wurde die Unwuchtbewegung als sinusähnliche Funktion aus vielen einzelnen Sinus-Funktionen zusammengesetzt. Diese Sinus-Funktionen wurden zwischen den ermittelten Unwuchtdrehwinkeln für jeweils eine Vierteldrehung interpoliert. Auf Basis der Unwuchtbewegung konnte die variable Erregerfrequenz der Messfahrten und daraus die Erregerkraft ermittelt werden.

Im Zuge der Auswertung der Messfahrten stellte sich heraus, dass die Erregerfrequenz und die auf den Plattenverdichter aufgebrachte Anpresskraft voneinander abhängig sind. Die Kapazität des Hydrauliksystems des Baggers reichte für eine unabhängige Steuerung von Anpresskraft und Erregerfrequenz nicht aus. So konnte entweder eine hohe Anpresskraft aufgebracht oder eine hohe Erregerfrequenz erzielt werden. Im Sinne einer Untersuchung der Messdaten im Hinblick auf eine arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle ist die stark variable Erregerfrequenz dieser Versuchsreihe sehr unvorteilhaft.

Die Bewegungsanalyse der Nullmessungen zeigte das ungestörte Schwingungsverhalten des Plattenverdichters und die weitgehende dynamische Entkoppelung zwischen Grundplatte und Rahmen. Weiters stellte sich heraus, dass die Abschätzung der Exzentrizität der Unwucht im Vorfeld der Versuche nicht exakt genug für die konkrete Bestimmung der Erregerkraft war. Um das zu korrigieren, wurde ein Reduktionsfaktor eingefügt, um die Erregerkraft abzumindern. Bei der Ermittlung des Reduktionsfaktors zeigte sich, dass der Reduktionsfaktor sowohl von der nicht exakt angenommenen Exzentrizität abhängt als auch von der Erregerfrequenz beeinflusst wird. Zusätzlich wurde die Schwerachse der Grundplatte (inklusive Erregersystem) im Vorfeld nicht exakt ermittelt und musste aus den Beschleunigungsdaten nachträglich bestimmt werden. Auf Basis der vorliegenden Datenlage war eine exakte Ermittlung des frequenzabhängigen Reduktionsfaktors und eine exakte Bestimmung der Schwerachse anhand der Beschleunigungen nicht möglich.

Die nachfolgende Bewegungsanalyse der gewählten Messausschnitte zeigte, dass die Anpresskraft (und/oder die Erregerfrequenz) einen großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten und den Betriebszustand des Plattenverdichters hat. Bei geringer Anpresskraft zeigte sich eine beinahe ungestörte Schwingung und eine vergleichsweise geringe Interaktion des Plattenverdichters mit dem Untergrund. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der Bewegungsverläufe des Messausschnitts mit geringer Anpresskraft und der Nullmessungen, ist davon auszugehen, dass der Plattenverdichter in diesem Fall von der, speziell für den Feldversuch konstruierten, Aufhängung angehoben wurde und nahezu frei schwingt.

Im Vergleich dazu zeigte sich bei hoher Anpresskraft eine starke Interaktion mit dem Untergrund und ein eindeutiges Springen des Plattenverdichters mit periodischem Kontaktverlust und einer hohen Regelmäßigkeit über zwei Erregerperioden. Im Abschnitt mit mittlerer Anpresskraft zeigte sich ein über zwei Erregerperioden wiederholendes, nicht eindeutig ausgeprägtes Bewegungsverhalten. Der Betriebszustand des Plattenverdichters ist auch in diesem Fall dem Springen zuzuordnen. Durch die Phasenverschiebung stellt sich die exakte Ermittlung einer Bodenkontaktkraft als anspruchsvoll dar. Dies zeigt sich auch in den erstellten Arbeitsdiagrammen.

Im Zuge früherer Forschungsprojekte [7] wurde festgestellt, dass eine arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle für Plattenverdichter der AHM 800-R grundsätzlich möglich ist. In der vorliegenden Bewegungsanalyse zeigte sich, dass der Plattenverdichter bei entsprechender Betriebsart ein regelmäßiges und reproduzierbares Bewegungsverhalten aufweist. Ein solches Bewegungsverhalten ist eine notwendige Grundvoraussetzung für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle.

