



**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**

---

EIN E-LEARNING-KONZEPT ZUM FORSCHENDEN LERNEN  
AM BEISPIEL BAUDYNAMISCHER UNTERSUCHUNGEN

Vom Fachbereich 13 - Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von:  
Judith Christine Rösger, M.Eng.

**Referent:** Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange  
**Korreferent:** Prof. Dr. André Seyfarth  
**Korreferent:** Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kuhlmann

2. Auflage  
Darmstadt 2021

Rösgen, Judith Christine: Ein E-Learning-Konzept zum forschenden Lernen am Beispiel baulastdynamischer Untersuchungen

Dissertationsort: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Veröffentlichungsjahr der Dissertation auf TUpriints: 2022

Tag der mündlichen Prüfung: 26.02.2021

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Ausgangspunkt und Problemstellung . . . . .	1
1.1.1. Ausgangssituation für das Lehrkonzept . . . . .	1
1.1.2. Ausgangssituation für die ingenieurwissenschaftliche Fragestellung . . . . .	2
1.2. Zielsetzung, Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Theoretische Grundlagen zu E-Learning und virtuellen Forschungsumgebungen</b>	<b>7</b>
2.1. E-Learning . . . . .	7
2.1.1. Definitionen und Begriffe . . . . .	7
2.1.2. E-Learning-Tools . . . . .	10
2.2. Virtuelle Forschungsumgebungen . . . . .	14
<b>3. Theoretische Grundlagen zu fußgängerinduzierten Schwingungen</b>	<b>15</b>
3.1. Allgemeines . . . . .	15
3.2. Der menschliche Gang . . . . .	15
3.2.1. Gehen und Laufen . . . . .	15
3.2.2. Bodenreaktionskräfte . . . . .	19
3.2.3. Einfluss von Personengruppen . . . . .	23
3.3. Lastmodelle . . . . .	24
3.3.1. Allgemeines . . . . .	24
3.3.2. Lastmodelle für Gehen und Laufen mit einem harmonischen Anteil . . . . .	24
3.3.3. Lastmodelle für Gehen mit mehreren harmonischen Anteilen . . . . .	26
3.3.4. Lastmodelle für Laufen . . . . .	34
<b>4. Entwickeltes E-Learning-Konzept</b>	<b>39</b>
4.1. Rahmenbedingungen für die Erstellung des E-Learning-Konzeptes . . . . .	39
4.1.1. Anforderungen an das zu erstellende Konzept . . . . .	39
4.1.2. Lernziele der einzelnen Teilnahmemöglichkeiten . . . . .	40
4.1.3. Technische Rahmenbedingungen . . . . .	42
4.2. Beschreibung des E-Learning-Konzeptes . . . . .	42
4.2.1. Allgemeine Beschreibung . . . . .	42
4.2.2. Ablauf einer Projektarbeit . . . . .	44
4.2.3. Genutzte E-Learning-Tools . . . . .	45

<b>5. Überarbeitung des Lastansatzes</b>	<b>47</b>
5.1. Experimentelle Untersuchungen . . . . .	47
5.1.1. Untersuchungen des menschlichen Gangs auf starrem und schwingendem Untergrund . . . . .	47
5.1.2. Ziele der experimentellen Untersuchungen . . . . .	47
5.1.3. Verwendete Messtechnik . . . . .	48
5.1.4. Versuchsaufbauten und Messketten . . . . .	50
5.2. Überarbeitung des Lastansatzes für Gehen . . . . .	55
5.2.1. Aufbereitung der Messdaten und Vorgehensweise . . . . .	55
5.2.2. Vergleich der Messdaten mit Lastansätzen aus der Literatur . . . . .	56
5.2.3. Analyse der Messdaten . . . . .	62
5.2.4. Vergleich . . . . .	74
5.2.5. Berücksichtigung der Standardabweichung . . . . .	75
5.2.6. Ansatz von $\varphi_1$ in der VDI 2038 . . . . .	78
5.3. Überarbeitung des Lastansatzes für Laufen . . . . .	79
5.3.1. Vergleich der erfassten Messdaten mit Lastansätzen aus der Literatur . . . . .	79
5.3.2. Annäherung durch ein Halbsinus-Modell . . . . .	82
5.3.3. Annäherung durch einen Fourierreihe . . . . .	85
5.3.4. Vergleich der beiden Ansätze . . . . .	85
5.3.5. Berücksichtigung der Standardabweichung . . . . .	87
5.4. Betrachtung des Synchronisationsfaktors . . . . .	89
<b>6. Qualitätssicherung des E-Learning-Konzeptes</b>	<b>93</b>
6.1. Allgemeines . . . . .	93
6.2. Fachliche Qualitätssicherung der Projektarbeiten . . . . .	93
6.2.1. Vorgaben an die Arbeitsweise und Dokumentation . . . . .	93
6.2.2. Prüfung der inhaltlichen Qualität . . . . .	93
6.3. Qualitätssicherung der Wiki-Seiten . . . . .	94
6.3.1. Übersicht zur Qualitätssicherung der Wiki-Seiten . . . . .	94
6.3.2. Vorgaben an die Wiki-Seiten . . . . .	94
6.3.3. Review-Prozess . . . . .	96
<b>7. Theorie zur Bewertung des E-Learning-Konzeptes</b>	<b>97</b>
7.1. Ziele der Evaluation . . . . .	97
7.1.1. Untersuchte Aspekte . . . . .	97
7.2. Bedingungen . . . . .	97
7.2.1. Allgemeines . . . . .	97
7.2.2. Leistungsmotivation . . . . .	97
7.2.3. Interesse an Teilnahme bei Forschungsprojekten und gewünschten Bedingungen . . . . .	102
7.3. Verlaufsprozesse . . . . .	103
7.3.1. Allgemeines . . . . .	103
7.3.2. Entwicklung Wiki . . . . .	103
7.3.3. Beratung . . . . .	104
7.3.4. Projektfortschritt durch die einzelnen Arbeiten . . . . .	104
7.4. Akzeptanz und Wirkung . . . . .	104



<b>8. Evaluation</b>	<b>105</b>
8.1. Durchgeführte Projektarbeiten . . . . .	105
8.2. Bedingungen . . . . .	110
8.2.1. Leistungsmotivation . . . . .	110
8.2.2. Interesse an der Teilnahme bei Forschungsprojekten . . . . .	113
8.3. Verlaufsprozesse . . . . .	115
8.3.1. Entwicklung Wiki . . . . .	115
8.3.2. Beratung . . . . .	118
8.3.3. Projektfortschritt . . . . .	119
8.3.4. Anpassungen im Verlauf des Projektes . . . . .	119
8.4. Akzeptanz und Wirkung . . . . .	120
<b>9. Fazit</b>	<b>121</b>
9.1. Fazit zum E-Learning-Konzept . . . . .	121
9.2. Vorschlag zur Überarbeitung der VDI 2038 Blatt 1 . . . . .	122
<b>10. Ausblick</b>	<b>125</b>
10.1. Ausblick zum E-Learning-Konzept . . . . .	125
10.2. Ausblick zur ingenieurwissenschaftlichen Fragestellung . . . . .	125
<b>Literatur</b>	<b>127</b>
<b>A. Pläne der Brücke</b>	<b>131</b>
<b>B. Fragebogen zur persönlichen Motivation der Studierenden</b>	<b>135</b>
<b>C. Interviewleitfaden</b>	<b>139</b>
<b>D. Alphabetische Liste aller Wiki-Seiten</b>	<b>141</b>



# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangspunkt und Problemstellung

### 1.1.1. Ausgangssituation für das Lehrkonzept

Im Bauingenieurstudium an der Technischen Hochschule Köln können die Studierenden der Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau, neben Modulen zu Statik, Tragfähigkeitsnachweisen von Tragwerken aus verschiedenen Baustoffen und weiteren Modulen wie beispielsweise Brandschutz, sowohl im Bachelor- als auch im Masterstudium Projektmodule wählen, in denen sie das wissenschaftliche Arbeiten und die Nutzung von Messtechnik lernen und anwenden sollen. Hierfür können u.a. Module im *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* gewählt werden, welches an die Professur für Stahl- und Verbundbau gekoppelt ist. Im Labor ist Messtechnik zur Durchführung von Versuchen im Stahlbau und Schwingungsmesstechnik zur Durchführung von Versuchen im Bereich der Baudynamik vorhanden.

Um einen Einblick in den Umgang mit Messtechnik zu erhalten, stehen den Studierenden im Bachelorstudiengang ab dem sechsten Semester das Wahlpflichtmodul *Bauteile und Verbindungen im Stahlbau* sowie die Bachelorarbeit und im Masterstudiengang das Wahlpflichtmodul *Versuchsgestützte Bemessung*, das Pflichtmodul *Wissenschaftliches Projekt*, bei dem sich die Studierenden unter allen Professoren einen Betreuer und Thema auswählen können sowie ihre Masterthesis zur Verfügung.

Die Entscheidung, ob die Studierenden im Labor einen Einblick in Messtechnik und dazugehörige Forschungsfragen erhalten wollen, ist also grundsätzlich freiwillig.

Bisher wurden für die Studierenden in diesen Modulen oder bei Abschlussarbeiten kleine Forschungsfragen ausgewählt, welche dann im Rahmen der vorhandenen Workload bearbeitet werden konnten. Ein Zusammenfassen der Arbeiten zu einem größeren Forschungsprojekt wurde nicht realisiert.

Die Teilnehmerzahlen in den Wahlpflichtmodulen und die Anzahl der Abschlussarbeiten mit einer wissenschaftlichen Fragestellung blieben gering. Die Studierenden waren häufig unsicher, ob sich eine Arbeit mit experimentellen Anteilen in der für das Modul vorgesehenen Zeit realisieren lasse. Ein weiterer Kritikpunkt war, dass die Studierenden die Sinnhaftigkeit von kleinen Projekten in Frage stellten, da sie zwar den Umgang mit Messtechnik lernten, jedoch nicht das Gefühl hatten, etwas zu einer Forschungsfrage beigetragen zu haben.<sup>1</sup>

Um das Interesse an forschendem Arbeiten mit/und experimentellen Untersuchungen im Stahlbau und der Baudynamik zu stärken und den Studierenden bei der Wahl eines Wahlpflichtmoduls oder einer Abschlussarbeit in diesem Bereich ein Gefühl der Sicherheit im Bezug auf die Workload zu geben und um die Relevanz der Projektarbeiten zu stärken, ergaben sich mehrere Fragestellungen.

---

<sup>1</sup>Diese Informationen erhielt die Autorin in mehreren Gesprächen mit Studierenden in ihrer eigenen Studienzeit und als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

Unter Anderem:

1. Mit welchem Lehrkonzept wird es möglich, Studierende gut in Forschungsprojekte einzubinden?
2. Wie können die Projektergebnisse der einzelnen Arbeiten an nachfolgende Studierende verlustfrei weitergegeben werden?
3. Wie kann sichergestellt werden, dass die Workload der einzelnen Module eingehalten wird?
4. Welche Motivation haben die Studierenden, an einem solchen Projekt mitzuwirken?
5. Wie lässt sich eine gute Verknüpfung von Lehre und Forschung erreichen?

Diese und weitere Fragestellungen führten zur Entwicklung eines Lehrkonzeptes auf dem von der TH Köln genutzten Learning-Management-Systems *ILLIAS*. Das E-Learning-Konzept wurde im Hinblick auf Bedingungen, Verlaufsprozesse während der Projektarbeiten und Akzeptanz der Studierenden evaluiert, um so Schwachstellen zu identifizieren und zu beheben. Nach Entwicklung und Evaluation soll sich das Lehrkonzept auch auf andere Forschungsfragestellungen anwenden lassen und dadurch verstetigt werden.

### **1.1.2. Ausgangssituation für die ingenieurwissenschaftliche Fragestellung**

Zur Entwicklung und Erprobung des E-Learning-Konzeptes wurde eine Fragestellung aus dem Bereich der Baudynamik gewählt.

Die Betrachtung der dynamischen Belastung bei Fußgängerbrücken gewinnt in den letzten Jahren, aufgrund des Trends zu immer schlankeren und leichteren Bauweisen an Relevanz. Die Eigenfrequenzen von Fußgängerbrücken können leicht in den niedrigen Bereich der Schrittfrequenzen von Gehen und Laufen (Joggen oder Rennen) kommen, wodurch eine Anregung durch Fußgänger leichter erfolgt. Auch kann eine Fußgänger-Bauwerk-Interaktion, wie beispielsweise bei der Millenium Bridge in London im Jahre 2000 aufgetreten, die Folge sein. „*Auf Brücken darf nicht im Gleichschritt marschiert werden.*“ ist eine Vorschrift in der deutschen Straßenverkehrsordnung StVO §27 Abs. 6. Durch die Unterbrechung des Gleichschritts sollen Schäden durch große Schwingungen verhindert werden. Doch auch Einzelpersonen können große Schwingungsamplituden erzeugen, wenn die Erregerfrequenz und die Eigenfrequenz des Bauwerks nahezu identisch sind.

Um nun nachzuweisen, dass das Wohlbefinden von Fußgängern nicht durch zu große Schwingungen beeinträchtigt wird, muss die Schwingungsamplitude im Rahmen der Gebrauchstauglichkeitsnachweise bewertet werden. Zur Berechnung der auftretenden Lasten durch Fußgänger und damit zur Berechnung der daraus resultierenden Kräfte und Schwingungen stehen, neben einem Lastansatz in der VDI 2038 - Blatt 1 [1], in der Fachliteratur noch andere Vorgehensweisen und Lastansätze zur Verfügung. Jedoch weisen diese Ansätze und Last-Zeit-Verläufe zum Teil große Unterschiede untereinander und zu gemessenen Bodenreaktionskräften auf.

Daher soll das in der VDI 2038 - Blatt 1 [1] angegebene Lastmodell, welches Last-Zeit-Verläufe für die Bewegungsarten *Gehen, Laufen, Springen (Fitness), Treppensteigen, Tanzen, Springen/Wippen (Veranstaltungen), Applaudieren (mit und ohne Bestuhlung)* sowie *horizontales Schwingen* darstellen kann,

- mit Messdaten auf seine Genauigkeit überprüft werden,
- mit anderen Last-Zeit-Verläufen aus Literatur, Richtlinien und Normen verglichen werden,
- überarbeitet werden, um die entstehenden Kräfte realistischer abbilden zu können.

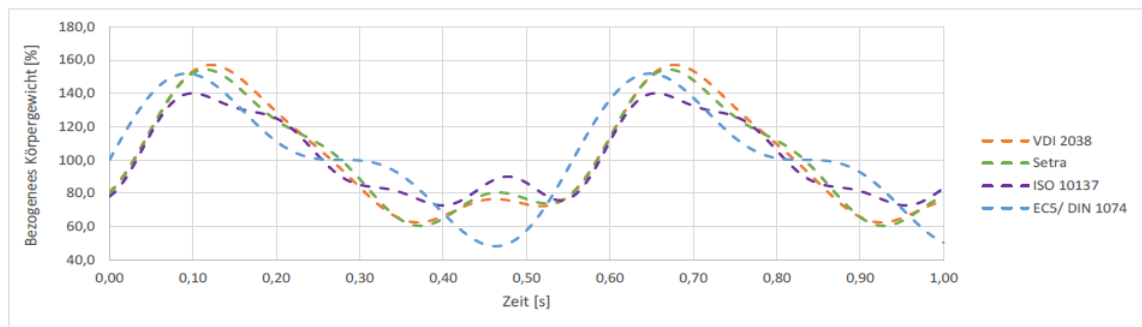


Abbildung 1.1.: Vergleich verschiedener Last-Zeit-Verläufe

Hierbei wird der Fokus der Arbeit auf den vertikalen Lasten aus den Bewegungsarten Gehen und Laufen liegen.

Des Weiteren wird in der VDI 2038 ein sogenannter Synchronisationsfaktor beschrieben, der den Einfluss von Personengruppen und Fußgängerströmen beschreibt. Auch der Ansatz dieses Beiwertes soll mit Modellen aus der Fachliteratur verglichen und mit Messdaten überprüft werden. Um Studierende in das Projekt einbinden zu können, teilt sich diese Forschungsfrage in mehrere Arbeitsblöcke, aus denen für die am Projekt teilnehmenden Studierenden Aufgabenstellungen generiert werden können.

- *Literaturrecherche*

- Recherche von relevanter Fachliteratur aus dem Bereich Bauingenieurwesen zu fußgängerinduzierten Schwingungen
- Recherche von anderen Richtlinien oder Normen zu fußgängerinduzierten Schwingungen sowie zur Bewertung von Schwingungen
- Recherche von Literatur zum Gehen und Laufen aus dem Bereich Sportmedizin und Biomechanik, insbesondere zu Bodenreaktionskräften

- *Durchführung von Versuchen*

- Versuche zur Ermittlung von Bodenreaktionskräften beim Gehen und Laufen verschiedener Probanden, hierbei sollen möglichst viele Personen und Frequenzen erfasst werden
- Versuche zum Synchronisationsfaktor mit unterschiedlichen Gruppengrößen
- Versuche zur Ermittlung der Unterschiede beim Gehen und Laufen je nach Untergrund (starr oder schwingend)

- *Auswertung*

- Vergleich der ermittelten Messwerte mit den recherchierten Grundlagen/Werten aus der Fachliteratur
- Anpassung des Lastansatzes

Hierbei sollen die Aufgabenstellungen immer so gestellt werden, dass sie für die Studierenden interessant sind. Eine Aufgabenstellung, die verlangt, dass eine Person im Rahmen einer Projektarbeit alle zugrundeliegende Literatur zum Thema Gehen und Laufen analysiert, würde bei einem Studierenden kaum Anklang finden und lässt sich auch mit den Vorgaben und Lernzielen der Module nicht vereinbaren, da dort der Fokus auf experimentellem Arbeiten liegt. Daher werden die Aufgabenstellungen immer Teile von verschiedenen Arbeitsblöcken erhalten, beispielsweise die Analyse von ein bis zwei Literaturquellen, die Durchführung von wenigen Messreihen und die anschließende Auswertung.

## 1.2. Zielsetzung, Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Für diese Arbeit ergeben sich Ziele in zwei unterschiedlichen Hauptthemen, der Didaktik und der Baudynamik. Neben der Erstellung, Analyse und Evaluation eines funktionsfähigen E-Learning-Konzeptes steht die Untersuchung und Überarbeitung eines Lastansatzes im Fokus. Hierbei ergeben sich für die beiden Schwerpunkte folgende detailliertere Zielsetzungen:

- Didaktik-Anteil:
  - Erarbeitung eines E-Learning-Konzeptes, welches eine gute Verknüpfung zwischen Lehre und Forschung erlaubt. Hierbei soll eine gute Übergabe der Projektergebnisse einzelner Gruppen an nachfolgende Studierende gewährleistet werden, um auf den Ergebnissen der vorangegangenen Gruppen weiter aufzubauen zu können.
  - Identifizierung von sinnvollen Kriterien zur Evaluation des Lehrkonzeptes.
  - Evaluation des Lehrkonzeptes nach den erarbeiteten Kriterien.
- Ingenieurwissenschaftlicher Anteil
  - Recherche verschiedener Last-Modelle in der Literatur aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen und Biomechanik/Sportmedizin.
  - Vergleich verschiedener Lastmodelle zu Gehen, Laufen und zum Einfluss von Personengruppen.
  - Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Auswertung der Bodenreaktionskräfte und der für Gehen und Rennen relevanten Parameter.
  - Analyse der Messdaten, um einen Lastansatz zu generieren, der die Bodenreaktionskräfte realitätsnäher als bisher abbildet.
  - Formulieren eines Überarbeitungsvorschlages für den Lastansatz zu fußgängerinduzierten Lasten in der VDI 2038-Blatt 1.

Für die Bearbeitung der Fragestellungen ist eine interdisziplinäre Herangehensweise notwendig. Im Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Fragestellung ist, neben der Baudynamik selbst, eine Betrachtung von biomechanischen Abläufen erforderlich, die die auf das Bauwerk wirkenden Kräfte erzeugen. Zu Beginn dieser Arbeit sollen in **Kapitel 2** die Grundlagen zu E-Learning und virtuellen Forschungsumgebungen erläutert werden. Da für die Entwicklung eines Lehrkonzeptes verschiedene Tools zu Verfügung stehen, die alle unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich bringen, wird hier die Basis für die Entwicklung des E-Learning-Konzeptes erläutert. Außerdem sind die Definitionen im Bereich E-Learning je nach Quelle anders belegt, daher soll hier klargestellt werden, auf welche Definition sich bei der Verwendung der typischen Begriffe bezogen wird. In **Kapitel 3** werden theoretische Grundlagen zu Gehen und Laufen sowie Lastmodelle zu fußgängerinduzierten Lasten vorgestellt und verglichen. Hier werden zuerst die Bewegungsabläufe für Gehen und Rennen erläutert, um die Entstehung der Bodenreaktionskräfte nachvollziehen zu können. In **Kapitel 4** werden zuerst die Anforderungen und Rahmenbedingungen für das zu erstellende Lehrkonzept thematisiert und anschließend eine Beschreibung des Konzeptes dargelegt. Das **Kapitel 5** beschreibt die durchgeführten experimentellen Untersuchungen, Auswertungen der Messdaten und Vergleiche der Ergebnisse mit bisherigen Lastmodellen. Anschließend wird ein Vorschlag zur Überarbeitung des Lastansatzes beschrieben. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den studentischen Projektarbeiten und aus eigenen Untersuchungen der Autorin zusammengeführt. Anschließend wird in **Kapitel 6** dargelegt, wie sichergestellt wurde, dass die Arbeiten und Ergebnisse aus Projektarbeiten von Studierenden für nachfolgende Arbeiten genutzt werden konnten und welche Vorgaben an die Arbeitsweise und Dokumentation sowie die Wiki-Seiten gestellt wurden. In **Kapitel 7** wurde Grundlagen zur Evaluation von Lehrkonzepten, eine Gliederung der zu evaluierenden Punkte in die Kategorien *Bedingungen*, *Verlaufsprozesse* und

*Akzeptanz und Wirkung* vorgenommen. Anschließend werden die durch die Interviews und Fragebögen gewonnenen Erkenntnisse in **Kapitel 8** analysiert und präsentiert. Abschließend wird in **Kapitel 9** zu beiden Schwerpunktthemen ein Fazit gezogen und in **Kapitel 10** ein Ausblick gegeben.





## 2. Theoretische Grundlagen zu E-Learning und virtuellen Forschungsumgebungen

### 2.1. E-Learning

#### 2.1.1. Definitionen und Begriffe

Der Begriff *E-Learning* weist kontextabhängig verschiedene Definitionsmöglichkeiten auf. Da auch weitere verwendete Begriffe, wie zum Beispiel E-Teaching, E-Assessment, E-Didaktik oder E-Education, je nach Literaturquelle eine synonyme oder sogar widersprüchliche Definition aufweisen, werden die unterschiedlichen Definitionen zu den wichtigsten Begriffen nachfolgend erläutert, um die Nutzung in der nachfolgenden Arbeit korrekt einordnen zu können.

##### 2.1.1.1. E-Learning

*E-Learning* stellt den zentralen Begriff in dieser didaktischen Ausrichtung dar. Jedoch ist die Definition nicht eindeutig und weist eine große Bandbreite an Einordnungen auf. Je nach Quelle kann mit E-Learning entweder die Nutzung eines bestimmten Tools, oder aber ein Konzept, in dessen Bearbeitung und Erstellung irgendwo elektronische Geräte oder Medien involviert sind, gemeint sein. Nach der Definition von Kerres [2, S. 6] ist E-Learning ein Oberbegriff für die Nutzung von digitaler Technik in der Lehre:

„E-Learning ist ein Oberbegriff für alle Varianten der Nutzung digitaler Medien zu Lehr- und Lernzwecken, die über einen Datenträger oder über das Internet bereitgestellt werden, etwa um Wissen zu vermitteln, für den zwischenmenschlichen Austausch oder das gemeinsame Arbeiten an Artefakten.“ Kerres, S.6

Diese Auffassung bedeutet, dass auch eine Vorlesung, bestehend aus Frontalunterricht, unterstützt mit einer PowerPoint-Präsentation, ein digitales Lernszenario darstellen kann. Denn durch die Nutzung eines Laptop oder Desktop-PC zur Erstellung der Präsentation und durch die Nutzung eines Beamers, sind digitale Techniken für Lehrzwecke verwendet worden. Diese Definition ist also sehr allgemein gehalten und spiegelt nicht die Art eines E-Learning-Konzeptes wieder, die hier entwickelt werden soll.

Fischer [3, vgl. S. 32] stellt klar, dass der Begriff E-Learning kontrovers diskutiert wird und die einzige Gemeinsamkeit vieler Definitionen sei, dass E-Learning eine Verschmelzung zwischen Bildungsprozessen und digitalen Technologien sei. Durch ständige Nutzung und Kreation weiterer Wortschöpfungen, wie E-Education, E-Teaching, E-Portfolio, etc. sei die definitorische Unschärfe weiter erhöht worden. Fischer selbst nutzt die Definition:

„Unter E-Learning werden alle Arten und Formen des Lehrens und Lernens verstanden, die beim Gestalten, Organisieren und Realisieren der Prozessabläufe digitale Technologien einsetzen.“ Fischer, S.33

Diese Definition ist schon etwas spezifischer als die sehr weit gefasste Definition von Kerres. Auch Dittler [4], Arnold et al. [5] und weitere Autoren stellen jeweils eine Definition auf. Da dies aber nicht Kern dieser Arbeit werden soll, wird nur noch auf die Definition von Handke [6] eingegangen und diese als Grundlage für die weitere Arbeit genutzt. Solche weit gefassten Definitionen, wie von Fischer oder Kerres, kritisiert Handke [6] und setzt eine Definition entgegen, die sich auf die Frage

„Mit welchen digitalen Materialien und unter welchen Rahmenbedingungen ist eine effiziente computergestützte Inhaltserschließung möglich?“ Handke und Schäfer, S.37

bezieht. Handke legt verschiedene Basiskriterien fest und unterscheidet danach die E-Learning-Szenarien vom Typ I bis Typ III. Als Kriterien legt er hierbei

- a. die Nutzung von Internet als Distributionsmedium
- b. die Nutzung einer Plattform als Benutzerverwaltung
- c. die Bereitstellung interaktiver Inhalte

fest (vgl. [6, S. 57 - 59])

Die Zuordnung zu den Lernszenarien erfolgt dabei nach folgender Tabelle:

Tabelle 2.1.: E-Learning-Taxonomie nach Handke [6]

Lernszenario	Nutzung des Internets	Nutzung einer Plattform	interaktive Inhalte	Beispiele
E-Learning Typ I	+	-	-	Skripte, Texte im Internet, Linksammlungen
E-Learning Typ II	+	+	-	Skripte, Texte über LMS, kollaborative Erstellung von Inhalten
E-Learning Typ III	+	+	+	Lehrvideos, multimediale Inhalte

Durch die Nutzung des Internets in allen drei Typen finde ein räumlich ungebundener Zugriff auf die Inhalte statt. Nur die Nutzung des Internets über Links und Bereitstellung von Skripten in die Lehre einzubeziehen, wird nach Handke in die schwächste Kategorie E-Learning-Typ I eingeordnet. Wenn noch eine zusätzliche Nutzung von kollaborativen und kommunikativen Elementen über ein LMS hinzukommt, wird das Szenario in Kategorie II eingeordnet. Bei Typ III spricht Handke von „Virtuellem Lernen in Reinform“ und definiert dies so, dass der Lernende die Inhaltserschließung eigenverantwortlich vornimmt. Nach dieser Definition von Handke erfüllt das hier zu entwickelnde E-Learning-Konzept die Kriterien vom Typ III. Neben der Bereitstellung von Texten und Links und dem kollaborativen Arbeiten an einem Forschungsprojekt, sollen Videos und multimediale Inhalte die Thematik erläutern und den Studierenden so einen leichten Zugang zum Thema ermöglichen.

### 2.1.1.2. Forschendes Lernen

Bei Forschungsprojekten von Studierenden stößt man unweigerlich auf die Theorie zum forschenden Lernen nach Huber [7]. Huber beschreibt forschendes Lernen als hochschuldidaktisches Prinzip und zielt auf die Beteiligung von Studierenden am wissenschaftlichen Prozess. Forschendes Lernen zeichne sich dadurch aus, dass die Studierenden den Prozess eines Forschungsvorhabens in seinen wesentlichen Phasen mitgestalten und daran teilhaben [8]. Er beschreibt den Forschungsprozess als Kreislauf, bestehend aus acht Phasen.

1. Wahrnehmung des Ausgangsproblems
2. Aufstellen der Thesen bzw. Formulieren einer Fragestellung
3. Recherche von Informationen
4. Auswahl von Methoden
5. Entwickeln eines Forschungsdesigns
6. Durchführen der forschenden Tätigkeit
7. Zusammenfassen und Präsentieren der Ergebnisse
8. Reflexion des Prozesses

Um ein Projekt im Stile des forschenden Lernens durchzuführen, erweisen sich laut Huber die Fähigkeit, Probleme zu definieren, die Fähigkeit, Lösungsschritte zu planen und Ausdauer als besonders wichtig.

Während laut Huber alle Phasen des Forschungsprozesses durchlaufen werden sollen, gehört beispielsweise für Reinmann [9] auch das Nachvollziehen eines Forschungsprozesses zum forschenden Lernen. Ruess et al. [10] ordnen forschungsbezogene Lehrelemente in eine Matrix je nach inhaltlichem Schwerpunkt und Aktivitätsniveau der Studierenden ein. Hierbei unterscheiden sie verschiedene Gruppen.

		Inhaltlicher Schwerpunkt		
		Forschungsergebnisse	Forschungsmethoden	Forschungsprozess
Aktivitätsniveau der Studierenden	forschend	... arbeiten selbständig Literatur zu einem Forschungsfeld auf	... wenden vorgegebene Methoden anhand einer Forschungsfrage an	... verfolgen eine Forschungsfrage und durchlaufen dabei den gesamten Forschungsprozess
	anwendend	... diskutieren Forschungsergebnisse	... diskutieren Vor- und Nachteile von Methoden	... diskutieren Forschungsvorhaben
			... üben Methoden	... üben die Planung von Forschungsvorhaben
rezeptiv		... bekommen Forschungsergebnisse vermittelt	... bekommen Forschungsmethoden vermittelt	... bekommen den Forschungsprozess vermittelt
				... bekommen Techniken wiss. Arbeitens vermittelt

Abbildung 2.1.: Klassifizierungsmatrix von Ruess et al. aus [10, S. 35]

All diese Lehrelemente (siehe Abbildung 2.1) zählen nach Ruess et al. zum forschenden Lernen, jedoch ist das Aktivitätsniveau der Studierenden jeweils unterschiedlich. Bei der Konzeption des Lehrkonzeptes muss sich vorher entschieden werden, welches Aktivitätsniveau der Studierende erreichen soll und dementsprechend kann der Lehrstoff aufbereitet werden. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, teilen Jenkins und Healey [11] den Grad der Forschungsorientierung auch nach der Aktivität der Studierenden ein. Sowohl im *research-tutored*- als auch im *research-based*-Teaching nehmen die Studierenden einen aktiven Part ein. Im *research-led*- und *research-oriented*-Teaching erlernen die Studierenden durch die vorgestellten Lehrinhalte Fachwissen im Bereich des Forschungsgebietes.

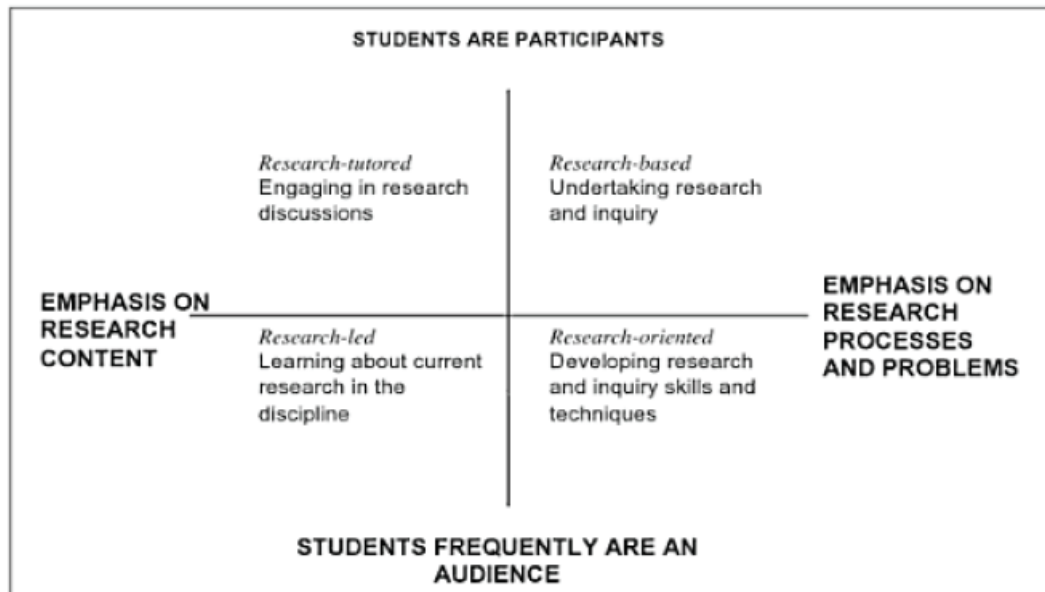


Abbildung 2.2.: Grad der Forschungsorientierung nach Jenkins und Healey [11, S. 38]

## 2.1.2. E-Learning-Tools

### 2.1.2.1. Allgemeines

Es gibt eine Vielzahl an E-Learning-Tools mit unterschiedlichen Verwendungszwecken. Angefangen bei Lernprogrammen, beispielsweise zum Erlernen von Sprachen, Tools zum kollaborativen Erstellen von Textdateien, Videoplattformen, Foren zur Diskussion von Inhalten bis hin zu Videos zur Vermittlung von Lehrinhalten.

Für die Hochschullehre sind Learning Management Systeme, kurz *LMS* oder Lernplattformen, ein zentraler Bestandteil. Die bekanntesten Systeme sind *Moodle* und *ILIAS*. In den LMS werden viele E-Learning-Tools bereit gestellt, außerdem ist eine Nutzerverwaltung und Zugriffsbeschränkung möglich. Da die Erläuterung der Vielzahl an E-Learning-Tools den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird der Fokus auf die Erläuterung der einzelnen Tools aus dem LMS *ILIAS* gelegt. Abbildung 2.3 zeigt die Auswahl der in *ILIAS* verfügbaren Tools. Neben Organisations-tools, Tools zum Bereitstellen von Materialien sowie Kommunikations- und Kollaborationstools bietet *ILIAS* auch Lernmodule und Online-Tests an.

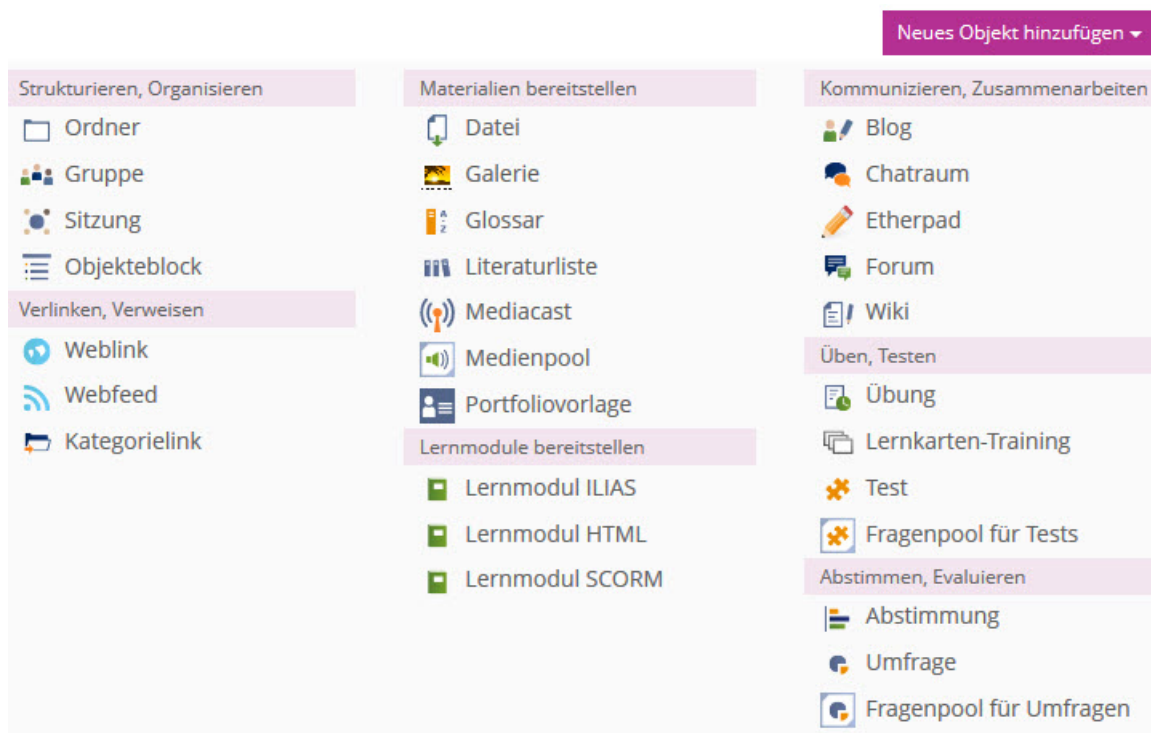


Abbildung 2.3.: Lehr- und Organisationstools in ILIAS

#### 2.1.2.2. Wiki

Wikis zählen zu Kollaborationstools und sind Webseiten, deren Inhalte von den Besuchern editiert werden können. Sie ermöglichen so, kollaborativ Inhalte bereitzustellen und zu bearbeiten. Die Struktur des Wikis wird durch die Beteiligten entwickelt, da die Seiten über Hyperlinks miteinander verbunden sind. Bremer [12] unterteilt die Anwendungsszenarien von Wikis in der Hochschullehre in vorlesungsbegleitenden Wiki-Einsatz, kollaborative Textproduktion und die Nutzung öffentlicher Wikis. Bei der vorlesungsbegleitenden Wiki-Nutzung würden beispielsweise Studierende gebeten, über Vorlesungsinhalte Wiki-Seiten zu erstellen. Wenn Studierende kollaborativ Texte erstellen sollen, wird davon ausgegangen, dass sie ein tieferes Verständnis für die Inhalte entwickeln.

Merle [13] beschreibt in seiner Dissertation den Einsatz von Wikis im Rahmen einer Stahlbau-Lehrveranstaltung. Er teilt die grundlegenden Eigenschaften eines Wikis in *Inhaltsgenerierung*, *Versionierung*, *Benutzer- und Rechteverwaltung* sowie die *Strukturbildung durch Vernetzungsprozesse* ein.

Während die Generierung und auch das Konsumieren von Inhalten über einen Webbrowser in einem Wiki eine der offensichtlichsten Funktionen ist, stellt die Versionierung einer jeden Wiki-Seite eine weitere Eigenschaft dar. So ist es möglich, jede Änderung einer Seite nachzuvollziehen und, sofern notwendig, ältere Versionen wiederherzustellen. Durch die Rechteverwaltung wird von einem administrativen Nutzer festgelegt, wer welche Funktionen des Wikis nutzen kann. Merle beschreibt die Aufteilung der Nutzer und Rechte so, wie sie in der Wiki Software Media-Wiki eingeteilt werden. Die hier relevanten Nutzer und Rechte aus Ilias teilen sich wie folgt ein:

Tabelle 2.2.: Nutzergruppen und Einstellung der Rechte im ILIAS-Kurs für Wiki-Module

	<b>Kursadministrator</b>	<b>Kurstutor</b>	<b>Kursmitglied</b>
Wiki im Kurs erzeugen	ja	nein	nein
Anzeigen: Wiki ist sichtbar	ja	ja	ja
Lesezugriff: Wiki-Inhalte lesen	ja	ja	ja
Statistiken einsehen	ja	ja	nein
Seitenmetadaten bearbeiten	ja	ja	nein
Navigation bearbeiten	ja	ja	nein
Schreibschutz für einzelne Wikiseiten aktivieren	ja	ja	nein
Wiki nach HTML exportieren	ja	nein	nein
Wikiseiten löschen	ja	nein	nein
Wiki kopieren	ja	ja	nein
Einstellungen des Wikis bearbeiten	ja	nein	nein
Wiki löschen oder verschieben	ja	nein	nein
Rechteinstellungen ändern	ja	nein	nein

Der Ersteller des ILIAS-Kurses nimmt dabei automatisch die Rolle eines Administrators ein. Studierende, die dem Kurs beitreten, sind Kursmitglieder. Der Administrator kann die Rolle eines jeden Nutzers jedoch anpassen und auch die Rechteinstellungen der Nutzergruppen anpassen. In dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept wurden die Rollen wie in Tabelle 2.2 dargestellt festgelegt. Die Studierenden sollten alle Wiki-typischen Funktionen, wie das Lesen, Erstellen und Bearbeiten von Wikiseiten nutzen können, jedoch eine Auswertung von Statistiken, der Vergleich verschiedener Seitenversionen und beispielsweise auch das Erstellen von Metadatensätzen sollten lediglich beim Kursadministrator verbleiben. Die Rolle des Kurstutors wird für unterstützende Personen, beispielsweise studentische Hilfskräfte, genutzt.

Der Aspekt der Hypertextstrukturbildung stellt laut Merle [13] neben dem einfachen Erzeugen von Inhalten ein wesentliches Merkmal des Wiki-Prinzips dar. Auf einer bereits existierenden Wiki-Seite wird, durch Nutzung des je nach Software unterschiedlichen Codes, eine neue Seite verlinkt. Bei Anwählen dieses Links wird die neue Seite erstellt und kann mit Inhalten gefüllt werden. Dadurch entsteht eine automatische Vernetzung der Wikiseiten. Diese Vernetzung sorgt für eine nichtlineare Struktur.

### 2.1.2.3. Glossar

Ein Glossar ist ein Wörterverzeichnis mit beigefügten Erklärungen und dient zur Bereitstellung von Informationen. Die Studierenden können Glossare nutzen, um Definitionen von Begriffen nachzuschlagen und sich somit auf einen einheitlichen Wissensstand zu bringen.

### 2.1.2.4. Lernmodul

Lernmodule sind Tools, mit denen Web-Based-Trainings erzeugt werden können. Lernmodule sind in Kapitel mit einzelnen Seiten gegliedert und ähneln vom Aufbau einem klassischen Skript. Der Autor des Lernmoduls kann jedoch, im Gegensatz zu einem klassischen Skript in Papierform, interaktive Elemente wie beispielsweise Fragen, die beantwortet werden müssen, um eine Seite umzublättern, oder Videos einfügen.

### 2.1.2.5. Bilder und Videos

Bilder finden auch jenseits von E-Learning in Printmedien Verwendung und dienen zur Veranschaulichung verschiedener Sachverhalte. Ein Vorteil von E-Learning-Tools im Vergleich zu

Printmedien ist der Einsatz von Videos. Lehrvideos vermitteln Lehrinhalte und können verschieden aufgebaut sein. Studierenden können so abgefilmte Lehrveranstaltungen angeboten werden oder es werden eigens für das Video Inhalte aufbereitet.

#### **2.1.2.6. Organisationstools**

Organisationstools sind sehr vielfältig, und viele Kommunikationstools werden auch zu Organisationszwecken genutzt. Ein Beispiel für ein Organisationstool ist die Website *trello.com*. Studierende können sich hier anmelden und über Boards und Listen Aufgaben aufteilen und organisieren. Für kleine Projektgruppen ist aber eine Absprache über ein Kommunikationstool meist effektiver.

#### **2.1.2.7. Tools zum kollaborativen Arbeiten**

Neben Wikis als Tools zum kollaborativen Erstellen von Inhalten sind auch google-docs, onlyoffice in Sciebo oder das in ILIAS vorhandene Etherpad Möglichkeiten, mit denen Studierende zeitgleich an Dokumenten arbeiten können. Wenn mehrere Personen zeitgleich an einem Dokument arbeiten, sehen die anderen Teilnehmer live die vorgenommenen Änderungen und den Cursor der Mitautoren. Bei google-docs und onlyoffice besteht außerdem auch die Möglichkeit, in einem Chat mit den anderen Autoren in Kontakt zu treten.

#### **2.1.2.8. Kommunikationstools**

In ILIAS besteht die Möglichkeit, den Studierenden zu Kommunikationszwecken Chats und Foren freizuschalten. Die meisten Studierenden nutzen jedoch lieber private Kommunikationswege und Messengerprogramme wie WhatsApp oder threema, um sich zu organisieren und abzusprechen.

#### **2.1.2.9. Cloud-Umgebungen**

Cloud-Umgebungen und Filehosting-Anbieter wie Dropbox, Sciebo oder die Hessenbox ermöglichen einen einfachen Datenaustausch der Studierenden untereinander und auch mit den Projektbetreuern.

## 2.2. Virtuelle Forschungsumgebungen

Virtuelle Forschungsumgebungen (kurz VFU) sind Arbeitsplattformen im Internet, die es erlauben, dass Forscher und Forscherinnen an verschiedenen Standorten zusammen an einem Projekt arbeiten und Daten und Ergebnisse miteinander teilen. Kindling [14] nennt die Begriffe *e-Science*, *e-Research* oder auch *Cyberscience* gleichbedeutend dazu.

Eine virtuelle Forschungsumgebung soll zur Vernetzung verschiedener Forschergruppen beitragen und die Effizienz in der Gewinnung und Auswertung von Daten steigern. [15] Das Soziologische Forschungsinstitut Göttingen [16] schreibt, virtuelle Forschungsumgebungen seien eine Arbeitsplattform, die zeitlich und räumlich unabhängiges kollaboratives Arbeiten verschiedener Gruppen ermöglichen.

VFUs können als Tools Wikis und Foren als Kommunikationstools enthalten. Datenbanken zum Austauschen von Messdaten können ebenfalls in virtuellen Forschungsumgebungen eingesetzt werden.

Im Rahmen des entwickelten E-Learning-Konzeptes bedeutet dies, dass das Wiki, neben seiner inhaltsvermittelnden Funktion auch die einer virtuellen Forschungsumgebung inne hat. Die Studierenden sollen über mehrere Semester in Forschungsgruppen an einem Projekt arbeiten und so ihre Daten und Ergebnisse austauschen können.

Die in diesem Kapitel dargestellten Definitionen von E-Learning, die Beschreibung verschiedener E-Learning-Tools und die Definition von virtuellen Forschungsumgebungen zeigen, dass bei der Entwicklung eines E-Learning-Konzeptes verschiedene Punkte beachtet werden müssen. Insbesondere ist es relevant vorab zu klären, welche Lernziele die Studierenden erreichen sollen und welche Methoden und Tools dazu beitragen können.



## 3. Theoretische Grundlagen zu fußgängerinduzierten Schwingungen

### 3.1. Allgemeines

Fußgängerinduzierte Lasten beschreiben Kräfte, die von Personen in einen Untergrund eingeleitet werden. Hierbei können Kräfte aus unterschiedlichen Bewegungsformen entstehen. Neben den Lasten aus *Gehen* und *Laufen* (auch als *Rennen* bezeichnet), können damit Lasten aus *Tanzen*, *Springen*, *Wippen* oder auch sportliche Tätigkeiten gemeint sein. Bezogen auf ein Bauwerk, wie beispielsweise eine Fußgängerbrücke, ändert sich nicht nur die Größe der Last über die Zeit, sondern auch der Belastungsort. Bei Annahme einer gleichbleibenden, sich wiederholenden Bewegung können die Lasten als periodische Lasten dargestellt werden.

### 3.2. Der menschliche Gang

#### 3.2.1. Gehen und Laufen

Gehen ist die wichtigste und eine elementare Fortbewegungsart des Menschen. Durch ein sich wiederholendes Bewegungsmuster, den Schritt, bewegt der Mensch sich fort und dadurch werden Kräfte auf den Untergrund übertragen.