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

Für eine weiterführende Untersuchung sollten weitere Feldversuche mit einer Variation des Versuchsaufbaus durchgeführt werden. Ein wichtige Änderung des Versuchsaufbaus betrifft die Richtung der Lastaufbringung der zusätzlichen Auflast. Es ist zu empfehlen, die zusätzliche Auflast (im vorliegenden Fall in Form der Anpresskraft) in vertikaler Richtung aufzubringen, sodass keine Umlenkung benötigt wird. Im Falle einer notwendigen Umlenkung erscheint die Messung der aufgebrachten Kraft nach der Umlenkung in vertikaler Richtung sinnvoll. Weiters sollte sichergestellt werden, dass die Aufhängung des Plattenverdichters diesen nicht anhebt und der Plattenverdichter auf dem Boden aufliegt, sodass eine nahezu freie Schwingung während einer Verdichtungsfahrt nicht möglich ist. Außerdem sollte die Bewegung des Plattenverdichters nicht durch die Aufhängung gedämpft oder beeinträchtigt werden.

Im Zuge des Zusammenbaus des Plattenverdichters ist eine genaue Analyse der Einzelteile des Plattenverdichters zu empfehlen. Um die Messdatenauswertung zu vereinfachen, sollten die Beschleunigungssensoren um die zuvor ermittelten Schwerachsen angebracht werden. Außerdem sollte die Funktionsfähigkeit aller Sensoren überprüft und die Verbindung zum Messdatenerfassungssystem sichergestellt werden.

Weiters ist zu empfehlen, die verwendeten Gummipuffer separat zu untersuchen, um deren Auswirkung auf das Bewegungsverhalten den Plattenverdichters besser beurteilen zu können.

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

Literatur

[1] URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fl%7B%5C%22a%7Dchennaturdenkmal_FNDDD225101_Bahndamm_Wallroda.jpg (Zugriff am 13. 12. 2020).

[2] URL: https://www.plassertheurer.com/ (Zugriff am 12. 12. 2020).

[3] D. Adam. „Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen“. Diss. TU Wien, 1996.

[4] D. Adam. *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Institut für Geotechnik der TU Wien, 2019.

[5] D. Adam und I. Paulmichl. „Bodenmechanische und bodenphysikalische Grundlagen der Bodenverbesserung“. In: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Bodenverbesserung. Wien, 2009.

[6] D. Adam und J. Pistrol. *Studienblätter zur Vorlesung Bodendynamik*. Institut für Geotechnik der TU Wien, 2019.

[7] D. Adam, J. Pistrol und A. Hausenberger. *Technische Weiterentwicklung AHM*. Forschungsber. TU Wien, 2018.

[8] D. Adam, A. Vogel und A. Zimmermann. „Ground improvement techniques beneath existing rail tracks“. In: *Ground Improvement* 11 (2007).

[9] M. Affenzeller. „Vorauswertung dynamischer Messungen an einem Plattenverdichter der gleisgebundenen Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R“. Projektarbeit. Institut für Geotechnik der TU Wien, 2020.

[10] R. Anderegg. „Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie“. In: *Anniversary Symposium - 40 Years of Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC)*. Wien, 2018.

[11] R. Anderegg, D. von Felten und K. Kaufmann. „Die Dynamik von Vibrationsplatten“. In: *Strassen- und Tiefbau* 10 (2007), S. 3–10.

[12] R. Anderegg und L. Recher. „Control of chaotic vibrations using the principle of autoparametric resonances“. In: *Proceedings of the 12th Mechatronics Forum Biennal International Conference*. ETH Zürich, 2010, S. 324–331.

[13] F. Auer, M. Zuzic, R. Schilder und H. Breymann. „13 Jahre Erfahrung mit gleisgebundener Untergrundsanierung im Netz der ÖBB“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 12 (2007), S. 817–827.

[14] R. Becker und P. Vierlinger. „Nachhaltiges Wirtschaften durch gleisgebundenes Schotterrecycling“. In: *EI – Eisenbahningenieur* 55 (2004), S. 18–22.

[15] H. Beczkowski. „Zustandsverbesserung von Streckengleisen der PKP durch Einsatz der AHM 800-R PL“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 51 (2002), S. 194–198.

[16] C. Boley. *Handbuch Geotechnik. Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

[17] A. Brandt. *Noise and Vibration Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

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

[18] A. Brandt und R. Brincker. „Integrating time signals in frequency domain – Comparison with time domain integration“. In: *Measurement* 58 (2014), S. 511–519.

[19] T. Butz. *Fouriertransformation für Fußgänger*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

[20] eurailpool GmbH. *Datenblatt AHM 800 R*.

[21] R. Fischer, R. Kipper, M. Moede, M. Mortag und D. Wegener. „Untergrundertüchtigung eines Streckenabschnittes über Weichschicht“. In: *EI – Eisenbahningenieur* (Juni 2009).

[22] F. Hansmann. „Großmaschineneinsatz bei Untergründen mit geringer Tragfähikeit“. In: *EI - Eisenbahningenieur - Sonderheft Geotechnik* (Aug. 2016), S. 13–16.

[23] S. Hofmann. *Numerische Integration von Beschleunigungssignalen*. Institutsmitteilung Nr. 38. IMW - Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2013.

[24] imc Test & Measurement GmbH. *Datenblatt imc CRONOSflex Basis Einheit*. 2020.

[25] K.-D. Kammeyer und K. Kroschel. *Digitale Signalverarbeitung. Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen mit 33 Tabellen*. 6. Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2006.

[26] Kistler Gruppe. *Datenblatt K-Beam Beschleunigungssensor*. 2020.

[27] H. König. *Maschinen im Baubetrieb. Grundlagen und Anwendung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[28] D. Li, J. Hyslip, T. Sussmann und S. Chrismer. *Railway Geotechnics*. eng. 2. Aufl. London: Elsevier, 2013.

[29] B. Lichtberger. *Handbuch Gleis. Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. 3. Aufl. Hamburg: Eurailpress, 2010.

[30] K. Lieberenz und F. Piereder. „Entwicklung von Schutzschichten mit Geokunststoffen“. In: *EIK – Eisenbahn Ingenieur Kompendium* (2013), S. 252–270.

[31] K. Lieberenz und F. Piereder. „Zur Unterbausanierung – Problemstellung, Entwicklung und Ausführung“. In: *ZEVrail* 136 (2012), S. 2–12.

[32] B. Lotfi und L. Huang. „An approach for velocity and position estimation through acceleration measurements“. In: *Measurement* 90 (2016), S. 242–249.

[33] R. Menius und V. Matthews. *Bahnbau und Bahninfrastruktur. Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.

[34] ÖBB. *Technische Lieferbedingungen 07.09.18*.

[35] N. Ostermann. *Studienblätter zur Vorlesung Eisenbahnwesen*. Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien, 2015.

[36] J. Pistrol. „Verdichtung mit Oszillationswalzen. Bewegungsverhalten, walzenintegrierte Verdichtungskontrolle und Verschleißbeurteilung“. Diss. TU Wien, 2016.

[37] J. Pistrol. „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichter“. Forschungsber. unveröffentlicht.

[38] J. Pistrol, D. Adam, F. Kopf, S. Villwock und W. Völkel. „Walzenverdichtung - Dynamisch erregte Bandagen im Vergleich“. In: *Vorträge zum 21. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 20. März 2014*. Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2014, S. 79–88.

[39] H. Pösch und W. Ikes. *Verdichtungstechnik und Verdichtungsgeräte im Erdbau*. 2. Aufl. Berlin: Ernst, 1975.

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

[40] K. Riebold und F. Piereder. „Gleisgebundene Unterbausanierungstechnologien“. In: *EIK – Eisenbahn Ingenieur Kompendium* (2010), S. 31–44.

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

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

[43] *RVS 08.03.04. Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches.* 2008.

[44] *RVS 08.15.01. Ungebundene Tragschichten.* 2010.

[45] R. Schilder und F. Piereder. „Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800 - R“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 49 (2000), S. 577–586.

[46] E. T. Selig und J. M. Waters. *Track geotechnology and substructure management.* eng. London: Telford, 2000.

[47] B. A. Shenoi. *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design.* eng. Chichester: Wiley-Interscience, 2005.

[48] T. Stefan. „Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern und Analyse von deren Bewegungsverhalten“. Diplomarbeit. TU Wien, 2020.

[49] L. Tan und J. Jiang. *Digital Signal Processing. Fundamentals and Applications.* eng. 2. Aufl. Oxford: Elsevier, 2013.

[50] Vereinte Nationen. *Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung.* 1992.

[51] Wimmer Hartstahl GmbH & Co KG und Wimmer Felstechnik GmbH. *Datenblatt Bodenverdichter WB.*

[52] World Commission on Environment and Development. *Our Common Future.* New York: Oxford University Press, 1987.