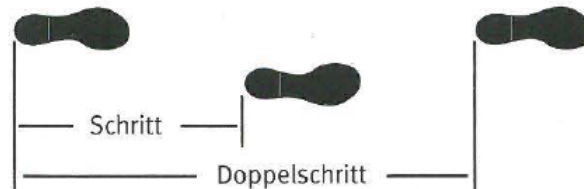


Abbildung 3.1.: Abbildung 1.3 aus [17]: Schritt und Doppelschritt

Ein Schritt, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, bezeichnet das Zeitintervall zwischen dem initialen Bodenkontakt des einen und des anderen Fußes. Mit dem Begriff Gangzyklus wird ein Doppelschritt beschrieben, und meint somit das Intervall, bis wieder das gleiche Bein wie zu Beginn als Standbein fungiert. Zugehörig zu den Begriffen Schritt und Doppelschritt sind die Schritt- und Doppelschrittlänge.

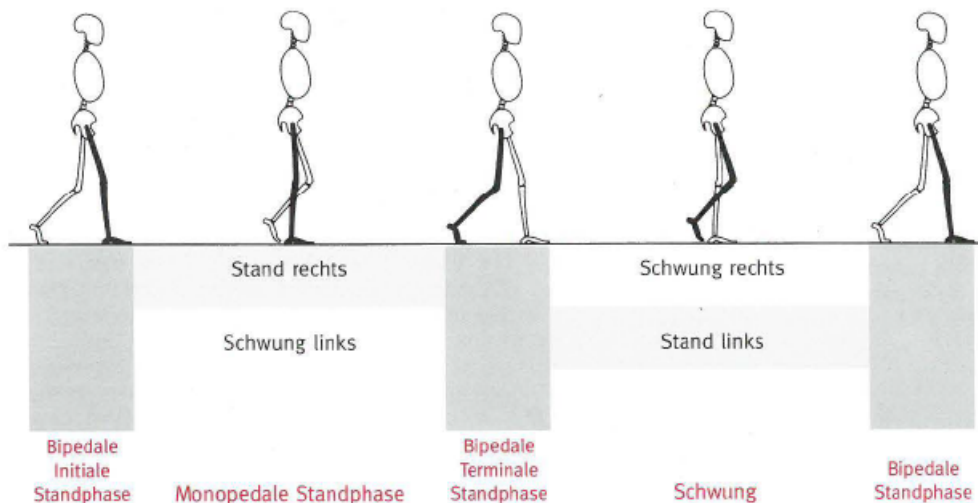


Abbildung 3.2.: Einteilung des Gangzyklus aus Perry [17]

Generell ist jeder Schritt unterteilt in eine Stand- und eine Schwungphase. In einer Standphase hat der Fuß Bodenkontakt, hier wird also der Zeitraum vom initialen Bodenkontakt bis zum Abheben des Fußes bezeichnet. In der Schwungphase schwingt das entsprechende Bein nach vorne, um eine Vorwärtsbewegung zu erzeugen.

Perry und Oster [17, S. 2] teilen die einzelnen Phasen eines Doppelschritts nach Abbildung 3.2 ein. Hierbei zeigen die grauen Blöcke jeweils die Zweibeinstandphasen auf. Begonnen wird eine Schrittfolge mit der *bipedalen initialen Zweibeinstandphase*. Sobald der andere Fuß zum nach vorne Schwingen abgehoben wird, befindet sich das Standbein in der monopedalen Standphase. Hier ruht die gesamte Körperlast auf dem Standbein. Sobald der Bodenkontakt des kontralateralen Fußes beginnt, beginnt auch die terminale bipedale Standphase. Diese Phase dauert so lange, bis das ursprüngliche Standbein vom Boden abgehoben wird um nach vorne zu Schwingen (Schwungphase).

Tab. 1.2: Gliederung des Gangzyklus

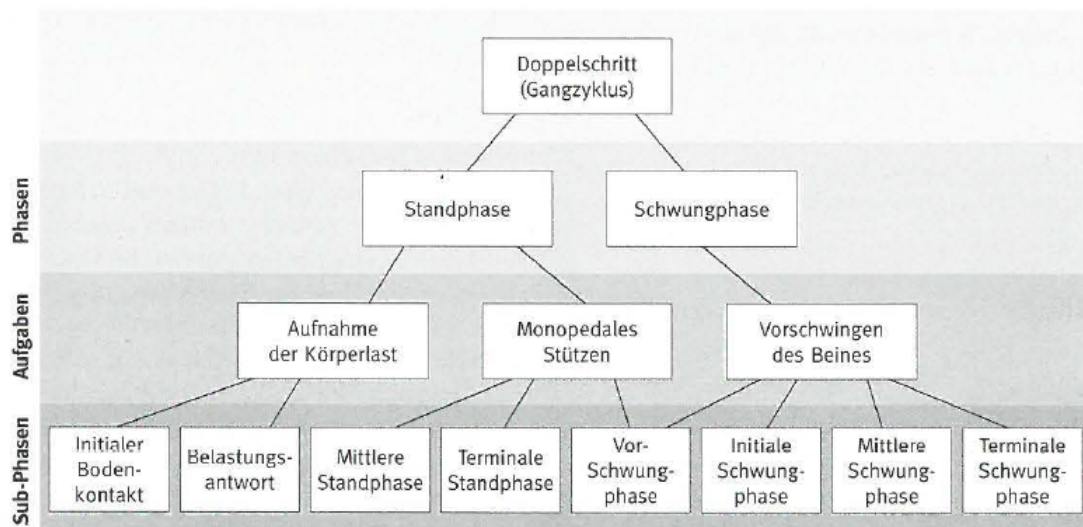


Abbildung 3.3.: Gliederung des Gangzyklus aus Perry [17]

Wie in Abbildung 3.3 aus Perry [17] zu sehen, lassen sich die Stand- und Schwungphase noch in Aufgaben und diese in Sub-Phasen unterteilen. Die Einteilung in die Sub-Phasen und deren Aufgaben hilft, die dadurch entstehenden Bodenreaktionskräfte nachvollziehen zu können. Die Standphase macht rund 60 Prozent des Gangzyklus aus. Sie beginnt mit dem initialen Bodenkontakt, sobald der vordere Fuß auf dem Boden aufsetzt. Anschließend wird die Last auf das vordere Bein übertragen und es erfolgt ein Abrollen über die Ferse (Belastungsantwort). Im Zuge der mittleren Standphase schwingt das kontralaterale Bein nach vorne und es kommt zu einer Vorwärtsbewegung über den lastabtragenden Fuß hinweg. Das Bein wird durch Abrollen über den Vorderfuß nach vorne bewegt. Mit Anheben der Ferse beginnt die terminale Standphase des kontralateralen Beines und es wird die Vor-Schwungphase eingeleitet. In der initialen Schwungphase hebt der Fuß vom Boden ab, um in der mittleren Schwungphase ein Vorschwingen des Beines zu ermöglichen. Mit der terminalen Schwungphase endet das Vorschwingen des Beines und es erfolgt die Vorbereitung für die nächste Standphase. Charakteristisch für das Gehen ist eine bipedale Standphase. Diese lässt sich mit etwas 20 Prozent des Gangzyklus beziffern [17]. Kramers-de Quervain et al. [18] beschreiben ähnliche Werte für die Aufteilung der einzelnen Gangphasen (vgl. Abbildung 3.4).

Erste Zweibeinstandphase (engl. double limb stance, loading response, weight acceptance)	ca. 12%
Einbeinstandphase (engl. single limb stance)	ca. 38%
Zweite Zweibeinstandphase (engl. pre-swing, weight release)	ca. 12%
Schwungphase (engl. swing)	ca. 38%

Abbildung 3.4.: Tabelle 3 aus [18]: Gangphasen und prozentuale Verteilung

Auch die tabellarische Zusammenstellung von Rose et al. [19], hier abgebildet in Abbildung 3.5, zeigt diese Verteilung.

TABLE 3-2 Gait Cycle: Periods and Functions			
Period	% Cycle	Function	Contralateral Limb
1. Initial double limb support	0–12%	Loading, weight transfer	Unloading and preparing for swing (preswing)
2. Single limb support	12–50	Support of entire body weight; center of mass moving forward	Swing
3. Second double limb support	50–62	Unloading and preparing for swing (preswing)	Loading, weight transfer
4. Initial swing	62–75	Foot clearance	Single limb support
5. Mid swing	75–85	Limb advances in front of body	Single limb support
6. Terminal swing	85–100	Limb deceleration, preparation for weight transfer	Single limb support

Abbildung 3.5.: Table 3.2 aus [19]

Hier zeigt sich schon, dass in der Fachliteratur aus dem Bereich der human-anatomischen Bewegungslehre weitgehend eine Deckungsgleichheit bezüglich der Parameter zu Gehen (und auch zu Laufen) herrscht. In der Fachliteratur aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen finden sich jedoch wesentlich größere Bereiche und Abweichungen.

Die wichtigsten Parameter, die neben dem Gewicht das *Gehen* beschreiben, sind die Schrittlänge, die Schrittfrequenz und die Ganggeschwindigkeit, welche voneinander abhängig sind. Die Ganggeschwindigkeit  $v_s$  ist ein Produkt der Schrittfrequenz  $f_s$  und der Schrittlänge  $l_s$ .

$$v_s = f_s \cdot l_s \quad (3.1)$$

Bachmann et al. [20] beschreiben für die Schrittfrequenz beim Gehen einen Wertebereich von 1,5 bis 2,5 Hz und beziehen sich dabei auf Matsumoto [21]. Der Mittelwert liege bei 2 Hz und es wird unter Annahme einer Gauss'schen Normalverteilung eine Standardabweichung von 0,13 Hz angegeben. Kramers-de Quervain et al. [18] geben eine Schritt-Kadenz von 105-130 Schritten pro Minute an. Dies fasst den Frequenzbereich für freies Gehen wesentlich enger, umgerechnet in 1,75 bis 2,16 Hz. Die angegebenen Frequenzbereiche für Gehen werden in der nachfolgenden Tabelle 3.1 aufgezeigt. Hegewald [22] beschreibt die Ganggeschwindigkeit als eine der zentralen Größen in der Ganganalyse.

Tabelle 3.1.: Vergleich der Gangparameter für Gehen aus verschiedenen Literaturquellen

Quelle	Freie Gang- geschwindigkeit in m/sec	Schrittänge in m	Schrittfrequenz in Hz
VDI 2038 - Blatt 1 [1]	k.A.	k.A.	1,6 - 2,4
Kramers-de Quervain et al. [18]	1,2 - 1,5	0,65 - 0,75	1,75 - 2,2
Pachi et al. [23]	0,93 - 1,8	Ø 0,71	1,4 - 2,1
Bachmann et al. [20]	1,1 - 2,2	0,6 - 1,0	1,7 - 2,3
Perry [17]	Ø 1,37	Ø 0,705	Ø 1,88
Matsumoto et al. [21]	k.A.	k.A.	1,5 - 2,5
Kramer und Kebe [24]	k.A.	k.A.	Ø 2,2 ± 0,30
Paschalidis [25]	Ø 1,25	k.A.	k.A.
Butz [26]	k.A.	Ø 0,75	Ø 1,84 ± 0,13

Beim freien Gehen wird in der Regel die Geschwindigkeit gewählt, bei der der geringste Energieverbrauch vorhanden ist [18]. Diese Geschwindigkeit wird auch als *preferred walking speed* bezeichnet.

Der Begriff *Laufen* ist in der deutschen Sprache mehrfach belegt. Er wird verwendet für langsames Laufen (Joggen), mittelschnelles Laufen (Rennen) und sogar für Sprinten. Je nach Kontext wird im allgemeinen Sprachgebrauch auch *Gehen* mit dem Begriff *Laufen* gemeint (als Synonym für „zu Fuß gehen“). Im englischen wird klar zwischen *walking* und *running* unterschieden, um die Unterschiede der Bewegungsabläufe klar zu definieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe *Laufen* und *Rennen* synonym verwendet und bezeichnen immer die Fortbewegungsart *Rennen* in unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

In der Öffentlichkeit, gerade auch auf Bauwerken wie Fußgängerbrücken, sind langsames und mittleres Laufen (langsames und mittleres Joggen) relevant. Laufen unterscheidet sich von Gehen, da es hier keine Zweibeinstandphase gibt, sondern eine freie Flugphase, in der kein Bein Bodenkontakt hat. Verschiedene Laufstile lassen sich nach der Art des Fußaufsatzes unterscheiden. Es wird differenziert zwischen Vorderfußlauf, Mittelfußlauf und Fersenlauf. Laut Kramers-de Quervain et al. [18] verkürzt sich die Bodenkontaktzeit vom Gehen zum Laufen von 0,6-0,7 auf 0,2-0,3 Sekunden. Dabei gilt: je höher die Laufgeschwindigkeit, desto niedriger die Bodenkontaktzeit. Der Begriff *preferred transition speed* beschreibt die Geschwindigkeit, bei der eine Person vom Gehen zum Rennen wechselt, also die Zweibeinstandphase aus dem Gangmuster verschwindet. In der VDI 2038 ist der empfohlene Frequenzbereich für das Laufen mit 2,0-3,5 Hz angegeben.

Laufschritt von 5 m/s:	Standphase (Kontaktphase) : Flugphase	= 30% : 70%
Sprint von 9.0 m/s:	Standphase (Kontaktphase) : Flugphase	= 20% : 80%
Im Vergleich zum Gehen:	Standphase (Kontaktphase) : Schwungphase	= 62% : 38%

Abbildung 3.6.: Tabelle 4 aus [18]: Verhältnis von Bodenkontaktzeit zu Flugphase bzw. Schwungphase

### 3.2.2. Bodenreaktionskräfte

Beim Gehen und Laufen werden vertikale und horizontale (quer und in Gangrichtung) Kräfte auf den Untergrund übertragen. Diese werden als Bodenreaktionskräfte, kurz *BRK*, bezeichnet. Die vertikale Belastung ist dabei um ein Vielfaches höher als die horizontale. Die Kräfte hängen vom Eigengewicht der Person, der Schrittgeschwindigkeit und der Schrittfrequenz ab. Auch Schuhwerk, Untergrund und weitere Faktoren haben Einfluss.

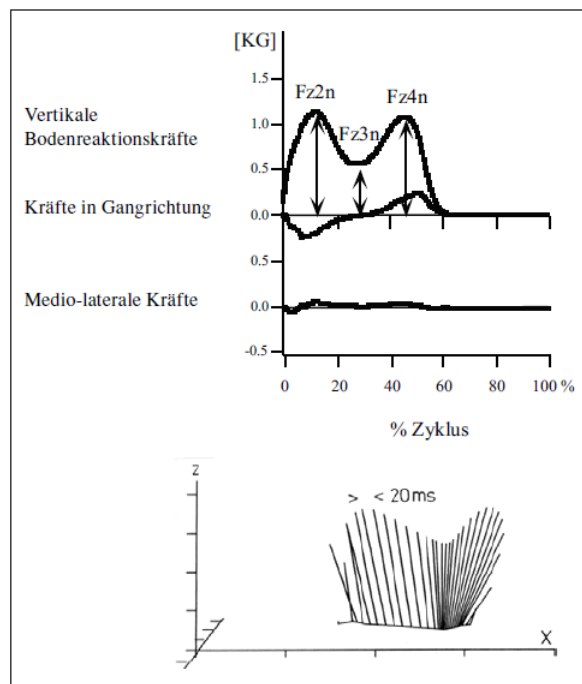


Abbildung 3.7.: Abbildung 2 aus [18]: Zeitlicher Verlauf der BRK beim Gehen und vierdimensionale Vektordarstellung

In Abbildung 3.7 werden die Bodenreaktionskräfte aus einem Schritt der Bewegungsart *Gehen* dargestellt. Für die vertikalen Bodenreaktionskräfte ist die „M-Form“ typisch. Dabei bezeichnet der Punkt Fz2n die erste Kraftspitze durch das Auftreten des Beins. Hierbei wird ein Wert des circa 1,2- bis 1,3-fachen Körpergewichtes erreicht. Durch das Vorschwingen des anderen Beins kommt es zu einer sogenannten *Hochentlastung* durch die parabelförmige Bewegung des Körperschwerpunktes, weshalb die Kraft zum Punkt Fz3n unter das Körpergewicht fällt (auf circa 70-80 % des Körpergewichtes). Als nächstes fällt der Körperschwerpunkt wieder nach unten, was zu einem Anstieg der Bodenreaktionskräfte zum Punkt Fz4n führt. Dabei beschreibt Fz4n das Ende der Einbeinstandphase. Nun wird das Gewicht auf das andere Bein umgelagert. Bei [18] werden die Punkte mit den Nummern zwei bis vier versehen, da es je nach Art des Auftrittes

bei einem Bodenkontakt zuerst mit der Ferse zu einem sogenannten *impact peak* kommen kann, der mit  $Pz1n$  bezeichnet wird. Die Entstehung dieses *impact peaks* ist jedoch sehr variabel und je nach Ganggewohnheiten unterschiedlich stark ausgeprägt

Die Schrittfrequenz ist hierbei ein primärer Steuerungsparameter für die Last-Zeit-Modelle und die daraus resultierenden Kräfte. Die Größe und der Verlauf der Bodenreaktionskräfte verändern sich mit der Schrittfrequenz. Je kleiner die Frequenz ist, desto kleiner ist die maximale Last und desto weniger ausgeprägt ist der charakteristische Verlauf. Umgekehrt gilt: Je größer die Schrittfrequenz ist, desto größer wird auch das Lastmaximum und die Differenz zwischen dem Lastmaximum und dem Minimum (vgl. Abbildung 3.8).

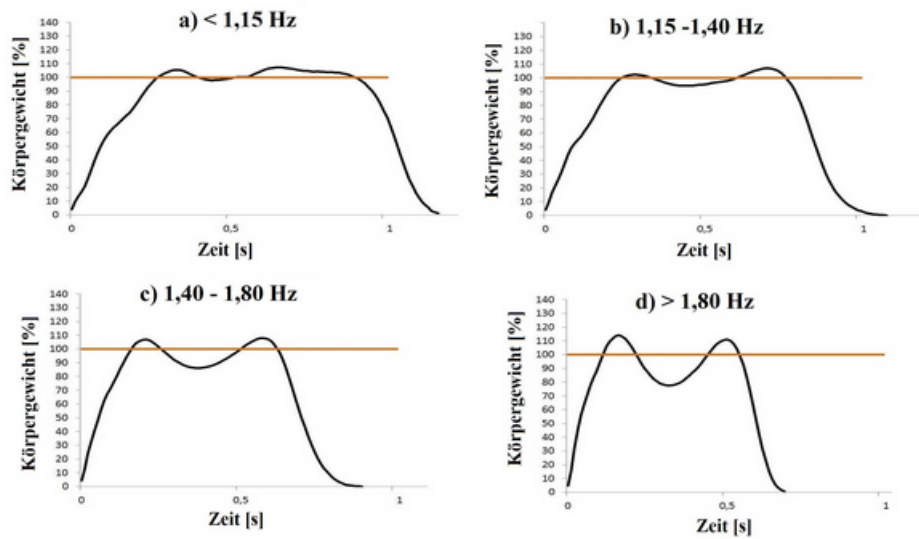


Abbildung 3.8.: vertikale Bodenreaktionskräfte bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen (gemittelt aus Messdaten)

Galbraith und Barton [27] untersuchten den Einfluss von verschiedenen Untergründen und Schuhwerk auf die Bodenreaktionskräfte. Typische Verläufe einer Versuchsperson sind in Abbildung 3.9 dargestellt und lassen keine großen Unterschiede erkennen. Des Weiteren untersuchten sie den Unterschied der frei gewählten Schrittfrequenz der Probanden. Hierzu fassen Galbraith und Barton Folgendes zusammen:

„The parameters that were investigated were subject weight, footwear, surface, and rate of walking. Results showed that the weight and rate of walking were the important parameters. Footwear and ground surface were relatively unimportant.“

Hierbei wurde als Untergrund allerdings nicht *schwingend* und *starr* betrachtet, sondern *hart* und *weich*, weshalb daraus keine Schlüsse für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gezogen werden können.

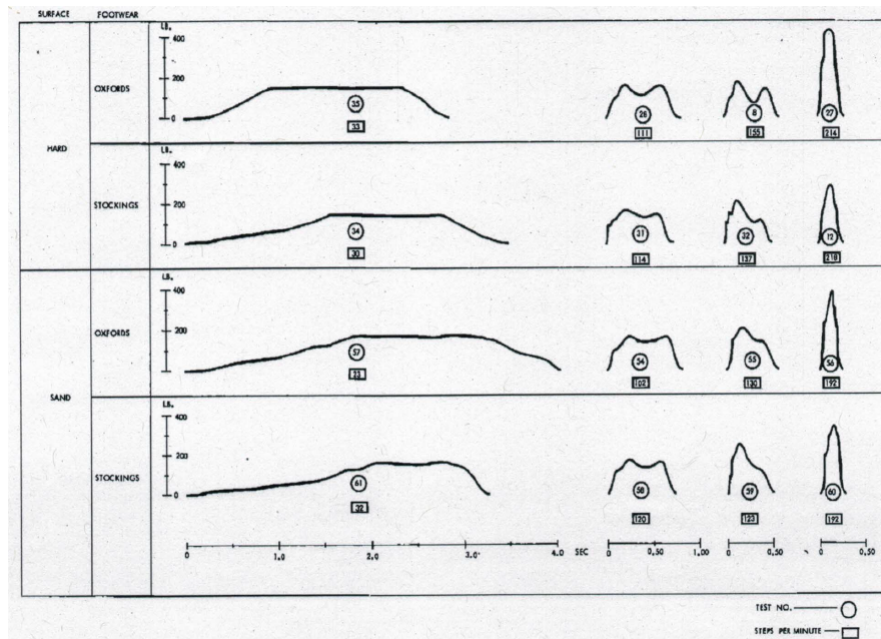


Abbildung 3.9.: Fig. 3 aus [27]: Typical footstep loadtime histories

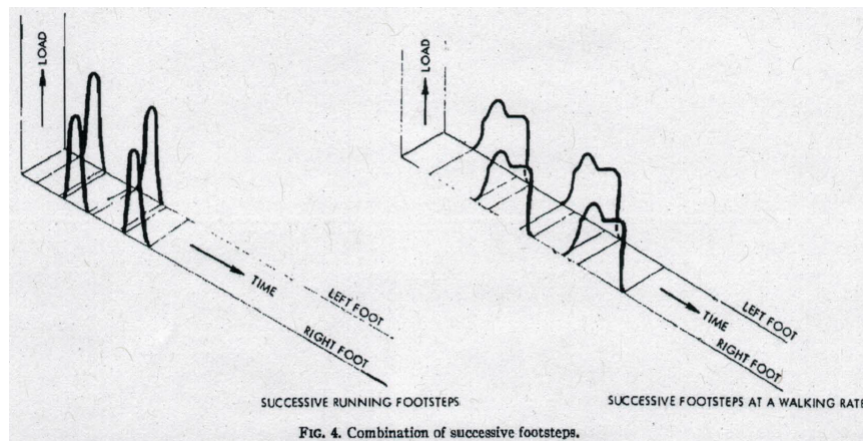


Abbildung 3.10.: Verlauf der Bodenreaktionskräfte der Einzelschritte beim Gehen und Laufen aus [27]

In Abbildung 3.10 sind die Bodenreaktionskräfte beim Laufen links und beim Gehen rechts im Bild dargestellt. Hier lassen sich neben den Last-Zeit-Verläufen der einzelnen Beine auch die Überlappungsbereiche der Kräfte während der Zweibeinstandphase gut erkennen.

Aus diesen Einzelschritten, die für die meisten Lastmodelle nicht als Einzelschritte, sondern als summierter Verlauf für beide Beine angesetzt werden, ist der Verlauf in der VDI 2038 (Abbildung 3.11) dargestellt.

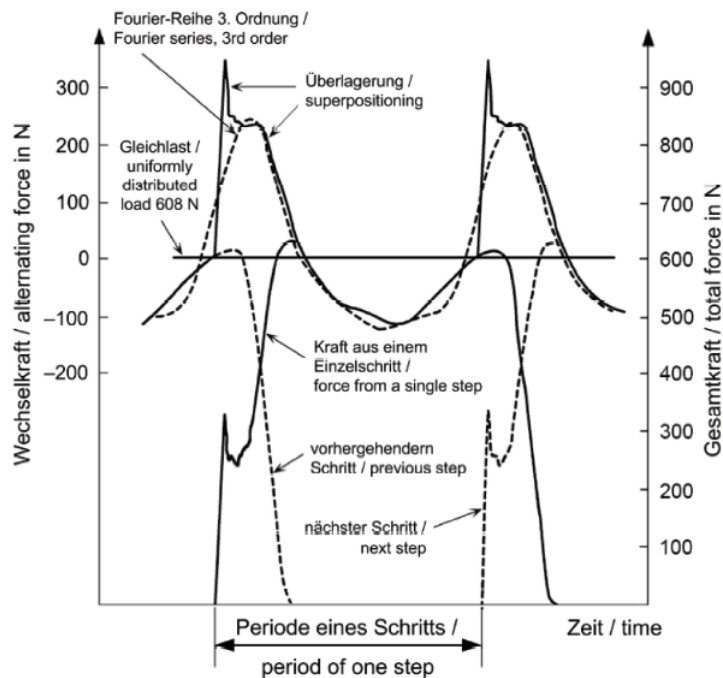


Abbildung 3.11.: Bild 13 aus [1]: Exemplarischer Lastverlauf beim Gehen

Die Bodenreaktionskräfte für Laufen werden, wie in Abbildung 3.10 links zu sehen ist, als einzelne Lastimpulse in den Untergrund eingetragen. Da zwischen den Kontaktphasen der einzelnen Beine eine Flugphase vorliegt, in der kein Bodenkontakt stattfindet, findet zwischen dem Zeitpunkt, zu dem das eine Bein vom Boden abhebt, und dem Zeitpunkt, zu dem das andere Bein den Boden berührt, kein Lasteintrag statt.

In Abbildung 3.12 sind links die Bodenreaktionskräfte beim Fersenlauf und in der Mitte die

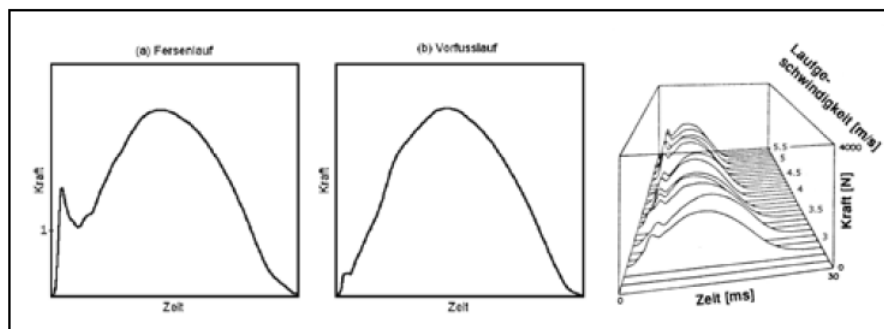


Abbildung 3.12.: Abbildung 3 aus [18]: Darstellung der Bodenreaktionskräfte beim Laufen, links mit *impact peak*, in der Mitte ohne und rechts BRK bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Bodenreaktionskräfte beim Vorfußlauf dargestellt. Durch das unterschiedliche Auftreten beim Laufen entsteht beim Fersenlauf (Auftritt mit der Ferse, dann Abrollen und Abstoßen) ein sogenannter *impact peak*.



### 3.2.3. Einfluss von Personengruppen

Neben der Personenanzahl sowie deren Schrittgeschwindigkeit und -frequenz hat auch die Synchronisation der Personen untereinander und die Verteilung auf der Brücke einen großen Einfluss auf die zu erwartenden Schwingungsamplituden. Auf den Fußgängerbrücken herrscht, je nach Lage und örtlichen Begebenheiten, meist Fußgängerverkehr bestehend aus mehreren Personen und Personengruppen, die sich über die Brücke verteilen. Idealerweise gehen die Personen hier unbeeinflusst voneinander über die Brücke, jeder in seiner frei gewählten Geschwindigkeit und Schrittfrequenz. Ab einer gewissen Anzahl von Personen pro Quadratmeter kann davon ausgegangen werden, dass sich die Personen auf der Brücke gegenseitig behindern und es so nicht mehr zu einem uneingeschränkten Fußgängerstrom kommt. Personen in kleinen Gruppen beeinflussen sich ebenfalls gegenseitig, da sie ihre Geschwindigkeit und auch Schrittfrequenz aneinander anpassen.

Nach Matsumoto [21] können die Ankunftswahrscheinlichkeiten durch eine Poisson-Verteilung dargestellt werden. Der Begriff Synchronisation definiert eine gleichzeitig ausgeführte Bewegung, im Falle der Fußgänger bedeutet ein synchrones Gehen, dass sich die Personen im Gleichschritt befinden. Wenn es zu großen Schwingungsamplituden kommt, kann es passieren, dass sich unterschiedliche Fußgänger aufgrund der Untergrundschwingung untereinander synchronisieren und dadurch einen verstärkenden Effekt auf die Amplitude haben. Wenn mehrere Fußgänger nicht synchron über eine Brücke gehen, werden die Last und die Schwingungsamplitude verringert.

Wesentlich relevanter als die vertikalen Schwingungen für die Fußgänger-Bauwerksinteraktion sind die horizontalen Schwingungen, da Menschen wesentlich sensibler darauf reagieren. Vertikale Schwingungen können von Beinen und Gelenken absorbiert und ausgeglichen werden, bei horizontalen Schwingungen versuchen Menschen dies unbewusst durch eine Gegenbewegung auszugleichen. Daher kommen voneinander unabhängige Personen auf einem Bauwerk auch schon bei leichten lateralen Schwingungen leichter in einen Gleichschritt als bei vertikalen Schwingungen. Dieses Phänomen wird auch als *lock in*-Effekt bezeichnet.

### 3.3. Lastmodelle

#### 3.3.1. Allgemeines

Zur Darstellung personeninduzierter Lasten gibt es verschiedene Ansätze in Normen, Richtlinien und Fachliteratur. Diese weisen zum Teil grundsätzliche Unterschiede (Anzahl der angesetzten harmonischen Lastanteile, Art der Funktion), aber auch kleinere Unterschiede, wie zum Beispiel eine unterschiedliche Festlegung von Beiwerten auf. Nachfolgend sollen relevante Funktionen dargestellt und verglichen werden. Hierbei wird die induzierte Last einer einzelnen Person dargestellt.

#### 3.3.2. Lastmodelle für Gehen und Laufen mit einem harmonischen Anteil

Der für die Anwendung einfachste Ansatz ist, sobald sich die Eigenfrequenz  $f_0$  der Brücke in einem für die Anregung relevanten Bereich befindet, der Ansatz einer Sinus-Funktion.

Ein Beispiel für einen solchen Ansatz findet sich im BS 5400-2 [28]. Dort wird die durch einen Fußgänger erzeugte dynamische Last als pulsierende Kraft beschrieben. Diese wird in der Eigenfrequenz  $f_0$  mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v_t = 0,9 \cdot f_0$  angesetzt.

$$F_v(t) = 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

Als der BS 5400 im Jahr 2010 vom Eurocode abgelöst wurde, fand ein ähnlicher Ansatz Einfluss in die Norm. Im nationalen Anhang zum Eurocode 1-2 in Großbritannien [29] wird ein Lastansatz zur Anwendung bei Personengruppen oder Einzelpersonen gegeben. Dieser wird, je nachdem, ob es sich um Gehen, Rennen oder den Einfluss von Personengruppen handelt, durch die Beiwerte angepasst. Außerdem wird, ähnlich wie in BS 5400-2, eine konstante Geschwindigkeit  $v_t$  angesetzt, mit der sich die Kraft entlang der ungünstigsten Linie über die Brücke bewegt. Diese Geschwindigkeit ist abhängig von der Bewegungsform. Zusätzlich führt der NA eine Brückenklasse ein, in der zwischen vier Kategorien von Fußgängerbrücken differenziert wird.

$$F = F_0 \cdot k(f_v) \cdot \sqrt{1 + \gamma(N - 1)} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_v \cdot t) \quad (3.3)$$

Hierbei ist

- $N$  die Anzahl der Personen
- $F_0$  ist eine Referenzamplitude, die der Tabelle NA.3 aus [29] entnommen wird.
- $\gamma$  ist ein Reduktionsfaktor, der den Einfluss von asynchronen Personengruppen berücksichtigt
- $k(f_v)$  ist ein kombinierter Faktor, der die Einflüsse aus der Schwingungsantwort und des realistischen Fußgängeraufkommens berücksichtigt.

Für Gehen wird  $F_0 = 280 \text{ N}$  und für Laufen  $F_0 = 910 \text{ N}$  gewählt. Der Faktor  $k(f_v)$  wird aus der Abbildung NA8 (hier dargestellt in Abbildung 3.13) ermittelt.

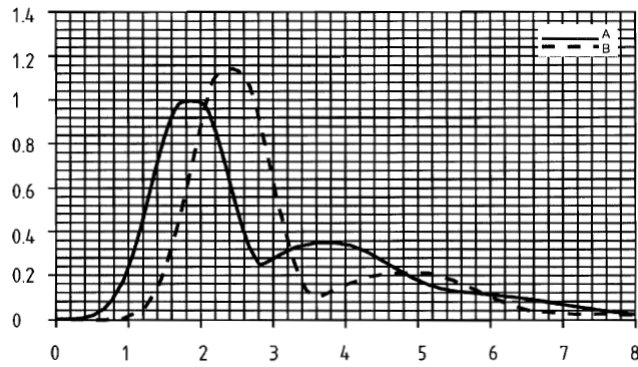
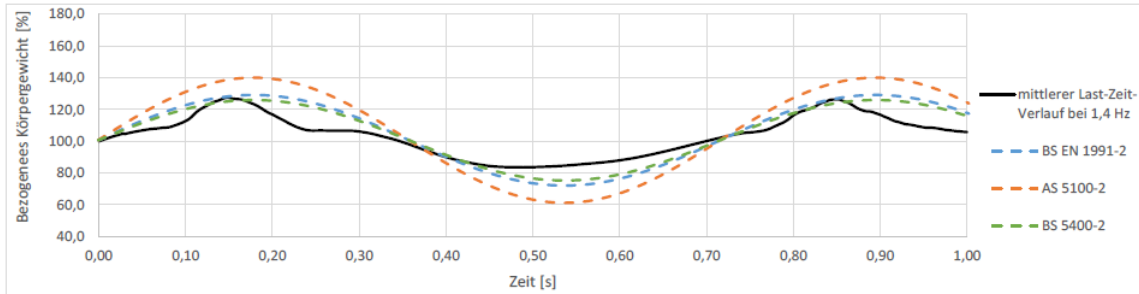


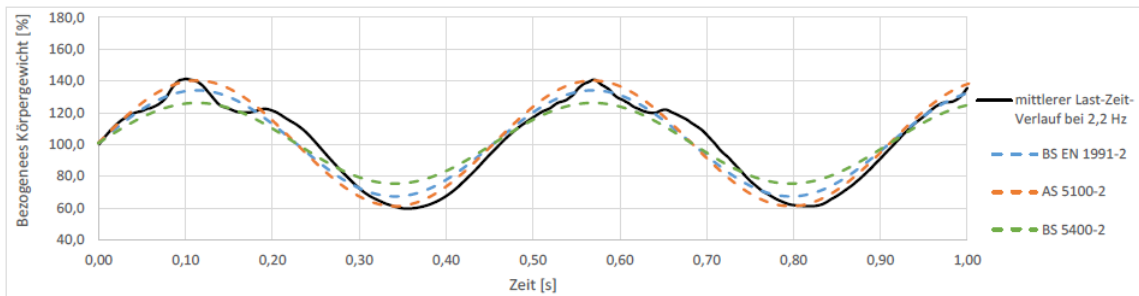
Abbildung 3.13.: Grafik NA8 aus [29]

In der Grafik ist der Lastfaktor über der Erregerfrequenz aufgetragen. Der dynamische Lastfaktor  $k_v(f_0)$  beträgt nach Abbildung 3.13 für Gehen maximal 1,0 und für Laufen maximal 1,18. Roos [30] beschreibt in seiner Arbeit einen nicht veröffentlichten Vorschlag für Anhang C zu EN1991-2:2003. Hier würden drei Lastmodelle beschrieben, mit denen der Australien Standard AS 5100-2:2004 seinen Ansatz für die Fortbewegungsart Gehen beschreibt. Der dynamische Lastfaktor wird hier zu eins gesetzt und die Referenzamplitude  $F_0$  verändert.

Aufgrund des nicht vorhandenen (gleich eins gesetzten) dynamischen Lastfaktors verändert sich mit zunehmender Erregerfrequenz bei den Lastmodellen lediglich die Periode, während die maximale Amplitude konstant bleibt. Da der dynamische Lastfaktor bei höheren Brückeneigenfrequenzen ab 1,8 Hz bei Gehen und ab 2,4 Hz für Rennen stark abfällt, werden somit für höhere Lasten kleinere Amplituden abgebildet.



(a) 1,4 Hz



(b) 2,0 Hz

Abbildung 3.14.: Normierter Vergleich der Vertikalkraft beim Gehen in Abhängigkeit von der Brückeneigenfrequenz im Vergleich zu gemittelten Messdaten bei der gleichen Erregerfrequenz

Alle drei einfach harmonischen Lastmodelle werden durch Ansatz der Brückeneigenfrequenz als Erregerfrequenz die größtmögliche Schwingungsantwort erzielen.

Jedoch ist ein Abfall der Amplitude bei höheren Frequenzen nicht nachvollziehbar. Insgesamt bilden die Lastmodelle aber die fußgängerinduzierten Lasten näherungsweise ab, da der Einfluss des ersten harmonischen Lastanteils am größten ist.

Für die Bewegungsart Laufen gibt es neben dem Ansatz aus [29] noch eine Funktion aus der *HIVOSS* [31].

$$F_v(t) = 1250 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \quad (3.4)$$

Auch hier bleibt die maximale Amplitude unabhängig von der Frequenz. Jedoch wird der Wert hier so hoch angesetzt, dass es auch bei einer hohen Erregerfrequenz nicht zu einer Unterschätzung der Lasten kommt.

### 3.3.3. Lastmodelle für Gehen mit mehreren harmonischen Anteilen

Um die durch Fußgänger induzierten Lasten genauer darzustellen, können Fourierreihen mit einer höheren Anzahl an harmonischen Lastanteilen verwendet werden. Allen Literaturquellen ist gemein, dass sie die Amplituden-Phasen-Darstellung wählen.

$$F(t) = a_0 + \sum c_j \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f_s \cdot t + \varphi_j) \quad (3.5)$$

Hierbei stellt  $c_j$  die Fourierkoeffizienten und  $\varphi_j$  die Phasenverschiebungen der einzelnen Lastanteile dar.

Diese Modellierung eignet sich besonders für die Fortbewegungsart Gehen, da die Lasteinträge der einzelnen Beine überlagert und nicht wie beim Laufen zeitweise zu Null werden.

Die Koeffizienten  $c_j$  lassen sich anhand gemessener Last-Zeit-Verläufe über Fourier-Analysen bestimmen. Der statische Anteil  $a_0$  stellt hierbei das Personeneigengewicht dar. Die Genauigkeit der Lastmodelle hängt hier von der Anzahl der harmonischen Lastanteile und deren Wertebereich ab. Sahnaci [32] stellt in seiner Arbeit fest, dass in Ausnahmefällen auch zwischenharmonische Lastanteile einen Einfluss auf den Last-Zeit-Verlauf haben können. Da in den meisten Lastmodellen nur ganzzahlige  $j$  angesetzt werden, können diese gegebenenfalls nicht abgebildet werden.

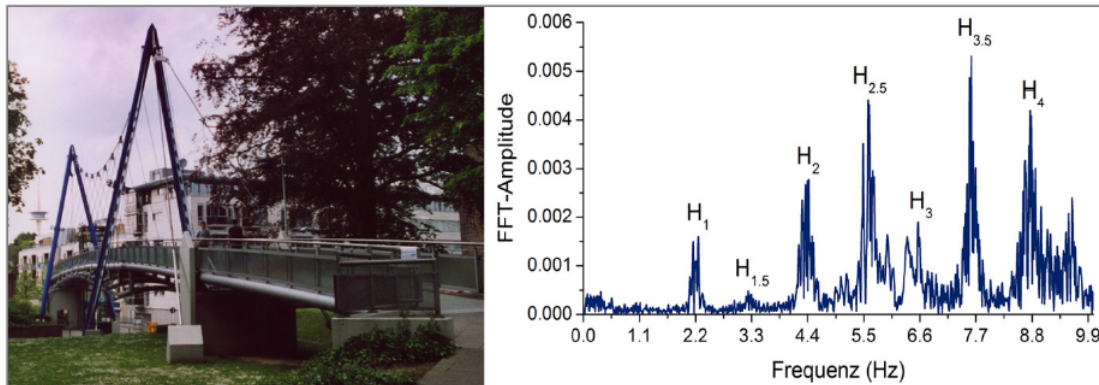


Abbildung 3.15.: Bild 1.2 aus [32]: Folkwangbrücke in Essen und Amplituden im Frequenzbereich infolge zweier querender Personen mit der Schrittfrequenz  $f_s = 2,2 \text{ Hz}$

Der für diese Arbeit wichtigste Lastansatz ist die Gleichung (7) aus der VDI-Richtlinie 2038, Blatt 1 [1]. Hier werden die Last-Zeit-Verläufe für vertikale Bodenreaktionskräfte, die durch gehende oder laufende Personen erzeugt werden, durch folgende Funktion beschrieben:

Für vertikale Lasten gilt:

$$F_{vp}(t) = F_G + \sum_i F_G \cdot \alpha_{vi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_{vp} \cdot t - \varphi_{vi}) \quad (3.6)$$

Für horizontale Lasten ist angegeben:

$$F_{hp}(t) = F_G + \sum_i F_G \cdot \alpha_{hi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_{hp} \cdot t - \varphi_{hi}) \quad (3.7)$$

Dabei ist:

- $F_G$  die Gewichtskraft der Person
- $\alpha_i$  der Last-Koeffizient in der i-fachen Grundfrequenz
- $f_p$  die Grundfrequenz der Personenaktivität (bei vertikalen Lasten die Schrittfrequenz, bei horizontalen Lasten die 0,5-fache Schrittfrequenz)
- $\varphi_i$  der Phasenwinkel
- $()_v$  vertikal
- $()_h$  horizontal

Die Schrittfrequenz liege mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit im Bereich von 1,6-2,4 Hz, mit einem Mittelwert von 2 Hz. Beim Laufen könnten die Schrittfrequenzen bis zu 4 Hz erreichen.

Oberhalb der 4-fachen Grundfrequenz seien die Anteile der harmonischen Schwingungen so gering, dass sie nicht mehr berücksichtigt werden müssen.

Die empfohlenen Werte für Schrittfrequenzen, Lastkoeffizienten und Phasenwinkel sind in der Tabelle 3 der VDI 2038 - Blatt 1 [1] nach [33] aufgelistet. Für die Lastfälle Gehen und Laufen werden diese angegeben mit:

Tabelle 3.2.: Frequenzbereiche und Beiwerte nach VDI 2038-Blatt 1, Tabelle 3 [1]

Bewegungsart	Frequenz $f_p$ in Hz	$\alpha_{v1}$	$\alpha_{v2}$	$\alpha_{v3}$	$\alpha_{h1}$	$\alpha_{h2}$
Gehen	1,6 bis 2,4	0,4 bis 0,5	0,1 bis 0,2 <sup>1</sup>	0,06 bis 0,1 <sup>1</sup>	0,1	<sup>2</sup>
Laufen	2,0 bis 3,5	bis 1,6	bis 0,7	bis 0,2	0,2	<sup>2</sup>

<sup>1</sup>  $\varphi_2 = \varphi_3 = \frac{\pi}{2}$

<sup>2</sup> Belastbare Werte liegen nicht vor.

Sowohl beim Gehen als auch beim Laufen kann eine Personendichte von 0,5 bis 1,5 Personen pro m<sup>2</sup> angesetzt werden.

Um den Einfluss mehrerer Personen abzudecken, wird nach VDI 2038 ein Koordinationsfaktor  $C(n)$  angesetzt. Dadurch ergibt sich die anzusetzende Gesamtkraft zu:

$$F_n(t) = F(t) \cdot C(n) \cdot n \quad (3.8)$$

mit  $n$  als Anzahl der Personen.

Der Faktor  $C(n)$  wird für unkoordinierte Bewegungen durch

$$C(n) = \frac{\sqrt{n}}{n} \quad (3.9)$$

berechnet. Bei bis zu 5 Personen oder koordinierten Bewegungen wird der Faktor auf 1 gesetzt.

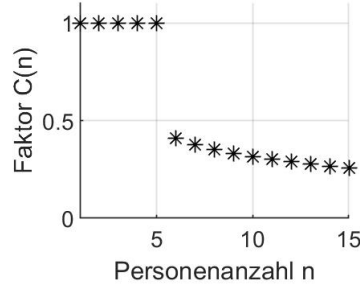


Abbildung 3.16.: Koordinationsfaktor  $C(n)$

Der in der VDI 2038 - Blatt 1 dargestellte Lastansatz zum Gehen und Laufen basiert auf der von Bachmann und Ammann in [20] dargestellten Funktion. Hier wird der zeitliche Verlauf ebenfalls mit einer Fourierreihe idealisiert, wobei auch hier nur die ersten drei Harmonischen Einfluss haben.

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) + \Delta G_2 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \sin(6 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_3) \quad (3.10)$$

mit:

- $G$  als Eigengewicht des Fussgängers
- $\Delta G_i$  entspricht dem Lastanteil der i-ten Amplitude
- $f_s$  der Schrittfrequenz
- $\varphi_2$  und  $\varphi_3$  als Phasenwinkel der 2. und 3. Harmonischen

Der Lastanteil der 1. Harmonischen Amplitude wird mit

$$\Delta G_1 = 0,4 \cdot G \quad \text{für} \quad f_s = 2 \text{ Hz} \quad (3.11)$$

und

$$\Delta G_1 = 0,5 \cdot G \quad \text{für} \quad f_s = 2,4 \text{ Hz} \quad (3.12)$$

Der Lastanteil der 1. Harmonischen könne zwischen 2 Hz und 2,4 Hz linear interpoliert werden. Im Bereich von circa 2 Hz könne für  $\Delta G_2 \approx \Delta G_3 \approx 0,1 \cdot G$  angesetzt werden. Für rechnerische Zwecke sei für  $\varphi_2 \approx \varphi_3 \approx \frac{\pi}{2}$  anzusetzen, da die Werte in Wirklichkeit stark streuen würden.

Zum Einfluss mehrerer Personen schreiben Bachmann und Ammann, dass es bei einer Personendichte über 1,6 bis 1,8 Pers./m<sup>2</sup> zu einer gegenseitigen Behinderung komme.

Um den Einfluss darzustellen verweisen sie auf den von Matsumoto et al. [21] beschriebenen Faktor  $m$ , mit dem die berechnete Schwingungsamplitude in Brückenmitte zu multiplizieren ist.

$$m = \sqrt{\lambda \cdot T_0} \quad (3.13)$$

mit:

- $\lambda$  = mittlere Ankunftsrate (Personen/s für die ganze Brückenbreite,  
 $\lambda_{\max} \approx 1,5$  Personen pro s und m Breite

- $T_0$  = die erforderliche Zeit um die Brücke der Länge  $L$  mit der Geschwindigkeit  $v_s$  zu passieren
- $\lambda \cdot T_0$  = die sich gleichzeitig auf der Brücke befindliche Anzahl von Personen

Laut Bachmann und Ammann wurde dieser Wert bisher nie experimentell, sondern nur durch Computersimulationen geprüft.