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.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Bahndamm Wallroda in Deutschland [1] 15
2.2 Aufbau eines Bahndamms nach RVS 08.03.01 [41] 16
2.3 Lastableitung in einem Bahndamm mit und ohne Tragschicht. Adaptiert nach [29] 18
2.4 Vergleich unterschiedlicher Schichtsysteme in Bezug auf deren Filterwirkung. Adaptiert nach [30] 19
2.5 Sieblinie für ungebundenen Obere Tragschichten 0/32 (im Anlieferungszustand) nach [44] 20
2.6 Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R im Einsatz. Foto: *Karl Heinz Ferk* . . 24
2.7 Schematische Darstellung des Aufbaus und der Arbeitsweise der AHM 800-R. Adaptiert nach [20] 26
2.8 Aushubketten beim Abtragen des Oberbaus [2] 27
2.9 Plattenverdichter beim Verdichten des eingebrachten Tragschichtmaterials [13] . 28
2.10 Sieblinie des Tragschichtmaterial bei Einbau mittels AHM 800-R. Adaptiert nach [13] 29
2.11 Darstellung ausgewählter Verdichtungsverfahren. Adaptiert nach [5] 31
2.12 Darstellung einer dynamischen Walze mit einer Vibrationsbandage (links) und einer Oszillationsbandage (rechts) [38] 31
2.13 Betriebszustände einer Vibrationswalze [3] 32
2.14 Betriebszustände einer Oszillationswalze [36] 33
2.15 Schematische Darstellung einer Vibrationsplatte [27] 34
2.16 Komponenten des Leichten Fallgewichtsgeräts [4] 35
2.17 Arbeitsdiagramm einer dynamischen Walzenverdichtung. Adaptiert nach [6] . . . 37
2.18 Vibrationswalze mit der benötigten Ausstattung eines FDVK-Systems, gemessene Beschleunigungen während einer Verdichtungsfahrt und zwei Beispiele für den Verdichtungsfortschritt eines Feldes [4] 37

3.1 Fourieranalyse der Vertikalschwingungen der Vibrationsplatte. Adaptiert nach [11] 40
3.2 Mechanisches 2-Freiheitsgrad-Modell der Maschinen-Boden-Interaktion. Adaptiert nach [11] 40
3.3 Darstellung der ermittelten Schwingwege eines Plattenverdichters der AHM in Form von Orbitalbewegungen 42
a Schwingwege des Plattenverdichters der AHM einer Nullmessung [7] . . . 42
b Schwingwege des Plattenverdichters der AHM einer Messfahrt während dem Baustellenbetrieb [7] 42
3.4 Darstellung der im Zuge der Feldversuche ermittelten Schwingwege mit unterschiedlichen Zusatzmassen in Form von Orbitalbewegungen 42
a Schwingwege des Plattenverdichters mit einer Zusatzmasse von 120 kg während einer Verdichtungsfahrt [7] 42
b Schwingwege des Plattenverdichters mit einer Zusatzmasse von 670 kg während einer Verdichtungsfahrt [7] 42
3.5 Darstellung der Betriebszustände von Plattenverdichtern [48] 44

4.1 Befestigung des Plattenverdichters am Schild des Baggers 46

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub

4.2 Anordnung der Beschleunigungssensoren auf der Platte 47
4.3 Anordnung der Positionssensoren an der Unwucht 48
4.4 Schematische Darstellung der Messkette 49
4.5 Skizze der Anordnung der Spuren 50
4.6 Einbau des Tragschichtmaterials 50
4.7 Der Hydraulikbagger wird mit einer Seilwinde über das Versuchsfeld gezogen . . 52
4.8 Plattenverdichter während einer Messfahrt 52

5.1 Numerische Integration mittels Trapezregel [23] 54
5.2 Schematisch dargestellter Ablauf einer digitalen Filterung 55
5.3 Symboldarstellungen der vier Grundformen digitaler Filter mit den jeweiligen Grenzfrequenzen f_g 56
a Darstellung eines Tiefpassfilter 56
b Darstellung eines Hochpassfilter 56
c Darstellung eines Bandpassfilter 56
d Darstellung eines Bandsperrfilter 56