Kramer und Kebe [34] beziehen sich für den Lastansatz auf die Gleichung von Bachmann und Ammann (hier in Gleichung 3.10).

Um die Last auf über eine Brücke regellos gehende Fußgänger vereinfacht auf der Brückenmitte anzusetzen, rechnen sie die Anregungskraft eines Fußgängers in eine fiktive Anregungskraft  $F_A(t)$  um.

$$F_A(t) = ASRF_1(t) \quad (3.14)$$

Hierbei ist:

- $F_1(t)$  die Anregungskraft infolge eines Fußgängers
- $A$  die Anzahl der Fußgänger auf der Brücke mit  
 $A = \text{Brückenfläche} \cdot (0,3 \text{ bis } 0,5 \text{ Personen pro m}^2)$
- $S$  der Synchronisationsfaktor
- $R$  der Reduktionsfaktor

Der Synchronisationsfaktor  $S$  beschreibt das Verhältnis der Schwingungsamplituden in Brückenmitte beim regellosen Gehen zum synchronen Gehen.

$$S = \frac{v_f}{v_s} \quad (3.15)$$

mit  $v_f$  als Amplitude beim freien Gehen und  $v_s$  als Amplitude beim synchronen Gehen.

Der Reduktionsfaktor  $R$  reduziert die Last aufgrund der Verteilung von Personen über die Brücke.

$$R = \frac{v_g}{v_k} \quad (3.16)$$

$v_g$  beschreibt die Amplitude bei gleichmäßig über die Brücke verteilten Fußgängern beim synchronen Gehen und  $v_k$  ist die Amplitude eines in Feldmitte gehenden Fußgängers. Je stärker eine Brücke schwingt, desto eher kommt es zu Rückkopplungseffekten, sodass sich regellos gehende Personen unbewusst der Schwingung anpassen.

Während in Deutschland die VDI 2038 für fußgängerinduzierte Lasten herangezogen wird, liefert die französische Richtlinie des Amtes für technische Studien für Straßen und Autobahnen (Setra) einen vergleichbaren Ansatz. Wie in der VDI-Richtlinie werden auch hier die Phasenwinkel  $\varphi_2$  und  $\varphi_3$  zu  $\pi/2$  gesetzt.

In der ISO 10137 werden vier harmonische Lastanteile verwendet, im Eurocode 5 bzw. der DIN 1074 nur zwei.

Rainer und Pernica stellen in ihrer Publikation [35] ebenfalls eine Fourierreihe vor. Sie untersuchten die Lastfaktoren dreier männlicher Versuchspersonen für Gehen und Rennen anhand eines Laufstegs mit Messplattformen. Sie überlagerten die jeweiligen Lastparameter um die Maximalwerte für die Fourierkoeffizienten der ersten bis vierten Harmonischen zu erhalten. Die von den drei Versuchspersonen ermittelten Werte wurden gemittelt und anschließend durch ein Polynom vierten Grades abgebildet.

Tabelle 3.3.: Vergleich Fourierkoeffizienten und Phasenwinkel

	VDI 3028	Setra-Richtlinie	ISO 10137	EC5
<b>Bereich <math>f_s</math></b>	$1,6 \leq f_s \leq 2,4$	$1,8 \leq f_s \leq 2,2$	$1,2 \leq f_s \leq 2,4$	-
$c_1$	0,40 – 0,50	0,40	$0,37 \cdot (f_s - 1,0)$	0,40
$c_2$	0,10 – 0,20	0,10	0,10	0,10
$c_3$	0,06 – 0,10	0,10	0,06	-
$c_4$	-	-	0,06	-
$\varphi_1$	0	0	0	-
$\varphi_2$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	-
$\varphi_3$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	-
$\varphi_4$	-	-	$-\frac{\pi}{2}$	-

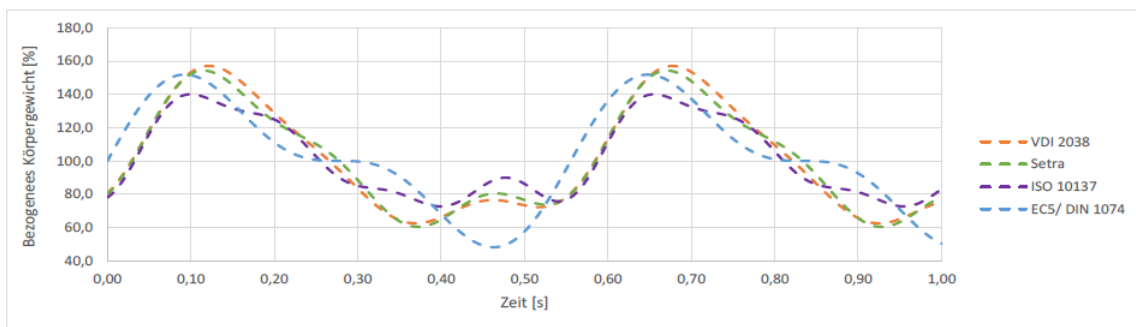


Abbildung 3.17.: Vergleich verschiedener Lastansätze bei 1,8 Hz

Maximum Dynamic Load Factors ( $\alpha$ ) for Walking and Running					
Activity	Harmonic (n)	Maximum from subject A, B or C*		Maximum from polynomial fit to averages from subjects A, B, C*	
		Frequency (Hz)	$\alpha$	Frequency (Hz)	$\alpha$
Walking	1	2.4	0.56	2.4	0.52
	2	5.2	0.28	5.6	0.24
	3	4.2 – 7.8	0.12	5.8	0.06
	4	8.0	0.08	7.6	0.05
Running	1	3.6	1.50	3.6	1.40
	2	6.8	0.47	3.2	0.40
				6.6	0.35
	3	4.2	0.20	6 – 8	0.12
	4	7 – 9	0.09	7 – 9	0.08

\*Except for values corresponding to 9.0 Hz and above.

Abbildung 3.18.: Table 2 aus [35]: Maximale Fourierkoeffizienten für Gehen und Laufen

Petersen [36] stellt die ermittelten Koeffizienten von Seiler und Hüttner (ursprünglich aus [37]) vor. Diese Werte wurden durch Versuche mit Druckmesssohlen ermittelt.

Butz [26] untersuchte die Bodenreaktionskräfte mit vier Kraftmessplatten. Sie entwickelte im Rahmen ihrer Arbeit ein Schritt für Schritt-Lastmodell, bei dem die Lastpunkte für jeden Schritt



an der Stelle des Fußes aufgebracht werden. Butz nähert einen Last-Zeit-Verlauf einer künstlichen Schrittfolge mit einer Fourierreihe mit vier harmonischen Lastanteilen an. Ein tabellarischer Vergleich dieser Koeffizienten zeigt die unterschiedlichen Beiwerte auf.

Tabelle 3.4.: Fourierkoeffizienten und Phasenwinkel im Vergleich

Quelle	Fourierkoeffizienten	Phasenwinkel
<b>Seiler/Hüttner</b> [36]	$c_1 = 0,40$	$\varphi_1 = -\pi/2$
$(1,3 \leq f_s \leq 2,5)$	$c_2 = 0,15$	$\varphi_2 = 5\pi/6$
	$c_3 = 0,10$	$\varphi_3 = -\pi/2$
	$c_4 = 0,05$	$\varphi_4 = 5\pi/6$
<b>Rainer et al.</b> [35]	$c_1 \leq 0,52$	$\varphi_1 = 0$
$1,7 \leq f_s \leq 2,3$	$c_2 \leq 0,24$	$\varphi_2 = -\pi/2$
	$c_3 \leq 0,06$	$\varphi_3 = 0$
	$c_4 \leq 0,05$	$\varphi_4 = 0$
<b>Butz</b> [26]	$c_1 = 0,0115 \cdot f_s^2 + 0,2803 \cdot f_s - 0,2902$	$\varphi_1 = 0$
$(1,3 \leq f_s \leq 2,3)$	$c_2 = 0,0669 \cdot f_s^2 + 0,1067 \cdot f_s - 0,0417$	$\varphi_2 = -(-99,76 \cdot f_s^2 + 478,92 \cdot f_s - 387,8) \cdot \pi/180$
	$c_3 = 0,0247 \cdot f_s^2 + 0,1149 \cdot f_s - 0,1518$	$\varphi_3 = -(-150,88 \cdot f_s^3 + 819,65 \cdot f_s^2 - 1431,35 \cdot f_s + 811,93) \cdot \pi/180$
	$c_4 = -0,0039 \cdot f_s^2 + 0,0285 \cdot f_s - 0,0082$	$\varphi_4 = -(34,19 \cdot f_s - 65,14) \cdot \pi/180$

Ein Vergleich der Last-Zeit-Verläufe ergibt, dass es eine große Ähnlichkeit zwischen den Last-Zeit-Verläufen von Bachmann, der VDI 2038 und der Setra-Richtlinie [38] gibt. Sowohl die VDI 2038 als auch Setra geben Bachmann als Quelle des, eventuell leicht abgewandelten, Lastansatzes an. Ein rein optischer Vergleich zeigt, dass der Lastansatz von Seiler und Hüttner den gemessenen Werten am nächsten kommt. In Abbildung 3.19 sind die harmonischen Lastanteile von  $c_1$  bis  $c_4$  verschiedener aufgelisteter Quellen abgebildet. In dieser Abbildung wird deutlich, dass die Werte von Butz/SYNPEX [26] die größten Unterschiede zu den anderen Ansätzen aufweisen. Alle hier dargestellten Lastansätze benennen keine Standardabweichung sondern bilden festgelegte Werte oder Funktionsverläufe ab. Dies bildet Sahnaci [32] in seiner Abbildung (siehe hier Abbildung 3.20) gut anschaulich ab. Diese Darstellung zeigt, wie breit die Streuung der Werte in der Realität sind, und dass die aktuellen Lastansätze dem kaum Rechnung tragen.

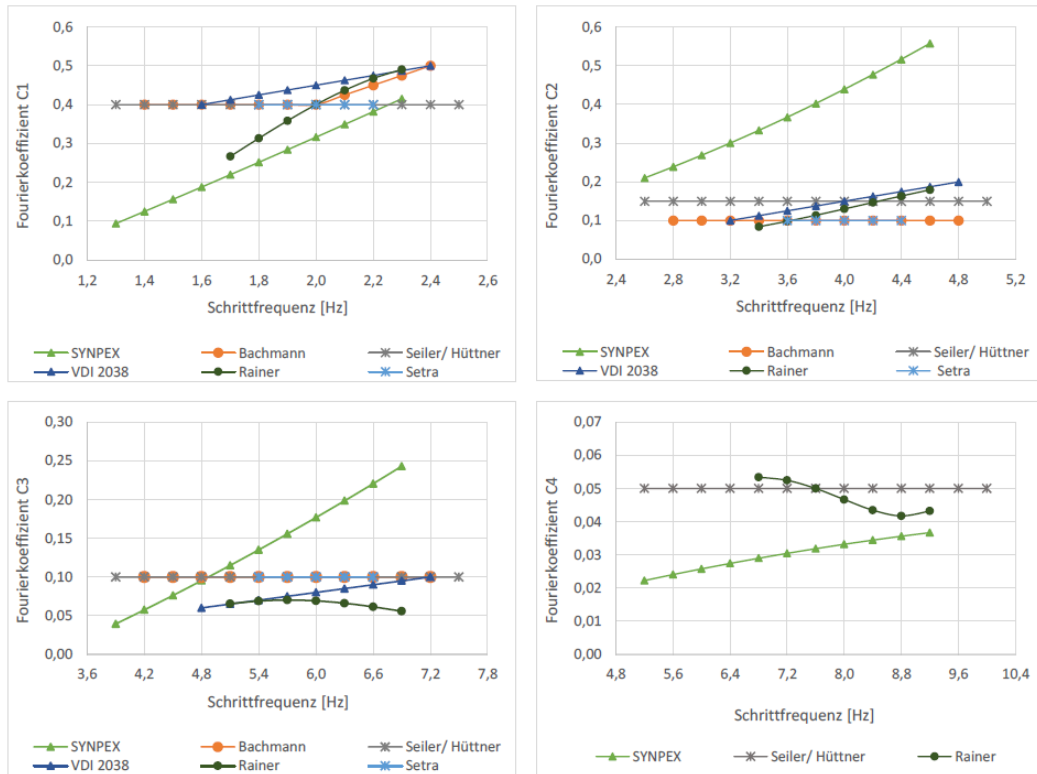


Abbildung 3.19.: Vergleich Fourier-Amplitudenspektrum

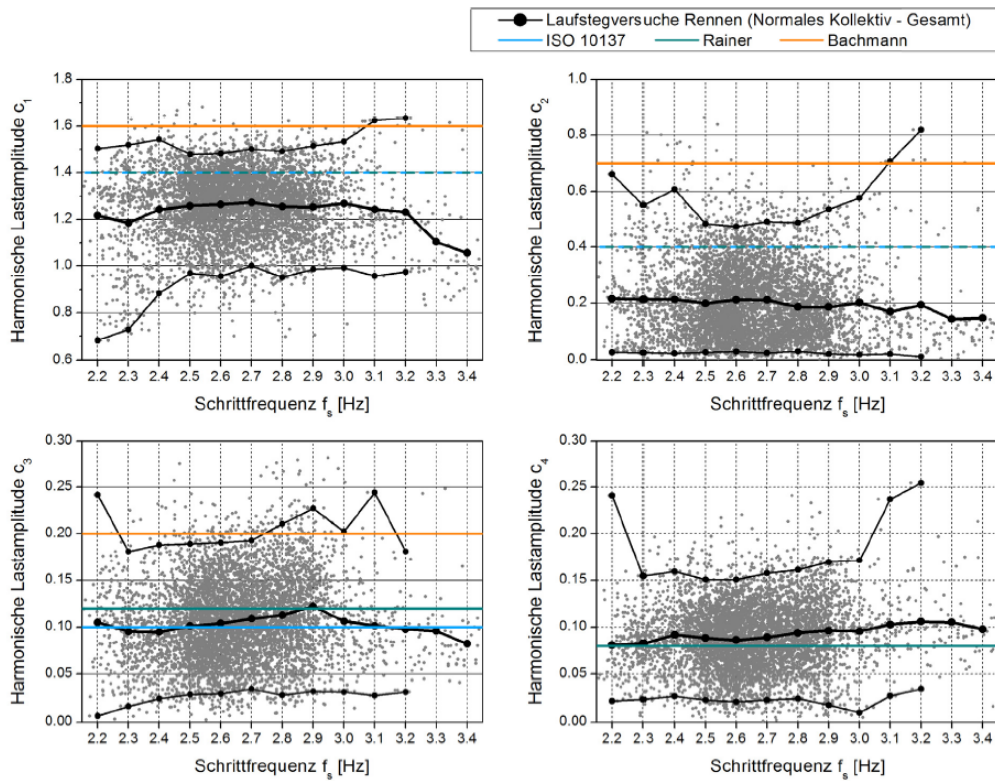


Abbildung 3.20.: Bild 7.42 aus Sahnaci [32]: Mittelwerte und 95%-Vertrauensbereiche der harmonischen Amplituden  $c_1$  bis  $c_4$  gegenüber den Schrittfolgen

Der Phasenwinkel  $\varphi_j$  wird ebenfalls als stark streuende Größe beschrieben (vgl. Bachmann und Ammann [20]). Der Phasenwinkel beschreibt den Versatz der einzelnen harmonischen Anteile gegeneinander. Bis auf die SYNPEX-Richtlinie/Butz [26] geben alle hier genannten Autoren die Phasenverschiebung als konstanten Wert an.

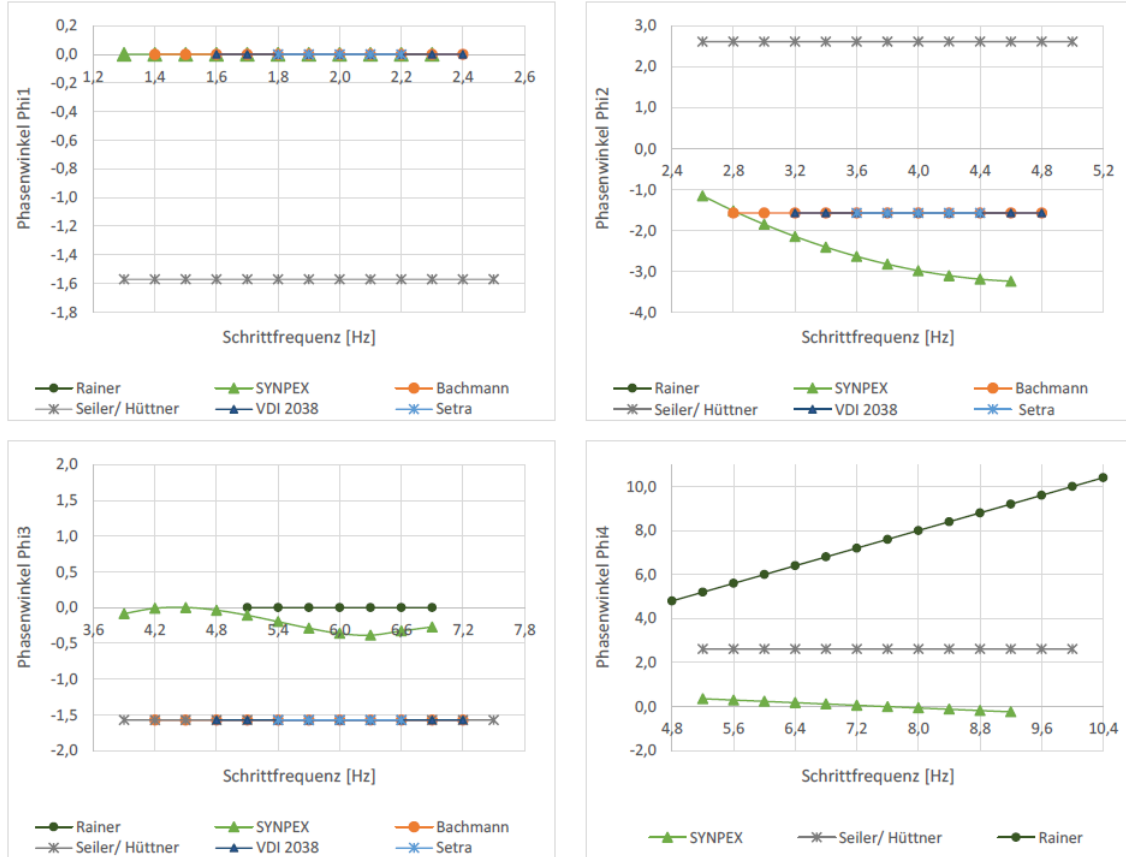


Abbildung 3.21.: Vergleich der Entwicklung des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Schritt-frequenz

In Abbildung 3.21 werden die Werte der einschlägigen Fachliteratur grafisch dargestellt. Bei Bachmann, der VDI 2038, der Setra-Richtlinie und Rainer ist die größte Übereinstimmung der Werte zu erkennen. Seiler und Hüttner haben als einzige Autoren eine Phasenverschiebung für den ersten harmonischen Anteil angesetzt und weichen bei den höheren harmonischen Anteilen ebenfalls von den anderen Autoren ab.

### 3.3.4. Lastmodelle für Laufen

Während beim Gehen die Last-Zeit-Verläufe aus der Überlagerung von zwei Einzelschritten gebildet werden, gibt es bei der Bewegungsform Rennen keine Zweibeinstandphase. Beim Laufen kommt es zu einem impulsartigen Lasteintritt infolge der Flugphase zwischen den Einbeinstandphasen.

In der Fachliteratur findet man zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Annäherung des Last-Zeit-Verlaufes. Entweder wird wie beim Gehen eine Fourierreihenentwicklung genutzt oder die Darstellung erfolgt über ein Halbsinus-Modell.

#### 3.3.4.1. Darstellung mit einem Halbsinus-Modell

Für die Bewegungsform Laufen beschreiben Bachmann und Amman zwei Ansätze. Eine Idealisierung über ein Halbsinus-Modell wird mit folgenden Formeln beschrieben.

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot \frac{t}{t_p}) & \text{für } t \leq t_p \\ 0 & \text{für } t_p < t \leq T_p \end{cases} \quad (3.17)$$

mit:

- $k_p = F_{p,\max}/G$  dynamischer Stoßfaktor
- $F_{p,\max}$  Maximalwert der Last
- $G$  Eigengewicht des Läufers
- $t_p$  Kontaktdauer
- $T_p = 1/f_s$  Periode eines Schrittes

Der Stoßfaktor  $k_p$  ist abhängig vom Verhältnis der Bodenkontaktdauer  $t_p$  zur Periodendauer  $T_p$ . Der dynamische Stoßbeiwert  $k_p$  kann aus Abbildung 3.22 rechts abgelesen werden. Nach Petersen [36] kann der dynamische Stoßbeiwert  $k_p$  durch die Gleichung  $k_p = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{t_p/T_p}$  dargestellt werden.

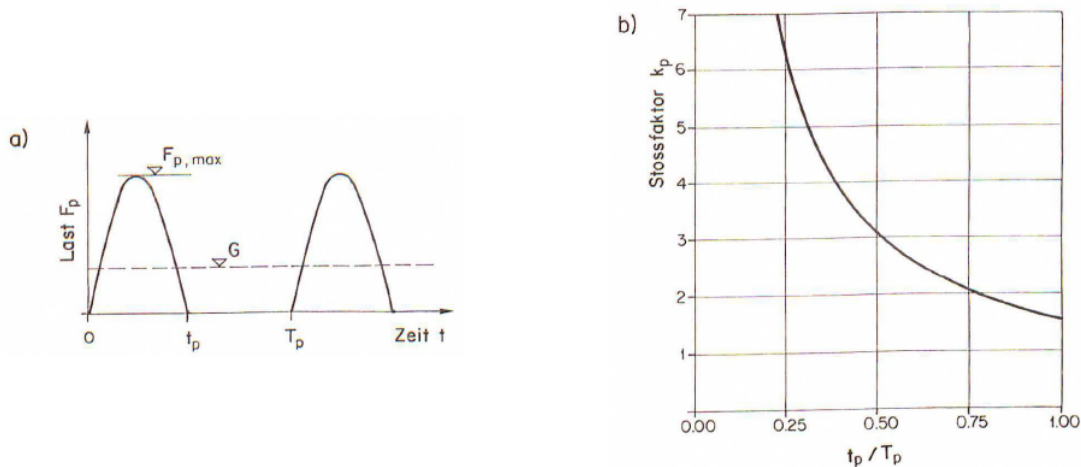


Abbildung 3.22.: Bild 2.7 aus [20]: Idealisierter zeitlicher Verlauf der Last a) Halbsinus-Modell  
b) Dynamischer Stoßfaktor für Laufen und Hüpfen an einem Ort

In Abbildung 3.22 wird ein idealisierter zeitlicher Verlauf der Lasten beim Halbsinus-Modell dargestellt. Um dieses Lastmodell anwenden zu können, ist neben der Kenntnis über die Schrittfrequenz  $f_s$  auch die Bodenkontaktdauer  $t_p$  zur Ermittlung der Lasten relevant. Petersen und Werkle [36] beschreiben einen Lastansatz von Wheeler, nachdem sich die Kontaktzeit  $t_p$  wie folgt berechnen lässt.

$$t_p = \frac{0,4}{f_s - 1} + 0,044 \cdot (2,5 - f_s) \quad (3.18)$$

Dies gilt für  $f_s > 1,74$  Hz und  $T_p = \frac{1}{f_s}$ . Der Stoßfaktor  $k_p$  definiert hierbei die Höhe der impulsartigen Lasten während des Laufens.

Laut Bachmann bringt der Ansatz eines Halbsinus-Modells für Schrittfrequenzen im Bereich von 3 Hz gute Übereinstimmungen, führt aber bei anderen Erregerfrequenzen zu einer circa 30%igen Überschätzung der Lasten.

Den theoretischen Wert nach (3.18) leitet Bachmann aus der Bedingung her, dass das Integral des Last-Zeit-Verlaufes über die Schrittdauer aufgrund des gleichbleibenden Gewichtes des Läufers dem Integral der statischen Gewichtskraft über die Schrittdauer entsprechen muss.

### 3.3.4.2. Nichtlinearer Einfeldfreiheitsgradschwinger

Ein selten zur Darstellung von Laufen verwendetes Modell ist der Ansatz eines nichtlinearen Einfeldfreiheitsgradschwingers. Petersen und Werkle [36] stellen dieses Modell, entwickelt von Seiler und Hüttner, vor. Dieser Ansatz basiert auf einem „sich bewegenden nichtlinearen Einfeldfreiheitsgradschwinger für den Läufer“ [36]. Der Last-Zeit-Verlauf wird in diesem Modell mit folgender Gleichung ermittelt:

$$F(t) = \begin{cases} G \cdot \left[ 1 + \sin \left( \pi \cdot \frac{t}{t_G} + \arcsin \left( \frac{-t}{s} \right) \right) \right] & \text{für } t \leq T_C \\ 0 & \text{für } T_C < t \leq T_S \end{cases} \quad (3.19)$$

Hierbei entspricht  $T_C$  der Kontaktzeit  $t_p$  und  $T_S$  der Periodendauer  $T_p$ . Mit  $s$  wird ein Impulsfaktor beschrieben, ähnlich wie der Stoßfaktor  $k_p$ .  $t_G$  und das Verhältnis  $\frac{T_C}{T_S}$  werden dabei wie folgt ermittelt:

$$t_G = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_C}{\arccos \left( -\frac{1}{s} \right)} \quad (3.20)$$

$$\frac{T_C}{T_S} = \left( 1 + \frac{\sqrt{s^2 - 1}}{\arccos \left( -\frac{1}{s} \right)} \right)^{-1} \quad (3.21)$$

Da zur rechnerischen Bestimmung des Impulsfaktors die relative Kontaktzeit und für die Bestimmung der relativen Kontaktzeit der Impulsfaktor bekannt sein müssen, können diese beiden Werte in Abhängigkeit von realen Messwerten bestimmt werden.

Petersen und Püschel [39] beschreiben eine Formel zur Annäherung des Impulsfaktors  $s$ , die auch von Petersen und Werkle [36] dargestellt wird.

$$s \approx k_p - 0,77 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{T_C/T_S} - 0,77 \quad (3.22)$$

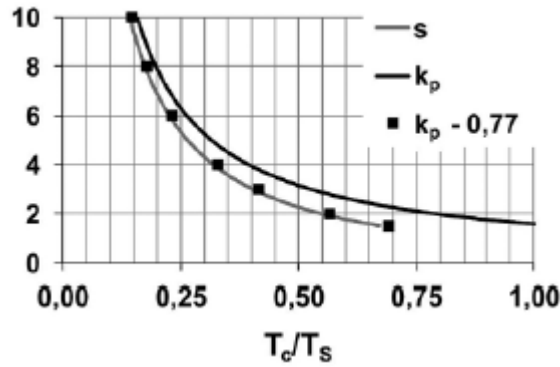


Abbildung 3.23.: Abbildung 19.11 aus [36] Stofsfaktoren nach Bachmann und Seiler/Hüttner

### 3.3.4.3. Darstellung durch eine Fourierreihenentwicklung

In der VDI 2038-Blatt 1 wird zur Darstellung des Last-Zeit-Verlaufs von Laufen auf die gleiche Funktion wie beim Gehen zurückgegriffen (siehe Gleichung 3.6). Hier werden lediglich die Fourierkoeffizienten angepasst und die Phasenwinkel für alle harmonischen Lastanteile auf Null gesetzt. Die Anzahl der anzusetzenden harmonischen Lastanteile bleibt bei drei.

Bachmann und Ammann [20] stellen neben dem Ansatz eines Halbsinus-Modells auch eine Fourierreihe zur Darstellung der Lasten vor. Diese resultiert aus einer Fourieranalyse des Halbsinus-Modells und auf diesem Modell beruht, neben dem Ansatz aus der VDI 2038, auch die Darstellung in der Setra-Richtlinie. Als Summe von Eigengewicht und harmonischen Lastanteilen stellt sich der Last-Zeit-Verlauf nach Bachmann und Amman wie folgt dar:

$$F_p(t) = G + \sum_{i=0}^{\infty} \Delta G_i \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_s \cdot (t - t_p/2 \cdot i)] \quad (3.23)$$

Die Anteile der einzelnen Harmonischen  $\Delta G_i$  werden in Abhängigkeit vom Verhältnis  $\frac{t_p}{T_p}$  bestimmt.

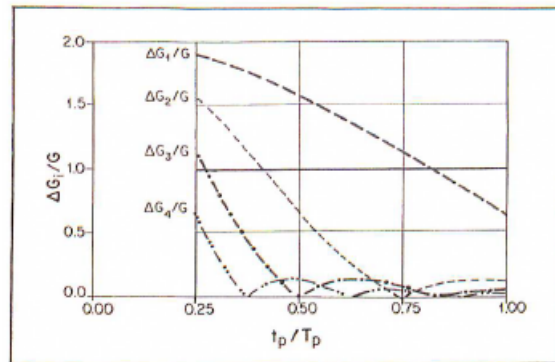


Abbildung 3.24.: Lastanteil der einzelnen Harmonischen nach Bachmann und Ammann [20]

Die in Abbildung 3.24 dargestellten Werte für eine relative Kontaktzeit von 0,5 liefern die Grundlage für die Beiwerte in der VDI 2038 und in der Setra-Richtlinie (vgl. Tabelle 3.5).

In der Setra-Richtlinie werden allerdings im Vergleich zur VDI 2038 nur die Werte angesetzt, die größer Null sind. Während der Flugphase findet kein Lasteintrag statt.

$$F(t) = \begin{cases} F_G \cdot [(1 + \sum c_j \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f_s \cdot t))] & \text{für } (j-1) \cdot t_p \leq t \leq (j - \frac{1}{2}) \cdot T_p \\ 0 & \text{für } (j - \frac{1}{2}) \cdot T_p < t \leq j \cdot T_p \end{cases} \quad (3.24)$$

Tabelle 3.5.: Fourierkoeffizienten und Phasenwinkel für die Bewegungsart Rennen

	VDI 2038 [1]	Setra	ISO 10137 [32]	Rainer [35]	Seiler/Hüttner [36]
$f_s$	$2,0 \leq f_s \leq 3,5$	$2,0 \leq f_s \leq 3,5$	$2,0 \leq f_s \leq 4,0$	$2,0 \leq f_s \leq 3,0$	$2,0 \leq f_s \leq 3,5$
$c_1$	$\leq 1,60$	1,60	1,40	$\leq 1,40$	1,38
$c_2$	$\leq 0,70$	0,70	0,40	$\leq 0,40$	0,31
$c_3$	$\leq 0,20$	0,20	0,40	$\leq 0,12$	-0,10
$c_4$	-	-	-	$\leq 0,08$	-
$\varphi_1$	-	-	-	-	$\pi \cdot (-0,4 \cdot 1 + 0,5)$
$\varphi_2$	-	-	-	-	$\pi \cdot (-0,4 \cdot 2 + 0,5)$
$\varphi_3$	-	-	-	-	$\pi \cdot (-0,4 \cdot 3 + 0,5)$

Seiler und Hüttner unterzogen ihre aufgezeichneten Messdaten ebenfalls einer Fourieranalyse und setzten, im Vergleich zu den anderen Autoren, jedoch auch Phasenwinkel an. Durch den Einsatz einer Kombination von Phasenwinkeln ist es möglich, durch die Fourierreihe annähernd ein impulsartiges Lastbild zu generieren.

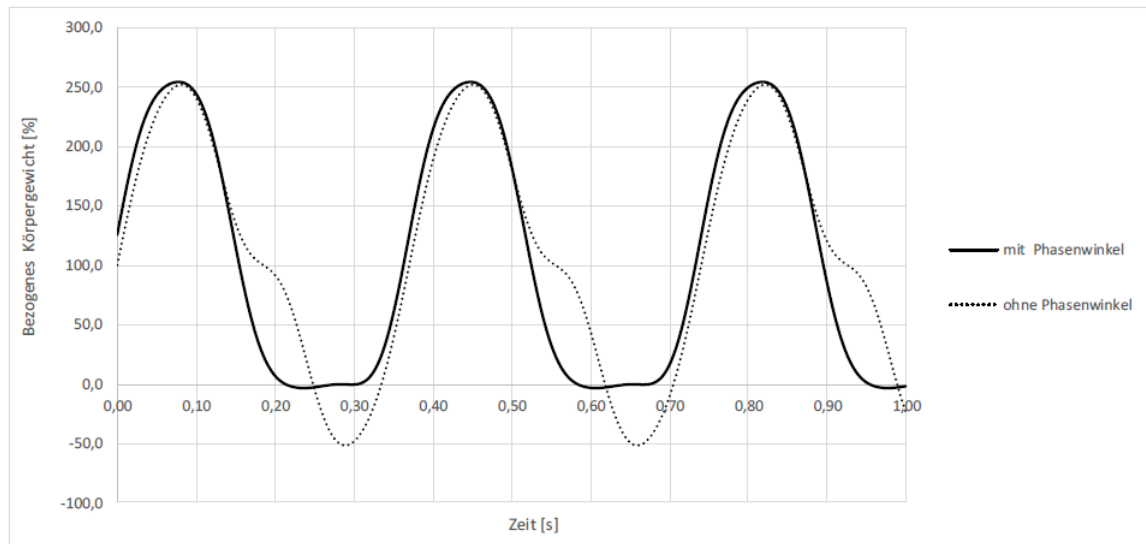


Abbildung 3.25.: Einfluss der Phasenverschiebung auf den Last-Zeit-Verlauf beim Laufen am Beispiel Seiler/Hüttner für eine Schrittfrequenz von 2,7 Hz

Der Einfluss der von Seiler und Hüttner genannten Phasenwinkel  $\varphi_j$  wird in Abbildung 3.25 deutlich. Während in der Kurve mit Ansatz der Phasenwinkel ein nahezu impulsartiger Last-Zeit-Verlauf generiert wird, erinnert der Ansatz ohne die Phasenwinkel an die Werte aus der VDI-Richtlinie und bringt negative Lasten auf das Bauwerk auf. Auch das Intervall ohne Last (während der Flugphase) verändert sich ohne den Ansatz eines Phasenwinkels.

Neben den in diesem Kapitel vorgestellten Ansätzen zur Darstellung des Last-Zeit-Verlaufes gibt es noch viele weitere Literaturquellen, wie beispielsweise Archbold [40] oder McRobie [41], die alle das Ziel haben, die entstehenden Bodenreaktionskräfte gut abzubilden. Dabei zeigt sich, dass auch bei einem ähnlichen Ansatz der Funktion mit einer Fourierreihe, sowohl die Wahl der Beiwerte als auch die Anzahl der harmonischen Lastanteile maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des Verlaufes haben.





## 4. Entwickeltes E-Learning-Konzept

### 4.1. Rahmenbedingungen für die Erstellung des E-Learning-Konzeptes

#### 4.1.1. Anforderungen an das zu erstellende Konzept

Um aus der Vielzahl der möglichen E-Learning-Tools, Plattformen und Ansätzen ein stimmiges und zielführendes Lehrkonzept zu entwickeln, ist eine klare Definition der Anforderungen an das Konzept und die Lernziele wichtig. Das Hauptziel des hier entwickelten Lehrkonzeptes ist, Studierende zu verschiedenen Zeitpunkten des Studiums (Bachelor- oder Masterstudium) in Forschungsprojekte einzubinden und ihnen so zu ermöglichen, sich über forschendes Lernen neuen Sachverhalten zu nähern und wissenschaftliches Arbeiten sowie den Umgang mit Messtechnik zu erlernen. Um die Anforderungen und Ziele des Konzeptes zu konkretisieren, wurde sich unter anderem an folgenden Fragestellungen orientiert:

1. Was sind die Ziele des Lehrkonzeptes?  
Das E-Learning-Konzept soll es ermöglichen, Studierende in ein laufendes Forschungsprojekt einzubinden und Forschung und Lehre gut zu verknüpfen. Die Teilfragestellungen für die Studierenden müssen außerdem gut auf die entsprechende Workload anpassbar sein.
2. Wer kann an dem Lehrkonzept teilnehmen?  
Teilnehmen sollen Studierende im Rahmen von Pflicht- und Wahlpflichtfächern und Abschlussarbeiten aus dem Bachelor- und Masterstudiengang Konstruktiver Ingenieurbau der TH Köln.
3. Mit wie vielen Teilnehmern ist pro Semester zeitgleich zu rechnen?  
Die Gruppengrößen schwanken je nach Semester, da im Sommersemester ein Wahlpflichtmodul aus dem Bachelor- und aus dem Masterstudiengang planmäßig stattfindet. Die Teilnehmerzahlen liegen üblicherweise bei circa 6 Teilnehmern pro Modul. Im Wintersemester findet das Wahlpflichtmodul *Versuchsgestützte Bemessung* aus dem Masterstudiengang statt und planmäßig starten dann auch die meisten Studierenden aus dem Bachelorstudiengang ihre Abschlussarbeiten.
4. Was sind die Vorkenntnisse der Teilnehmer?  
Da Baudynamik als Wahlpflichtmodul im Bachelorstudiengang angeboten wird, können keine Vorkenntnisse in diesem Bereich erwartet werden, da die Teilnahme am Modul Baudynamik keine zwingende Voraussetzung für die Teilnahme ist.
5. Welche technischen Zugangsmöglichkeiten können erwartet werden?  
Es wird erwartet, dass die Studierenden über einen PC oder Laptop mit Zugang zum Internet verfügen. Für Studierende, bei denen diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, stehen insgesamt drei Leihgeräte zur Verfügung. Internetzugang haben alle Studierende auch in der Hochschule, was zwar die örtliche Flexibilität einschränkt, aber dennoch jedem Student eine Teilnahme in vollem Umfang erlaubt.
6. Was sollen die Studierenden lernen?  
Die Studierenden sollen sich forschend mit dem Thema fußgängerinduzierte Schwingungen

als Teilgebiet der Baudynamik auseinandersetzen. Sie sollen die Grundlagen der Baudynamik verstehen, die Problemstellung des Forschungsprojektes erkennen und sich mit Forschungsmethoden auseinandersetzen. Sie sollen den Umgang mit Messtechnik erlernen und kleine Fragestellungen im Forschungsbereich beantworten.

7. Wie viel Zeit haben die einzelnen Studierenden für ihr Forschungsprojekt?  
Die Lernziele und Workload unterscheiden sich je nach Teilnahmemöglichkeit und werden in Kapitel 4.1.2 gesondert behandelt.
8. Wie soll das nötige Fachwissen zur Verfügung gestellt werden?  
Die Studierenden sollen das nötige Fachwissen vornehmlich im Selbststudium über das Wiki und Fachliteratur beziehen.
9. Wie soll das Erreichen der Lernziele geprüft werden?  
Obwohl Studierende verschiedener Module und auch mit Abschlussarbeiten an dem Projekt teilnehmen können, werden alle Teilnehmer auf die gleiche Art geprüft. Sie erstellen eine, ihrer Aufgabenstellung im Umfang angemessene, schriftliche Ausarbeitung, eine Wiki-Seite mit ihren zusammengefassten Ergebnissen und werden abschließend in einem Kolloquium zur Projektarbeit befragt.
10. Welche Taxonomiestufe nach Bloom [42] soll erreicht werden?  
Die Studierenden sollen die Taxonomiestufen *Evaluation* erreichen und ihre Projektarbeit bewerten und in den Gesamtkontext einordnen können.

#### **4.1.2. Lernziele der einzelnen Teilnahmemöglichkeiten**

##### **4.1.2.1. Allgemeines**

Um möglichst vielen Studierenden die Teilnahme an diesem Forschungsprojekt zu ermöglichen, wurde zu Beginn recherchiert, in welchen Modulen des Studiengangs Studierende daran teilnehmen könnten. Im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau gibt es jeweils ein Wahlpflichtmodul im Bachelor und im Master. Außerdem kommt neben den Abschlussarbeiten noch das Wissenschaftliche Projekt im Masterstudiengang in Betracht. Diese Module und Projektarbeiten haben nach den Modulhandbüchern unterschiedliche Schwerpunkte, die auf unterschiedliche Bereiche dieses Forschungsvorhabens passen.

Die Fragestellungen werden jeweils auf den Modulschwerpunkt angepasst. Je nach Workload und Themenschwerpunkt greifen die Teilfragestellungen entweder in die gesamte Forschungsfrage ein, oder behandeln nur kleine Ausschnitte. Die Studierenden haben sowohl im Bachelorstudiengang als auch im Master jeweils 3 Möglichkeiten am Forschungsprojekt teilzunehmen.

#### 4.1.2.2. Bachelorstudiengang

**Bauteile und Verbindungen im Stahlbau** Bei dem Modul *Bauteile und Verbindungen im Stahlbau*, kurz *BVS*, handelt es sich um ein Wahlpflichtmodul der Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau im Bachelorstudiengang der TH Köln. Es wird planmäßig im 6. Semester angeboten.

Das Modulhandbuch [43] legt eine Workload von 5 CP, bei 30 Std/CP also 150 Stunden fest. Als Lernziele werden „experimentelle Untersuchungen von Bauteilen und Verbindungen im Stahlbau und/oder [die] Entwicklung von Bemessungshilfen, um das Tragverhalten [...] bzw. das Schwingverhalten von Bauteilen detailliert zu erfassen [...]“ [43, S. 84] vorgegeben. Die Lehrinhalte sind konkret in die Kapitel

1. Versuchsgestützte Untersuchungen von Bauteilen und Verbindungen
2. Entwicklung von Bemessungs- oder Auswertprogrammen mit z.B. Excel oder Visual Basic
3. Bemessungshilfen: Diagramme, Tabellen, elektronische Nachschlagewerke

eingeteilt. Die Vorgaben im Modulhandbuch lassen eine Bearbeitung von Teilfragestellungen im Bereich der Baudynamik an Stahlbauteilen zu. Die Studierenden können mit Fragestellungen zur Ermittlung und Auswertung von Messdaten und zur Messtechnik allgemein eingebunden werden.

**Baudynamik** Das Wahlpflichtmodul *Baudynamik* wird im 7. Semester angeboten. Das Modul ist nicht, wie zum Beispiel *BVS*, rein projektbasierend, sondern wird über klassische Lehrveranstaltungen mit Vorlesungen und Übungen abgehalten. Die Workload beträgt auch hier 5 CP. Das Modulhandbuch legt hier als Lernziele die Grundlagen der Dynamik und Schwingungsberechnungen fest. Durch die vorgegebenen Lehrinhalte zu den Grundlagen der Baudynamik, werden die Studierenden anteilig, mit einem Umfang von 1-2 CP, an die Messtechnik herangeführt. Die Studierenden nutzen hierbei die durch E-Learning-Tools zur Verfügung stehenden Informationen, bearbeiten jedoch keine Fragestellung aus dem Forschungsprojekt. Dieses Wahlpflichtmodul gibt den Studierenden jedoch einen Einblick in die Themenschwerpunkte Baudynamik und Messtechnik sowie Aufschluss über die Funktionsfähigkeit des Lehrkonzeptes.

**Bachelor-Thesis** Die Bachelorarbeit stellt mit 15 CP die größte Workload im Bachelorstudiengang zur Verfügung. Die Themenwahl ist hier frei, somit können die Studierenden jede Teilfragestellung, deren Umfang einer Workload von 15 CP entspricht, bearbeiten.

#### 4.1.2.3. Masterstudiengang

**Versuchsgestützte Bemessung** Das Wahlpflichtmodul *Versuchsgestützte Bemessung (VGB)* des Masterstudiengangs Konstruktiver Ingenieurbau verfügt über eine Workload vom 6 CP. Als Lernziele sind die „Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen an Bauelementen [...], um das wirkliche Trag- bzw. Schwingungsverhalten zu veranschaulichen und zu quantifizieren“, vorgesehen [44]. Da die Lehrinhalte mit *Messtechnik*, *Versuchsplanung*, *Versuchsdurchführung* sowie *Auswertung und Dokumentation* sehr flexibel definiert sind, lassen sich die Studierenden aus diesem Wahlpflichtmodul in nahezu jede Teilfragestellung aus dem Forschungsprojekt einbinden.

**Wissenschaftliches Projekt Konstruktiver Ingenieurbau** Bei dem *Wissenschaftlichen Projekt* können die Studierenden im Masterstudiengang Bauingenieurwesen, ähnlich wie zuvor bei der Bachelorarbeit, einen Prüfer auswählen. Das Projekt soll die Studierenden dazu befähigen, „eine theoretische Aufgabenstellung aus dem Gebiet des Konstruktiven Ingenieurbaus mit wissenschaftlichen Methoden weitgehend selbständig zu bearbeiten und darzustellen. Die Lehrinhalte sind jeweils von der Aufgabenstellung abhängig. Die Studierenden können daher mit einer großen Workload von 12 CP am Forschungsprojekt teilnehmen.“

**Master-Thesis** Für die Masterarbeit gilt prinzipiell das Gleiche wie für die Studierenden, die im Rahmen einer Bachelorarbeit oder des wissenschaftlichen Projektes am Forschungsprojekt teilnehmen. Sie sind in der Bearbeitung der Teilfragestellungen sehr frei, haben jedoch mit 18 CP die größte Workload zur Verfügung.

#### 4.1.3. Technische Rahmenbedingungen

Es wurde entschieden, das E-Learning-Konzept auf der Plattform ILIAS umzusetzen, da diese in der Hochschule vorhanden ist, die Studierenden einen Zugriff darauf haben und ein Support seitens der Campus-IT gewährleistet ist. Studierende der Technischen Hochschule Köln sind seit dem ersten Semester mit ILIAS vertraut, da dort Skripte und weitere Unterlagen bereitgestellt werden. Die Studierenden können sich dort mit ihrer Campus-ID einloggen, während die Dozenten dort ihre Kurse einrichten und nur für bestimmte Personenkreise freigeben können. In ILIAS stehen verschiedene Organisations- und Lerntools zur Verfügung (vgl. Abbildung 2.3).

## 4.2. Beschreibung des E-Learning-Konzeptes

### 4.2.1. Allgemeine Beschreibung

Das E-Learning-Konzept wurde in den verschiedenen Durchläufen angepasst und verbessert, um auf Kritik und Feedback der Studierenden einzugehen und die dort angesprochenen Punkte zu verbessern. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf das angewandte Konzept eingegangen. Im Kapitel 8.3.4 werden die Änderungen, die sich im Verlauf der Durchführung ergeben haben, beschrieben.

Der Grundgedanke, auf dem das E-Learning-Konzept beruht, ist, dass es Studierenden, sowohl im Bachelor- als auch im Masterstudiengang, zu verschiedenen Zeiten ihres Studiums möglich sein soll, einen Einblick in ein Forschungsprojekt zu bekommen, und durch ihre Teilnahme einen Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfrage zu leisten.

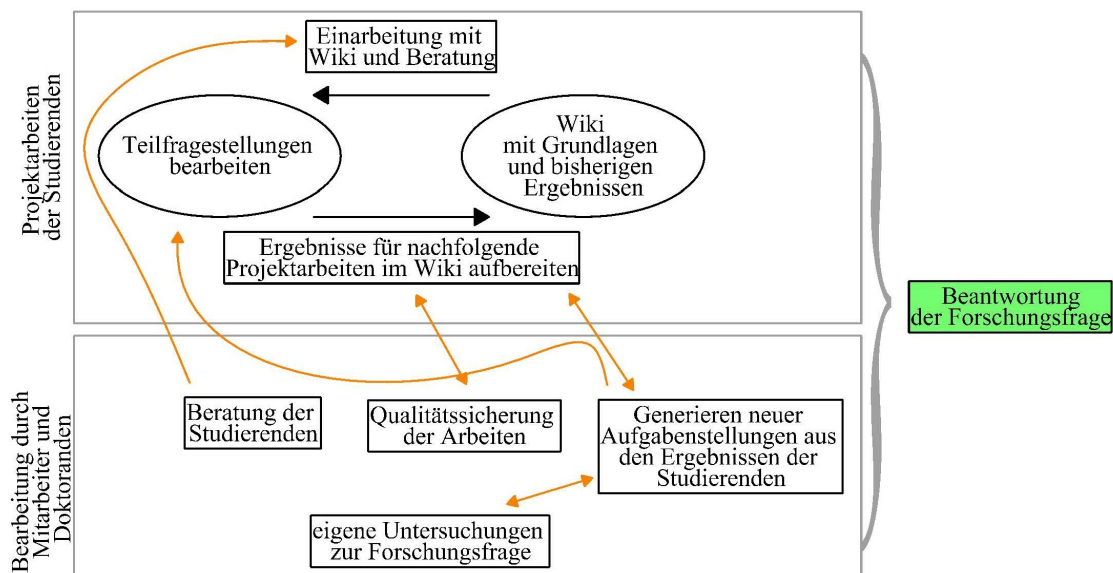


Abbildung 4.1.: Konzept-Skizze

Im LMS ILIAS wurde ein Kurs für die Studierenden angelegt. In diesem befindet sich unter anderem ein Wiki, welches als zentrales Tool des E-Learning-Konzeptes genutzt wird.

Die ersten Seiten des Wikis wurden mit Grundlagen zu Baudynamik, Messtechnik und einer Beschreibung des Forschungsprojektes angelegt. Die teilnehmenden Studierenden konnten sich so

eigenständig und unabhängig von ihrem Vorwissen in das Thema einarbeiten und mit Beratung der Betreuer ihre Teilfragestellung bearbeiten. Die so gewonnenen Ergebnisse werden im Wiki veröffentlicht, sodass die nachfolgenden Studierenden diese Erkenntnisse in die Bearbeitung ihrer eigenen Fragestellung einbeziehen können.

Die Projektbetreuer nehmen so, zusätzlich zur eigenen Forschungsarbeit, die Rolle eines Projektmanagers ein. Sie kümmern sich um die Beratung der Studierenden, die Qualitätssicherung und die Generierung neuer Aufgabenstellungen aus den bisherigen Ergebnissen.

Ziel ist es, durch Zusammentragen der Ergebnisse über die vorher geplante Dauer des Forschungsprojektes, die Forschungsfrage zu beantworten.

Um die Funktionalität des Konzeptes zu untersuchen, wurde das Konzept evaluiert. Auf die Evaluation, und daraus resultierenden Anpassungen wird in Kapitel 8 eingegangen.

#### 4.2.2. Ablauf einer Projektarbeit

Der grundsätzliche Ablauf einer Projektarbeit ist, unabhängig von der zu erreichenden Workload, immer gleich und in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Studierenden erhalten von ihrem Projektbetreuer eine Aufgabenstellung. Diese ist relativ frei gestellt, sodass, falls bei der Bearbeitung Punkte aufkommen, die einer genaueren Betrachtung bedürfen, diese auch mit abgedeckt werden können. Anschließend arbeiten sich die Studierenden selbstständig in das Thema ein. Hierzu nehmen sie den angelegten ILIAS-Kurs mit dem Wiki, einem Glossar und weiteren Tools zur Hilfe.



Abbildung 4.2.: Üblicher Ablauf einer Projektarbeit

Nun folgt der wichtigste Teil, das Bearbeiten der Fragestellung. In einem Beratungsgespräch mit dem Projektbetreuer müssen die Studierenden ihr Konzept zur Beantwortung der Fragestellung darlegen. Die Studierenden arbeiten nun, weiterhin unter Zuhilfenahme der E-Learning-Tools und Beratungsgespräche, an ihrer Fragestellung. Am Ende der Bearbeitungszeit geben sie eine schriftliche Ausarbeitung ihrer Ergebnisse ab. Eine Woche später müssen sie eine oder mehrere Wiki-Seiten mit ihren Ergebnissen erstellt oder ergänzt haben. Wenige Tage danach erhalten sie ein Feedback zu ihren Ausführungen im Wiki und können die dort gemachten Anmerkungen noch einpflegen. Die Ausarbeitung, die Wiki-Seiten und ein abschließendes Kolloquium werden zur Leistungsbewertung herangezogen.

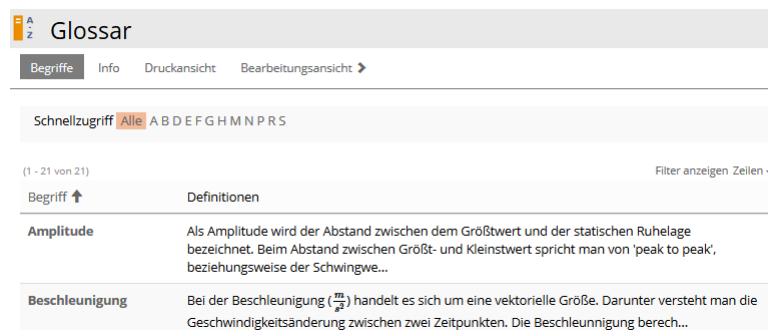
Die Dozenten begleiten diesen Prozess, beraten die Studierenden und bewerten am Schluss die Leistung. Nach der Bewertung wird überlegt, mit welcher weiteren Aufgabenstellung die ermittelten Ergebnisse ergänzt und erweitert werden können.

### 4.2.3. Genutzte E-Learning-Tools

Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben, wurden E-Learning-Tools gesucht, die sich dazu eignen, ein Projekt kollaborativ und zeitlich unabhängig zu bearbeiten. Im ILIAS-Kurs zu dem Forschungsprojekt befinden sich zwei Wikis (*Fußgängerinduzierte Schwingungen* und *HowTo:Wiki*), ein Glossar, eine Literaturliste, ein Ordner mit Dokumenten und eine Linksammlung zu während der Bearbeitung nützlichen Seiten. Neben den in ILIAS direkt verfügbaren Tools kommen aber noch andere, wie beispielsweise die Campuscloud Sciebo, zum Einsatz.

**Wiki** Das wichtigste genutzte E-Learning-Tool ist das Wiki. Im LMS ILIAS werden zwei Wikis mit ihren Hauptseiten durch die Projektbetreuer angelegt. Das Wiki mit dem Titel *Fußgängerinduzierte Schwingungen* ist das Forschungswiki, in dem die Studierenden sich in die Inhalte einarbeiten können und ihre eigenen Ergebnisse nachfolgenden Studierenden präsentieren. Dieses Wiki funktioniert als virtuelle Umgebung für die kollaborative Forschung. Im zweiten Wiki mit dem Titel *HowTo:Wiki* werden den Studierenden Grundlagen des wissenschaftlichen Schreibens und eine Anleitung zur Erstellung von eigenen Seiten erläutert. Dieses Wiki hat demnach nur die Funktion Wissen zu vermitteln und ist mit einem Skript zu vergleichen.

**Glossar** Das genutzte Glossar ist ebenfalls ein in ILIAS verfügbares Tool und soll den Studierenden, die mit wenig oder keinen Vorkenntnissen im Bereich Baudynamik an dem Projekt teilnehmen, ermöglichen, sich schnell und effektiv in das verwendete Vokabular einzuarbeiten. Außerdem kann so sichergestellt werden, dass Fachbegriffe korrekt verwendet werden. Das Glossar wurde auch von den Projektbetreuern erstellt und eignet sich aufgrund seiner Struktur besser zur Erläuterung einzelner Begriffe, als dafür jeweils eine neue Wiki-Seite anzulegen. Die einzelnen Glossareinträge können aber im Wiki verlinkt werden.



Begriff	Definitionen
Amplitude	Als Amplitude wird der Abstand zwischen dem Größtwert und der statischen Ruhelage bezeichnet. Beim Abstand zwischen Größt- und Kleinstwert spricht man von 'peak to peak', beziehungsweise der Schwingwe...
Beschleunigung	Bei der Beschleunigung ( $\frac{m}{s^2}$ ) handelt es sich um eine vektorielle Größe. Darunter versteht man die Geschwindigkeitsänderung zwischen zwei Zeitpunkten. Die Beschleunigung berech...

Abbildung 4.3.: Ausschnitt Glossar

**Videos** Zur Vermittlung von Softwarekenntnissen (speziell zur Software *MEDA* zur Erfassung von Schwingungen) wurde sich für Videos als Medium entschieden. Diese sind auf den entsprechenden Wiki-Seiten eingebunden und noch einmal in einem Medienpool auf der Startseite verlinkt. Die Studierenden erhalten für die Projektdauer einen Hardkey zu der genannten Software und sollen selbstständig Messprojekte anlegen und die aufgebauten Messketten im System richtig einstellen. Für die einzelnen Teilschritte wurden jeweils kurze Bildschirmvideos mit der Software *Camtasia* erstellt. Die Videos befassen sich dabei immer nur mit einem kurzen Abschnitt, beispielsweise dem Anlegen eines Projektes in MEDA, dem Einstellen der Messparameter oder dem Starten einer Messung. Videos finden auch in Beratungen Anwendung. Bei Rückfragen der Studierenden zu Einstellungen der Software, sofern diese nicht in einem Beratungsgespräch erfolgen, sondern per E-Mail, hat es sich als hilfreich erwiesen, den Studierenden ein kurzes Bildschirmvideo mit Antworten zu den Fragen zu erstellen.

**Sciebo** Sciebo ist ein Filehosting-Dienst des Landes NRW für Hochschulen und Universitäten. Die Studierenden können sich mit ihrer CampusID, mit der sie Zugang zu allen hochschuleigenen Diensten haben, einloggen und den Dienst gratis nutzen. Mit den Studierenden können so Messdaten und Informationen unter Wahrung der deutschen Datenschutzrichtlinien ausgetauscht werden.

**E-Mail und andere Kommunikationstools** Neben den persönlichen Beratungsgesprächen für die Studierenden wird auch eine Beratung über Telefon und E-Mail angeboten. Dies ist aber nur als ergänzendes Angebot für Rückfragen gedacht, die Studierenden sind angehalten, regelmäßig zu den vereinbarten Terminen zu erscheinen.



## 5. Überarbeitung des Lastansatzes

### 5.1. Experimentelle Untersuchungen

#### 5.1.1. Untersuchungen des menschlichen Gangs auf starrem und schwingendem Untergrund

Im Rahmen von studentischen Projektarbeiten und Untersuchungen der Autorin werden für die Entwicklung und Überarbeitung des Lastansatzes der VDI 2038 experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierbei sollen die für den menschlichen Gang relevanten Parameter und Kräfte erfasst werden. Je nach konkreter Fragestellung unterscheiden sich Messziele und Versuchsaufbauten.

Dabei liegt der Fokus der Untersuchungen bei vertikalen Schwingungen und Kräften.

Das übergeordnete Ziel ist es, einen Lastansatz zu generieren, der die entstehenden Lasten realitätsnah darstellt.

#### 5.1.2. Ziele der experimentellen Untersuchungen

Es werden Aspekte untersucht, die Einfluss auf die Bodenreaktionskräfte haben können. Hierbei werden folgende Fragestellungen behandelt:

- Wie verlaufen die vertikalen Bodenreaktionskräfte auf starrem und auf schwingendem Untergrund? Wie unterscheiden sich diese Verläufe?  
Durch diese Fragestellung soll ermittelt werden, ob sich die Lastmaxima der Bodenreaktionskräfte beim Gehen und Laufen durch einen schwingenden Untergrund, abhängig von der Schwingungsamplitude, im Vergleich zu einem starrem Untergrund verändern und, wenn ja, wie groß dieser Einfluss ist.  
So soll festgestellt werden, ob der Ansatz von Bodenreaktionskräften von starrem auf einen schwingenden Untergrund übernommen werden kann.
- Welchen Einfluss haben die Gangparameter wie Schrittlänge und Schrittfrequenz auf die Bodenreaktionskräfte?  
Die Zusammenhänge zwischen Bodenreaktionskräften, Schrittfrequenz, Schrittlänge und Schrittgeschwindigkeit sind in der Literatur wie zum Beispiel [22] beschrieben. Eine Betrachtung dieser Fragestellung wird aber im Rahmen von studentischen Projektarbeiten erfolgen und soll den Studierenden die Zusammenhänge verdeutlichen.
- Welchen Einfluss haben Personengruppen auf die Schwingungsamplitude von Fußgängerbrücken?  
In der VDI 2038 wird ein Synchronisationsfaktor  $C$  vorgeschlagen, um den Einfluss mehrerer Personen zu berücksichtigen. Um diesen in die Überarbeitung einbeziehen zu können, werden hierzu ebenfalls Versuchsreihen durchgeführt. Ziel ist es zu erfassen, ab welcher Schwingungsamplitude es zu einer Beeinflussung der Gangparameter kommt und mit welchem Faktor der Einfluss mehrere Personen angesetzt werden kann.
- Kalibrierung eines Stabwerksmodells der Stahlbrücke, um einen Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten zu ermöglichen.  
Zur Durchführung der Versuche wurde eine 10 Meter lange Stahlbrücke bemessen, die

eine niedrige Eigenfrequenz aufweist. Nach Aufbau der Brücke und Anschließen der Messtechnik soll ein Stabwerksmodell der Versuchsbrücke kalibriert werden, um die gleichen Eigenschaften, Schwingungsantworten und Auflagerkräfte unter definierten dynamischen Lasten abzubilden. Durch dieses kalibrierte Modell sollen die Auswirkungen verschiedener Lastansätze auf das Tragwerk verglichen und mit dem realen Modell abgeglichen werden können.

Für diese unterschiedlichen Untersuchungsziele wurden unterschiedliche Aufbauten und Messtechnik benötigt. Diese werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

### 5.1.3. Verwendete Messtechnik

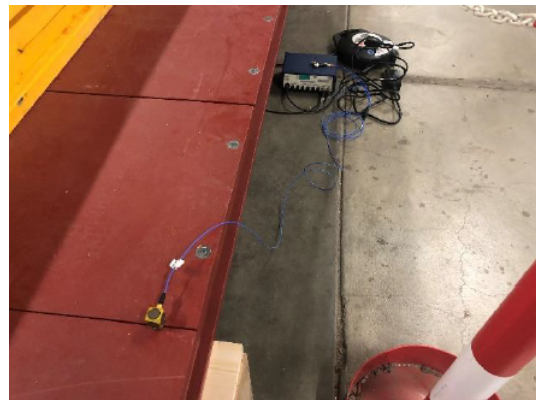
#### 5.1.3.1. Messtechnik zur Erfassung von Schwingungen

Zur Erfassung von Schwingungen stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Neben Schwinggeschwindigkeitssensoren LE-3D der Firma Lennartz konnten auch ein- und dreiaxiale Beschleunigungssensoren der Firma *PCB Piezotronics* verwendet werden.

Für Messungen an Fußgängerbrücken im Kölner Raum wurden hauptsächlich die Lennartz LE-3D/DIN Sensoren und die zugehörige Messkette mit einer AD-Karte verwendet. Für Messungen an der Laborbrücke kamen die Beschleunigungssensoren zum Einsatz, da diese einen größeren Messbereich aufweisen. In Anhang A ist in Abbildung A.3 der Messaufbau für die Schwingungsmesstechnik dargestellt. Dort ist in Brückenmitte ein Baudynamikshaker BD-5 der Firma Wölfel abgebildet, der in manchen Versuchsreihen statt der Kraftmessplatten zum Einsatz kam. In Abbildung 5.1 sind die ein- und dreiaxialen Sensoren auf der Brücke im Detail abgebildet. Als Software zur Erfassung der Schwingungen wurde *MEDA* [45] der Firma Wölfel genutzt.



(a) Einaxialer Beschleunigungssensor



(b) Dreiaxialer Beschleunigungssensor angeschlossen an eine Verstärkerbox

Abbildung 5.1.: Beschleunigungssensoren auf der Versuchsbrücke

#### 5.1.3.2. Messtechnik zur Erfassung von Bodenreaktionskräften

Zur Erfassung fußgängerinduzierter Lasten und der Abbildung des Gang- und Laufverhaltens kommen verschiedene Messeinrichtungen infrage. Neben Kraftmessplatten können instrumentierte Laufbänder oder auch Druckmesssohlen genutzt werden. Diese unterschiedlichen Methoden haben verschiedene Vor- und Nachteile und sind auch nicht alle mit den definierten Versuchszielen kompatibel.

Kraftmessplatten stellen eine gängige Methode zur Erfassung von Bodenreaktionskräften dar. Je nach Modell und Aufbau sind auch Messungen der horizontalen Kräfte in und quer zur Gangrichtung möglich. Je nach Größe der Kraftmessplatten kann es aber zu einem bewussten oder

unbewusstem Anvisieren der Platten, einem sogenannten Targeting, kommen. Dadurch werden die natürlichen Gangparameter, wie Schrittlänge, Schrittgeschwindigkeit und Schrittfrequenz verändert. Werden die Platten hingegen verdeckt angeordnet, kann es passieren, dass die Platten nicht richtig getroffen und belastet werden.

Unter instrumentellen Laufbändern versteht man ein Laufband mit integrierten Kraftsensoren. Auch wenn hier eine beliebig hohe Anzahl an Schrittwiederholungen durchgeführt werden kann, ohne dass ein Targeting auftritt, wird hier durch die vorgegebene Geschwindigkeit des Laufbands ebenfalls Einfluss auf das Gangbild genommen und der Aufbau lässt sich mit den Versuchszielen auf einer Brücken nicht vereinbaren.

Eine weitere Möglichkeit wären Druckmesssohlen, die in die Schuhe eingelegt werden können. Diese müssen jedoch individuell angefertigt werden und können so nicht für eine große Anzahl an Probanden verwendet werden, obwohl sie keinerlei Einfluss auf die Gangparameter nehmen. Daher wurde sich für den Einsatz von Kraftmessplatten entschieden. Hier wurden erfreulicher- und dankenswerterweise Platten der RWTH Aachen zur Verfügung gestellt, mit welchen Butz die Versuche in ihrer Arbeit [26] durchgeführt hat. Da die Platten über einen Zeitraum von über 10 Jahren eingelagert waren, wurden im Vorfeld Untersuchungen zur Genauigkeit und Funktionsfähigkeit der Kraftmessplatten durchgeführt. Dabei ergab sich, dass die Erfassung der vertikalen Kräfte im Gegensatz zu den horizontalen Kräften zuverlässig durchgeführt werden konnte. Die Platten haben Abmessungen von 40 x 60 cm. In den Kraftmessplatten sind Wägezellen (Einpunktwägezellen bzw. Biegebalken-Wägezellen) verbaut, welche die vertikalen Kraftkomponenten erfassen. Das elektrische Signal der On-Board-Unit (OBU) wird über ein Adapterkabel LEMO auf SUB-D 15-polig an den Messverstärker *Spider 8* der Firma *HBM* übertragen. Dort wird das elektrische Signal in digitale Daten umgewandelt.



(a) Kraftmessplatten zur Erfassung der Bodenreaktionskräfte auf der Versuchsbrücke



(b) Aufbau der Plattform zur Sicherung der Probanden bei langen Schrittweiten

Abbildung 5.2.: Messtechnik zur Erfassung der Bodenreaktionskräfte

### 5.1.3.3. Messtechnik zur Erfassung von Auflagerkräften

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Versuchsbrücke geplant und gebaut. Hier war es möglich, Wägezellen unter den Auflagern zu planen, um so die Auflagerkräfte bei Belastung genau zu erfassen.

Unter den Auflagern der drei Hauptträger wurden *HLCB2*-Wägezellen der Firma *HBM* angeordnet. Diese wurden über Kabel mit 15-poligen SUB-HD-Steckern mit dem Messverstärker *Quantum X* von *HBM* verbunden und die Messdaten mit der Software *Catman Easy* [46] aufgezeichnet.

### 5.1.4. Versuchsaufbauten und Messketten

#### 5.1.4.1. Allgemeines

Da unterschiedliche experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt wurden, wurde je nach Ziel ein unterschiedlicher Messaufbau gewählt. Dabei handelt es sich um 4 unterschiedliche Aufbauten.

1. Stahlbrücke mit Kraftmessdosen an den Auflagern zur Ermittlung der Auflagerkräfte sowie Beschleunigungssensoren in Feldmitte zur Erfassung der Schwingungen
2. Kraftmessplatten zur Erfassung der Bodenreaktionskräfte auf starrem Untergrund
3. Stahlbrücke mit Kraftmessdosen an den Auflagern, Beschleunigungssensoren in Feldmitte und Kraftmessplatten zur Erfassung der Bodenreaktionskräfte
4. Beschleunigungssensoren auf verschiedenen ausgewählten Fußgängerbrücken zur Erfassung der Schwingungen

#### 5.1.4.2. Stahlbrücke

Zur Durchführung von Versuchen auf schwingendem Untergrund wurde eine Versuchsbrücke konzipiert. Als Ziel für die Bemessung und Konstruktion galt, eine Brücke zu planen, die eine Länge von 10 Meter und eine Breite von 2 Meter aufweist. Die Abmessungen ergeben sich aus dem möglichen Stellplatz. Dabei sollte die Eigenfrequenz nicht über 2,4 Hz liegen und eine Tragfähigkeit erreicht werden, dass bis zu vier Personen zeitgleich über die Brücke joggen können. Dies spiegelt zwar nicht die Anforderungen wider, die an Fußgängerbrücke gelten, sollte aber im Rahmen des Projektes dafür sorgen, große Schwingungsamplituden zu erreichen und den vorhandenen Platz bestmöglich auszunutzen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde die Planung dieser Brücke bearbeitet. Hier wurden mehrere Systeme entwickelt und miteinander verglichen.






Modell	Bild	Informationen & Ausschlusskriterium
Modell Überspannung		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenfrequenz &gt; 5 Hz → Stahlplatte h = 7 cm</li> <li>- Tragfähigkeit sehr gut</li> <li>- Durchbiegung sehr gering</li> </ul>
Modell Stab einfach		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenfrequenz <math>f = 2,57</math> Hz</li> <li>- Tragfähigkeit zu gering (infolge Eigengewicht komplett ausgenutzt)</li> <li>- Durchbiegung sehr hoch</li> </ul>
Modell Überspannung groß		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenfrequenz 3,27 Hz → Stahlplatte h = 6 cm</li> <li>- Tragfähigkeit sehr schlecht</li> <li>- Durchbiegung sehr hoch</li> </ul>
Modell Unterspannung groß		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenfrequenz &gt; 5 Hz → durch Unter- und Überspannung zu hohe Steifigkeit</li> <li>- Tragfähigkeit gut</li> </ul>
Modell Unterspannung klein		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenfrequenz &gt; 5 Hz</li> <li>- Tragfähigkeit schlecht</li> <li>- Durchbiegung hoch</li> </ul>

Abbildung 5.3.: Verschiedene entwickelte Brückenmodelle aus einer Bachelorarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes

In Abbildung 5.3 sind einige dieser entwickelten Modelle dargestellt. Sie wurden alle auf ihre Tragfähigkeit (nur unter Eigenlast, Imperfektionen und der Belastung durch gehende und

laufende Personen und Personengruppen) untersucht. Der Standort der Versuchsbrücke ist ein Laborvorraum in der TH Köln, daher sind Einwirkungen aus Wind, Schnee oder anderen Umwelteinflüssen ausgeschlossen. Auch Versammlungen von großen Personengruppen oder andere außergewöhnliche Einwirkungen wurden ausgeschlossen. Die Entwicklung eines Brückenmodells mit einer bei dieser kurzen Spannweite niedrigen Eigenfrequenz, bedingt durch eine geringe Steifigkeit bei hohem Eigengewicht, erwies sich als schwierig und benötigte ein iteratives Vorgehen. Die in der Bachelorarbeit als präferiertes Modell entwickelte Brücke ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Da dieses vorgeschlagene Modell allerdings Stabilitätsprobleme aufwies, wurde von der Autorin ein anderes System entwickelt und gewählt.

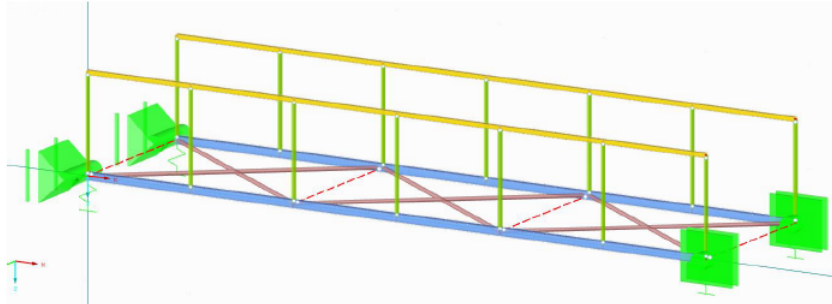


Abbildung 5.4.: Ersten entwickeltes (und anschließend verworfenes) Brückenmodell

Letztendlich wurde eine Brücke mit drei Profilen HEM 100 in S355 konzipiert. Diese wurden mit einem lichten Abstand von einem Meter angeordnet und durch Flachstahlbleche als Querträger miteinander verbunden. Als Belag wurden Stahlplatten in S235 mit einer Dicke von 10 mm jeweils mit zwei Schrauben an den Randträgern und am Mittelträger verschraubt. Es werden für die SL-Verbindungen der Querträger und die Montage der Wägezellen Schrauben vom Typ HV M16 und für den Anschluss der Belagsplatten Senkkopfschrauben M12 der Festigkeitsklasse 8.8 verwendet. Die Bohrlöcher weisen ein normales Lochspiel auf ( $M12\ d_0 = 1,0\text{ mm}$  und  $M16\ d_0 = 2,0\text{ mm}$ ) und es liegen die Gewinde der Schrauben in den Scherfugen. Die Schweißnähte sind mit einer Schweißnahtdicke  $a = 5,0\text{ mm}$  als umlaufende Kehlnähte ausgeführt. Im Anhang A sind Konstruktionszeichnungen der Brücke abgebildet. In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist die Brücke während des Aufbaus und nach Fertigstellung zu sehen.



Abbildung 5.5.: Unterkonstruktion der Brücke



Abbildung 5.6.: Fertig aufgebaute Versuchsbrücke

Wie in Abbildung 5.6 zu erkennen ist, weist die Versuchsbrücke auch in unbelasteter Ruhelage eine relativ große Verformung in Feldmitte auf. Dies ist den Vorgaben nach niedriger Eigenfrequenz bei kurzer Spannweite zuzuschreiben. Hier wurden dafür andere Gebrauchstauglichkeitskriterien, wie die Verformung, ignoriert, da ein Einhalten dieser Werte die Eigenfrequenz zu weit nach oben gebracht hätte und dadurch eine Anregung durch Fußgänger nicht so gut möglich gewesen wäre. Wenn keine Versuche auf der Brücke durchgeführt werden, werden mithilfe eines hydraulischen Wagenhebers Auflager in den Viertelpunkten der Brücke eingeschoben, um eine Beschädigung der Brücke oder der Messtechnik durch unsachgemäßen Gebrauch fremder Personen zu unterbinden.

Für eine Kalibrierung eines Stabwerkmodells sind die tatsächlichen Materialkennwerte der verwendeten Profile relevant. Die Stahlbrücke wurde von der Firma Queck hergestellt und geliefert. Durch Materialprüfung beim Hersteller sind Streckgrenze und Zugfestigkeit bekannt und konnten in den Stabwerksmodellen angepasst werden.

Tabelle 5.1.: Materialkennwerte der Brücke

	<b>Profil</b>	<b>Material</b>	$f_y$ in N/mm <sup>2</sup>	$f_u$ in N/mm <sup>2</sup>
Längsträger	HEM 100	S355JR	411	519
Querträger	FL 100 x 15 mm	S355JR	385	538
Gehwegplatten	BL 10 x 496 x 2000 mm	S235JR	310	442

Unter den drei Hauptträgern wurden an den Auflagerpunkten Wägezellen des Typs HLCB2 der Firma HBM mit einer Nennlast nach Hersteller von jeweils 1,76 Tonnen verbaut. Dies ist in Abbildung 5.7 dargestellt.



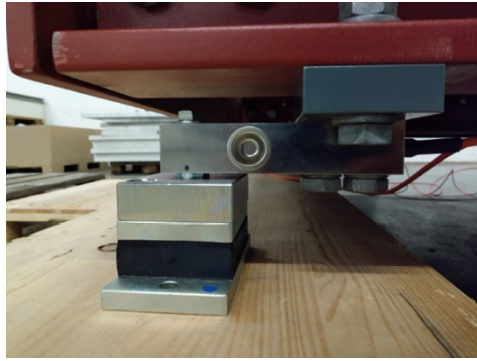


Abbildung 5.7.: Wägezelle HLCB2 an einem Auflager

Die Brücke wurde nach Fertigstellung im Rahmen verschiedener Projektarbeiten analysiert. Hierbei wurden folgende Punkte behandelt:

- Schwingungsmessung mit anschließender Ermittlung von Eigenfrequenz und Dämpfung des Systems
- Erstellung und Kalibrierung eines Stabwerksystems
- Untersuchungen zur Anpassung der Eigenfrequenz durch zusätzliche Lasten und Untersuchung des Einflusses der Verbundwirkung der Gehwegplatten auf die Eigenfrequenz
- Erfassung des Einflusses der weiteren Messaufbauten auf der Brücke auf die Eigenfrequenz

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden bei weiteren Projektarbeiten und Versuchsreihen berücksichtigt.

#### 5.1.4.3. Kraftmessplatten

Ein weiterer Messaufbau besteht aus einer Art Laufsteg auf starrem Untergrund, bei dem fünf Kraftmessplatten die vertikalen Bodenreaktionskräfte erfassen. Der Abstand zwischen den Kraftmessplatten ist variabel und wurde je nach Untersuchungsziel unterschiedlich gewählt. Bei großen Plattenabständen wurden Holzplatten zwischen den Kraftmessplatten befestigt, um eine Verletzungsgefahr oder zu starkes Anvisieren der Platten auszuschließen.



Abbildung 5.8.: Anordnung der Kraftmessplatten zu einem Laufsteg

Die Hauptaufgabe dieses Messaufbaus bestand in der Erfassung der Bodenreaktionskräfte auf starrem Untergrund sowie der Untersuchung des Einflusses verschiedener Schrittweiten auf die Bodenreaktionskräfte, um für nachfolgende Untersuchungen die bestmögliche Schrittweite zu wählen. Die Fragestellung nach der optimalen Schrittweite für nachfolgende Versuche zu Gehen und Laufen wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit am Rande betrachtet und in einer Projektarbeit im Modul *Versuchsgestützte Bemessung* vertieft. Die Abstände wurden durch experimentelle Untersuchungen und eine Literaturrecherche ermittelt.

#### 5.1.4.4. Brücke mit Kraftmessplatten

Da für diese Arbeit die Bodenreaktionskräfte auf schwingendem Untergrund relevant sind, wurde der Aufbau *Kraftmessplatten* auch auf der Brücke aufgebaut, wie in Abbildung 5.9 dargestellt. So konnten zeitgleich Bodenreaktionskräfte, Brückenschwingungen und Auflagerkräfte erfasst werden.

Dies ist der wichtigste und meist genutzte Aufbau für die Ermittlung der Überarbeitung des Lastansatzes.

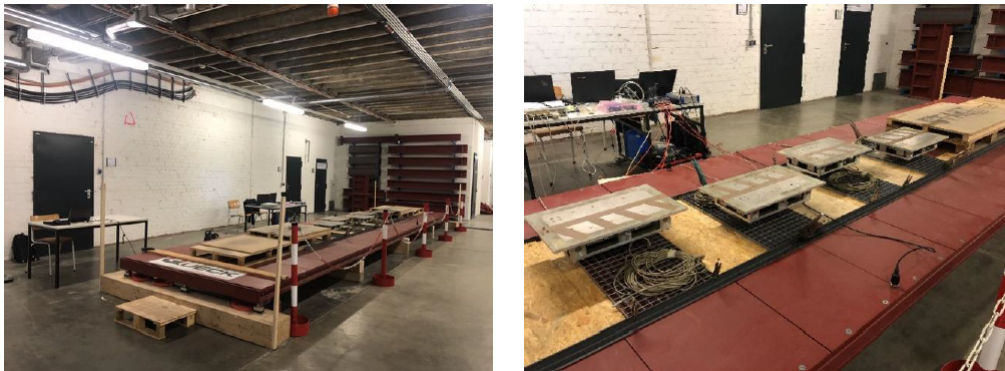


Abbildung 5.9.: Messaufbau der Stahlbrücke mit Kraftmessplatten

#### 5.1.4.5. Schwingungsmesstechnik auf Fußgängerbrücken

Da sich der Einfluss von Personengruppen auf der im Stahlbaulabor stehenden Brücke nicht optimal darstellen lässt, da diese durch ihre Abmessungen für größere Personengruppen nur bedingt geeignet ist, wurden Schwingungsmessungen auf schwingungsanfälligen Fußgängerbrücken im Kölner Umland durchgeführt.

Hier wurde eine Liste von Brücken erstellt und durch eine erste Begehung festgestellt, ob diese durch Personen angeregt werden können. Danach wurde Schwingungsmesstechnik (Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitssensoren) in Feldmitte des jeweiligen Brückensystems aufgestellt und es wurden Eigenfrequenz und Dämpfung ermittelt sowie Versuchsreihen mit Personengruppen zu regellosem Gehen und Laufen und zu synchronem Gehen und Laufen durchgeführt.



## 5.2. Überarbeitung des Lastansatzes für Gehen

### 5.2.1. Aufbereitung der Messdaten und Vorgehensweise

Die mit der Software CatmanEasy [46] mit einer Abtastrate von 600 Hz erfassten Messdaten werden in Matlab eingelesen. Erfasst werden die Bodenreaktionskräfte für 5 Einzelschritte. Zur Auswertung herangezogen werden die letzten vier Kraftmessplatten. Im ersten Schritt der Aufbereitung werden die Messdaten gesichtet und unter Umständen ein Hochpassfilter eingesetzt. Außerdem werden die Daten normiert indem durch das im Messprotokoll erfasste Körpergewicht der Probanden geteilt wird, um unabhängig vom Gewicht der unterschiedlichen Probanden einen Vergleich durchführen zu können. Nun werden die BRK der Einzelschritte überlagert, da für den Lastansatz die Gesamtlast relevant ist. Anschließend werden die Extremwerte des Verlaufs ermittelt, sodass die Messdaten auf einen kontinuierlichen Verlauf reduziert werden können (siehe Abbildung 5.10).

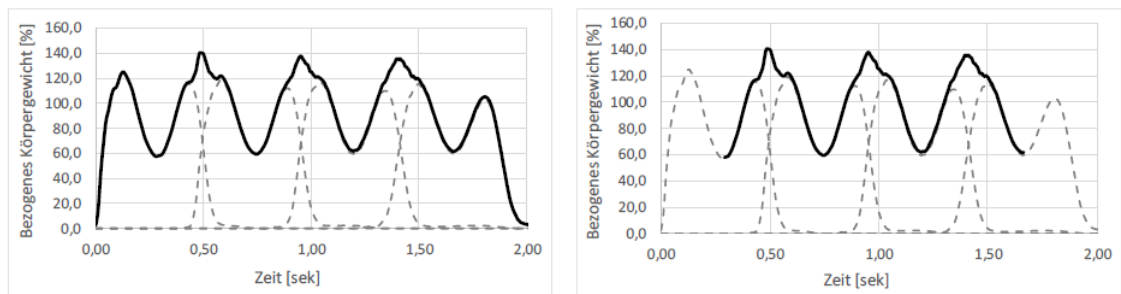


Abbildung 5.10.: Überlagerung der Einzelschritte und Reduzieren des Verlaufs

Als nächstes werden die Messdaten auf der Zeit-Achse verschoben, sodass verschiedene Messdatensätze vergleichend übereinandergelegt werden können und die durch die Fourieranalyse erzeugten Datensätze miteinander verglichen werden können. Dies ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

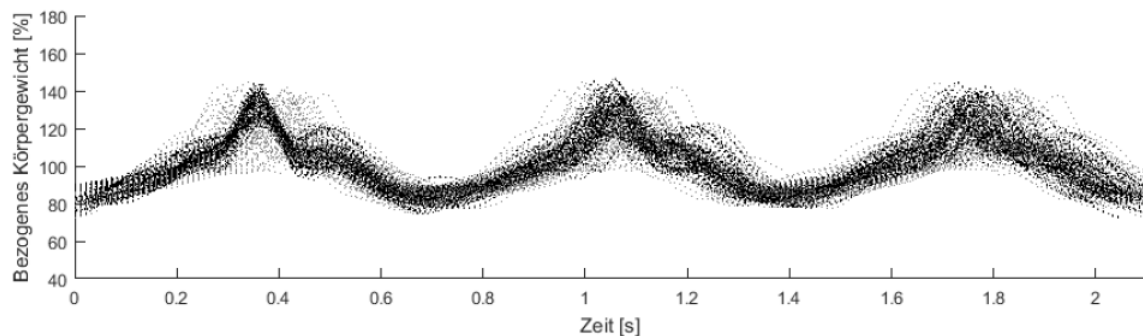


Abbildung 5.11.: Last-Zeit-Verläufe exemplarisch bei einer vorgegebenen Gangfrequenz von 1,4 Hz, nach den ersten Bearbeitungsschritten und verschoben auf  $t=0$  sec

Nach Sichtung der Verläufe wurden die Messdaten noch einmal verschoben, damit der erste Hochpunkt einer jeden Messung auf dem gleichen x-Wert liegt. Durch diese Darstellung ist ein optischer Vergleich wesentlich einfacher.

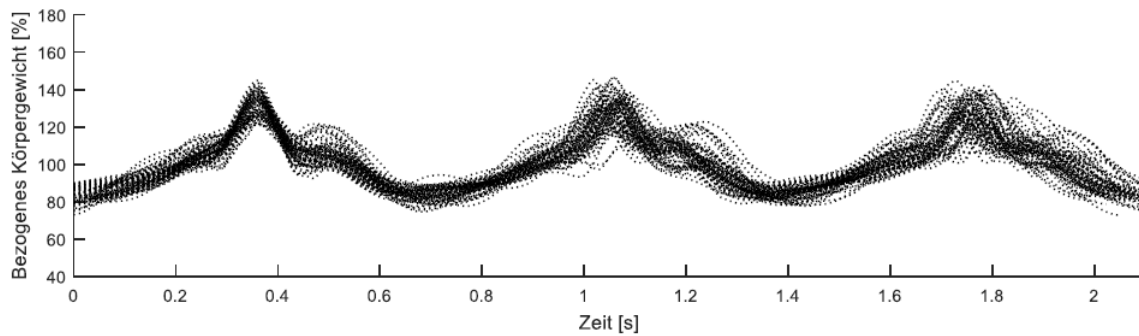


Abbildung 5.12.: Last-Zeit-Verläufe exemplarisch bei einer vorgegebenen Gangfrequenz von 1,4 Hz, nach Übereinanderlegen der ersten Maxima

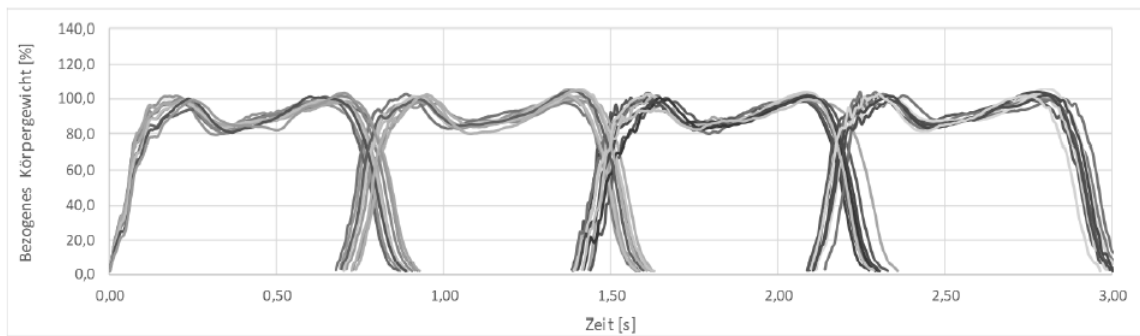
Unter dieser Darstellung, wie in Abbildung 5.12 gezeigt, lässt sich erkennen, dass die Versuchspersonen nicht in der Lage waren, exakt die vorgegebene Frequenz zu treffen, die Abweichungen jedoch gering sind.

Zur Überarbeitung des Lastansatzes werden insgesamt folgende Schritte durchgeführt:

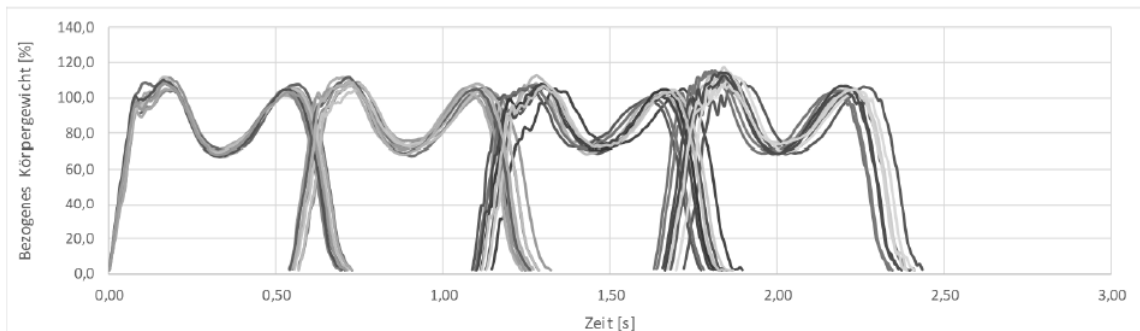
1. Aufbereitung der Messdaten
2. Vergleich der Messwerte mit Lastansätzen aus Literatur und Richtlinien
3. Fourieranalyse der Messdaten unterschiedlicher Anzahl von harmonischen Lastanteilen
4. Vergleich der vorangegangenen Ergebnisse zur Festlegung der Anzahl der harmonischen Lastanteile für die weitere Betrachtung
5. Berücksichtigung der Standardabweichung
6. Formulierung des überarbeiteten Lastansatzes

### 5.2.2. Vergleich der Messdaten mit Lastansätzen aus der Literatur

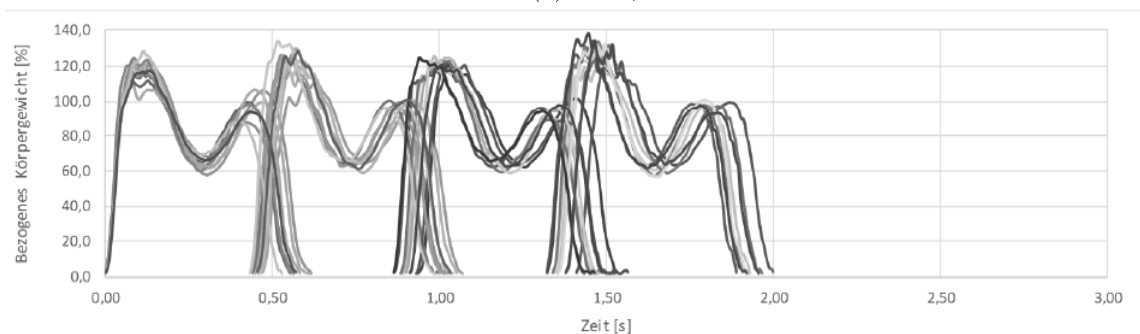
Zur Überarbeitung des Lastansatzes in der VDI 2038 werden die gemessenen Bodenreaktionskräfte auch mit den Last-Zeit-Verläufen aus anderen Literaturquellen verglichen, um Unterschiede zwischen der VDI 2038 und anderen Lastansätzen identifizieren zu können. Sahnaci [32] verweist im Rahmen seiner Dissertation darauf, dass sich bei der Überlagerung von Einzelfußlasteinträgen „erhebliche Verfälschungen in den Lastparametern während der Zweifußstandphase“ einstellen können. Im Rahmen des hier in dieser Arbeit durchgeführten Forschungsprojektes wurden alle Einzelfußlasteinträge separat erfasst, und daher jede Zweibeinstandphase der Realität entsprechend abgebildet. Dadurch muss der von Sahnaci erwähnte Aspekt nicht weiter betrachtet werden.



(a) bei 1,4 Hz



(b) bei 1,8 Hz



(c) bei 2,0 Hz

Abbildung 5.13.: Schrittfolgen einer Versuchsperson bei verschiedenen Messdurchläufen

Wie in der Abbildung 5.13 exemplarisch zu erkennen ist, zeigen die unterschiedlichen Versuchsdurchläufe einer Versuchsperson für die gleiche vorgegebene Schrittfrequenz eine sehr gute Übereinstimmung.

Zur Darstellung können die Messwerte einer Versuchsperson in Grafiken gemittelt dargestellt werden, ohne den Verlauf der Kurven zu verfälschen.

Bei einer Betrachtung der einzelnen Bodenreaktionskräfte sind im Allgemeinen keine direkten Unterschiede zwischen dem linken und dem rechten Fuß erkennbar. Dies ist eine Voraussetzung, um die Lasten mit einer Fourierreihenentwicklung darstellen zu können, da diese auf der Annahme einer sich perfekt wiederholenden Lastfolge beruht.

Nachfolgend werden die Lastansätze aus VDI 2038 - Blatt 1 [1], der Setra-Richtlinie [38] und von Bachmann und Ammann [20] mit den erfassten Messdaten verglichen, da diese Ansätze eine große Ähnlichkeit aufweisen.

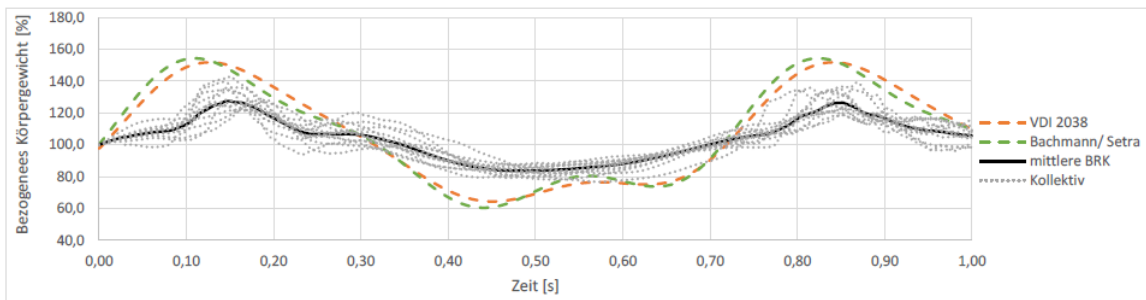
Der Einfluss frequenzabhängiger Fourierkoeffizienten im Vergleich zu konstanten Koeffizienten wurden bereits in Kapitel 3.3.2 erläutert und soll am Beispiel der von Rainer [35] genannten Maximalwerte mit gemessenen Last-Zeit-Verläufen verglichen werden.

Auch die Ansätze aus der SYNPEX -Richtlinie und von Seiler und Hüttner [37] (dargestellt in [36]) werden den gemessenen Bodenreaktionskräften gegenüber gestellt. Der in der ISO 10137 aufgeführte Lastansatz berücksichtigt eine lineare Frequenzabhängigkeit der ersten Harmonischen sowie eine Phasenverschiebung der zweiten bis vierten Harmonischen. Der EC5 und die DIN 1074 verzichten ganz auf die Benennung von Phasenverschiebungen und berufen sich auf konstante Lastanteile der ersten und zweiten Harmonischen.