6.1 Ausrichtung des Koordinatensystems in Bezug zur Fahrtrichtung 59
6.2 Frequenzspektrum des Beschleunigungssignal des Sensors AP1 in z-Richtung von Messfahrt 01 61
6.3 Darstellung der Differenzen des mit unterschiedlichen Filtern gefilterten Beschleunigungssignals der Messfahrt 01 62
6.4 Vergleich der Konvergenzkriterien des Mittelwerts und der Umhüllenden. Darstellung für Sensor AP1 und Messfahrt 01 62
6.5 Darstellung der nach den zwei aufgestellten Konvergenzkriterien ermittelten Grenzfrequenzen jedes Sensors für alle Messfahrten 63
6.6 Ausschnitt eines Beschleunigungssignals, welches einmal mittels FIR- und einmal IIR-Tiefpassfilter gefilterten wird 64
6.7 Gegenüberstellung der ungefilterten Beschleunigungen $a_{z,0}$, der gefilterten Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des Sensors AP4 für Messfahrt 01 65

7.1 Darstellung des Verlaufs der Positionssignale und der ermittelten Sinusfunktion, welche den Verlauf der Unwucht beschreibt und durch die Positionssensoren definiert wird (Ausschnitt aus Messfahrt 01) 68
7.2 Gegenüberstellung der zusammengesetzten sinusähnlichen Funktion (Verlauf der Unwuchtumdrehung) aus Abschnitt 7.1.1 und der ermittelten Erregerkraft F_{err} für einen Ausschnitt aus Messfahrt 01 69
7.3 Frequenz- und Erregerkraftverläufe der Nullmessungen 70
7.4 Vergleich der Erregerkraftverläufe der Nullmessungen für einen Zeitausschnitt von 0,2 Sekunden 71
7.5 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1 bis AP4 und AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 03 72
7.6 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 03 73
7.7 Orbitalbewegung der verschiedenen Sensoren für Nullmessung 03 74
7.8 Vergleich der Schwingwege in y- und z-Richtung für Nullmessung 03 74

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

7.9 Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 03 ohne Reduktion der Erregerkraft . . . 76
7.10 Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 03 mit einem Reduktionsfaktor von $X_{F,err} = 0,75$ . . . 77
7.11 Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessungen 01 und 02 mit dem aus Nullmessung 03 bestimmten Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$ 77
a Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 01 mit $X_{F,err} = 0,75$ . . . 77
b Gegenüberstellung von Trägheitskraft und Erregerkraft für Nullmessung 02 mit $X_{F,err} = 0,75$ . . . 77
7.12 Gegenüberstellung von Trägheitskraft F_a und Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 02 mit dem in Nullmessung 03 bestimmten Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0,75$ . . . 78
7.13 Darstellung der Kompensation der Phasenverschiebung durch die Änderung der Gewichtung der Beschleunigungssignale der Sensoren AP1 und AP4 für Nullmessung 02. Gewichtung AP1 = 0,416, Gewichtung AP4 = 0,584, Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}75$ . . . 79
7.14 Schematische Darstellung der auf den Plattenverdichter wirkenden Kräfte . . . 81
7.15 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz und Anpresskraft von Messfahrt 01 . . . 82
7.16 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz und Anpresskraft von Messfahrt 04 . . . 83
7.17 Vergleich der Bodenkontaktkraft und deren Komponenten von Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft für eine unterschiedliche Gewichtung der Sensoren AP1 und AP4 mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ . . . 84
a Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,42 und AP4 = 0,58 . . . 84
b Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,45 und AP4 = 0,55 . . . 84
c Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,48 und AP4 = 0,52 . . . 84
d Kräfte und vertikaler Schwingweg für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft mit einem Reduktionsfaktor $X_{F,err} = 0{,}7$ und einer Gewichtung AP1 = 0,50 und AP4 = 0,50 . . . 84
7.18 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit niedriger Anpresskraft 85
7.19 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft . . . 86
7.20 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft . . . 86
7.21 Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft . . . 87
7.22 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft . . . 88