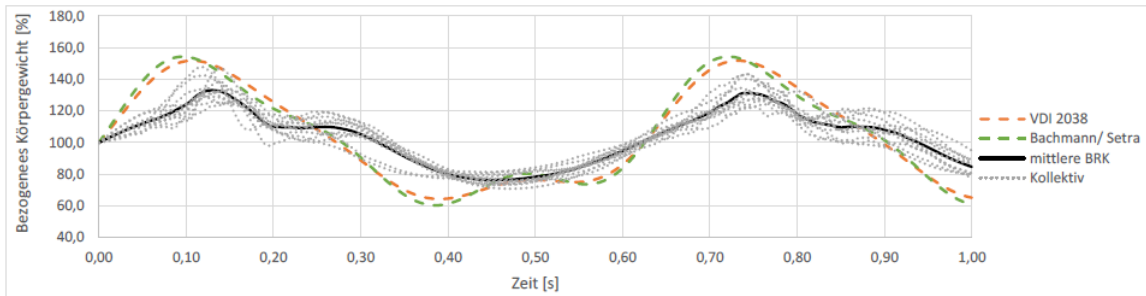
Um die jeweiligen Lastansätze, die auch unterschiedliche Werte für das Personeneigengewicht bzw.  $a_0$  angeben, miteinander vergleichen zu können, werden sowohl die generierten Lastansätze als auch die gemessenen Bodenreaktionskräfte normiert und auf 100% des Körpergewichtes zum Zeitpunkt  $t = 0$  bezogen.

#### **5.2.2.1. Vergleich der Messdaten mit VDI 2038, Bachmann und Setra-Richtlinie**

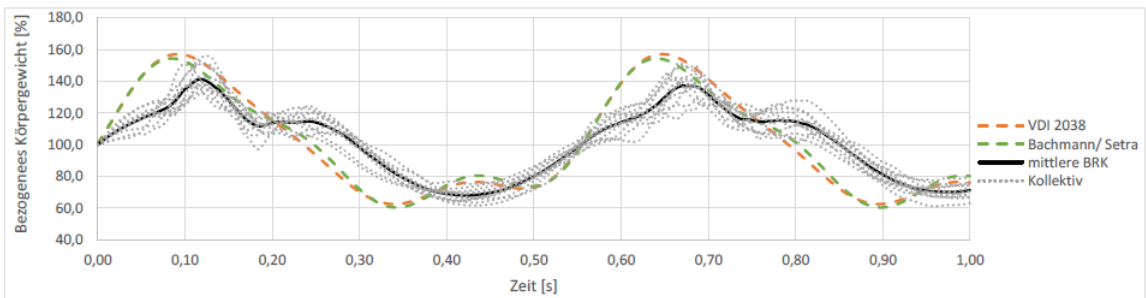
Während in der VDI 2038 ein Wertebereich für die Fourierkoeffizienten der ersten bis dritten Harmonischen angegeben werden, sind in der Setra-Richtlinie lediglich Konstanten benannt. Bachmann gibt für Frequenzen von 2,0 Hz bis 2,4 Hz einen Wertebereich von 0,4 bis 0,5 für den Lastanteil der ersten Harmonischen an. Durch diese Belegung der Koeffizienten sind bei einer Schrittfrequenz bis 2 Hz die Last-Zeit-Verläufe der Setra-Richtlinie mit denen von Bachmann und Ammann identisch. In Abbildung 5.14 sind die gemittelten Bodenreaktionskräfte von elf Versuchspersonen sowie die Last-Zeit-Verläufe von Bachmann, der VDI 2038 und der Setra-Richtlinie aufgetragen. Hier erkennt man eine Überschätzung des ersten harmonischen Lastanteils bei allen aufgetragenen Verläufen im Vergleich zu den Bodenreaktionskräften. Des Weiteren zeigt der qualitative Verlauf der berechneten Bodenreaktionskräfte große Abweichungen von den gemessenen Werten. Dies lässt sich durch die Wahl der Phasenwinkel  $\varphi_1$  bis  $\varphi_3$  erklären.



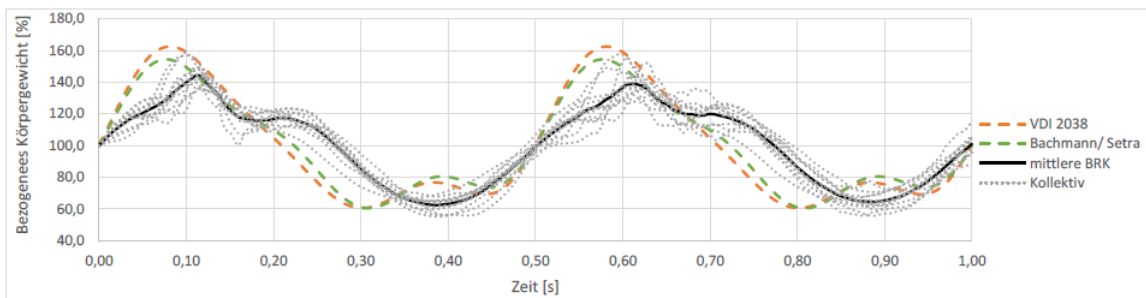
(a) 1,4 Hz



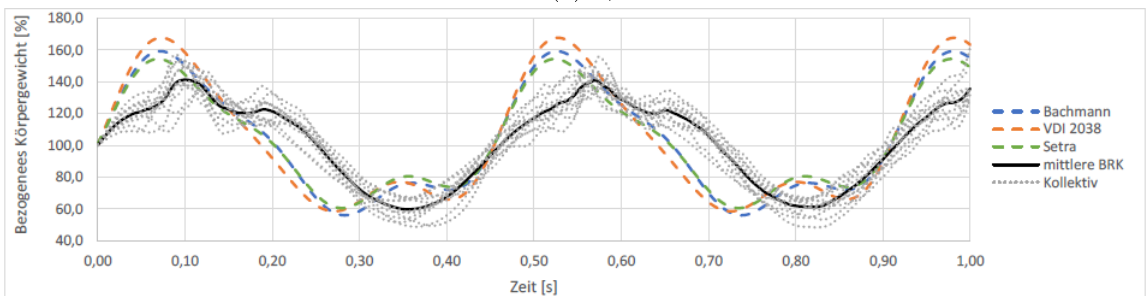
(b) 1,6 Hz



(c) 1,8 Hz



(d) 2,0 Hz



(e) 2,4 Hz

Abbildung 5.14.: Vergleich der Lastansätze von Bachmann, der VDI 2038 und der Setra-Richtlinie mit gemessenen BRK

### 5.2.2.2. Vergleich der Messdaten mit den Lasten nach Eurocode 5/ DIN 1074 und ISO 10137

Da der EC 5 bzw. die DIN 1074 lediglich konstante Lastkoeffizienten benennen, ist der künstliche Last-Zeit-Verlauf für alle Schrittfrequenzen identisch. Obwohl lediglich zwei harmonische Lastanteile berücksichtigt werden, scheint der qualitative Lastverlauf die gemessenen Last-Zeit-Verläufe besser abzubilden als derjenige der VDI 2038. Die Höhe der Lastmaxima befindet sich in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei der Setra-Richtlinie, die Lastminima werden insbesondere bei geringeren Schrittfrequenzen stark unterschätzt. Die ISO 10137 hingegen berücksichtigt eine lineare Abhängigkeit der ersten Harmonischen von der Schrittfrequenz. Diese ermöglicht bis zu Schrittfrequenzen von 1,8 Hz eine relativ zutreffende Einschätzung der Lastmaxima. Anschließend stagniert die Amplitude der gemessenen Bodenreaktionskräfte nahezu, sodass die lineare Funktionsgleichung der ersten Harmonischen zu einer Überschätzung der Lastverläufe für Schrittfrequenzen größer 1,8 Hz führt. Der qualitative Lastverlauf ist unabhängig von der Schrittfrequenz nicht geeignet, die gemessenen Last-Zeit-Verläufe abzubilden.

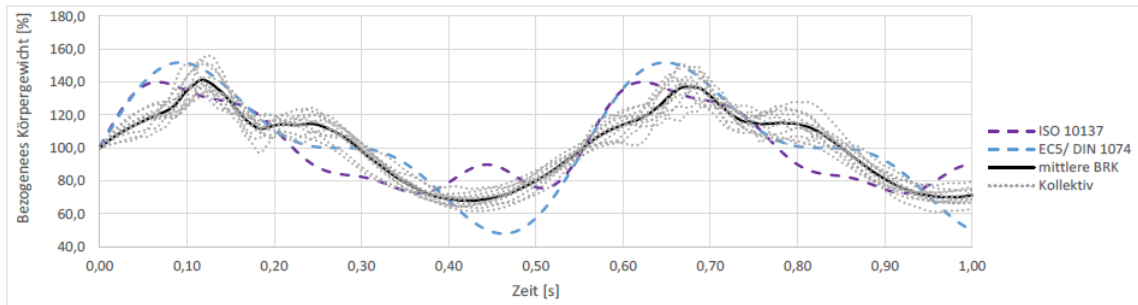
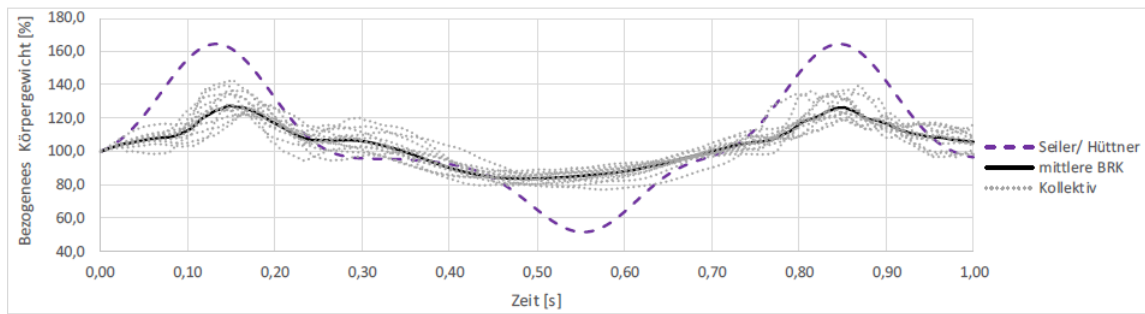


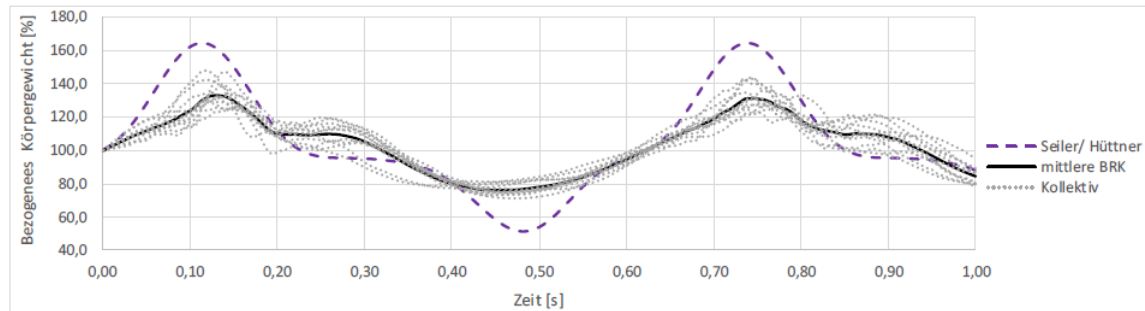
Abbildung 5.15.: Exemplarischer Vergleich der Bodenreaktionskräfte mit den Last-Zeit-Verläufen nach ISO 10137 und EC5/DIN 1074

### 5.2.2.3. Vergleich der Messdaten mit den Lasten nach Seiler und Hüttner

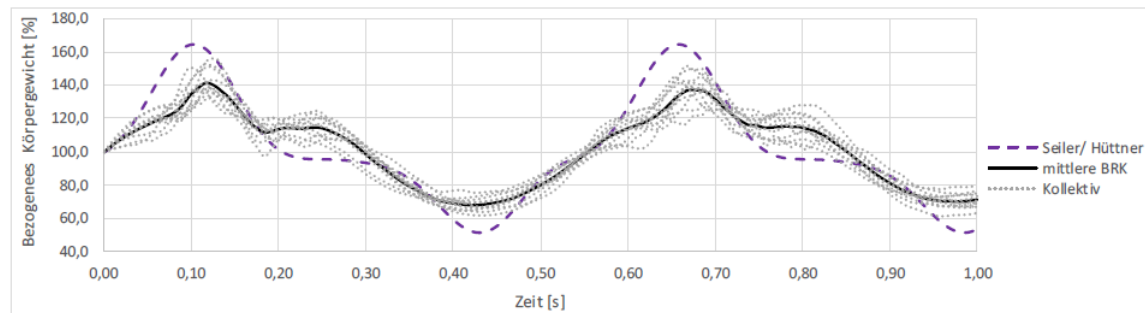
Seiler und Hüttner [37] benennen für ihren Lastansatz konstante Fourierkoeffizienten, weshalb sich die Größe der Lastamplitude nicht verändert. Dies führt zu einer Überschätzung der Lasten bei geringen Schrittfrequenzen, jedoch wird der Verlauf bei höheren Schrittfrequenzen gut abgebildet. Analog verhält es sich mit dem rechten Lastplateau, welches aufgrund seiner Konstanz bei rund 100 Prozent des Körpergewichtes bei einer Schrittfrequenz von 1,4 Hz noch annähernd mit dem gemessenen Last-Zeit-Verlauf übereinstimmt, mit zunehmender Frequenz die tatsächlichen Lasten jedoch immer stärker unterschätzt. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Last-Zeit-Funktion Seiler/Hüttners im Vergleich zu den zuvor betrachteten qualitativ trotzdem ausgesprochen gut die tatsächlichen Lasten abbildet. Anders als die auf Bachmann basierten Lastansätze berücksichtigen Seiler und Hüttner für jeden der vier betrachteten harmonischen Lastanteile auch eine Phasenverschiebung.



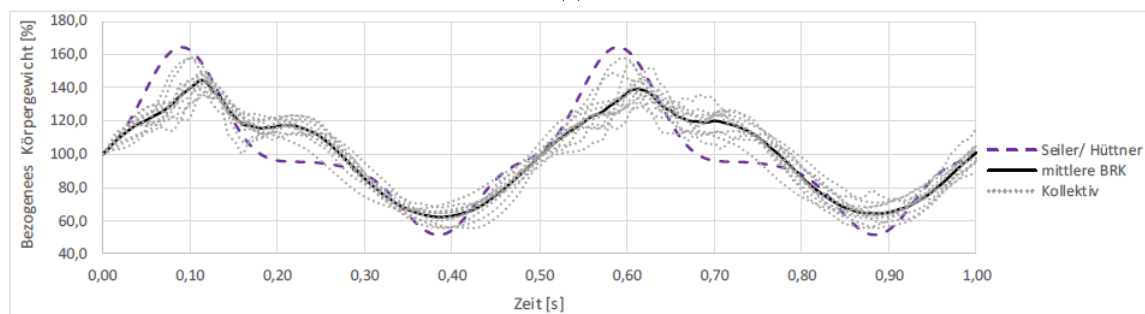
(a) 1,4 Hz



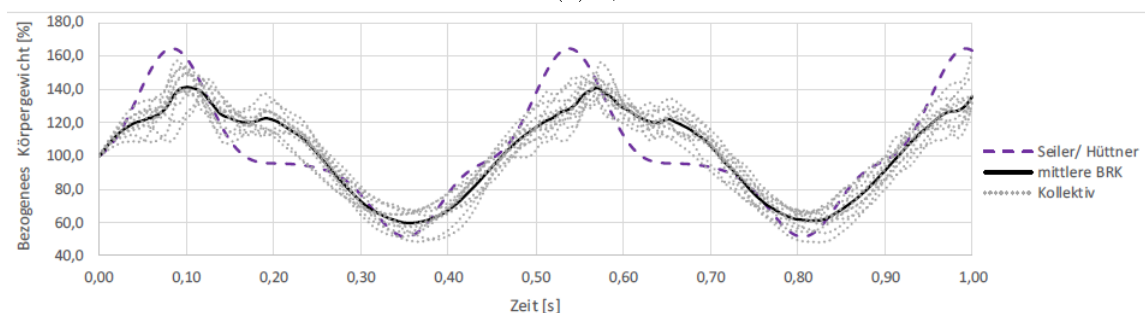
(b) 1,6 Hz



(c) 1,8 Hz



(d) 2,0 Hz



(e) 2,4 Hz

Abbildung 5.16.: Vergleich der Lastansätze von Seiler und Hüttner mit gemessenen BRK

### 5.2.3. Analyse der Messdaten

#### 5.2.3.1. Fourieranalyse und Auswertung der Parameter

Um die gemessenen Verläufe nun mathematisch darzustellen, wird eine Fourier-Analyse durchgeführt. Hierbei werden die Daten zuerst in der trigonometrischen Darstellung ausgegeben. Hier setzt sich der Funktionsverlauf aus einem konstanten Anteil  $a_0$  sowie  $j$  harmonischen Anteilen  $a_j \cdot \cos(j \cdot \omega \cdot t) + b_j \cdot \sin(j \cdot \omega \cdot t)$  zusammen. Die erste Harmonische wird als Grundschwingung, die höheren Harmonischen als Oberschwingung höherer Ordnung bezeichnet.

$$F(t) = a_0 + \sum (a_j \cdot \cos(j \cdot \omega \cdot t) + b_j \cdot \sin(j \cdot \omega \cdot t)) \quad (5.1)$$

Die Sinus- und Kosinusschwingungen können auch zu einer phasenverschobenen Sinusschwingung zusammengefasst werden, indem die Fourierkoeffizienten  $a_j$  und  $b_j$  unter Berücksichtigung einer Phasenverschiebung  $\varphi_j$  zusammengefasst werden [47]. Zur Umrechnung der Parameter in die, in der VDI 2038-Blatt 1 dargestellten Amplituden-Phasen-Darstellung gelten folgende Zusammenhänge:

$$c_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad (5.2)$$

und

$$\varphi_j = \begin{cases} \arctan \frac{a_j}{b_j} & \text{für } b_j \geq 0 \\ \arctan \frac{a_j}{b_j} + \pi & \text{für } b_j < 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Anschließend erfolgt die Darstellung der Fourierreihen in der Amplituden-Phasen-Darstellung:

$$F(t) = a_0 + \sum c_j \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f \cdot t + \varphi_j) \quad (5.4)$$

Die Parameter  $a_0$ ,  $c_j$  und  $\varphi_j$  werden jeweils für jede Messung ermittelt und anschließend statistisch ausgewertet.

Da in der Fachliteratur die Lastansätze mit zwischen drei und fünf harmonischen Lastanteilen als sinnvoll erachtet werden, werden nachfolgend Fourieranalysen mit drei, vier und fünf harmonischen Lastanteilen durchgeführt und diese mit den Messdaten verglichen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden insgesamt 812 Einzelmessungen für Gehen durchgeführt, die für die Ermittlung der Fourierkoeffizienten herangezogen wurden. Hierbei wurden neben eigenen Messreihen auch eine Messreihe aus einer Bachelorarbeit, Messreihen aus verschiedenen Projektarbeiten und Messreihen aus einer Masterarbeit für die Auswertung betrachtet.

Messreihen aus Projektarbeiten, die beispielsweise zur Bestimmung des Plattenabstandes für den Versuchsaufbau oder zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens der Brücke erfasst wurden, werden nicht zur Bestimmung der Fourierkoeffizienten herangezogen, finden aber durch die Nutzung der jeweiligen Projektergebnisse indirekt Eingang in die Überarbeitung.

In den für die Fourieranalyse genutzten Versuchsreihen wurden verschiedene Taktvorgaben getroffen und auch Bodenreaktionskräfte ohne Taktvorgabe erfasst und ausgewertet.

#### 5.2.3.2. Last-Zeit-Verläufe mit drei harmonischen Lastanteilen

Bei einer Fourieranalyse der Messdatensätze mit drei harmonischen Lastanteilen ergeben sich die Ergebnisse, wie in den nachfolgenden Grafiken dargestellt. In Abbildung 5.17 ist der statische Anteil  $a_0$  aufgetragen. Dieser Anteil stellt das Personengewicht dar. Die Abbildung zeigt, dass der Wert mit 100 % des Körpergewichtes angesetzt werden kann.



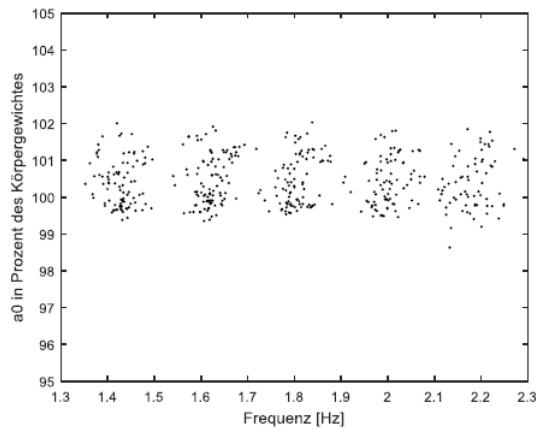


Abbildung 5.17.: Statischer Lastanteil  $a_0$  in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz

Die statistische Auswertung des ersten harmonischen Lastanteils  $c_1$  (siehe Abbildung 5.18) lässt eine nahezu lineare Frequenzabhängigkeit erkennen.

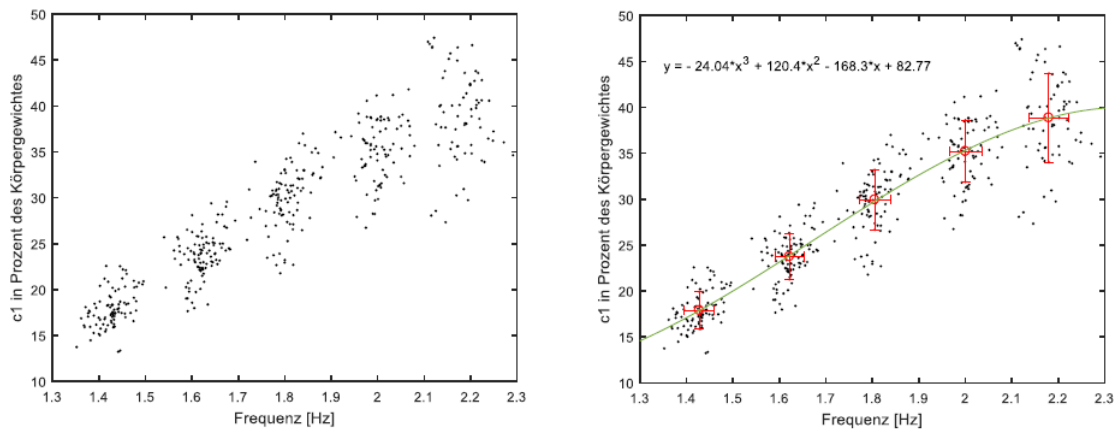
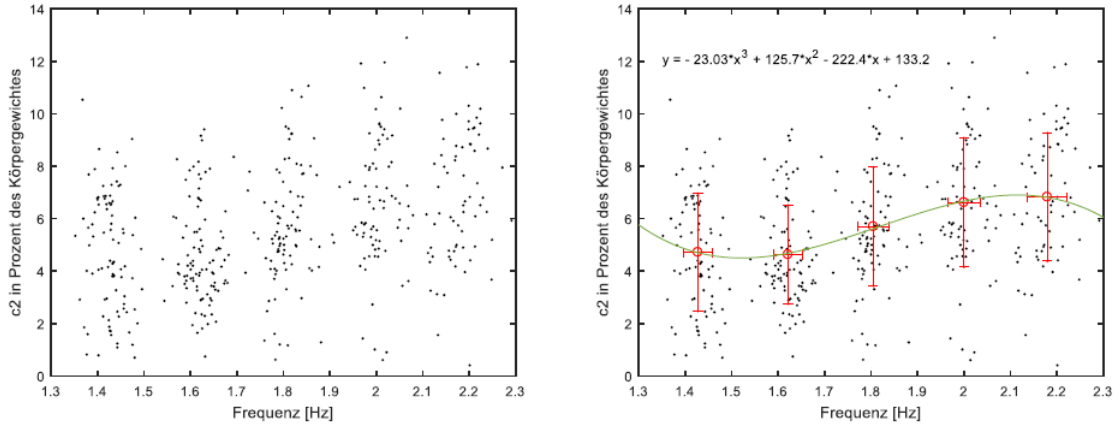
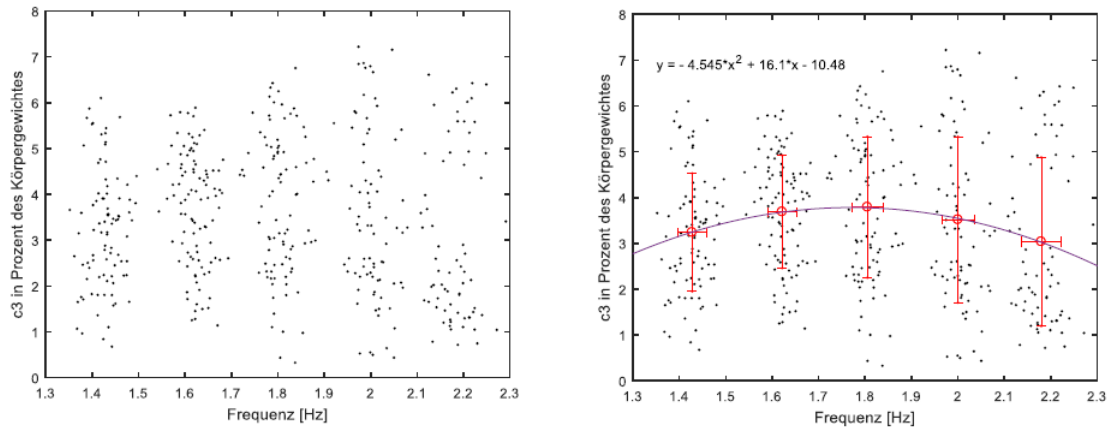
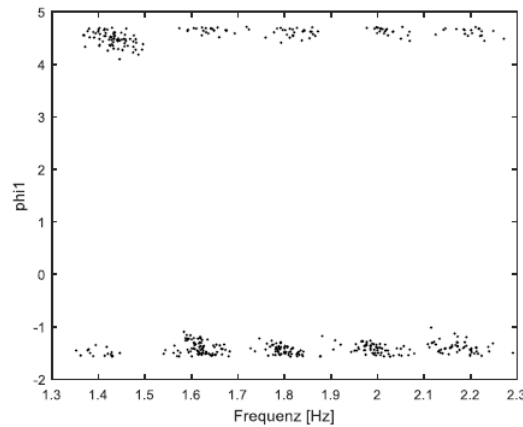


Abbildung 5.18.: Erster Harmonischer Lastanteil  $c_1$  in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz  $f$

Besser abbilden lässt sich der Zusammenhang jedoch über ein Polynom dritten Grades, wie in Abbildung 5.18 rechts dargestellt. Während in der VDI 2038-Blatt 1 für  $c_1$  ein Wert von 0,4 bei 1,6 Hz und 0,5 bei 2,4 Hz angegeben wird, ergeben die Messungen hier einen Wertebereich von 0,17 bis 0,4 (im Diagramm in % angegeben).

Für den zweiten harmonischen Lastanteil  $c_2$  sowie den dritten Anteil  $c_3$  ergeben sich wesentlich größere Streuungen, wie in den Abbildungen 5.19 und 5.20 abgebildet.


 Abbildung 5.19.: Zweiter harmonischer Lastanteil  $c_2$  in Abhängigkeit von der Schritt看率  $f$ 

 Abbildung 5.20.: Dritter harmonischer Lastanteil  $c_3$  in Abhängigkeit von der Schritt看率  $f$ 

 Abbildung 5.21.: Phasenwinkel  $\varphi_1$  in Abhängigkeit von der Schritt看率  $f$ 

Für die Phasenwinkel  $\varphi_1$  bis  $\varphi_3$  bzw.  $\varphi_5$  ergeben sich große Unterschiede. Ein Auftragen der einzelnen Werte für  $\varphi_1$  über der Gangfrequenz  $f$  ergibt Abbildung 5.21. Dort lässt sich erkennen, dass der Phasenwinkel  $\varphi_1$  entgegen der Annahmen in der Fachliteratur nicht Null, sondern bei Frequenzen kleiner 1,5 Hz bei  $\frac{3}{2}\pi$  und bei Frequenzen größer 1,5 Hz bei  $-\frac{\pi}{2}$  angenommen werden kann. Dies zeigt sich in den Punktwolken der einzelnen Messungen, die sich bei den Erregerfrequenzen 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 und 2,2 Hz jeweils auf Werte um die  $\frac{3}{2}\pi$  und  $-\frac{\pi}{2}$  aufteilen. Ab einer

Frequenz von circa 1,5 Hz verändert sich die Aufteilung der Werte. Während bei Erregerfrequenzen kleiner 1,5 Hz ein Großteil der Werte für  $\varphi_1$  im Wertebereich von  $\frac{3}{2}\pi$  liegt, verändert dies sich für die höheren Erregerfrequenzen.

Die Phasenverschiebung  $\varphi_2$  der zweiten Harmonischen weist eine größere Streuung auf als die von  $\varphi_1$ . Auch hier sieht man einen Unterschied zwischen den Erregerfrequenzen  $f \leq 1,5$  Hz und  $f > 1,5$  Hz.

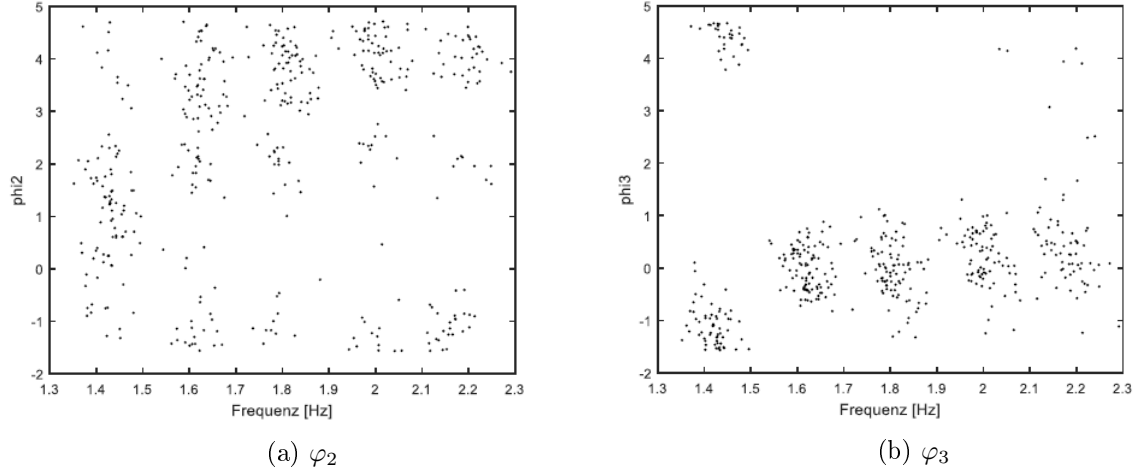


Abbildung 5.22.: Phasenwinkel  $\varphi_i$  in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz  $f$

Eine Analyse der Messdaten und eine Ermittlung von Funktionsgleichungen durch die Mittelwerte für die harmonischen Lastanteile ergab folgende Werte:

$$c_1 = -0,24 \cdot f^3 + 0,12 \cdot f^2 - 1,68 \cdot f + 0,83 \quad (5.5)$$

$$c_2 = -0,23 \cdot f^3 + 1,26 \cdot f^2 - 2,22 \cdot f + 1,33 \quad (5.6)$$

$$c_3 = -0,045 \cdot f^2 + 0,16 \cdot f - 0,105 \quad (5.7)$$

Die Phasenwinkel  $\varphi_1$  bis  $\varphi_3$  werden durch folgende Werte angenähert.

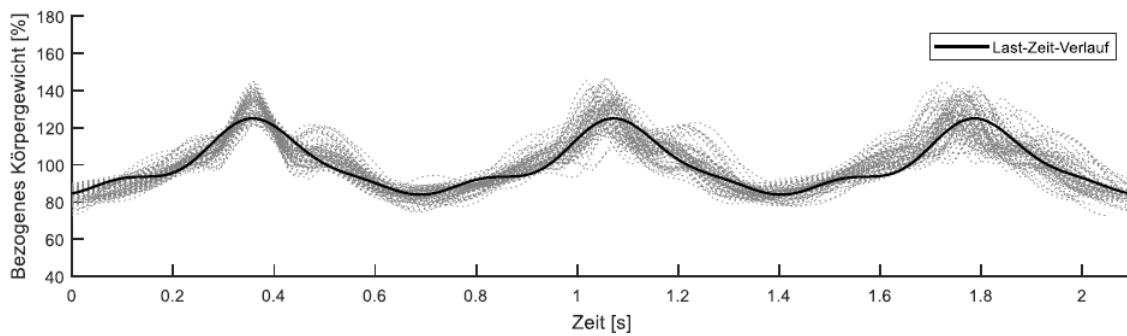
$$\varphi_1 = \begin{cases} \frac{3}{2}\pi & \text{für } f \leq 1,5 \text{ Hz} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{für } f > 1,5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \frac{2}{5}\pi & \text{für } f \leq 1,5 \text{ Hz} \\ \pi & \text{für } f > 1,5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.9)$$

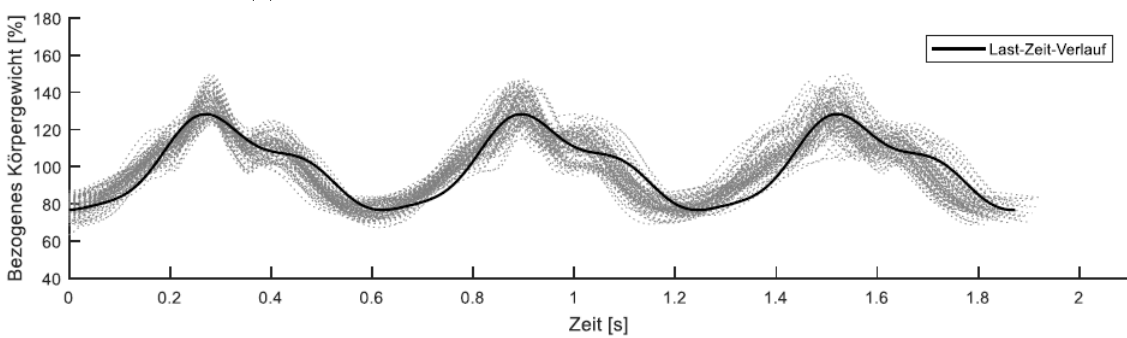
$$\varphi_3 = \begin{cases} -\frac{2}{5}\pi & \text{für } f \leq 1,5 \text{ Hz} \\ 0 & \text{für } f > 1,5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.10)$$

Unter Annahme dieser Beiwerte ergeben sich Last-Zeit-Verläufe, die mit den ermittelten Messdaten bei 1,4; 1,6; 1,8 und 2,0 Hz verglichen werden.

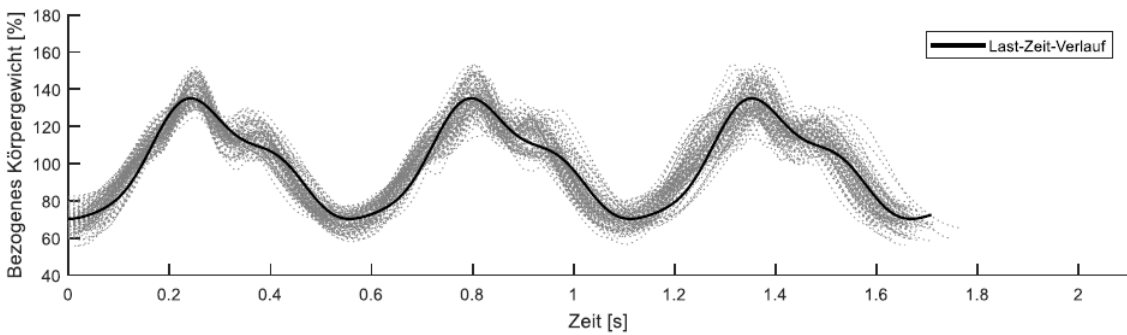
Die in Abbildung 5.23 dargestellten Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den grau hinterlegten Messdatensätzen, stellen jedoch die typischen Hoch- und Tiefpunkte nicht sehr ausgeprägt dar.



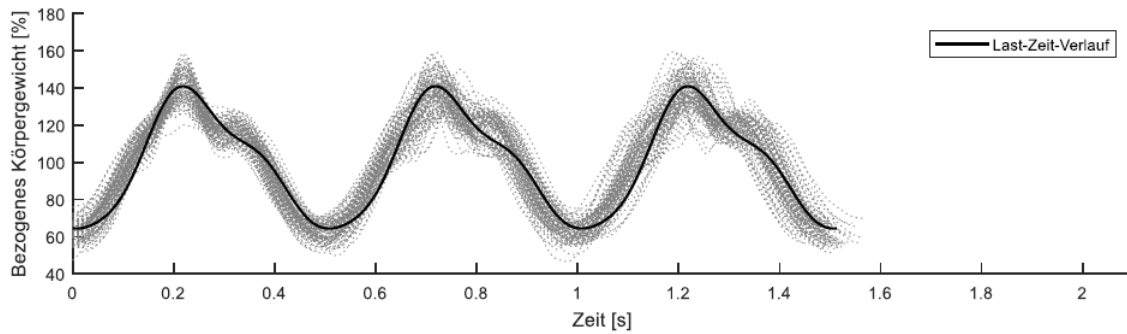
(a) 1,4 Hz



(b) 1,6 Hz



(c) 1,8 Hz



(d) 2,0 Hz

Abbildung 5.23.: Last-Zeit-Verlauf und Messdaten bei verschiedenen Frequenzen

### 5.2.3.3. Last-Zeit-Verläufe mit vier harmonischen Lastanteilen

Bei Betrachtung der Koeffizienten mit vier harmonischen Lastanteilen fällt auf, dass die Beiwerte hier eine wesentlich größere Standardabweichung aufweisen. In der Abbildung 5.24 sind die Beiwerte für die durchgeführten Messungen dargestellt. Zur Vergleichbarkeit mit den Analysen mit drei bzw. fünf harmonischen Lastanteilen wird auch hier ein Polynom dritten oder zweiten Grades durch die Mittelwerte gelegt, um einen Last-Zeit-Verlauf zu generieren.

Die Werte ergeben sich hierbei zu:

$$c_1 = -0,975 \cdot f_{vp}^3 + 5,09 \cdot f_{vp}^2 - 8,38 \cdot f_{vp} + 4,60 \quad (5.11)$$

$$c_2 = -0,078 \cdot f_{vp}^3 + 0,45 \cdot f_{vp}^2 - 0,81 \cdot f_{vp} + 0,51 \quad (5.12)$$

$$c_3 = -0,008 \cdot f_{vp}^2 + 0,03 \cdot f_{vp} + 0,09 \quad (5.13)$$

$$c_4 = -0,08 \cdot f_{vp}^3 + 0,44 \cdot f_{vp}^2 - 0,76 \cdot f_{vp} + 0,48 \quad (5.14)$$

$$\varphi_1 = \begin{cases} \frac{3}{2}\pi & \text{für } f_{vp} \leq 1,5\text{Hz} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{für } f_{vp} > 1,5\text{Hz} \end{cases} \quad (5.15)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{für } f \leq 1,5\text{ Hz} \\ \pi & \text{für } f > 1,5\text{ Hz} \end{cases} \quad (5.16)$$

$$\varphi_3 = \begin{cases} -\frac{2}{5}\pi & \text{für } f \leq 1,5\text{ Hz} \\ 0 & \text{für } f > 1,5\text{ Hz} \end{cases} \quad (5.17)$$

$$\varphi_4 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{für } f \leq 1,5\text{ Hz} \\ \pi & \text{für } f > 1,5\text{ Hz} \end{cases} \quad (5.18)$$

In Abbildung 5.24 sind die Verteilungen der einzelnen Beiwerte zu erkennen. In Abbildung 5.25 lässt sich erkennen, dass die Last-Zeit-Verläufe die gemessenen Bodenreaktionskräfte gut abbilden.

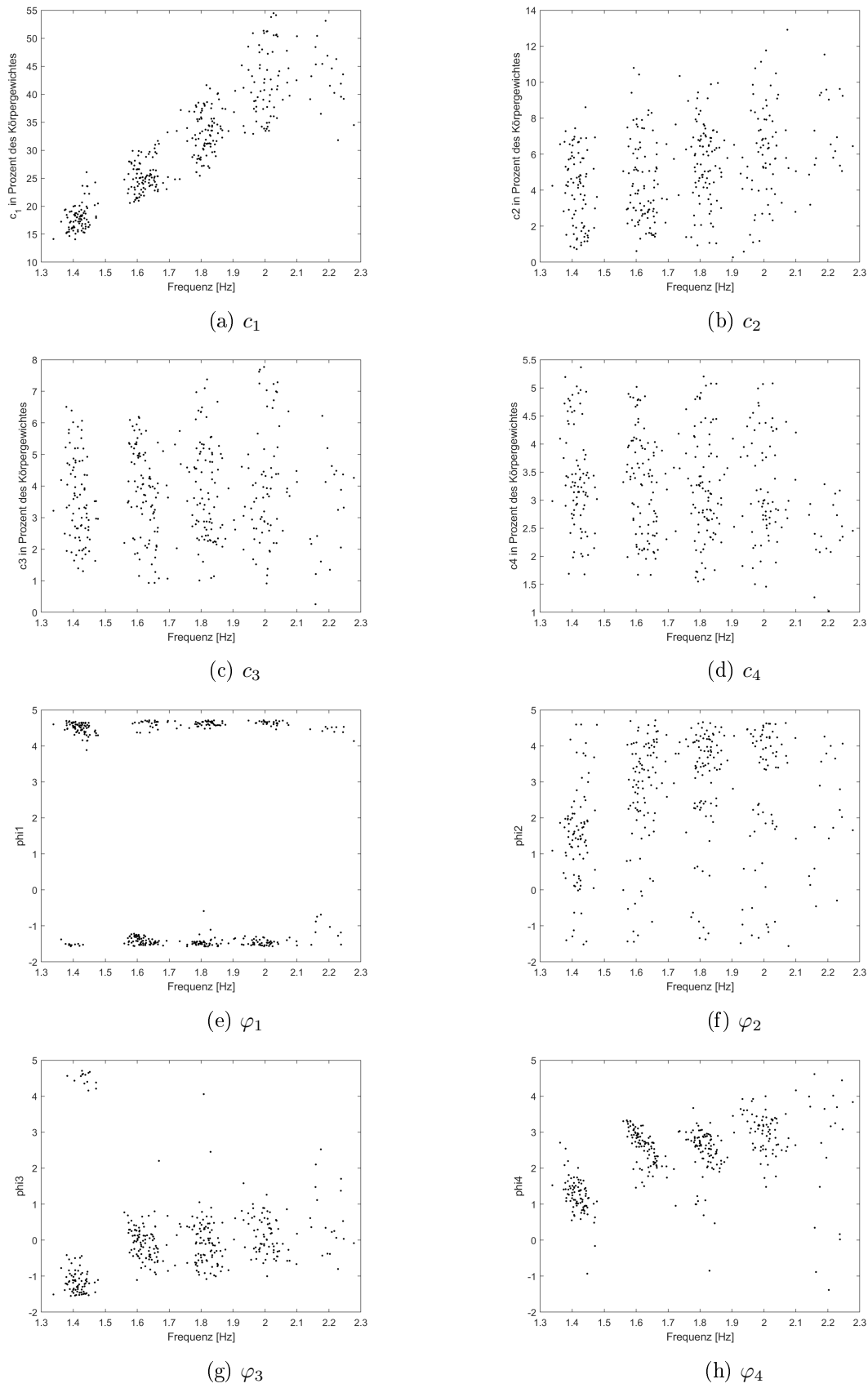
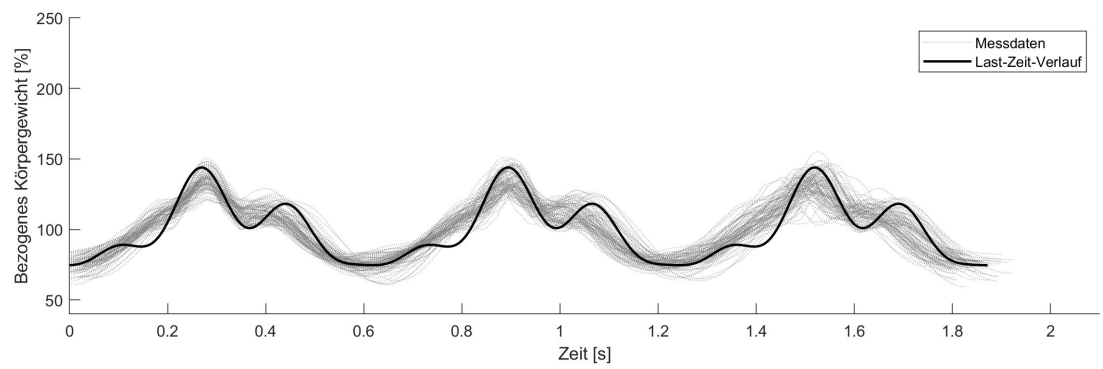
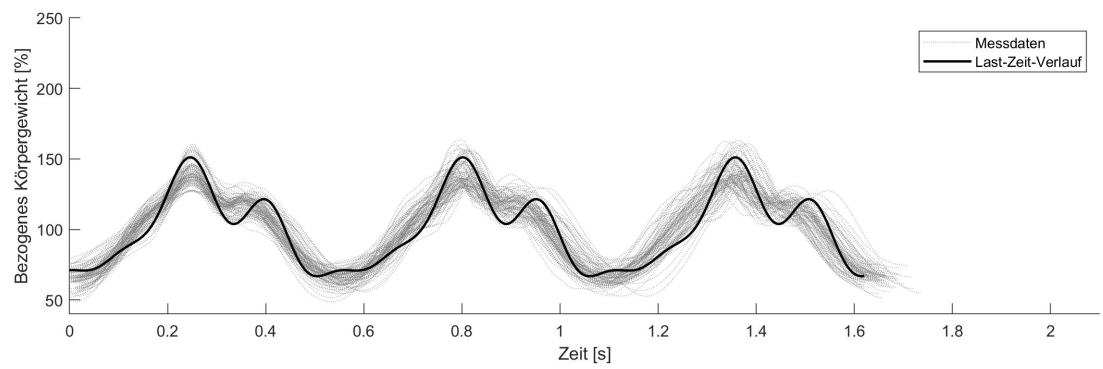


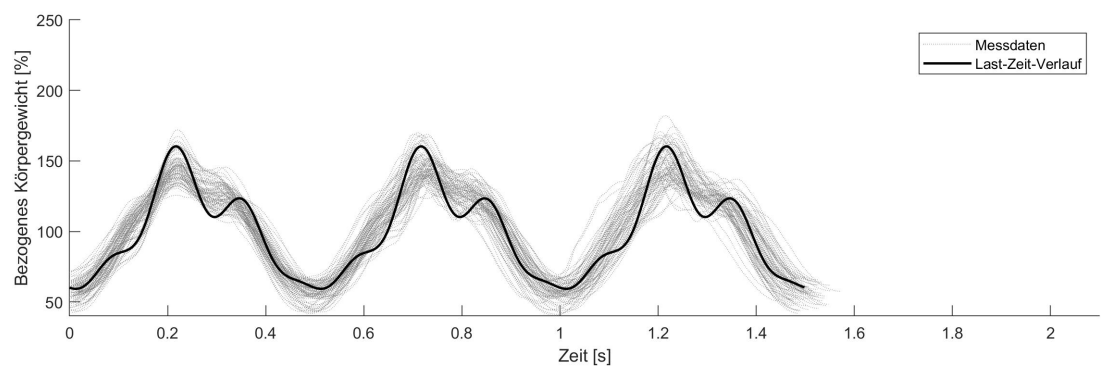
Abbildung 5.24.: Harmonische Lastanteile  $c_i$  und Phasenwinkel  $\varphi_i$  bei einer Fourieranalyse mit vier Harmonischen



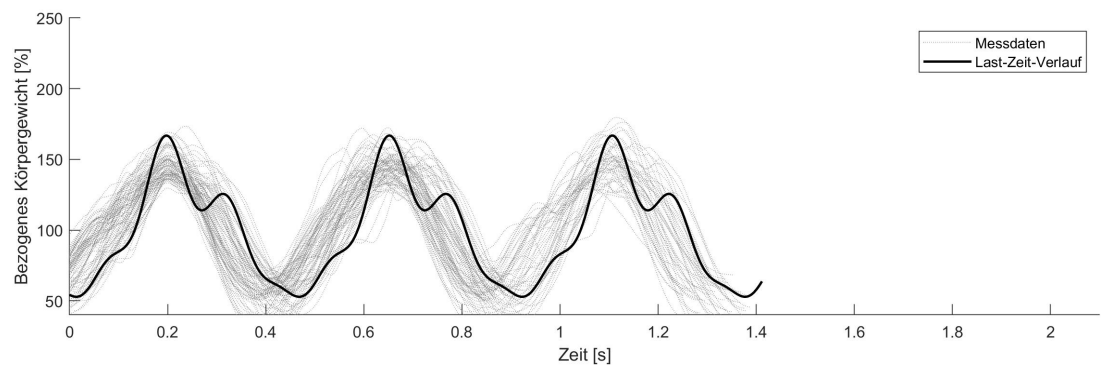
(a) 1,6 Hz



(b) 1,8 Hz



(c) 2,0 Hz



(d) 1,6 Hz

Abbildung 5.25.: Vergleich der Last-Zeit-Verläufe mit Messdaten bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen

**5.2.3.4. Last-Zeit-Verläufe mit fünf harmonischen Lastanteilen**

Bei der Analyse mit fünf harmonischen Lastanteilen lassen sich die Beiwerte mit folgenden Funktionen annähern:

$$c_1 = -0,286 \cdot f_{vp}^2 + 1,337 \cdot f_{vp} - 1,128 \quad (5.19)$$

$$c_2 = 0,283 \cdot f_{vp}^2 - 1,029 \cdot f_{vp} + 0,953 \quad (5.20)$$

$$c_3 = -0,201 \cdot f_{vp}^2 + 0,752 \cdot f_{vp} - 0,517 \quad (5.21)$$

$$c_4 = 0,01 \quad (5.22)$$

$$c_5 = -0,177 \cdot f_{vp}^2 + 0,629 \cdot f_{vp} - 0,442 \quad (5.23)$$

Als Phasenwinkel lassen sich dabei folgende Werte ermitteln:

$$\varphi_1 = -\frac{\pi}{2} \quad (5.24)$$

$$\varphi_2 = \pi \quad (5.25)$$

$$\varphi_3 = 0 \quad (5.26)$$

$$\varphi_4 = \pi \quad (5.27)$$

$$\varphi_5 = 0 \quad (5.28)$$

In der Abbildung 5.26 sind die Beiwerte  $c_1$  bis  $c_5$  dargestellt. Die  $\varphi$ -Werte sind in Abbildung 5.27 abgebildet und die zugehörigen Bodenreaktionskräfte in Abbildung 5.28.

Die durch die Mittelwerte der Koeffizienten dargestellten Bodenreaktionskräfte weisen eine größere Abweichung von den Messdaten auf, als die Verläufe mit vier harmonischen Lastanteilen.



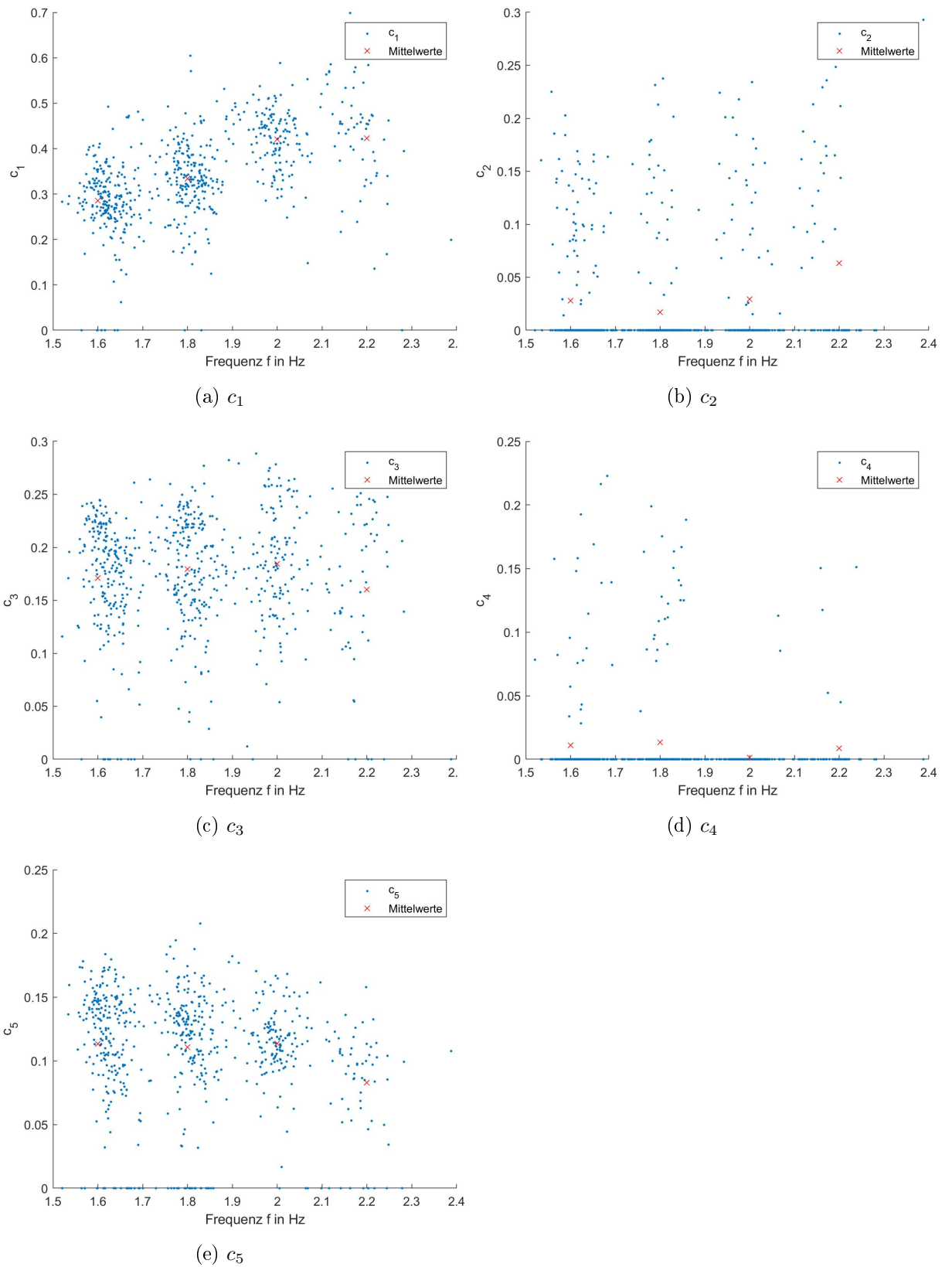
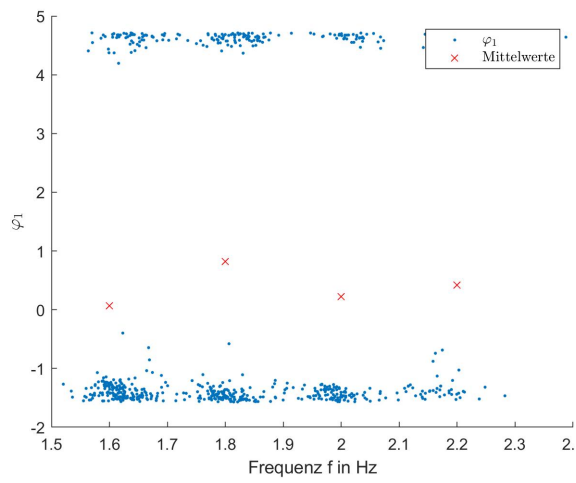
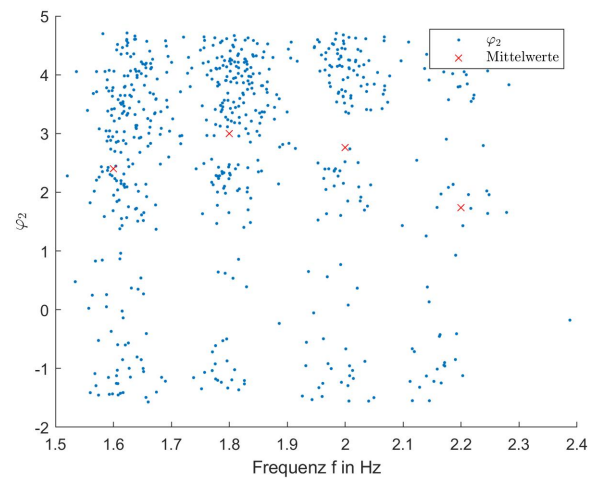


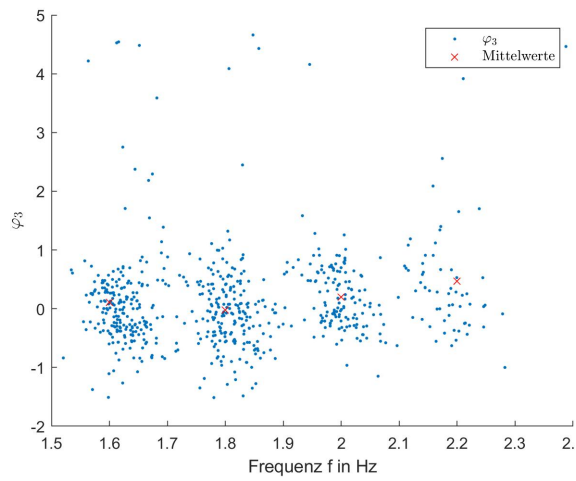
Abbildung 5.26.: Harmonische Lastanteile



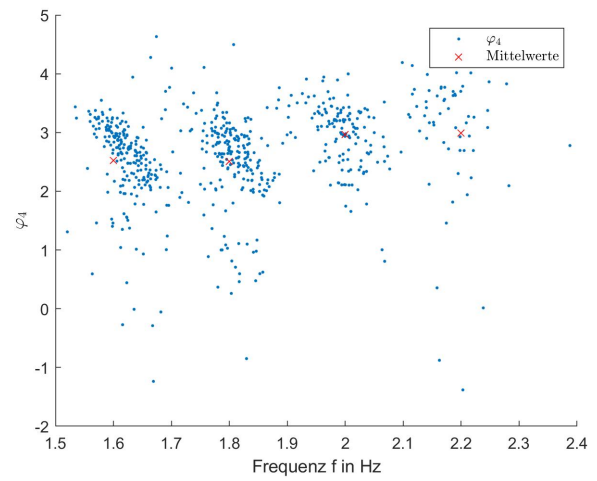
(a)  $\varphi_1$



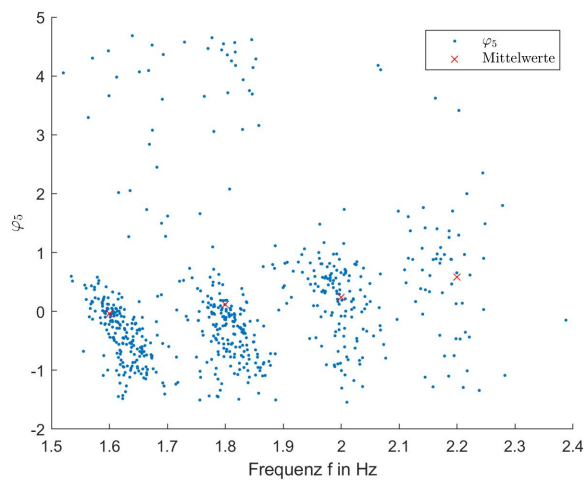
(b)  $\varphi_2$



(c)  $\varphi_3$

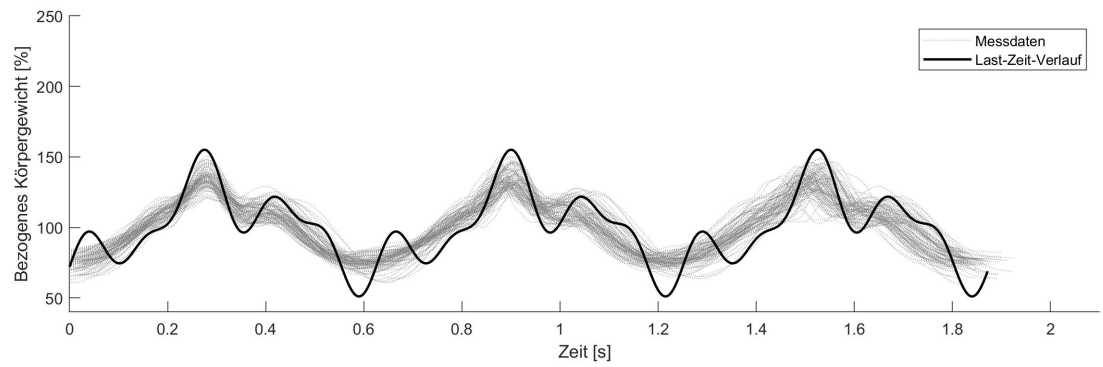


(d)  $\varphi_4$

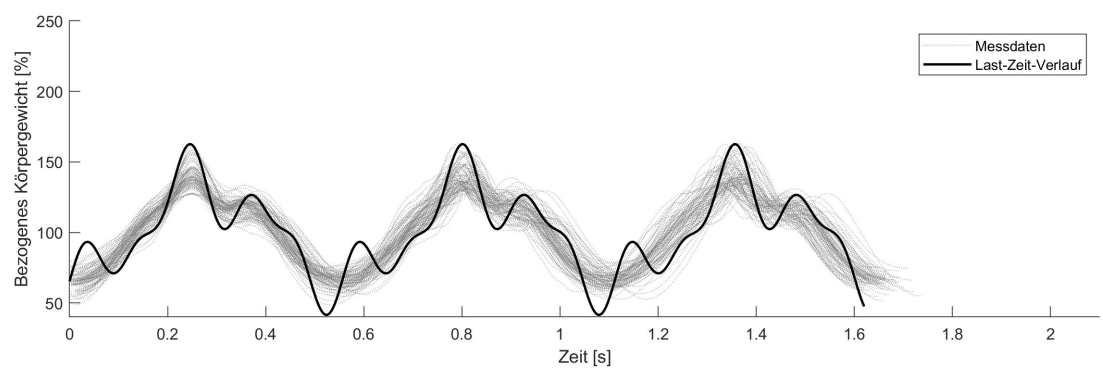


(e)  $\varphi_5$

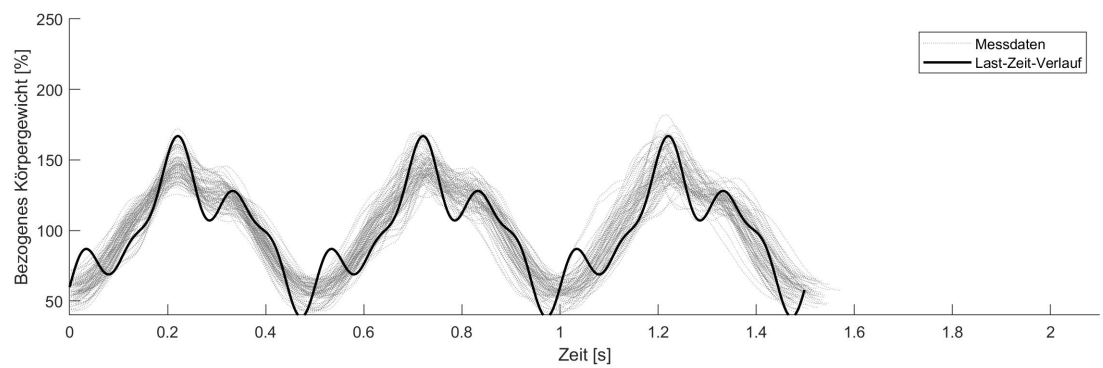
Abbildung 5.27.: Phasenwinkel



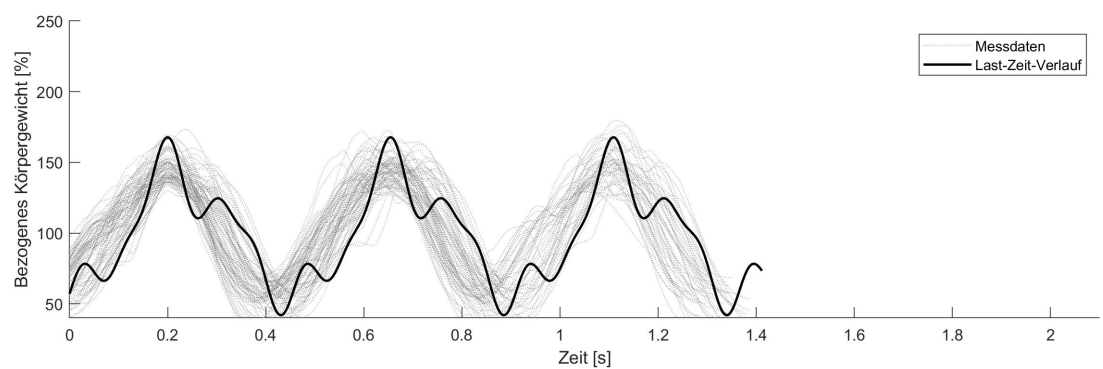
(a) 1,6 Hz



(b) 1,8 Hz



(c) 2,0 Hz



(d) 1,6 Hz

Abbildung 5.28.: Vergleich der Last-Zeit-Verläufe mit Messdaten bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen bei Ansatz von fünf harmonischen Lastanteilen

#### 5.2.4. Vergleich

Es zeigt sich, dass die Fourierreihenentwicklung als solche durchaus geeignet ist, die gemessenen Last-Zeit-Verläufe der Fortbewegungsart Gehen zutreffend abzubilden. Um die Gangdynamik, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Anregung der Brücke hat, hinreichend genau zu erfassen, ist die Berücksichtigung von lediglich drei harmonischen Lastanteilen jedoch nicht ausreichend. Teilweise gehen markante Merkmale des tatsächlichen Lastverlaufs wie der zweite Peak nach dem eigentlichen Maximum verloren, auch werden die Maxima und Minima nicht exakt erfasst. Es wird zudem erörtert, dass im Falle von Resonanz die vorhandene Brückenschwingung am wirksamsten durch eine maximale Belastung zum absoluten Schwingungstiefpunkt und zeitgleich eine vollständige Entlastung zum absoluten Schwingungshochpunkt verstärkt wird. Um die Be- und Entlastung entsprechend dieses ungünstigsten Falls zutreffend zu erfassen, ist darüber hinaus die Berücksichtigung einer Standardabweichung bezogen auf die Lastmaxima sowie -minima erforderlich. Allen aus der Literatur untersuchten Lastansätzen ist gemeinsam, dass keine Standardabweichungen berücksichtigt/ benannt werden. Dies ist durchaus kritisch und kann zu einer erheblichen Fehleinschätzung der auftretenden Lasten sowie der Resonanzanregung der Brücke führen. Um zu ermitteln, wie viele harmonische Lastanteile erforderlich sind, um die gemessenen Last-Zeit-Verläufe hinsichtlich ihrer Laständerungen hinreichend genau abbilden zu können, wurden die einzelnen Last-Zeit-Verläufe aller Versuchspersonen in Abhängigkeit von der jeweiligen Schrittfrequenz mit den künstlichen Last-Zeit-Verläufen der Fourierreihenentwicklungen mit drei, vier und fünf Lastanteilen verglichen. Die größte Übereinstimmung mit den Messwerten war, unabhängig von der Schrittfrequenz, für eine Fourierreihenentwicklung mit vier Harmonischen zu erkennen. Bei einer noch höheren Anzahl harmonischer Lastanteile nahm die Qualität der Annäherung bereits weiter ab, weshalb eine über fünf hinausgehende Anzahl Harmonischer nicht eingehend untersucht wurde.

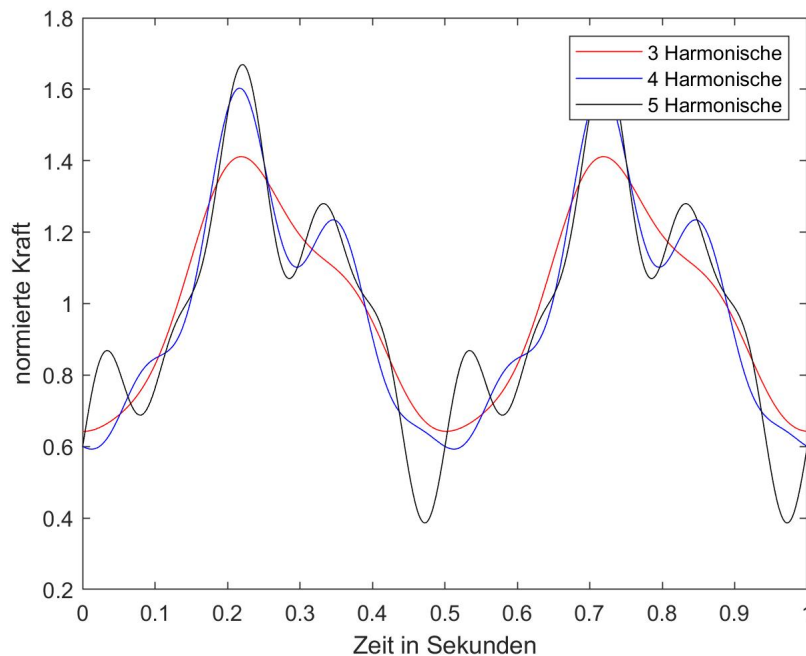


Abbildung 5.29.: Last-Zeit-Verlauf beim Ansatz von 3, 4 oder 5 Harmonischen Lastanteilen bei 2 Hz

Wie in Abbildung 5.29 zu erkennen ist, bilden sich die für Gehen typischen Last-Zeit-Verläufe mit zunehmender Anzahl an harmonischen Lastanteilen besser aus. Für die weitere Betrachtung werden daher vier harmonische Lastanteile betrachtet.

### 5.2.5. Berücksichtigung der Standardabweichung

Damit die zu erwartenden Schwingungen in der Planungsphase einer Brücke nicht unterschätzt werden, soll der Lastansatz auf der sicheren Seite gewählt werden. Neben einer pauschalen Erhöhung der Last wurde auch die Betrachtung des 95%-Fraktilwertes untersucht. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Untersuchung mit fünf harmonischen Lastanteilen, da sich hier der Unterschied am Besten darstellen lässt. Die Betrachtung mit vier harmonischen Lastanteilen ergibt ähnliche Ergebnisse.

Es wurden für jeden harmonischen Lastanteil die 95%-Fraktilwerte bestimmt und die daraus resultierenden Last-Zeit-Verläufe untersucht.

Die Standardabweichung wurde für die Erregerfrequenzen 1,6; 1,8; 2,0 und 2,2 Hz ermittelt. Die 95%-Bereiche der einzelnen harmonischen Lastanteile stellen sich wie nachfolgend dargestellt auf. Die Standardabweichungen der harmonischen Lastanteile zu den jeweiligen Erregerfrequenzen, sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Für diese Auswertung liegen insgesamt 812 Einzelmessungen vor.

Tabelle 5.2.: Standardabweichungen

Harmonischer Anteil \ Frequenz	1,6	1,8	2,0	2,2
$c_1$	0,082	0,082	0,068	0,127
$c_2$	0,054	0,048	0,060	0,087
$c_3$	0,055	0,051	0,053	0,074
$c_4$	0,038	0,041	0,012	0,032
$c_5$	0,046	0,049	0,032	0,041

Eine Annäherung der Werte kann über nachfolgende Funktionen erfolgen:

$$c_{1,95\%} = 0,441 \cdot f^2 - 1,300 \cdot f + 1,400 \quad (5.29)$$

$$c_{2,95\%} = 0,679 \cdot f^2 - 2,410 \cdot f + 2,260 \quad (5.30)$$

$$c_{3,95\%} = 0,099 \cdot f^2 - 0,034 \cdot f + 0,564 \quad (5.31)$$

$$c_{4,95\%} = 0,235 \cdot f^2 - 0,948 \cdot f + 1,010 \quad (5.32)$$

$$c_{5,95\%} = -0,110 \cdot f^2 + 0,344 \cdot f - 0,063 \quad (5.33)$$

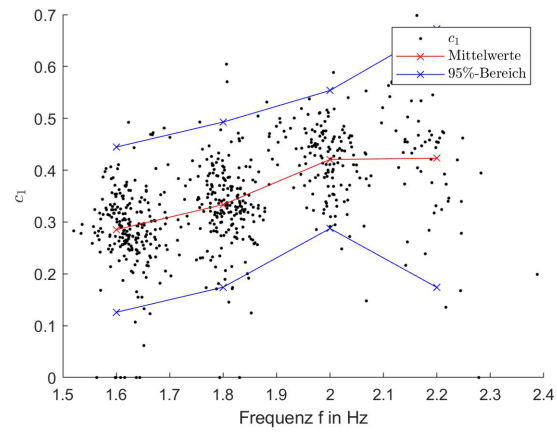
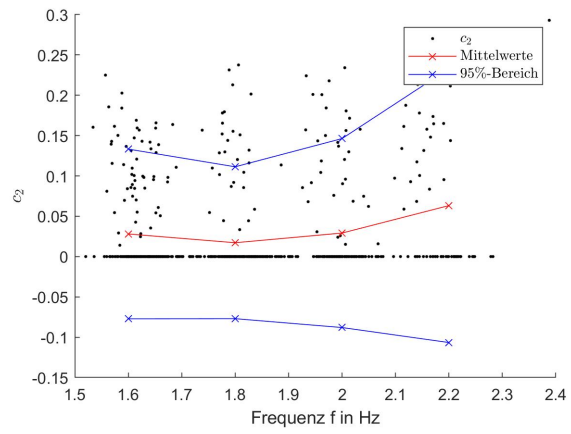
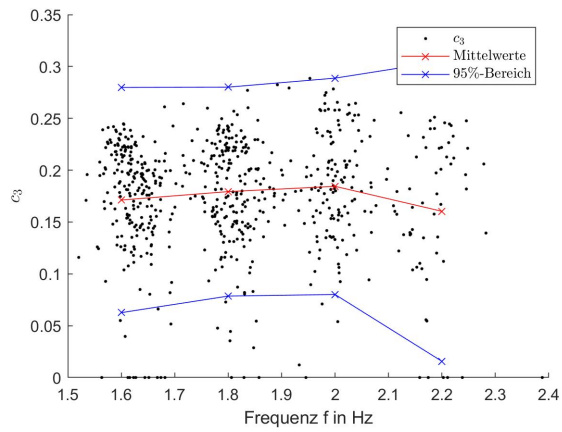
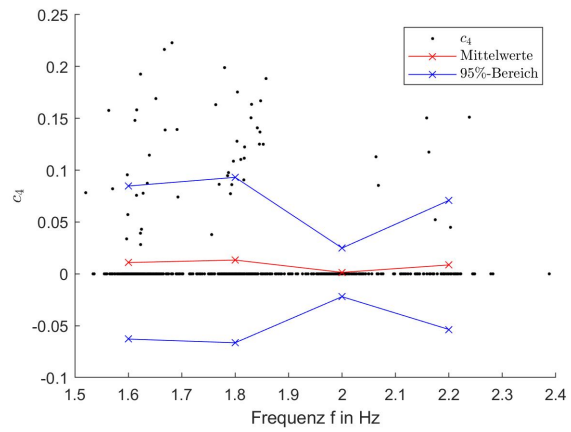
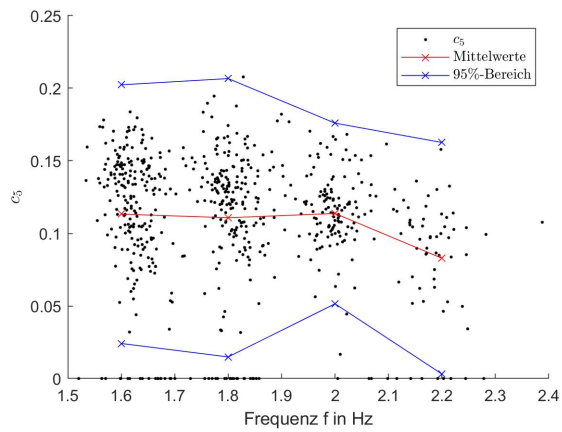

(a)  $c_1$ 

(b)  $c_2$ 

(c)  $c_3$ 

(d)  $c_4$ 

(e)  $c_5$ 

Abbildung 5.30.: 95%-Bereiche der harmonischen Lastanteile

Durch den Ansatz des maximal möglichen harmonischen Anteils, werden in Vergleich zu den, durch die Mittelwerte generierten Last-Zeit-Verläufe, die Maximalwerte erhöht und die Lastminima verkleinert. Dadurch erinnert der Last-Zeit-Verlauf optisch nicht mehr an die Bewegungsform Gehen.

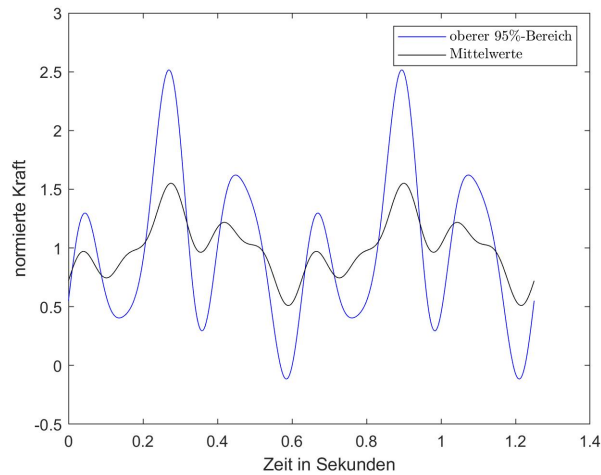


Abbildung 5.31.: Vergleich der Last-Zeit-Verläufe

Durch diesen Ansatz vergrößert sich die Lastamplitude nicht zum ungünstigsten Fall. Bei einem Vergleich der Schwingungen, die in einem Stabwerksmodell durch Ansetzen des Last-Zeit-Verlaufes auf das Brückenmodell generiert wurden, mit den Schwingungen, die an der Laborbrücke gemessen wurden ergab sich, dass eine Erhöhung der Funktion um den Faktor 2 auf der sicheren Seite liegend alle Schwingungsmaxima abdeckt. Dieser Faktor muss aber noch an anderen Bauwerken untersucht und bestätigt werden.

### 5.2.6. Ansatz von $\varphi_1$ in der VDI 2038

Der größte Unterschied zwischen der VDI 2038 und dem entwickelten Lastansatz ist neben der Anzahl der Harmonischen auch der Ansatz eines Phasenwinkels  $\varphi_1$ . Die Annahme einer Phasenverschiebung beim ersten harmonischen Anteil hat einen großen Einfluss auf den qualitativen Verlauf der Funktion, da die Phasenwinkel bei der Fourieranalyse aufeinander abgestimmt sind. Trotzdem heißt es in der zugrundeliegenden Literatur, dass bei „der Berechnung einer erzwungenen Schwingung für Gehen [...] jedoch in den meisten Fällen nur eine einzige Harmonische maßgebend [sei], so dass die Phasenverschiebung keine Rolle spielt“ [20].

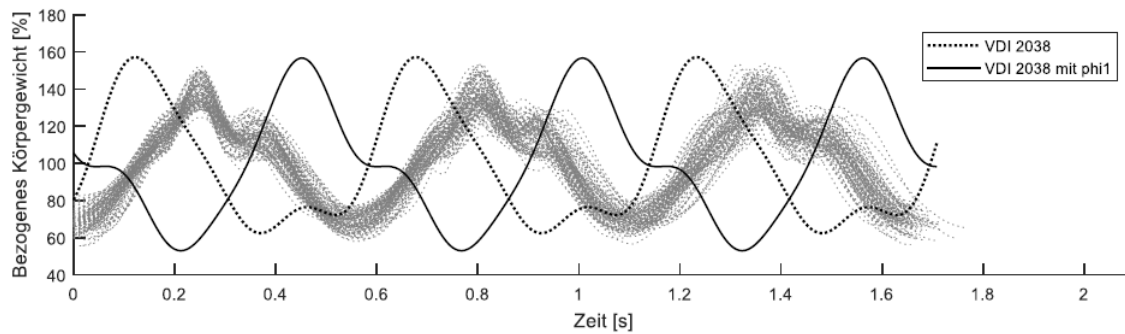


Abbildung 5.32.: Last-Zeit-Verlauf der VDI 2038 mit  $\varphi_1 = 0$  verglichen mit  $\varphi_1 = \frac{4}{5}\pi$  bei 1,8 Hz

Wie in Abbildung 5.32 zu erkennen ist, verändert sich der Last-Zeit-Verlauf bei Ansatz einer Phasenverschiebung beim ersten harmonischen Lastanteil deutlich und ähnelt nun eher den erfassten Messdaten.

Ein weiterer Unterschied ist die Höhe der harmonischen Anteile.

Wie in Abbildung 5.33 zu erkennen ist, bewertet die VDI 2038 die Anteile der einzelnen Harmonischen höher, als dies in Versuchsreihen bei der Auswertung nach drei harmonischen Lastanteilen ermittelt wurde.

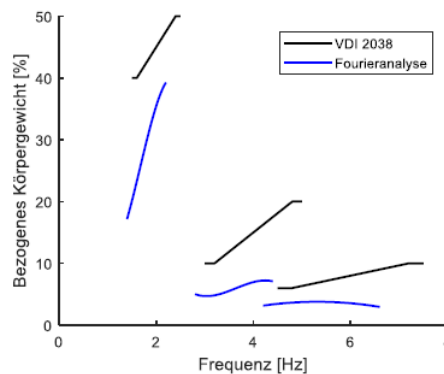


Abbildung 5.33.: Vergleich Lastanteile VDI 2038 mit selbst ermittelten Werten

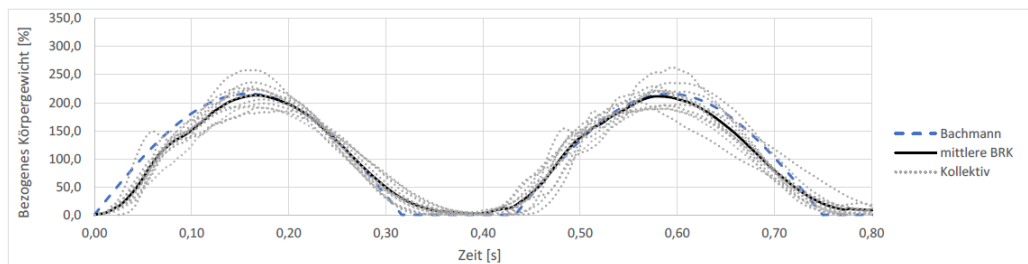


### 5.3. Überarbeitung des Lastansatzes für Laufen

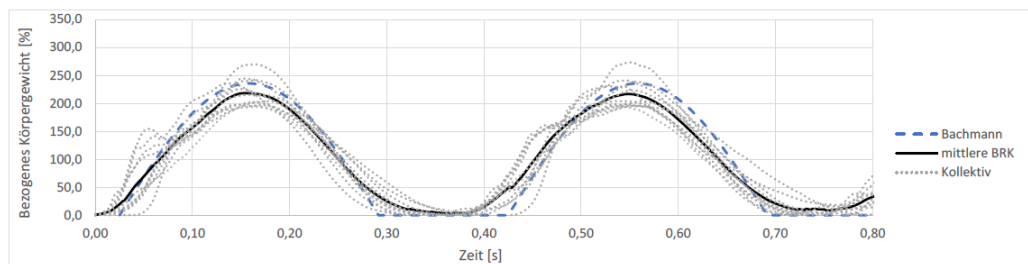
#### 5.3.1. Vergleich der erfassten Messdaten mit Lastansätzen aus der Literatur

##### 5.3.1.1. Vergleich mit Lastansätzen des Halbsinus-Modells

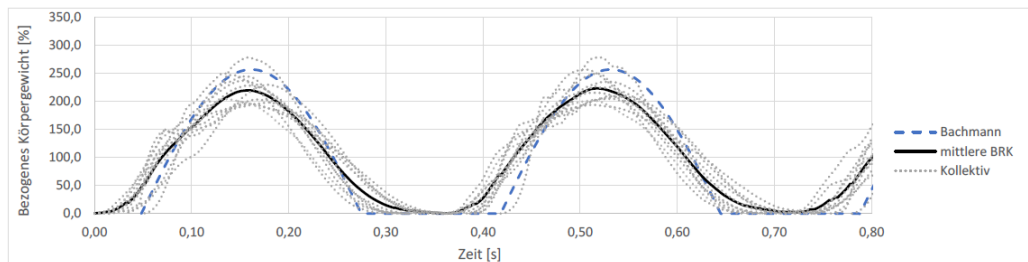
Bei Berechnung von Last-Zeit-Verläufen nach dem Halbsinus-Modell von Bachmann verändert sich die maximale Amplitude in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz. Hierbei werden Werte zwischen 115 % des Körpergewichtes bei einer Lauf-Frequenz von 2,3 Hz und 310 % bei einer Frequenz von 3,1 Hz erreicht.



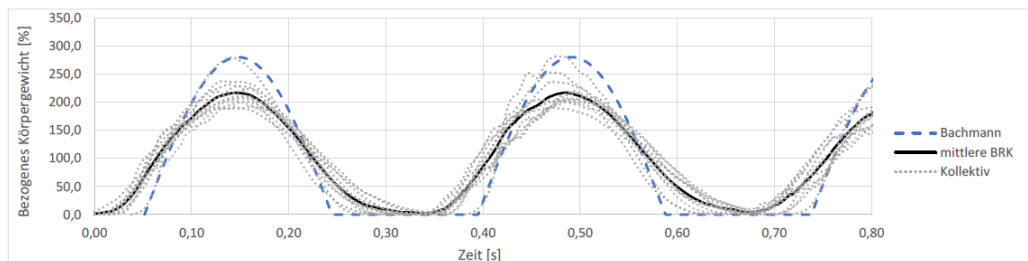
(a) bei 2,3 Hz



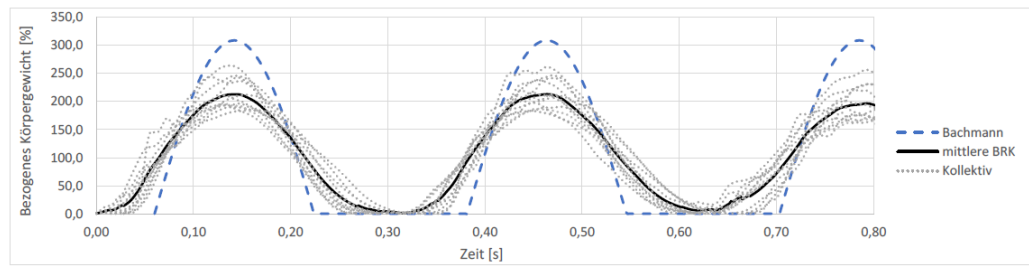
(b) bei 2,5 Hz



(c) bei 2,7 Hz



(d) bei 2,9 Hz



(a) bei 3,1 Hz

Abbildung 5.35.: Vergleich des Lastansatzes *Halbsinus-Modell* von Bachmann mit gemessenen Last-Zeit-Verläufen

Wie in Abbildung 5.35 (a) bis (e) zu erkennen ist, stimmt der qualitative Lastverlauf des Halbsinus-Modells mit den gemessenen Last-Zeit-Verläufen der einzelnen Probanden gut überein. Auf das von Seiler und Hüttner in [36] beschriebene Modell des nichtlinearen Einfreiheitsgradschwingers wird nicht weiter eingegangen, da die Lastamplitude diejenige des Halbsinus-Modells bei gleicher Periode übersteigt und bereits für das Halbsinus-Modell erkennbar ist, dass die maximalen Amplituden eher überschätzt als unterschätzt werden.

### 5.3.1.2. Vergleich mit dem Lastansatz aus der VDI 2038 - Blatt 1

Entgegen dem Halbsinus-Modell oder anderen Funktionen, die eine Fourierreihe zur Grundlage haben, ist in der VDI 2038 nicht geregelt, dass die Werte nicht kleiner als Null werden können. Dadurch ergibt sich ein Last-Zeit-Verlauf, der während der Flugphase negative Lasten auf das Bauwerk aufbringt. Dieser aufgebrauchte Sog kann als rechnerisch auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden, entspricht aber nicht dem wirklichen Lastbild.

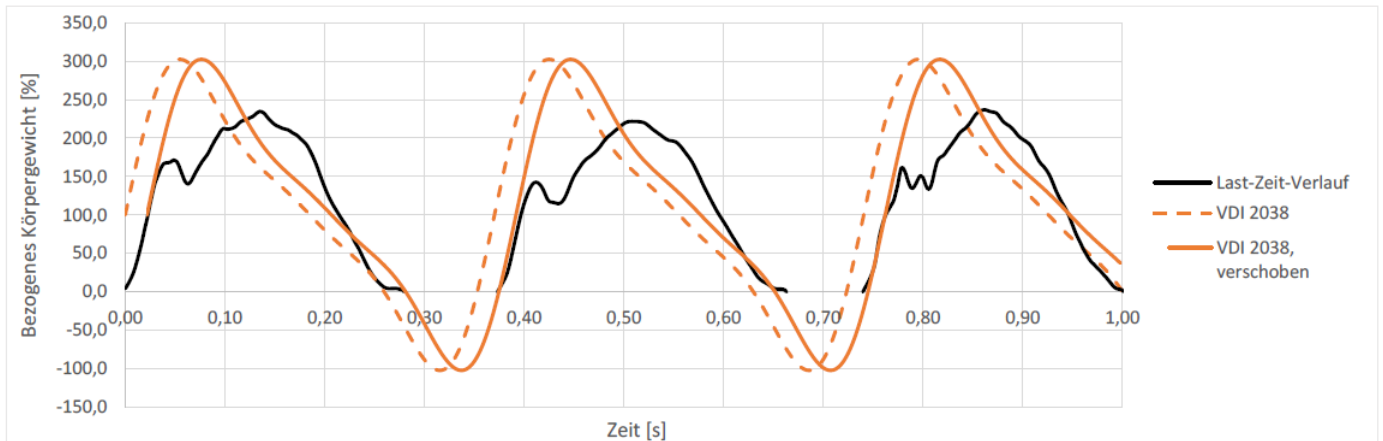
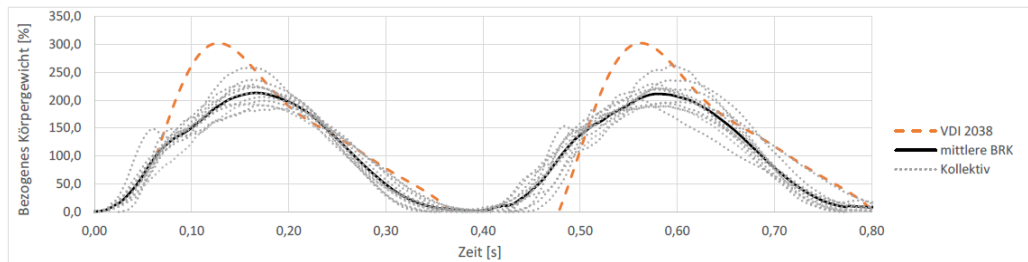


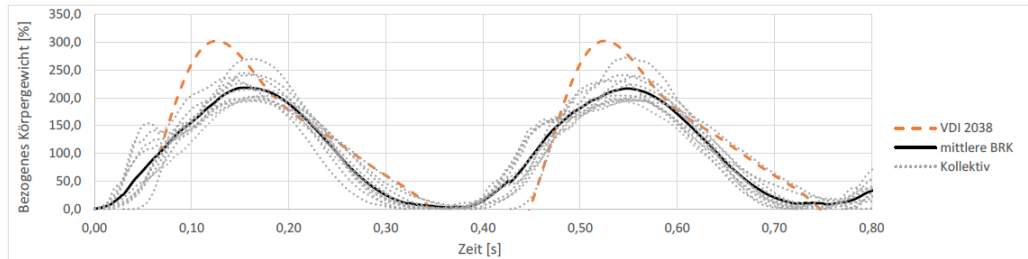
Abbildung 5.36.: Überlagerung Lastansatz VDI 2038 und Messdaten

In Abbildung 5.36 ist zu erkennen, dass die Überlagerung des Last-Zeit-Verlaufes mit Messdaten (hier ein gemittelter Verlauf) große Abweichungen aufzeigt. Das Verschiebungsintervall wurde so gewählt, dass die negativen Werte aus der Funktion mit den Flugphasen weitestgehend übereinstimmen.

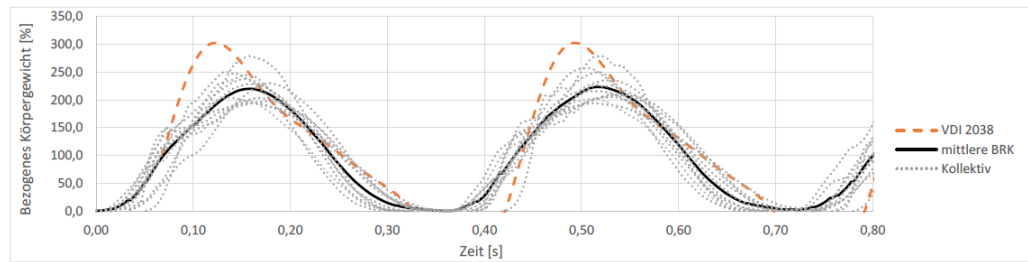
In den nachfolgenden Darstellungen wurde der negative Bereich der Last-Zeit-Verläufe aus der Funktion der VDI zu Darstellungszwecken nicht abgebildet. Auch hier lassen sich für die einzelnen Frequenzen große Abweichungen, sowohl in der Form als auch der Amplitudengröße, erkennen.



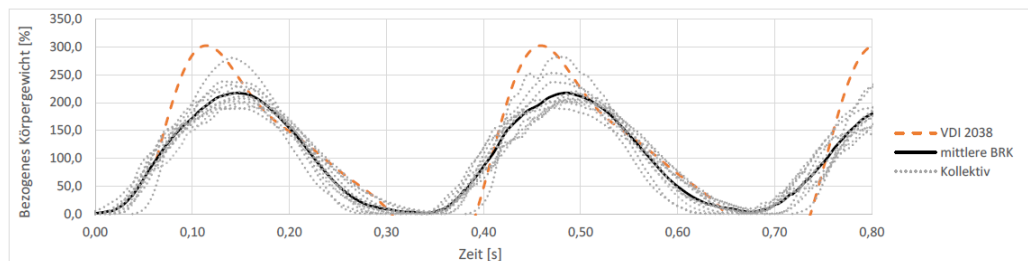
(a) bei 2,3 Hz



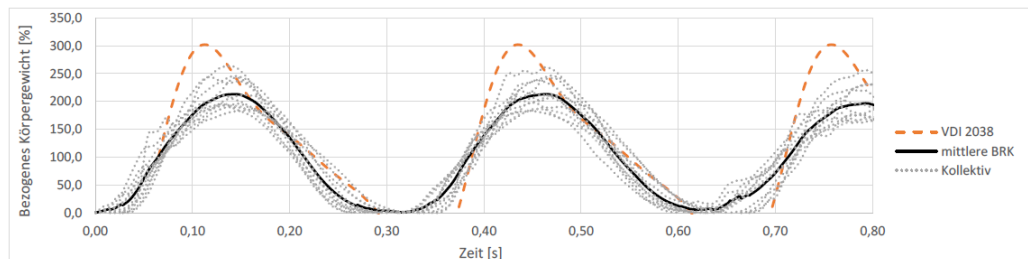
(b) bei 2,5 Hz



(c) bei 2,7 Hz



(d) bei 2,9 Hz



(e) bei 3,1 Hz

Abbildung 5.37.: Vergleich Lastansatz VDI 2038 - Laufen mit Messdaten

### 5.3.1.3. Vergleich mit dem Lastansatz nach Setra-Richtlinie

Die Setra-Richtlinie [38] beruht sich auf die von Bachmann genannten Fourierkoeffizienten, die auf der Analyse des Halbsinus-Modells beruhen. Um den impulsartigen Charakter des Halbsinus-Modells zu erhalten, werden lediglich positive Amplitudenwerte (aus der Kontaktphase) berücksichtigt, die größer als das Eigengewicht der Person sind. Während der Flugphase und bei Werten kleiner des Eigengewichts werden die Werte gleich Null gesetzt.