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

7.23 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit hoher Anpresskraft . 88
7.24 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 und des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft 89
7.25 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft 90
7.26 Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit hoher Anpresskraft 90
7.27 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft 91
7.28 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 01 mit Kennzeichnung des ausgewerteten Messausschnitts mit mittlerer Anpresskraft 92
7.29 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft 92
7.30 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft 93
7.31 Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft 94
7.32 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft 94
7.33 Ausschnitt der Verläufe von Frequenz f und Anpresskraft F_{an} für Messfahrt 04. Entspricht Abbildung 7.16 95
7.34 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z der Sensoren AP1, AP4, AR1 sowie des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ und der Erregerkraft F_{err} für Anpresskraft 04 im Bereich mit konstanter Anpresskraft 96
7.35 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ sowie der Erregerkraft F_{err} für Messfahrt 04 im Bereich mit konstanter, ungesteuerter Anpresskraft 96
7.36 Orbitalbewegung der verschiedenen Sensoren für Messfahrt 04 im Bereich mit konstanter Anpresskraft 97
7.37 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 04 bei ungesteuertem Betrieb und hohem Anpressdruck 98
7.38 Arbeitsdiagramme der vier analysierten Messausschnitte 99
a Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit niedriger Anpresskraft 99
b Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit hoher Anpresskraft 99
c Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit mittlerer Anpresskraft 99
d Arbeitsdiagramm der Messfahrt 04 mit hoher Anpresskraft 99

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

8.1 Darstellung der Phasenverschiebung aufgrund der Verschiebung der Schwerachse. Abgebildet sind die Trägheitskraft F_a und die Erregerkraft F_{err} für Nullmessung 02. Entspricht Abbildung 7.12 103
8.2 Gegenüberstellung der gemessenen Beschleunigungen a_z und der daraus integrierten Bewegungsgrößen, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z des virtuellen Sensors $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit niedriger Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.20 104
8.3 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.22 104
8.4 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.27 106
8.5 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 04 bei ungesteuertem Betrieb und hoher Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.37 107
8.6 Darstellung der Bodenkontaktkraft F_b und ihrer Komponenten, der Erregerkraft F_{err}, der statischen Last F_g und der Trägheitskraft F_a sowie des Schwingwegs u_z für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft. Entspricht Abbildung 7.32 108
8.7 Orbitalbewegung der Sensoren AP1, AP4 und $\mathrm{AP}_{\mathrm{mean}}$ für Messfahrt 01 im Bereich mit mittlerer Anpresskraft 109
8.8 Arbeitsdiagramme der vier analysierten Messausschnitte. Entspricht Abbildung 7.38 110
a Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit niedriger Anpresskraft 110
b Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit hoher Anpresskraft 110
c Arbeitsdiagramm der Messfahrt 01 mit mittlerer Anpresskraft 110
d Arbeitsdiagramm der Messfahrt 04 mit hoher Anpresskraft 110

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.

Tabellenverzeichnis

2.1 Verdichtungsanforderungen für den Einbau von Tragschichten für die Unterbauherstellung von bestehenden Eisenbahnstrecken nach RVS 08.03.01 [41] 21
2.2 Ausgewählte Instandhaltungsmaßnahmen für Gleiskörper [29] 22
2.3 Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren [5] 30
2.4 Technische Maschinendaten des Plattenverdichters WBB530 [51] 34

4.1 Ablauf der durchgeführten Messungen 51

7.1 Frequenz f und Erregerkraft F_{err} der Nullmessungen 70
7.2 Definition der verwendeten Variablen 75
7.3 Ermittelte Reduktionsfaktoren der Nullmessungen 78
7.4 Ermittelte Parameter zum Angleichen der Erregerkraft F_{err} an die Trägheitskraft F_a und zur Kompensation der Phasenverschiebung: Frequenz f, Gewichtung der Sensoren, geometrische Verschiebung der Schwerachse in Fahrtrichtung w_x, Reduktionsfaktor $X_{F,err}$ 80
7.5 Ergebnisse der Auswertung der Nullmessungen mit korrigierter Erregerkraft und kompensierter Phasenverschiebung. Dargestellt sind Frequenz f, Erregerkraft F_{err}, Beschleunigung a_z, Schwinggeschwindigkeit v_z und Schwingweg u_z 80
7.6 Übersicht über Zeitpunkt t, Frequenz f, Anpresskraft F_{an} und Betriebsart der analysierten Messausschnitte 82
7.7 Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei niedriger Anpresskraft . . . 87
7.8 Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei hoher Anpresskraft 89
7.9 Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 01 bei mittlerer Anpresskraft . . . 93
7.10 Ausgewertete Bewegungsgrößen für Messfahrt 04 bei konstanter, hoher Anpresskraft im ungesteuerten Betrieb 97

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der Nullmessungen 101
8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der Messfahrten 102

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 WIEN Bibliothek Your knowledge hub