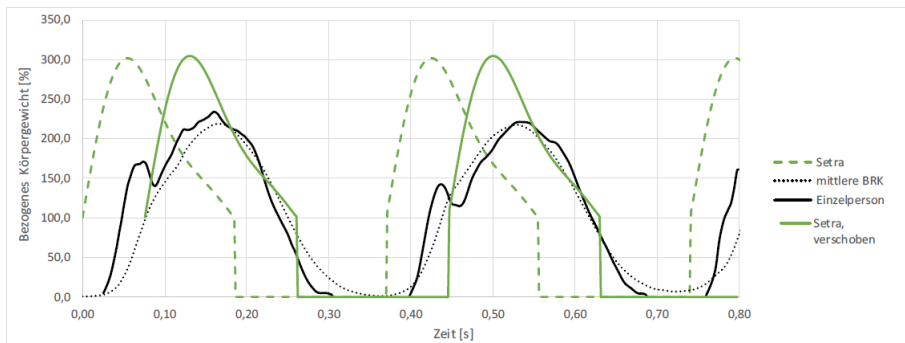


Abbildung 5.38.: Vergleich Lastansatz Setra-Richtlinie mit gemessenem Last-Zeit-Verlauf einer Einzelperson sowie gemittelten Verlauf

In Abbildung 5.38 ist zu erkennen, dass die tatsächlichen Lasten nicht ausreichend genau abgebildet werden. Die Maxima werden aufgrund der konstanten Fourierkoeffizienten unabhängig von der Schrittfrequenz überschätzt und die Kontaktphase ist allgemein als zu kurz zu bezeichnen.

### 5.3.2. Annäherung durch ein Halbsinus-Modell

In jedem in der Literatur verwendeten Lastmodell ist das Verhältnis zwischen der Kontaktdauer und der Dauer des gesamten Schrittes relevant. Sowohl in der VDI-Richtlinie als auch in der Setra-Richtlinie wird eine relative Kontaktzeit von 0,5 zugrunde gelegt.

Laufen umfasst jedoch, wie in Kapitel 3 erläutert, einen breit gestreuten Frequenzbereich. Hier werden die verschiedenen Laufstile wie Joggen, Rennen oder Sprinten mit abgedeckt. Die Flugdauer nimmt mit steigender Geschwindigkeit und Schrittfrequenz zu, daher ist der Ansatz der relativen Kontaktzeit als Konstante nicht genau.

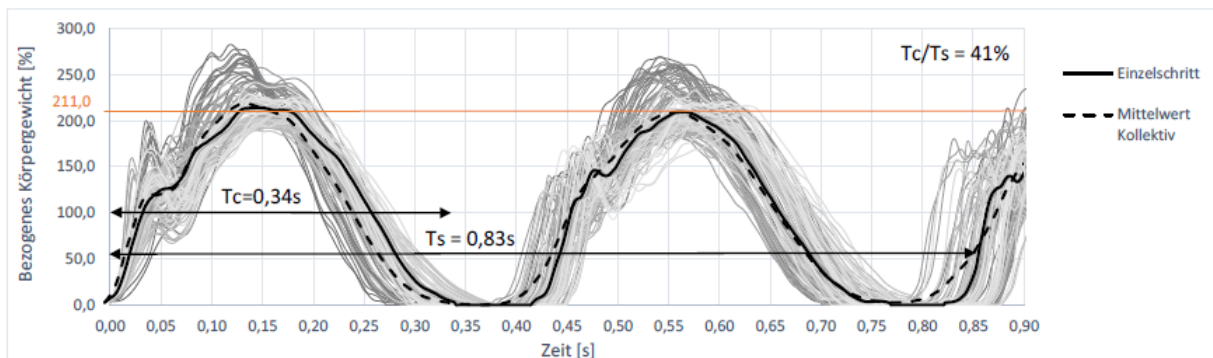


Abbildung 5.39.: Ermittlung der Kontaktdauer  $T_c$  und Schrittdauer  $T_s$  sowie deren Verhältnis

Die relative Kontaktzeit eines Einzelschritts nach Bachmann berechnet sich zu  $t_p/T_p = 2T_C/T_S$ . Nach den ermittelten Werten ergibt sich somit:

Tabelle 5.3.: Lastkoeffizienten sowie relative Kontaktzeit in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz

f [Hz]	$t_p/T_p$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
2,3	0,82	1,00	0,09	0,01	0,01
2,5	0,76	1,09	0,03	0,08	0,05
2,7	0,72	1,19	0,06	0,13	0,06
2,9	0,70	1,25	0,13	0,14	0,06
3,1	0,67	1,28	0,17	0,14	0,05
VDI	0,50	$\leq 1,60$	$\leq 0,70$	$\leq 0,20$	0,00

An dieser Tabelle ist bereits der geringe Einfluss aus den höheren harmonischen Lastanteilen beim Laufen zu erkennen.

Für das Halbsinus-Modell ergeben sich nach Bachmann folgende Funktionsgleichungen:

$$F(t) = \begin{cases} k_p \cdot F_G \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) & \text{für } 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & \text{für } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (5.34)$$

Mit  $k_p = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{t_p/T_p}$ .

Dabei ist  $0 \leq t \leq t_p$  gleichbedeutend mit  $F(t) \geq 0$  und  $t_p \leq t \leq T_p$  entspricht der Flugphase und damit  $F(t) = 0$ . Dabei sind Kontaktdauer  $t_p$  und Schrittdauer  $T_p$  abhängig von der Schrittfrequenz  $f_s$ . Zur Ermittlung von  $t_p$  beschreibt Petersen [36] eine Formel von Wheeler:

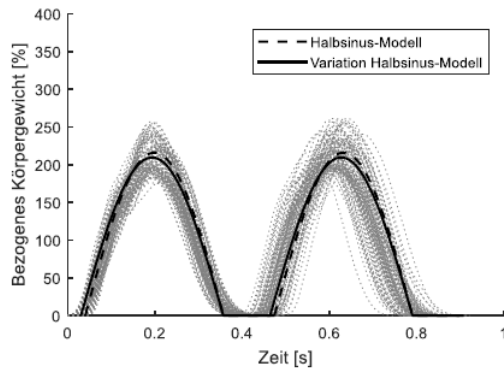
$$t_p = \frac{0,4}{f_s - 1} + 0,044 \cdot (2,5 - f_s) \quad (5.35)$$

mit  $f_s > 1,74\text{Hz}$  und  $T_p = \frac{1}{f_s}$

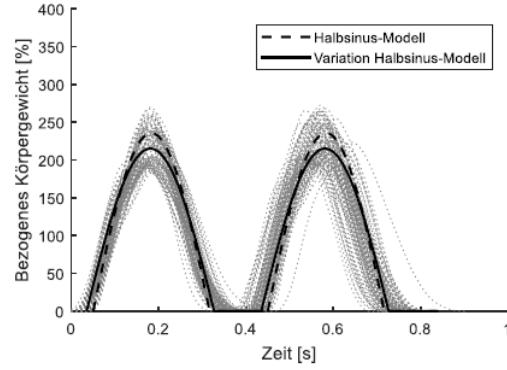
Setzt man in diese Gleichungen die Kontakt- und Schrittdauern nach Tabelle 5.3 ein, bilden die Verläufe die tatsächlichen Lasten genauer ab als das ursprüngliche Modell Bachmanns oder der VDI 2038.

In Abbildung 5.40 ist zu erkennen, dass die Höhe der Maxima mit abnehmender relativer Kontaktdauer ansteigt. Bei genauerer Untersuchung wurde ein linearer Zusammenhang von Schrittfrequenz und relativer Kontaktdauer dargestellt:  $t_p/T_p$  nimmt von 0,75 bei einer Schrittfrequenz von 2,3 Hz auf 0,67 bei einer Schrittfrequenz von 3,1 Hz ab und lässt sich mit folgender Funktionsgleichung beschreiben:

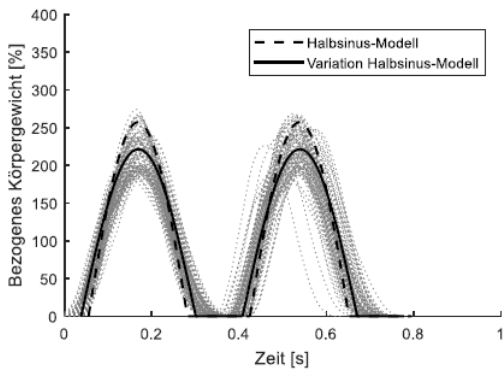
$$t_p/T_p = -0,1 \cdot f + 0,98 \quad (5.36)$$



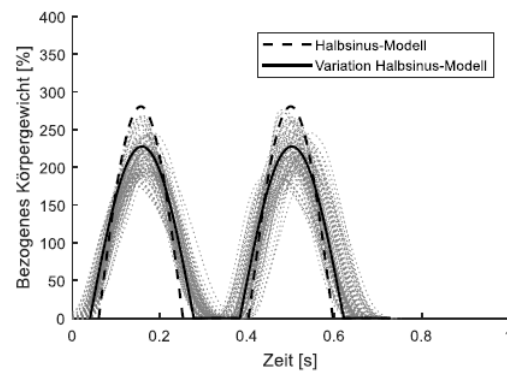
(a) bei 2,3 Hz



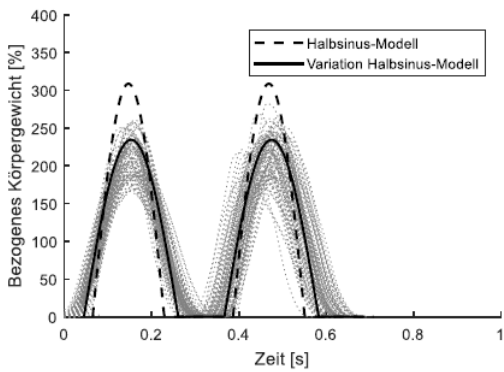
(b) bei 2,5 Hz



(c) bei 2,7 Hz



(d) bei 2,9 Hz



(e) bei 3,1 Hz

Abbildung 5.40.: Annäherung der Messdaten mit einem Halbsinus-Modell

### 5.3.3. Annäherung durch einen Fourierreihe

Da in der Fachliteratur neben dem Halbsinus-Modell auch eine Fourierreihenentwicklung zum Einsatz kommt, wird diese im Rahmen dieser Arbeit auch anhand der Messdaten entwickelt. Hierbei wird, aufgrund des Lastverlaufs, lediglich der erste harmonische Lastanteil berücksichtigt und es werden keine negativen Kräfte auf das Bauteil aufgebracht.

$$F(t) = \begin{cases} a_0 + a_0 \cdot c \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{für } F(t) \geq 0 \\ 0 & \text{für } F(t) < 0 \end{cases} \quad (5.37)$$

Der Lastanteil  $c$  ergibt sich zu:

$$c = -0,456 \cdot f^3 + 3,70 \cdot f^2 - 9,69 \cdot f + 9,34 \quad (5.38)$$

Der Phasenwinkel  $\varphi$  ist gleich Null und wird auch in der Funktion nicht genannt. In Abbildung 5.41 ist der so generierte Lastverlauf zusammen mit Messdaten dargestellt.

Abbildung 5.41 zeigt, dass die so generierten Messdaten eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Bodenreaktionskräften aufweisen.

### 5.3.4. Vergleich der beiden Ansätze

Da sowohl eine Annäherung durch eine Fourierreihe, als auch die Modellierung der Bodenreaktionskräfte mit dem Halbsinusmodell gute Ergebnisse erzielen, werden diese beiden Ansätze vergleichend gegenübergestellt.

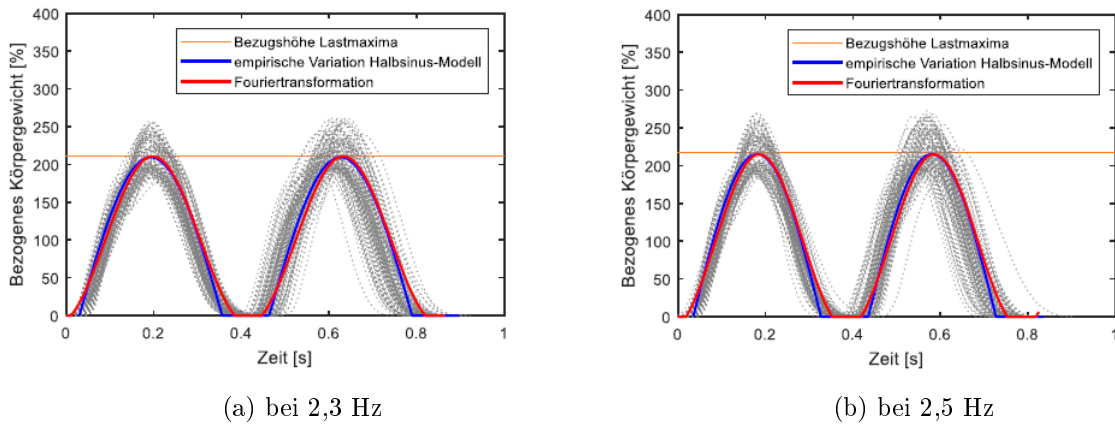
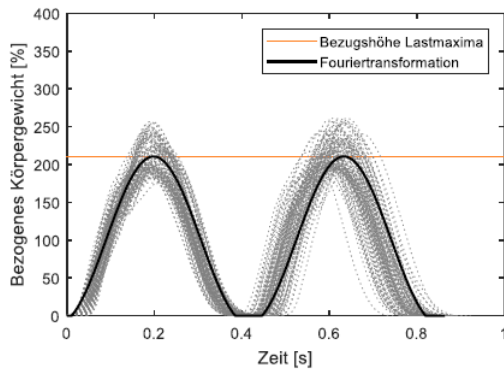
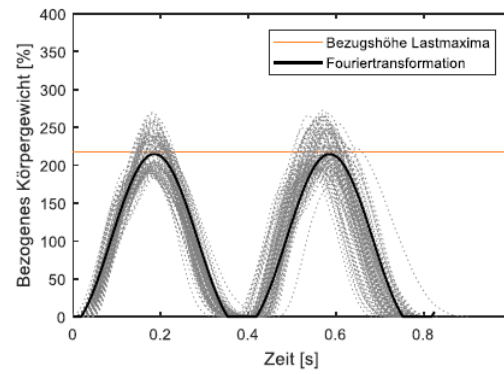


Abbildung 5.42.: Vergleich der beiden Lastansätze exemplarisch

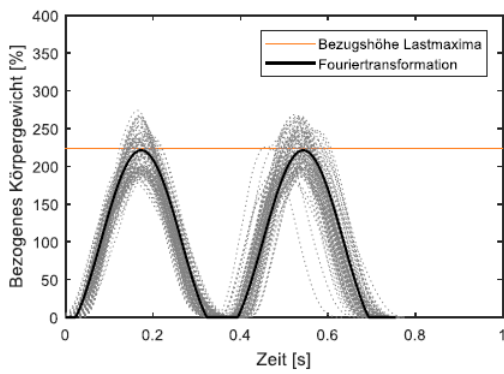
In Abbildung 5.43 ist zu erkennen, dass die Abweichungen der beiden Modelle minimal sind. Die Lastspitzen erweisen sich als nahezu identisch in Form sowie Amplitude und ermöglichen im Resonanzfall eine gute Einschätzung der maximalen Belastung. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Lastmodellen liegt bei der Einschätzung der Kontaktdauer.



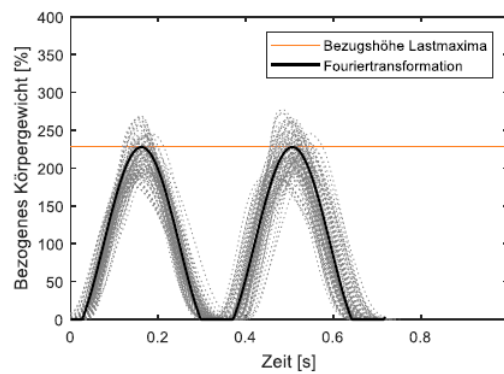
(a) bei 2,3 Hz



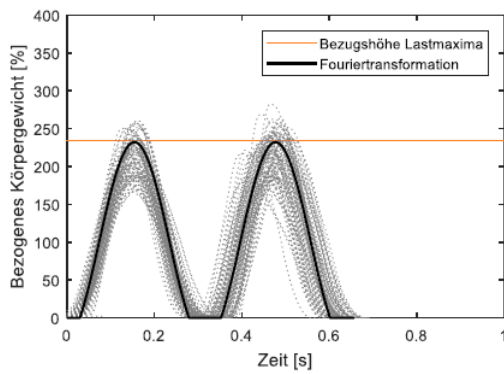
(b) bei 2,5 Hz



(c) bei 2,7 Hz



(d) bei 2,9 Hz



(e) bei 3,1 Hz

Abbildung 5.41.: Annäherung durch eine Fourierreihe



### 5.3.5. Berücksichtigung der Standardabweichung

Im Falle einer Resonanz würde eine maximale Belastung zum Zeitpunkt der größten Brückenverformung nach unten und eine Entlastung bei einem Schwingungshochpunkt auf das Bauwerk einwirken. Des weiteren streuen die maximal aufgebrauchten BRK und daher sollen diese Fälle durch die Berücksichtigung einer Standardabweichung abgebildet werden.

Für das Halbsinus-Modell werden die Funktionsgleichungen wie folgend angesetzt:

$$F_{\sigma, \text{oben}} = \begin{cases} 1, 1 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{t_p/T_p} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) & \text{für } 0 \leq t < t_p \\ 0 & \text{für } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (5.39)$$

$$F_{\sigma, \text{unten}} = \begin{cases} 0, 9 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{t_p/T_p} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t}{t_p}\right) & \text{für } 0 \leq t < t_p \\ 0 & \text{für } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (5.40)$$

Für die Anwendung einer Fourierreihe ergeben sich:

$$F_{\sigma, \text{oben}}(t) = \begin{cases} a_0 + 1, 18 \cdot c \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{für } F_{\sigma, \text{oben}}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{für } F_{\sigma, \text{oben}}(t) < 0 \end{cases} \quad (5.41)$$

$$F_{\sigma, \text{unten}}(t) = \begin{cases} a_0 + 0, 82 \cdot c \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{für } F_{\sigma, \text{unten}}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{für } F_{\sigma, \text{unten}}(t) < 0 \end{cases} \quad (5.42)$$

Der Lastverlauf mit der Variation der Formeln ist in den nachfolgenden Grafiken gezeigt.

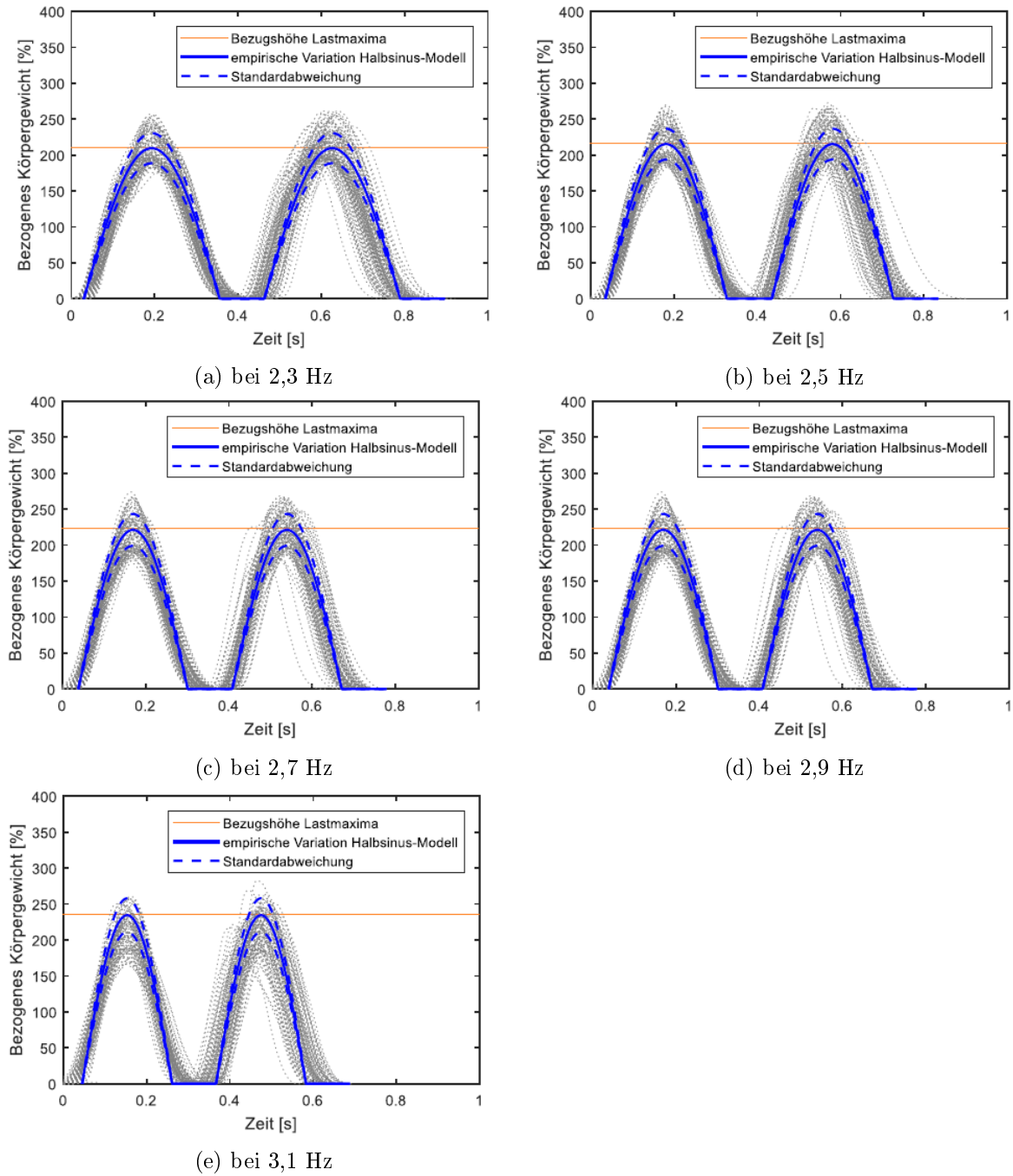
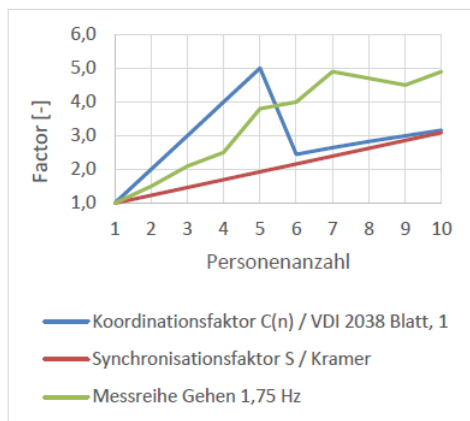


Abbildung 5.43.: Exemplarischer Vergleich der beiden Lastansätze

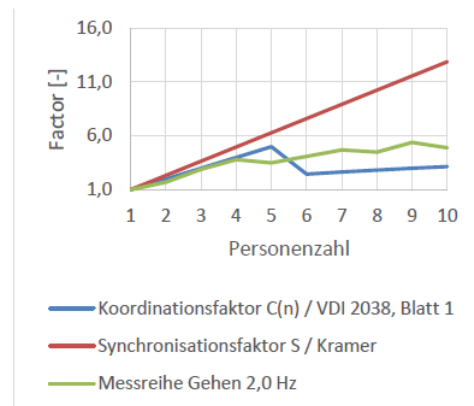
## 5.4. Betrachtung des Synchronisationsfaktors

Der Einfluss von Personengruppen wurde im Rahmen einiger studentischer Projektarbeiten betrachtet. Hierbei kamen drei Versuchsreihen in Projekten aus dem Modul *Praxisprojekt KIB* und *Versuchsgestützte Bemessung* an Brücken im Kölner Umland und eine Versuchsreihe an der Versuchsbrücke im Stahlbaulabor zustande.

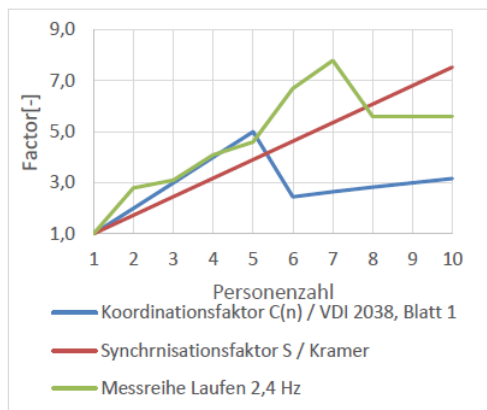
Hierbei sind Personengruppen unterschiedlicher Größe mit und ohne Taktvorgaben über die Brücke gegangen und gelaufen. Dabei wurden die Schwingungsamplituden in Feldmitte erfasst und die Steigung in Abhängigkeit von der Personenanzahl ermittelt und diese Ergebnisse mit dem Ansatz aus der VDI 2038 und anderen Literaturquellen verglichen. Dabei wurde jedoch nur eine Gruppe auf der Brücke betrachtet, der Einfluss von voneinander unabhängigen Gruppen an unterschiedlichen Punkten der Brücke wurde nicht untersucht.



(a) Gehen bei 1,75 Hz



(b) Gehen bei 2,00 Hz



(c) Gehen bei 2,40 Hz

Abbildung 5.44.: Synchronisationsfaktor an einer Fußgängerbrücke in Leverkusen

In Abbildung 5.45 sieht man exemplarisch die Schwinggeschwindigkeit einer Fußgängerbrücke in Leverkusen unter Einfluss von unterschiedlich großen Fußgängergruppen. Die Gruppen sind in jeder Frequenz fünf mal über diese Brücke gegangen oder gelaufen. Der direkte Vergleich der hier ermittelten Messdaten mit den Werten aus der VDI 2038 - Blatt 1 ist in Abbildung 5.46 dargestellt.

Hier ist zu erkennen, dass der Ansatz der VDI 2038 Blatt 1 [1] durchaus als auf der sicheren Seite liegend bezeichnet werden kann. An einer anderen Brücke ergaben sich die Verläufe in Abhängigkeit von der Größe der Personengruppen wie in Abbildung 5.44 dargestellt.

Insgesamt ist die Anzahl der im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Messungen zum Thema Synchronisation jedoch zu gering, um eine finale Aussage zu diesem Wert zu treffen.



Abbildung 5.45.: Normierte Schwinggeschwindigkeit in Feldmitte bei Anregung durch unterschiedlich große Personengruppen

Die hier ermittelten Werte stützen jedoch die Aussage, die in VDI 2038 und weiterer Literatur getroffen wird, dass sich kleine Personengruppen bei einfachen Bewegungsmustern einfacher synchronisieren können als große Gruppen.

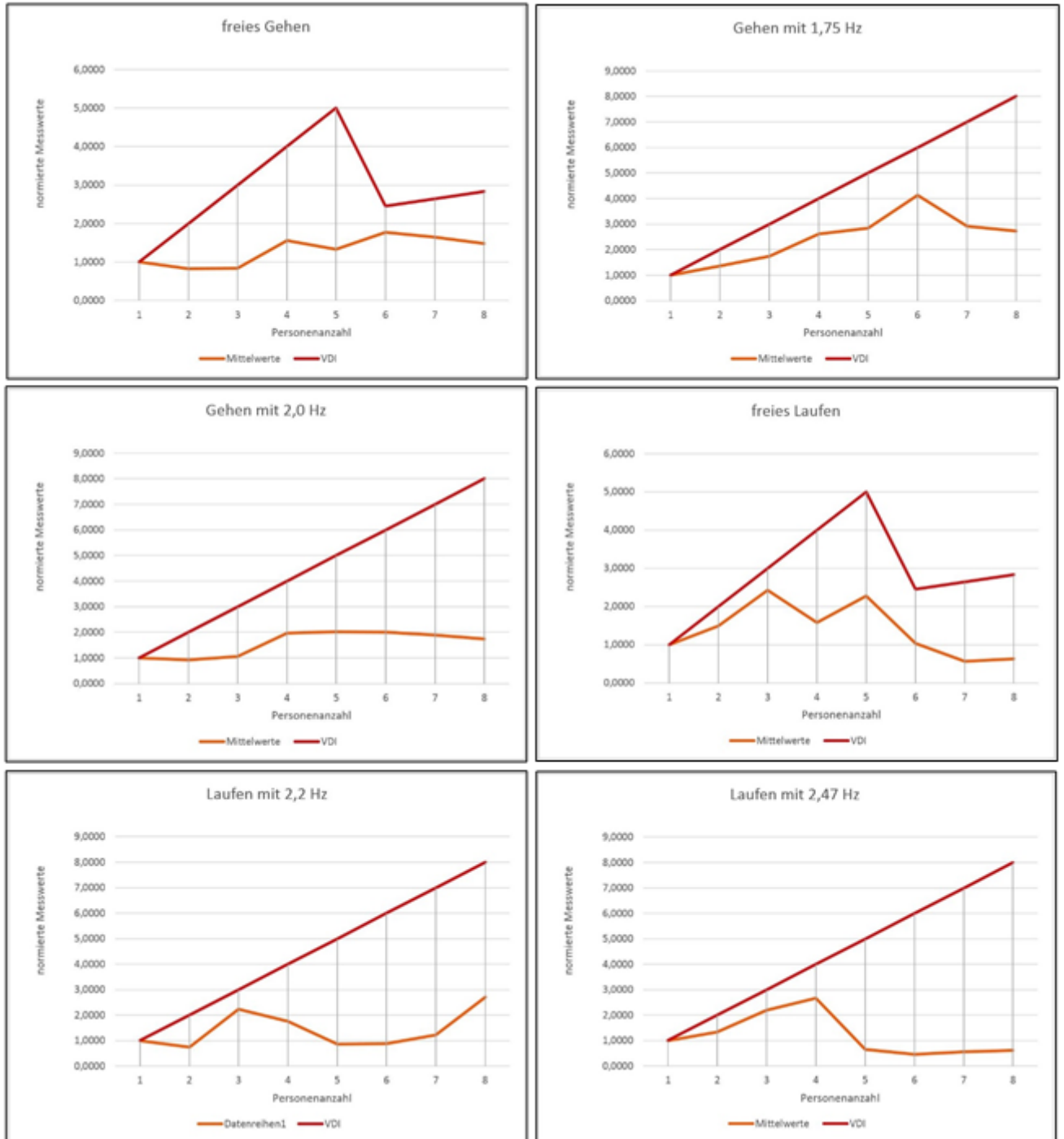


Abbildung 5.46.: Ermittelte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Vergleich zu den laut VDI zu erwartenden Werten



## 6. Qualitätssicherung des E-Learning-Konzeptes

### 6.1. Allgemeines

Die durch studentische Projektarbeiten ermittelten Daten müssen für eine weitere Verwendung geprüft werden. Daher spielt die Qualitätssicherung für die Anwendung des E-Learning-Konzeptes eine große Rolle. Für die Qualitätssicherung müssen zwei Schwerpunkte betrachtet werden. Zum einen muss die inhaltliche Qualität überprüft und gesichert sein, zum anderen muss die Qualität der Wiki-Seiten so gut sein, dass die gewonnenen Erkenntnisse möglichst verlustfrei übergeben werden können. Nur wenn eine Projektarbeit sowohl inhaltlich, als auch von der Präsentation der Ergebnisse gut ist, kann sie als Grundlage für weitere Projektarbeiten genutzt werden.

Daher werden zu Beginn des Forschungsprojektes sowohl an die Wiki-Seiten als auch an die Durchführung der Arbeit Anforderungen formuliert, die eingehalten und geprüft werden müssen. Da viele Studierende vor ihrer Teilnahme noch keine wissenschaftliche Arbeit verfasst haben, ist eine regelmäßige Beratung sowie das Bereitstellen von Informationen zu forschendem Arbeiten erforderlich.

### 6.2. Fachliche Qualitätssicherung der Projektarbeiten

#### 6.2.1. Vorgaben an die Arbeitsweise und Dokumentation

Während sich die Studierenden selbstständig in die Grundlagen und bisherigen Ergebnisse einarbeiten, werden sie bei der Durchführung eigener forschender Tätigkeiten eng betreut. Auf den Wiki-Seiten der Kategorie *Messtechnik Grundlagen* werden den Studierenden Dokumentation und Vorgehensweise bei Versuchen vermittelt. Bei der Durchführung der Versuchsreihen ist immer ein Projektbetreuer mit anwesend und achtet darauf, dass die Vorgaben zur Dokumentation eingehalten werden.

Konkret bedeutet dies, die Studierenden skizzieren den Messaufbau, führen ein Messprotokoll, in dem alle wichtigen Informationen erfasst werden und dokumentieren die Rahmenbedingungen der Versuchsreihe. Unmittelbar nach Durchführung der Versuche wird die Dokumentation kopiert und zusammen mit den Messdaten auch beim Projektbetreuer hinterlegt. Dies hat den Grund, dass so mögliche Abweichungen in der finalen Ausarbeitung der Studierenden festgestellt werden könnten und die Messdaten und deren Dokumentation auch für spätere Auswertungen und Projektarbeiten noch einmal genutzt werden können.

#### 6.2.2. Prüfung der inhaltlichen Qualität

Die Prüfung der inhaltlichen Qualität der Arbeiten erfolgt wie bei jeder anderen Projektarbeit auch. Die Studierenden geben eine Ausarbeitung ihrer Projektarbeit ab, diese wird vom Projektbetreuer gelesen, korrigiert und bewertet. Bei unklaren Punkten haben die Studierenden in einem Kolloquium die Möglichkeit, die entsprechenden Punkte zu erläutern.

Durch die Betreuung während der Projektbearbeitung, in der die Studierenden regelmäßig ihren aktuellen Bearbeitungsstand erläutern, werden unklare Punkte im Rahmen der Bearbeitung diskutiert.

## 6.3. Qualitätssicherung der Wiki-Seiten

### 6.3.1. Übersicht zur Qualitätssicherung der Wiki-Seiten

Um ein trotz vieler Autoren im Stil möglichst einheitliches Wiki zu erhalten, ist eine enge Begleitung der Studierenden im Erstellungsprozess notwendig. An das Wiki werden insgesamt folgende Ansprüche erstellt:

- Gute Lesbarkeit, trotz vieler verschiedener Autoren
- Seitenaufbau immer ähnlich
- Gute und sinnvolle Verlinkung der einzelnen Seiten untereinander
- Gute Nachvollziehbarkeit, aus welchen Projektarbeiten die Inhalte stammen

Da die Wiki-Seiten auch nach der Beendigung der Projektarbeiten der einzelnen Studierenden relevant für die nachfolgenden Gruppen sind, ist eine gute Qualität dieser Seiten notwendig. Wie in Abbildung 6.1 zusammengefasst ist, durchläuft die Erstellung einer Wiki-Seite mehrere Phasen.

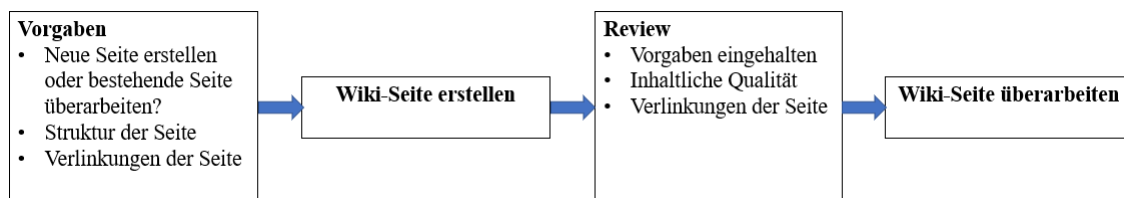


Abbildung 6.1.: Vorgehensweise zur Erstellung der Wiki-Seiten

In der ersten Phase werden den Studierenden Vorgaben zur Erstellung der Seite gemacht. Diese erfolgen über ein HowTo:Wiki und in Beratungsgesprächen (siehe Kapitel 6.3.2). Anschließend erstellen die Studierenden ihre Wiki-Seite. Diese wird dann begutachtet und anschließend noch einmal anhand des Feedbacks überarbeitet.

### 6.3.2. Vorgaben an die Wiki-Seiten

Bevor die Studierenden ihre Ergebnisse in Form einer Wiki-Seite zusammenfassen, werden in einem Beratungsgespräch folgende Fragen geklärt:

- Gibt es zu dem behandelten Thema schon eine oder mehrere Wiki-Seiten, die mit den neuen Informationen ergänzt und überarbeitet werden können?
- Welcher Name ist für die zu erstellende Wiki-Seite sinnvoll?
- Von welchen Seiten ist eine Verlinkung zu einer neu erstellten Seite sinnvoll? Wenn eine vorhandene Seite ergänzt oder überarbeitet wird, ist diese Seite sinnvoll verlinkt und in das Wiki eingebunden?

Diese Festlegungen entstehen im Dialog mit den Studierenden am Ende der Bearbeitungsdauer. So wird verhindert, dass das Wiki zu unübersichtlich wird, hilfreiche Artikel nicht gefunden werden, weil sie nicht gut verlinkt sind, oder es mehrere Seiten zu dem gleichen Thema gibt.

Um den Studierenden einen leichten Einstieg in die Erstellung von Wiki-Seiten und in wissenschaftliches Arbeiten allgemein zu ermöglichen, wurde mit Start des Forschungsprojektes ein *HowTo:Wiki* erstellt und im ILIAS-Kurs veröffentlicht. Das HowTo:Wiki enthält Informationen zu den Grundlagen des wissenschaftlichen Schreibens, zur inhaltlichen Strukturierung von Arbeiten und Wiki-Seiten und zur technischen Umsetzung in ILIAS.



Der Wiki-Artikel *Grundlagen des wissenschaftlichen Schreibens* mit Hinweisen zu logischem Fluss, Formatierung und Struktur, Verweisen, Übersichtlichkeit und auch zur korrekten Darstellung von Formeln und Variablen gibt Studierenden, die kaum oder noch keine Erfahrung im wissenschaftlichen Arbeiten haben, einen leichten Einstieg und soll so dafür sorgen, dass die inhaltlichen Ergebnisse der Studierenden auch gut präsentiert werden.

Wiki-Seiten zu Urheber- und Nutzungsrecht sowie zu Zitaten und Quellenangaben helfen den Studierenden, ihre Literaturrecherche sauber darzustellen, und nachfolgenden Projektgruppen nachzuvollziehen, woher welche Informationen stammen.

Für den konkreten Aufbau der Wiki-Seiten werden den Studierenden im Artikel *Inhaltliche Strukturierung* folgende Vorgaben gemacht: Zuerst wird das Thema allgemein eingeleitet, danach folgen die Details und dann kommt eine Auflistung der Autoren der Wiki-Seite und des zugehörigen Projekt-Titels. Zweck dieser genauen Vorgabe ist, dass die Studierenden nach dem ersten Abschnitt schon wissen, ob die Inhalte für ihr eigenes Projekt relevant sind, und über die Auflistung der Autoren wird klar, aus welchen Projektarbeiten die Informationen stammen.

Checkliste	Geprüft
Die Wiki-Seite ist, wie auf den Seiten „Grundlagen des wissenschaftlichen Schreibens“ und „Inhaltliche Strukturierung“ im HowTo:Wiki beschrieben, aufgebaut.	<input type="checkbox"/>
Die Wiki-Seite enthält alle relevanten Informationen und verlinkt auf andere relevante Seiten.	<input type="checkbox"/>
Die Inhaltsübersicht wurde geprüft und Überschriften richtig gewichtet.	<input type="checkbox"/>
Es wurde überprüft, dass alle Links auf das richtige Ziel zeigen und funktionieren.	<input type="checkbox"/>
Zitate und Quellen wurden im Text entsprechend gekennzeichnet. <sup>1</sup>	<input type="checkbox"/>
Medien wurden sinnvoll eingesetzt und angeordnet.	<input type="checkbox"/>
Es wurde bei allen Medien (Bildern und Videos) auf das Urheber- und Nutzungsrecht <sup>2</sup> geachtet.	<input type="checkbox"/>
Es wurde auf eine sachgerechte Schreibweise (keine Umgangssprache) geachtet.	<input type="checkbox"/>
Rechtschreibung, Kommasetzung und Grammatik wurden überprüft.	<input type="checkbox"/>
Verwendete Literatur wurde auf der Seite „Literaturliste“ des Wikis ergänzt.	<input type="checkbox"/>
Die Wiki-Seite enthält als letztes Kapitel eine Übersicht der Autoren und eine Zuordnung der Kapitel zu diesen. (vgl. Seite „Inhaltliche Strukturierung“)	<input type="checkbox"/>

Abbildung 6.2.: Checkliste zur Abgabe der Wiki-Seite

Bei der Bearbeitung erhalten die Studierenden außerdem eine Checkliste, welche sie unterschreiben mit abgeben müssen. In Abbildung 6.2 sind die einzelnen Punkte dargestellt. Durch die Abgabe der Checkliste soll sichergestellt werden, dass sich die Studierenden eingehend mit den Vorgaben im HowTo:Wiki beschäftigt haben, da dort die wesentlichen Punkte noch einmal aufgegriffen werden.

Die Seiten zur technischen Umsetzung befassen sich mit dem Erstellen von Textblöcken, Einfügen von Medien und zum Beispiel Einfügen von Formeln. Diese Seiten dienen lediglich als Hilfestellung, da die Erstellung, Bearbeitung und Formatierung von Wiki-Seiten in ILIAS relativ umständlich und nicht selbsterklärend ist.

### 6.3.3. Review-Prozess

Nachdem die Studierenden Wiki-Seiten abgegeben haben, bekommen sie ein Feedback zu ihren Seiten, können diese dann noch einmal überarbeiten und geben dann die finale Fassung ab. Ursprünglich war geplant, die Qualitätssicherung der Seite durch einen Peer-Review-Prozess zu gestalten. Da die Anzahl der Teilnehmer aber je nach Semester stark schwankte, einige Studierende zwischen den Semestern ihre Abschlussarbeiten anfertigen und es so nicht sichergestellt werden kann, dass auch immer eine andere Studierendengruppe zeitgleich beteiligt ist, um die Seiten zu begutachten, wurde das Feedback von den Projektbetreuern durchgeführt.

Das Feedback wird systematisch anhand eines Fragebogens durchgeführt. Der Fragebogen beruht auf einem Fragebogen der TU Darmstadt, der von Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange und Dr.-Ing. habil. Felicitas Rädel im Rahmen der Lehrveranstaltungen eingesetzt wird. Er erfasst Punkte zur inhaltlichen Qualität und zur Form der Wiki-Seite.

1. Fragen zur inhaltlichen Qualität:

- a) Sind Begriffe gut erklärt und werden richtig verwendet?
- b) Sind die logischen Zusammenhänge klar?
- c) Werden Bezüge zu Grundlagen hergestellt?

2. Fragen zur Form der Wiki-Seite:

- a) Ist die Seite ansprechend gestaltet?
- b) Sind Quellen und Referenzen korrekt angegeben?
- c) Ist die Seite gut gegliedert?
- d) Ist der Einsatz von Medien (Bildern, Videos oder interaktiven Bildern) gut und sinnvoll gewählt?

Anhand des daraus resultierenden Feedbacks können die Studierenden ihre Wiki-Seite noch einmal überarbeiten, und so wird sichergestellt, dass die Qualität der einzelnen Wiki-Seiten gut ist und weitere Projekte auf Grundlage der Seite entstehen können.

## 7. Theorie zur Bewertung des E-Learning-Konzeptes

### 7.1. Ziele der Evaluation

#### 7.1.1. Untersuchte Aspekte

Bei der Evaluation des Lehrkonzeptes wurde zunächst eine Einteilung in drei Schwerpunkte vorgenommen, um die Evaluation zielgerichtet und strukturiert durchführen zu können. Hierbei wurden *Bedingungen*, *Verlaufsprozesse* sowie *Akzeptanz und Wirkung* als Schwerpunkte der Evaluation ausgewählt. Im Schwerpunkt *Bedingungen* werden die Leistungsmotivation der Studierenden sowie das generelle Interesse an forschendem Arbeiten untersucht. Unter *Verlaufsprozesse* fallen Analysen zur Nutzung des Wikis, zum Fortschreiten des Forschungsprojektes mit den studentischen Arbeiten und Bewertung und zur Anpassung des Lehrkonzeptes, damit die Studierenden ihr Lernziel erreichen. Unter *Akzeptanz und Wirkung* soll untersucht werden, inwieweit die Studierenden die Vorgehensweise mit einem E-Learning-Konzept akzeptieren, ob ihnen ihr Beitrag zum Forschungsprojekt bewusst ist, und welche Probleme aufgetreten sind.

### 7.2. Bedingungen

#### 7.2.1. Allgemeines

Wie schon beschrieben, können die Studierenden über Wahlpflichtmodule oder Abschlussarbeiten an dem Projekt teilnehmen. Die Studierenden können sich also auch gegen ein Projekt zu forschendem Lernen entscheiden. Die Studierenden wissen, dass sie mit ihrer Projektarbeit Teil-ergebnisse für die Beantwortung einer Forschungsfrage liefern, und dass die Veranstaltungen auf einem E-Learning-Konzept beruhen. Es wird über Interviews und Fragebogen festgestellt, warum sich die Studierenden für die Mitarbeit am Forschungsprojekt entschieden haben. Es wird ebenfalls abgefragt, unter welchen Rahmenbedingungen die anderen Studierenden teilnehmen würden. Die Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Forschungsvorhaben, auch mit Beteiligung von Pflichtmodulen, soll untersucht werden. Hierfür werden die Dimensionen der Leistungsmotivation der teilnehmenden Studierenden untersucht und geprüft, ob diese sich von den Werten ihrer Kommilitonen unterscheiden.

#### 7.2.2. Leistungsmotivation

##### 7.2.2.1. Erläuterung zur Leistungsmotivation

Die Untersuchung der Leistungsmotivation stellt einen zentralen Aspekt der Evaluation des Lehrkonzeptes dar. Es soll geklärt werden, ob die Leistungsmotivation der Teilnehmergruppe sich von der Kontrollgruppe unterscheidet und ob und welchen Einfluss die Leistungsmotivation im Bezug auf forschendes Lernen hat.

Mit dem Begriff *Motivation* wird die Bereitschaft beschrieben, Zeit und Energie zu investieren, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Diese wird in extrinsische und intrinsische Motivation unterteilt. Als extrinsische Motivation werden dabei äußere Zwänge oder Anreize verstanden. Extrinsische Motivationen können sehr vielseitig sein. Beispielsweise arbeiten Studierende an einem Projekt, weil die Abgabe kurz bevor steht oder nehmen an einem Modul teil, weil es für die

Erlangung des Abschlusses notwendig ist. Als intrinsische Motivation wird die innere Motivation beschrieben. Eine Tätigkeit ist intrinsisch motiviert, wenn sie aus innerem Antrieb erfolgt. Leistungsmotivation wird der intrinsischen Motivation zugeordnet und nach Schweizer [48, S.224] als „Bedürfnis, das ein Individuum antreibt, seine Leistung zu steigern, erfolgreich zu sein oder sich/andere zu übertreffen“ beschrieben.

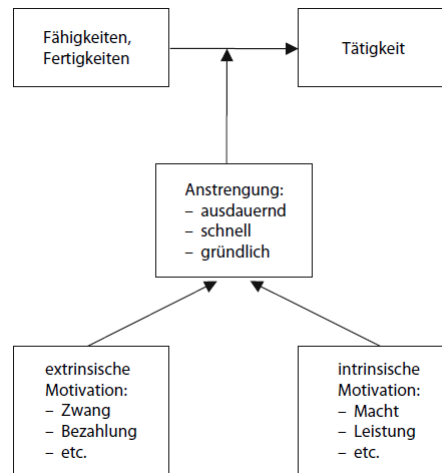


Abbildung 7.1.: Motivlage bei Leistungsverhalten aus [48, S. 226]

Wie Schweizer in Abbildung 7.1 darstellt, ist eine Tätigkeit niemals nur durch eine intrinsische oder extrinsische Motivation bedingt. Jedoch kommt er zu dem Schluss, dass individuelle Leistungsunterschiede nicht sehr eng mit der Leistungsmotivation zusammenhängen [48, S.228]. Schuler und Prochaska sehen die Leistungsmotivation entgegen Schweizers Aussage, nach den kognitiven Fähigkeiten als zweites erfolgsrelevantes Merkmal an (vgl. [49, S.8]).

Zur Erfassung der Leistungsmotivation werden Fragebögen angewendet, denen jeweils eine Definition verschiedener Items zugrunde liegt. Schuler [50] beschreibt das Leistungsmotivationsinventar nach [49] als umfangreiches Instrument zur Erfassung der Leistungsmotivation.

#### 7.2.2.2. Leistungsmotivationsinventar nach Schuler und Prochaska [49]

Zur Feststellung der Leistungsmotivation der Studierenden wird das Leistungsmotivationsinventar von Schuler und Prochaska [49] verwendet. Es besteht aus 170 Fragen, die in einer siebenstufigen Antwortskala von *trifft gar nicht zu* bis *trifft vollständig zu* beantwortet werden müssen. Das Ausfüllen eines Fragebogens dauert circa 30 Minuten und soll in einem ruhigen Umfeld, möglichst ohne Unterbrechungen, durchgeführt werden.

Den Studierenden wird die Verwendung der Ergebnisse vorher erläutert und sie werden gebeten, den Test gewissenhaft auszufüllen. Außerdem wird erläutert, dass ein hoher beziehungsweise niedriger Wert nicht mit gut oder schlecht gleichzusetzen ist, um die Studierenden nicht in der Auswahl der Antworten zu beeinflussen.

- |   |               |
|---|---------------|
| 21. Es kommt oft vor, dass ich mich ganz selbstvergessen mit irgendeiner Sache beschäftige. | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ |
| 22. Wenn ich etwas Schwieriges zuwege gebracht habe, bin ich stolz auf mich.                | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ |
| 23. Vor Prüfungen bin ich oft schrecklich nervös.   | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ |

Abbildung 7.2.: Ausschnitt des Fragebogens zum Leistungsmotivationsinventar nach Schuler und Prochaska

Anhand eines Bewertungsbogens, der die einzelnen Fragen den Leistungsdimensionen zuweist, wird dann die Verteilung der Leistungsmotivation ermittelt und kann in einem Diagramm dargestellt werden.



Abbildung 7.3.: Kasten 3 aus [49]

Abbildung 7.3 zeigt die Auswertung von Rohdaten in einem Netzdiagramm und die Verteilung auf die einzelnen Leistungsdimensionen. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

**Erläuterung der Leistungsdimensionen** Die 17 Dimensionen des Leistungsmotivationsinventars, kurz LMI, werden in [49] ausführlich erläutert und mit beispielhaften Eigenschaften dargestellt. Diese 17 Dimensionen sind:

1. *Beharrlichkeit (BE)*

Beharrlichkeit beschreibt, mit wie viel Kräfteinsatz und Ausdauer eine Aufgabe bewältigt wird. Personen mit hohen Werten neigen eher dazu, konzentriert an der Aufgabe zu arbeiten und bei Schwierigkeiten den Kräfteinsatz zu erhöhen. Als Beispiele werden die Begriffe *ausdauernd*, *entschlossen*, *fleißig* und auch *hartnäckig* genannt.

2. *Dominanz (DO)*

Unter Dominanz wird im LMI die Tendenz beschrieben, Macht und Einfluss auf andere auszuüben. Personen mit hohen Werten neigen in Zusammenarbeit dazu, andere anzuleiten, gerne die Initiative zu ergreifen und Verantwortung zu übernehmen. Als weitere beschreibende Begriffe werden hier *beeinflussend*, *bestimmend*, *verantwortungsbereit* und *einflussreich* aufgeführt.

3. *Engagement (EN)*

Unter Engagement wird die persönliche Anstrengungsbereitschaft verstanden. Personen mit hohen Werten sind durch ein hohes Aktivitätsniveau gekennzeichnet und fühlen sich

unwohl, wenn sie nichts zu tun haben. Sie räumen ihrer Arbeit einen hohen Stellenwert ein. Weitere Begriffe sind hier *arbeitsfreudig*, *emsig*, *betriebsam* oder *ehrgeizig*.

4. *Erfolgszuversicht (EZ)*

Erfolgszuversicht ist eine Vorwegnahme des Handlungsergebnisses im positiven Sinne. Hohe Werte kennzeichnen Personen, die auch bei schwierigen Aufgaben und Problemen davon ausgehen, dass sie diese durch Einsatz ihrer Fähigkeiten und Kenntnisse bewältigen können. Beispielhaft werden die Begriffe *selbstvertrauend*, *optimistisch*, *hoffnungsvoll* und *siegesbewusst* genannt.

5. *Flexibilität (FX)*

Flexibilität beschreibt den Umgang mit neuen Situationen und Aufgabenstellungen. Hohe Werte kennzeichnen Personen, die gerne neues erfahren und erleben und sich auf unterschiedliche Bedingungen und Veränderungen gut einstellen können. Hier sind die Begriffe *offen*, *veränderungsbereit* oder auch *aufgeschlossen* beschreibend.

6. *Flow (FL)*

Unter Flow wird nicht nur eine Eigenschaft, sondern auch ein Zustand verstanden. Personen mit hohen Werten können sich, unter Ausblendung aller Ablenkungen, lange und selbstvergessen mit einer Sache befassen. Beschreibende Begriffe sind *konzentriert*, *aufgabenverliebt* oder auch *vertieft*.

7. *Furchtlosigkeit (FL)*

Personen mit hohen Werten in der Dimension Furchtlosigkeit haben keine Angst davor, sich schwierigen Problemen und Aufgaben zu stellen, obwohl die Möglichkeit des Misserfolgs durchaus bedacht wird. Sie haben keine Angst davor zu versagen oder negativ bewertet zu werden. Daher ist ihre Anspannung vor wichtigen Aufgaben oder Prüfungen nicht sehr hoch. Als weitere beschreibende Begriffe werden hier *angstfrei*, *mutig*, *unverdrossen* und *wagemutig* aufgeführt.

8. *Internalität (IN)*

Unter Internalität wird die Überzeugung verstanden, für Handlungsergebnisse selbst verantwortlich zu sein. Personen mit hohen Werten sind davon überzeugt, dass das meiste im Leben von ihrem eigenen Kräfteinsatz und Verhalten abhängt. Erfolg wird nicht als Glück angesehen und für Misserfolg fühlen sie sich selbst verantwortlich. Beispielhaft werden die Begriffe *selbstbestimmend*, *selbstbewusst*, *erfolgssicher* und *analysierend* genannt.

9. *Kompensatorische Anstrengung (KA)*

Die kompensatorische Anstrengung beschreibt den Teil persönlicher Anstrengung und Kraftaufwandes, der aus Angst vor Misserfolg resultiert. Es ist eine konstruktive Bewältigung von Furcht vor Versagen oder Misserfolg. Personen mit hohen Werten investieren viel Zeit und Mühe in eine Aufgabenstellung, um Misserfolge zu vermeiden. In Prüfungssituationen erscheinen sie häufig übervorbereitet. Beispielhaft werden die Begriffe *konstruktiv angstvermeidend* oder auch *übervorbereitet* genannt.

10. *Leistungsstolz (LS)*

Dem Leistungsstolz liegt das Bedürfnis zugrunde, die mit Erfolgen verbundenen positiven Gefühlszustände wiederholt erfahren zu dürfen. Personen mit hohen Werten sind dann zufrieden, wenn sie ihr Bestes gegeben haben, steigern gerne ihre Leistung und sind ehrgeizig. Synonym werden die Begriffe *erfolgsabhängig* oder *ehrgeizig* genannt.

11. *Lernbereitschaft (LB)*

Lernbereitschaft beschreibt das Bemühen, seine Kenntnisse zu erweitern. Personen mit hohen Werten sind wissbegierig und investieren aus eigenem Antrieb Zeit und Mühe, um

Neues dazuzulernen. Für Lernbereitschaft werden außerdem die Begriffe *wissbegierig*, *neugierig* oder auch *aufmerksam* genannt.

12. *Schwierigkeitspräferenz (SP)*

Unter Schwierigkeitspräferenz wird die Wahl des Anspruchsniveaus und Risikos bei Aufgaben verstanden. Personen mit hohen Werten neigen zu anspruchsvollen Aufgaben, bei erfolgreicher Bewältigung erhöhen sie ihr Anspruchsniveau. Die Möglichkeit des Scheiterns wird als Herausforderung empfunden und Probleme werden eher als Ansporn statt Hemmnis gesehen. Hier sind die Begriffe *anspruchsvoll*, *risikobereit* oder auch *problemlösend* genannt.

13. *Selbstständigkeit (SE)*

Unter Selbstständigkeit wird die Neigung zu eigenständigem Handeln verstanden. Personen mit hohen Werten sind für ihre Angelegenheiten lieber selbst verantwortlich, bestimmen ihre Arbeitsweisen gerne selbst und treffen eigenständige Entscheidungen. Die Begriffe *eigenständig*, *selbstverantwortlich* oder auch *entscheidungssicher* werden dieser Dimension zugeordnet.

14. *Selbstkontrolle (SK)*

Die Art der Organisation und Durchführung von Aufgaben wird von der Selbstkontrolle beeinflusst. Personen mit hohen Werten arbeiten gut organisiert und schieben Pflichten nicht auf. Sie sind diszipliniert und nehmen auch Entbehrungen in Kauf, um langfristige Ziele zu erreichen. Die Begriffe *diszipliniert*, *organisiert* und *selbstbeherrscht* werden in dieser Leistungsdimension aufgezählt.

15. *Statusorientierung (ST)*

Das Bestreben, sich eine wichtige Rolle im sozialen Umfeld zu schaffen, wird als Statusorientierung beschrieben. Personen mit hohen Werten suchen leistungsbezogene soziale Anerkennung, und die Aussicht auf Karriere stellt eine wichtige Motivation dar. Statusorientierte Personen können auch als *nach Ansehen strebend*, *imagebedacht* oder *nach Anerkennung suchend* beschrieben werden.

16. *Wettbewerbsorientierung (WE)*

Bei hohen Werten in der Wettbewerbsorientierung wird Konkurrenz als Ansporn erlebt. Wettbewerb und Vergleich mit anderen wird gezielt gesucht, wobei dabei immer versucht wird, besser und schneller zu sein. Zusätzlich zum Begriff *wettbewerbsorientiert* werden die Begriffe *kämpfend* oder auch *rivalisierend* genannt.

17. *Zielsetzung (ZS)*

Zielsetzung hat eine Zukunftsorientierung. Personen mit hohen Werten setzen sich Ziele (auch langfristig) und stellen hohe Ansprüche an das, was sie noch leisten wollen. Beispielfhaft werden die Begriffe *zukunftsorientiert*, *entschlossen* und *zielbewusst* genannt.

### 7.2.2.3. Hypothesen zur Leistungsmotivation

Da die Studierenden im Rahmen von Wahlpflichtmodulen ausschließlich freiwillig am Forschungsprojekt teilnehmen können, soll untersucht werden, ob die Teilnehmer im Vergleich zur Kontrollgruppe in bestimmten Dimensionen der Leistungsmotivation einen ausgeprägt höheren oder niedrigeren Wert erzielen. Dabei werden folgende Thesen aufgestellt:

1. Es wird vermutet, dass die Gesamtsummen der Motivation der Teilnehmer und der Kontrollgruppe keine großen Unterschiede aufweisen, da bei der Auswahl eines projektorientierten Moduls vermutlich eher Interesse am Thema und Interesse an forschendem Arbeiten anstelle der Gesamtmotivation im Vordergrund stehen.

2. Die teilnehmenden Studierenden neigen zu einem höherem Wert in der Leistungsdimension *Furchtlosigkeit*. Diese Annahme wird getroffen, da die Studierenden im Vergleich zu anderen Wahlpflichtmodulen mit unbekannten Aufgabenstellungen konfrontiert werden und sich nicht an den Berichten von vorangegangenen Studentengruppen orientieren können. Die Studierenden wissen daher nicht, welche genauen Aufgaben auf sie zu kommen, auch wenn sie bei der Themenfindung mitwirken können.
3. Bei den Teilnehmern wird eine hohe *Selbstständigkeit* und *Selbstkontrolle* erwartet. Bei Projektarbeiten müssen die Studierenden sich selbstständig einen Plan aufstellen und eigenverantwortlich ihre Aufgaben bearbeiten. Es wird also davon ausgegangen, dass Studierende, die sich damit schwer tun, lieber ein Wahlpflichtmodul mit klassischer Präsenzveranstaltung und Klausur wählen.
4. Die Leistungsdimension *Wettbewerbsorientierung* könnte bei den teilnehmenden Studierenden niedriger ausfallen, da ein konkreter Vergleich mit anderen Studierenden nach Abschluss des Semesters nicht möglich ist. Während bei einem Modul mit abschließender Klausur alle Studierenden die gleiche Klausur schreiben, haben die Studierenden in den Wahlpflichtfächern unterschiedliche Aufgabenstellungen. Auch wenn diese alle ein ähnliches Niveau aufweisen müssen, ist doch kein direkter Vergleich der Studierenden möglich.
5. Es wird vermutet, dass die teilnehmenden Studierenden eine höhere Eigenverantwortlichkeit aufweisen. Daher wird von einem höheren Wert in der Dimension *Internalität* ausgegangen.

### 7.2.3. Interesse an Teilnahme bei Forschungsprojekten und gewünschten Bedingungen

Neben der Leistungsmotivation soll auch das allgemeine, persönliche Interesse der Studierenden erfragt werden. Diese Ergebnisse sollen genutzt werden, um die Teilnehmerzahlen, das generelle Interesse am angebotenen Forschungsthema und an forschendem Arbeiten und Messtechnik zu erfahren.

Mit den teilnehmenden Studierenden wird nach Abschluss der Projektarbeit ein Interview geführt, dass die persönliche Motivation erfragt. Um die Antworten der Studierenden in einen Kontext setzen zu können, wird in einer Kontrollgruppe, dem 5. und 7. Semester der Vertiefungsrichtung konstruktiver Ingenieurbau des Wintersemesters 2019/2020 ein Fragebogen ausgegeben. In den Anhängen B und C sind der ausgeteilte Fragebogen für die Kontrollgruppe und der Interviewleitfaden für die Teilnehmer komplett abgedruckt.

#### 7.2.3.1. Fragebogen für die Kontrollgruppe

Der Fragebogen zum Interesse der Studierenden (Anhang B) wurde erstellt um zu erfahren, warum Studierenden sich gegen eine Teilnahme in einem Wahlpflichtmodul zum Forschungsprojekt oder zur Durchführung der Abschlussarbeit dort entscheiden. Neben allgemeinen Informationen zu Fachsemester und Geschlecht wird abgefragt, ob den Studierenden die Möglichkeit an der Teilnahme zu einem Forschungsprojekt im Bereich fußgängerinduzierter Schwingungen bekannt ist und wenn ja, woher.

Die Studierenden werden gefragt, ob sie überlegen am Forschungsprojekt teilzunehmen, und werden bei der Antwortmöglichkeit *Nein* gebeten, dies zu konkretisieren. Hierbei stehen zur Mehrfachauswahl Punkte wie „Kein Interesse an forschendem Arbeiten“, „erwarteter zeitlicher Aufwand des Projektes“, „thematische Ausrichtung im Bereich Baudynamik“ oder „mangelnde Vorkenntnisse“ zur Auswahl.

Es wird unter anderem erfragt, welche Punkte bei der Auswahl eines Wahlpflichtmoduls für die Studierenden relevant sind, ob generell Interesse an forschendem Arbeiten besteht und in welchem Fachbereich die Studierenden gerne an einem Forschungsprojekt teilhaben würden.



### 7.2.3.2. Interview für die Teilnehmer

Die Teilnehmer werden gebeten, nach Abgabe ihres Projektes und der Bekanntgabe der Noten an einem Interview teilzunehmen. Neben den in Kapitel 7.4 erläuterten Fragen zur Akzeptanz wird auch hier das persönliche Interesse und die Motivation erfragt. Die Studierenden werden konkret gefragt, welche Gründe sie für die Auswahl der Projektarbeit hatten und ob sie Vorkenntnisse im Bereich des forschenden Arbeitens oder der Baudynamik hatten.

Das Interview wird bewusst erst nach Bekanntgabe der Noten durchgeführt, um den Studierenden die Möglichkeit zu geben, sich offen zu äußern und sich nicht mit Kritik am E-Learning-Konzept oder ähnlichem zurück zu halten, da sie noch eine Note erwarten.

## 7.3. Verlaufsprozesse

### 7.3.1. Allgemeines

Unter *Verlaufsprozesse* fallen Aspekte wie die Entwicklung des Wikis, der Projektfortschritt der einzelnen Arbeiten und die Beratungen. Durch die Dokumentation der Verlaufsprozesse soll erfasst werden, ob das E-Learning-Konzept im kleinen, also in den studentischen Arbeiten, und im großen, also im Gesamtkontext der Forschungsfrage zielführend ist und die Projektarbeiten im Sinne der Studierenden möglichst ohne organisatorische Schwierigkeiten vonstatten gehen.

### 7.3.2. Entwicklung Wiki

Bei der Entwicklung des Wikis steht neben den Seitenzahlen, Lesezugriffen und der Anzahl der Verlinkungen auch die Struktur im Fokus. Da Wikis ein dynamisches Tool sind, besteht die Gefahr, dass die Inhalte unübersichtlich werden und es für die Studierenden nicht mehr nachvollziehbar ist, welche Seiten für sie Relevanz haben und welche Seiten es gibt. Neben der objektiven Beurteilung nach Aufbau und Qualität der einzelnen Wiki-Seiten, bietet ILIAS diverse Möglichkeiten der statistischen Auswertung. Neben der Analyse einzelner Wiki-Seiten nach beispielsweise der Anzahl der Änderungen, der durchschnittlichen Anzahl der Änderungen je Benutzer, der Anzahl der Lesezugriffe oder der Anzahl der internen und externen Links, kann auch das komplette Wiki statistisch über verschiedene Zeiträume ausgewertet werden. Unter die Möglichkeiten fallen zum Beispiel:

- Anzahl Seiten
- Anzahl neue Seiten
- Durchschnitt der Anzahl neuer Seiten je Benutzer
- Anzahl geänderter Seiten
- Anzahl gelöschter Seiten
- Anzahl Lesezugriffe
- Anzahl interner Links
- Durchschnitt der Anzahl interner Links je Seite
- Anzahl Wörter
- Anzahl Fußnoten
- und weitere

Diese Möglichkeiten sind sicherlich alle interessant, jedoch wird der Fokus der Evaluation des Wikis neben der Qualität der Wiki-Seiten (siehe 6.3) auf die Anzahl der Lesezugriffe, die Anzahl der Seiten und neuen Seiten sowie Übersichtlichkeit und Struktur des Wikis gesetzt.

### 7.3.3. Beratung

Die Studierenden müssen regelmäßig zu Beratungsgesprächen mit den Projektbetreuern erscheinen, hierbei wird der Ablauf der studentischen Arbeiten besprochen und geschaut, welche Unterstützung die Studierenden benötigen. Außerdem wird dokumentiert, sollten sich Schwierigkeiten oder Unstimmigkeiten bei der Anwendung des Konzeptes ergeben, sodass diese diskutiert und gegebenenfalls beseitigt werden können. Die Beobachtung der Beratungen im Verlauf der Projektbearbeitungen ist nicht klar umrissen, da die Beratungsgespräche je nach Gruppe und Termin sehr individuell und dynamisch sind. Es wird lediglich dokumentiert, wenn die Studierenden Probleme mit den Tools in ILIAS haben oder der Projektablauf problematisch ist.

### 7.3.4. Projektfortschritt durch die einzelnen Arbeiten

Zur Einordnung der Projektarbeiten in den Gesamtkontext der Forschungsfragestellungen werden die Ausarbeitungen nach folgendem Schema analysiert:

1. Titel der Hausarbeit
2. Was sollte untersucht werden?
3. Welche Erkenntnisse wurden erlangt?
4. Welche Relevanz haben diese Erkenntnisse für die weitere Bearbeitung der Forschungsfrage?
5. Mit welchen wissenschaftlichen Methoden wurden diese Erkenntnisse erlangt? Sind die ermittelten Daten reproduzierbar?
6. Aus welchen Erkenntnissen/Aspekten der Projektarbeit können neue Aufgabenstellungen für nachfolgende Studentengruppen generiert werden?
7. Welche Wiki-Seiten wurden erstellt?
8. Welche Relevanz haben diese Seiten für das Wiki?

Durch diese schematische Auswertung soll ermittelt werden, ob die Projekte der Studierenden einen Mehrwert für das gesamte Forschungsprojekt bringen und ob es möglich ist, auf deren Ergebnissen weitere Fragestellungen zu generieren.

## 7.4. Akzeptanz und Wirkung

In der Kategorie *Akzeptanz und Wirkung* soll ermittelt werden, wie die Studierenden die Durchführung ihrer Projektarbeit mit dem hier vorgestellten E-Learning-Konzept bewerten. Hierfür wird der in Anhang C abgebildete Interviewleitfaden genutzt. Nach Abschluss der Projektarbeit sollen die Studierenden bewerten, wie sie die Durchführung erlebt haben, welche Erfahrungen sie gemacht haben und, welchen Stellenwert sie ihrer Projektarbeit im Gesamtkontext der Forschungsfrage beimessen.

## 8. Evaluation

### 8.1. Durchgeführte Projektarbeiten

Seit Beginn des Forschungsprojektes im März 2017 wurden 22 Projektarbeiten von Studierenden durchgeführt. Diese wurden alleine oder in Gruppen von maximal 3 Teilnehmer bearbeitet.

Tabelle 8.1.: Auflistung der von Studierenden durchgeführten Projektarbeiten

Nr.	Modul	Semester	Gruppen- größe	Aufgabenstellung
1	BVS	SoSe17	2	Anwendung und Verifizierung des Baudynamikshakers
2	VGB	WiSe17/18	2	Einfluss des Synchronisationsfaktors bei fußgängerinduzierter Schwingung
3	VGB	WiSe17/18	2	Vergleich verschiedener Lastansätze zu fußgängerinduzierter Schwingung
4	BA	WS17/18	1	Planung und Bemessung einer Fußgängerbrücke mit einer Eigenfrequenz von circa 2 Hz für Versuchszwecke
5	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	2	Linearität des Schwingungsverhaltens von Fußgängerbrücken
6	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	2	Synchronisationsfaktor von Personengruppen (Schwerpunkt Versuchsauswertung)
7	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	3	Vergleich verschiedener Last-Zeit-Verläufe zu fußgängerinduzierten Schwingungen mittels RSTAB [51]
8	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	2	Synchronisationsfaktor von Personengruppen (Schwerpunkt Versuchsdurchführung)
9	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	2	Vergleich verschiedener Messtechnik
10	PP-KIB <sup>1</sup>	SoSe18	2	Vergleich verschiedener Last-Zeit-Verläufe zu fußgängerinduzierten Schwingungen mittels RSTAB [51]
11	BVS	SoSe18	1	Ermittlung von Eigenfrequenz und Dämpfung an verschiedenen Fußgängerbrücken
12	BA	WS18/19	1	Theoretischer und experimenteller Vergleich der Ansätze von personeninduzierten Lasten
13	VGB	WiSe18/19	3	Einfluss der Schrittweiten auf Bodenreaktionskräfte beim Gehen und Laufen
14	VGB	SoSe19	1	Ermittlung von Eigenfrequenz und Dämpfung an der neuen Laborbrücke und Kalibrierung des RSTAB-Systems

<sup>1</sup> Die Teilnahme der Studierenden im Praxisprojekt KIB im Sommersemester 2019 war verpflichtend. Die Auswertungen von Leistungsmotivation und Interviews wurden daher nicht in die Evaluation aufgenommen.

Nr.	Modul	Semester	Gruppen- größe	Aufgabenstellung
15	VGB	SoSe19	1	Versuche zur Anpassbarkeit der Eigenfrequenz an der Laborbrücke
16	WissPro	SoSe19	1	Aufgabenstellungen aus 12 und 13 vertieft
17	WissPro	SoSe19	2	Veränderung der Schrittweite beim Gehen und Laufen auf starrem und schwingendem Untergrund
18	BA <sup>2</sup>	SoSe19	1	Vergleich verschiedener Lastansätze zu fußgängerinduzierten Schwingungen mit real gemessenen Werten
19	MA	SoSe19	2	Vergleich verschiedener Lastansätze zu fußgängerinduzierten Schwingungen mit real gemessenen Werten sowie einer Annäherung der Messwerte mit einem neuen Lastansatz
20	VGB	WiSe19/20	1	Synchronisationsfaktor - Erfassung von Schwingungen und Auflagerkräften bei unterschiedlichen Gruppengrößen
21	BVS	SoSe20	3	Ermittlung der Dauer der Zweibeinstandphase beim Gehen
22	BVS	SoSe20	4	Vergleich eines neu erarbeiteten Lastansatzes mit anderen Literaturquellen

<sup>2</sup> Bachelorthesis wurde nicht abgeben.

Da die Teilnehmer des Praxisprojektes (Projekte Nr. 5 bis 10) in einem Pflichtmodul am Forschungsprojekt teilgenommen haben, wurden für die Evaluation nur die freiwilligen Teilnehmer berücksichtigt. An der Auflistung ist zu erkennen, dass die Anzahl der Teilnehmer mit steigendem Bekanntheitsgrad des Projektes zugenommen hat. Außerdem ist in dieser Auflistung zu erkennen, dass die Studierenden im Masterstudiengang in den Modulen Versuchsgestützte Bemessung (VGB), dem Wissenschaftlichen Projekt (WissPro) und der Masterarbeit ein größeres Interesse an der Teilnahme haben als die Studierenden im Bachelorstudiengang.

Auch wenn die Titel, gerade bei den Aufgabenstellungen zum Synchronisationsfaktor oder dem Vergleich von Lastansätzen, eine ähnliche Aufgabe und ähnliche Ergebnisse vermuten lassen, wurde jede Aufgabenstellung konkret an die Workload des Projektes (mit der entsprechenden Anzahl an teilnehmenden Studierenden) angepasst und setzt die vorangegangenen Arbeiten als bekannt voraus. Das heißt beispielsweise bei den Arbeiten zum Vergleich verschiedener Lastansätze, dass jeweils Literaturquellen in den Vergleich ergänzt wurden und neue Messreihen zu diesem Thema erstellt wurden, um die vorangegangene Arbeit zu komplettieren.

Der letzte Punkt einer jeden Aufgabenstellung war immer, einen Ausblick zu verfassen und zu beschreiben, welche Versuche/Recherchen oder Vorgehensweisen die Studierenden nun wählen würden, um in ihrem Projekt fortzufahren. So war es möglich relativ einfach, nach der Prüfung der abgegebenen Aufgabenstellungen neue Projektaufgaben zu generieren.

Die Ergebnisse der einzelnen Projektarbeiten, deren interdisziplinäre Aspekte und der Einfluss der Ergebnisse auf die gesamte Forschungsfrage werden nachfolgend zusammengefasst:

- Nr. 1 : Das erste Projekt fand zu Beginn des Forschungsprojektes statt. Das Wiki war zu dem Zeitpunkt noch im Aufbau, die Grundlagenseiten zu Baudynamik und Messtechnik waren noch nicht vorhanden. Im Rahmen einer Projektarbeit wurde sich mit dem neu beschafften Baudynamikshaker BD.5 der Firma *Wölfel* befasst. Hier standen die Funktionsweise und Auswertung der Ergebnisse im Vordergrund.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Betrieb des Baudynamikshakers, Last-Zeit-Verlauf mittels Baudynamikshaker aufbringen**
- Nr. 2 : In diesem Projekt wurden erste Untersuchungen zum Thema Synchronisation durchgeführt. Der Fokus lag auf ersten Erkenntnissen zum Thema insgesamt, der Durchführbarkeit von Versuchsreihen im Rahmen studentischer Projekte und Erstellen ersten Themenseiten im Wiki.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Synchronisationsfaktor, Dämpfung**
- Nr. 3 : In diesem Projekt lag der Fokus auf (zusätzlich zu der von der Autorin durchgeführten) Literaturrecherche und einem mathematischen Vergleich von Last-Zeit-Verläufen. Hierbei wurde auch ein Fokus auf den Bereich Sportmedizin und Biomechanik gelegt, um sich mit den Bewegungsabläufen aus Gehen und Laufen vertraut zu machen und diese im Wiki für nachfolgende Studierende aufzubereiten.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Literaturliste** (angefangen und im Laufe des Projektes von allen Beteiligten immer erweitert)
- Nr. 4 : Für die Durchführung von Versuchen sollte die in Kapitel 5.1.4 bereits vorgestellte Laborbrücke entwickelt werden. Hierzu wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit erste Vorschläge entwickelt.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Laborbrücke**
- Nr. 5 : In diesem Projekt wurde die Linearität des Schwingungsverhalten von Fußgängerbrücken untersucht. Dabei wurden im Wiki Seiten zum Grundverständnis der Materie erstellt.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Linearität des Gangbildes**
- Nr. 6 : Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde sich mit dem Synchronisationsfaktor beschäftigt. Hierbei lag der Schwerpunkt auf der Versuchsauswertung und Programmierung von Auswerteprogrammen.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Auswertung von Schwingungsmessungen zum Synchronisationsfaktor**
- Nr. 7 : In diesen Projektarbeiten wurden verschiedene Brückenmodelle in einem (für die Studierenden bis dahin unbekannten) Stabwerksprogramm erstellt und die Studierenden haben sich mit dem Aufbringen von dynamischen Lasten und Vergleich der Auswertung beschäftigt.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Vergleich der Lastansätze zu fußgängerinduzierten Schwingungen der VDI 2038 und dem AS-5100**
- Nr. 8 : Diese Projektarbeit wurde parallel zur Arbeit Nr. 6 durchgeführt. In der Dokumentation lag der Schwerpunkt in der Versuchsdurchführung.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Versuchsdurchführung Synchronisationsfaktor**
- Nr. 9 : Diese Arbeit hatte einen Schwerpunkt beim Vergleich verschiedener Messtechnik und der Dokumentation im Wiki. Da für das Forschungsprojekt verschiedene Sensoren verschiedener Hersteller und mit unterschiedlichen Messbereichen und Genauigkeiten vorlagen, sollte hier ermittelt werden, was es bei den einzelnen Sensoren zu beachten gibt und dies für

nachfolgende Gruppen dokumentiert werden.

Erstellte Wiki-Seiten: **Messungen mit VibMoST und Measurement Manager, Messtechnik** (nicht erstellt, jedoch wesentliche Kapitel eingefügt)

- Nr. 10 : Dieses Projekt ist vergleichbar mit Nr. 7, jedoch lag ein anderer Lastansatz zugrunde.  
Erstellte Wiki-Seiten: - (laut Aufgabenstellung gefordert, jedoch nicht abgegeben)
- Nr. 11 : In dieser Hausarbeit lag der Fokus auf der experimentellen Ermittlung von Eigenfrequenz und Dämpfung an verschiedenen Fußgängerbrücken.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Messtechnische Untersuchung der Eigenfrequenz, Messtechnische Untersuchung der Dämpfung**
- Nr. 12 : Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden erste Versuche mit den Kraftmessplatten durchgeführt. Die so erfassten Bodenreaktionskräfte wurden mit dem Lastansatz aus der VDI 2038 verglichen.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Messung der vertikalen Bodenreaktionskräfte, Die Variabilität des Gangbildes**
- Nr. 13 : Da sich in Projekt 12 ergeben hat, dass die Versuchspersonen bei manchen Schrittfrequenzen Schwierigkeiten mit dem vorgegebenen Plattenabstand hatten, wurde in diesem Projekt der Einfluss des Plattenabstandes untersucht und eine Empfehlung für Gehen und Laufen für die nachfolgenden Versuche getroffen.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Einfluss der Schrittweite auf die Bodenreaktionskräfte beim Gehen, Einfluss der Schrittweite auf Bodenreaktionskräfte beim Laufen**
- Nr. 14 : Zu Beginn des Sommersemesters 2019 wurde die geplante Laborbrücke geliefert und aufgebaut. Daher wurde nun die Eigenfrequenz, Dämpfung und Anpassbarkeit dieser Werte untersucht und ein Stabwerksmodell kalibriert.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Laborbrücke** (Überarbeitung)
- Nr. 15 : In dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich die Eigenfrequenz der Brücke durch zusätzliche Gewichte oder Änderung der Steifigkeit anpassen lässt.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Laborbrücke - Anpassbarkeit der Eigenfrequenz**
- Nr. 16 : siehe Projekte 12 und 13  
Erstellte Wiki-Seiten: **Laborbrücke - Vergleich RFEM und Realität**
- Nr. 17 : Da alle vorangegangenen Untersuchungen zur Ermittlung der Bodenreaktionskräfte auf starrem Untergrund durchgeführt wurden, wurde in diesem Projekt betrachtet, ob und welchen Einfluss eine Untergrundschrwingung auf die Gangparameter hat.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Einfluss der Schwingung auf Bodenreaktionskräfte, Auswertprogramm**
- Nr. 18 : In dieser Arbeit sollten Vergleiche zwischen gemessenen Bodenreaktionskräften und verschiedenen Last-Zeit-Verläufen aus der Literatur gezogen werden. Diese Arbeit wurde jedoch nicht fertiggestellt.
- Nr. 19 : In dieser Masterarbeit wurden Messdaten ermittelt und Fourieranalysen durchgeführt, um die gemessenen Werte durch Fourierreihen abzubilden.  
Erstellte Wiki-Seiten: **Erstellen einer Last-Zeit-Funktion als Vorschlag für eine überarbeitete Fassung der VDI 2038**
- Nr. 20 : In dieser Projektarbeit wurden Versuche zum Synchronisationsfaktor an der Brücke im Labor durchgeführt. Dabei wurden neben den Schwingungsamplituden auch die Auflagerkräfte erfasst.

Erstellte Wiki-Seiten: **Synchronisationsfaktor - Vergleich mit Messungen an Laborbrücke**

Nr. 21 : Dieses Projekt fand im Sommersemester 2020 und damit in der ersten Welle der Corona-Pandemie statt. Damit fand, im Gegensatz zu allen vorher durchgeführten Projektarbeiten, fast jeder Kontakt zu den Studierenden online statt. Lediglich für eine Versuchsreihe konnten die Teilnehmer Zugang zur Hochschule erhalten. Die Vorbereitung, Einarbeitung in die Messtechnik und Versuchsdurchführung, der Einblick in die Biomechanik und die Beschäftigung mit den Bewegungsabläufen beim Gehen konnten über das Wiki gut realisiert werden. Allerdings konnten die Studierenden ihre Messketten nicht selbstständig aufbauen, da sonst die Mindestabstände zwischen den Personen nicht eingehalten worden wären. Die Studierenden dieser Gruppe haben sich mit der Dauer der Zweibeinstandphase beschäftigt, um zu überprüfen, ob die bis dahin angenommenen Werte korrekt sind.

Erstellte Wiki-Seiten: **Gehen und Laufen, Dauer der Zweibeinstandphase**

Nr. 22 : In Projekt 19 wurden Vorschläge für Fourierkoeffizienten im Rahmen einer Masterarbeit gemacht. Diese wurden anschließend überprüft und noch einmal überarbeitet. In diesem Projekt sollten die überarbeiteten Werte durch eine weitere Messreihe geprüft werden. Auch hier fand das komplette Projekt unter den Einschränkungen der Corona-Pandemie statt.

Erstellte Wiki-Seiten: **Vergleich der Lastansätze zu fußgängerinduzierten Schwingungen mit neu erstelltem Lastansatz**

Die Projektteilnehmer konnten durch ihre Arbeiten Einblicke in forschendes Arbeiten, Baudynamik und Messtechnik erhalten. Außerdem wurde sich mit den Bewegungsabläufen von Gehen und Laufen sowie der Entstehung der Bodenreaktionskräfte befasst. Trotz des großen und interdisziplinären Themenfeldes konnten die Teilnehmer in den Projektarbeiten die gestellten Aufgaben bearbeiten und gute Ansätze und Ergebnisse für das Forschungsprojekt liefern.

## 8.2. Bedingungen

### 8.2.1. Leistungsmotivation

#### 8.2.1.1. Allgemeines

Für die Auswertung der Leistungsmotivation wurden in der Teilnehmergruppe die LMIs von 17 Personen ausgewertet. In der Kontrollgruppe befinden sich 117 Datensätze, die insgesamt im SoSe17, WiSe17/18, SoSe18 und WiSe18/19 von Studierenden im Bachelor- und Masterstudien-gang in der Vertiefungsrichtung konstruktiver Ingenieurbau gesammelt wurden. Den Studierenden wurden zugesagt, dass die Daten anonymisiert ausgewertet werden. Sie wurden trotzdem aufgefordert, ihre Namen auf die Fragebögen zu schreiben, um eine Dopplung von Datensätzen über den langen Zeitraum zu vermeiden. Nach Auswertung der Fragebögen ist nur noch erfasst, wer schon alles einen Fragebogen abgegeben hat. Eine konkrete Zuordnung ist nicht mehr möglich.

#### 8.2.1.2. Auswertung der Datensätze und Überprüfung der Hypothesen

Für die Auswertung des Fragebogens werden zuerst die Rohdaten ermittelt. Für jede der 170 Fragen können die Teilnehmer zwischen einem und sieben Punkten vergeben. Jede Frage ist einer Leistungsdimension zugewiesen und dort werden die Punkte dann addiert. Jeder Teilnehmer erreicht damit automatisch zwischen 170 und 1190 Punkten. Um zu vergleichen, wie die prozentuale Verteilung der Gesamtmotivation auf die einzelnen Dimensionen in den Gruppen voneinander abweicht, wird die Gesamtpunktzahl normiert, sodass jeder Teilnehmer die gleiche Gesamtmotivation aufweist, diese sich allerdings auf die unterschiedlichen Dimensionen verteilt.

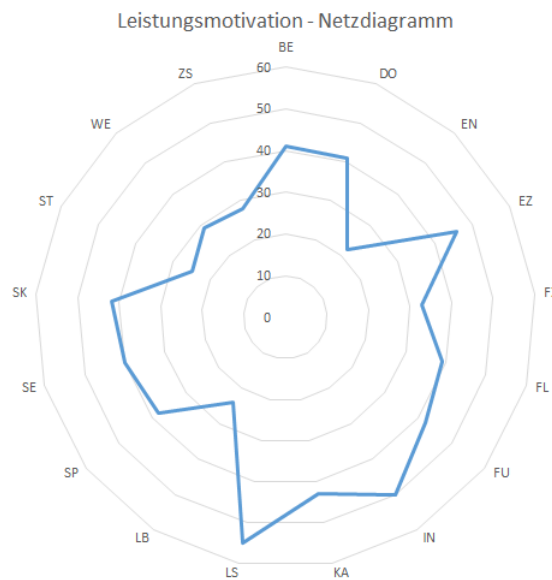


Abbildung 8.1.: Beispiel eines Netzdiagrammes eines Teilnehmers - Rohdaten

In Kapitel 7.2.2.3 wurde in These 1 vermutet, dass sich die Gesamtmotivation zwischen Teilnehmern und Kontrollgruppe nicht unterscheidet. Wie in Abbildung 8.2 zu sehen ist, weisen die Teilnehmer eine leicht höhere Gesamtmotivation auf. Diese liegt circa 3 % höher und wird daher als nicht maßgebend angesehen.



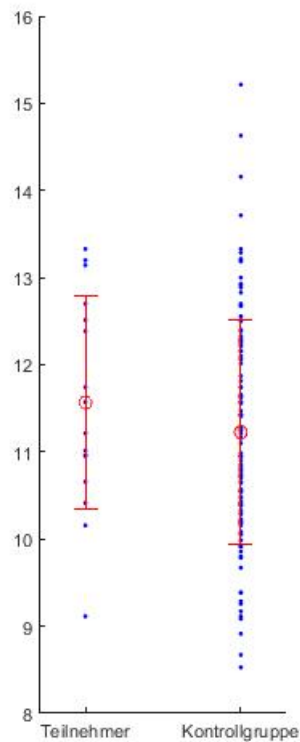


Abbildung 8.2.: Abweichung der Gesamtmotivation

In den vier weiteren Thesen wurde angenommen, dass bestimmte Dimensionen der Leistungsmotivation stärker oder schwächer ausgeprägt sind als andere.

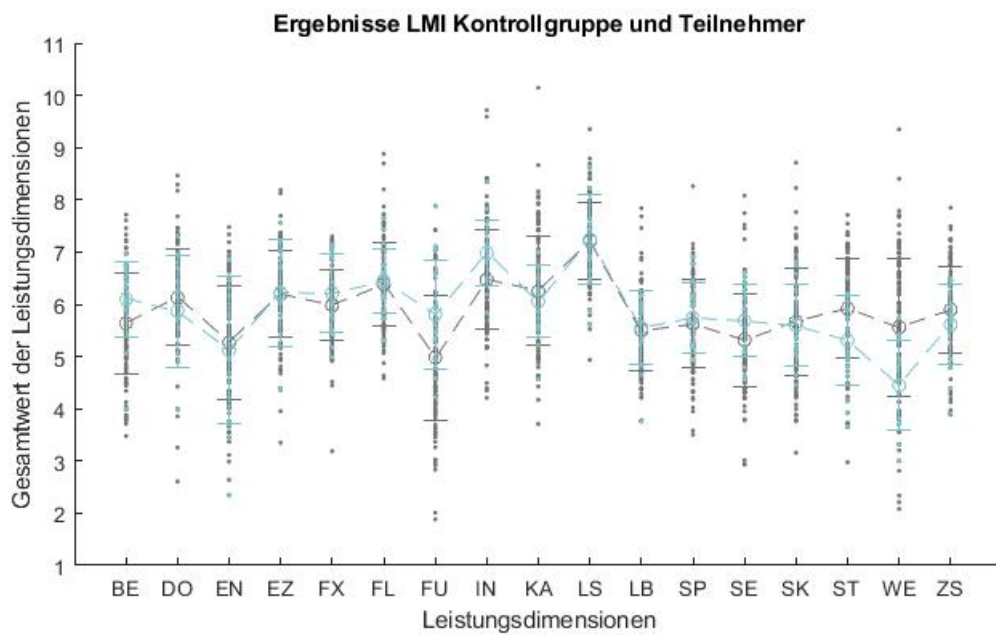


Abbildung 8.3.: Verteilung der auf 100 normierten Motivation auf die einzelnen Dimensionen

Die in Abbildung 8.3 dargestellten Werte zeigen in türkis die Einzelwerte, den Mittelwert und die Standardabweichung der Teilnehmer und in grau die der Kontrollgruppe.

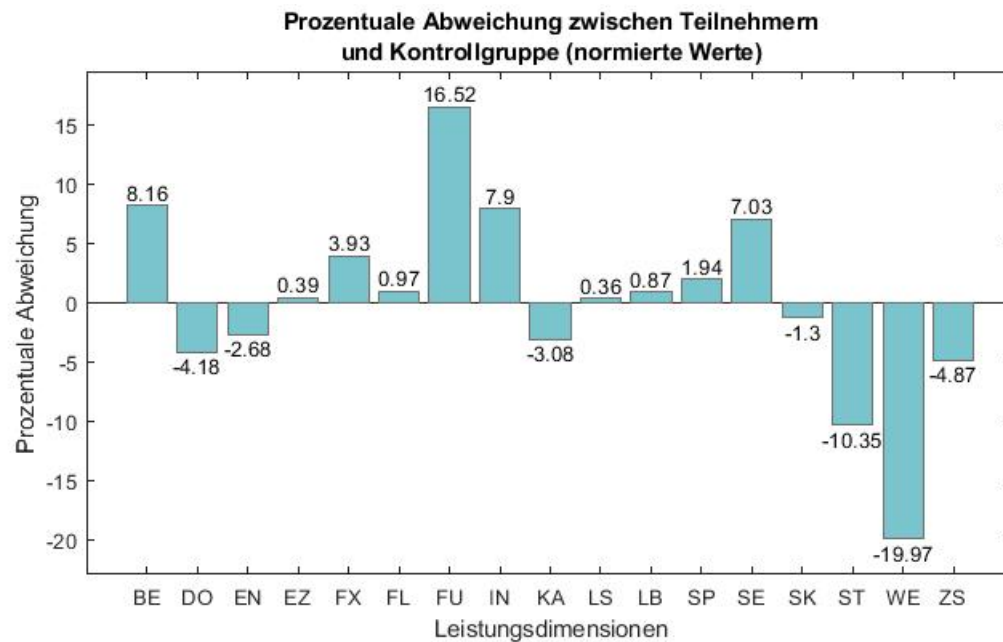


Abbildung 8.4.: Prozentuale Abweichung der Werte der Teilnehmer gegenüber denen der Kontrollgruppe

In Abbildung 8.4 werden die Abweichungen aus Abbildung 8.3 prozentual dargestellt. Anhand dieser Grafik lassen sich so die aufgestellten Hypothesen überprüfen und weitere Aspekte herauslesen. Der höhere Wert in der Leistungsdimension *Furchtlosigkeit* (FU) kann bestätigt werden. Die teilnehmenden Studierenden weisen hier im Mittel einen um 16,52 % höheren Wert auf. Die Argumentation, dass die Studierenden sich auf eine unbekannte Projektarbeit mit einem noch nicht lange erprobten Konzept einlassen, klingt schlüssig.

Die dritte Hypothese, dass die Teilnehmer mit der Wahl einer Projektarbeit einen höheren Wert in *Selbstständigkeit* und *Selbstkontrolle* (SK) aufweisen, kann nur zum Teil bestätigt werden. Die Studierenden weisen in der Leistungsdimension *Selbstständigkeit* (SE) 7,03 % höhere Werte auf, jedoch liegt der Wert in der Selbstkontrolle mit -1,03 % unwesentlich niedriger als der der Kontrollgruppe.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Dimension *Wettbewerbsorientierung* bei der teilnehmenden Gruppe geringer ausfällt, als bei der Kontrollgruppe. Wie in Abbildung 8.4 zu sehen ist, liegt in der Dimension *WE* mit -19,97 % die größte Abweichung vor. Diese These kann damit bestätigt werden. Die letzte aufgestellte Hypothese bezog sich auf die Leistungsdimension *Internalität*. Diese ist mit einem Plus von 7,0 % auch maßgeblich größer als der Mittelwert der Kontrollgruppe.

Es fallen jedoch noch weitere Aspekte auf, die betrachtet werden können. Die teilnehmenden Studierenden weisen einen höheren Wert in der *Beharrlichkeit* auf. Diese Eigenschaft könnte, ähnlich wie eine hohe Selbstständigkeit, vorteilhaft für die Bearbeitung von Projektarbeiten sein. Neben der schon erwähnten Wettbewerbsorientierung fallen auch die Werte der Statusorientierung geringer aus. Dies könnte einen ähnlichen Hintergrund, wie in Hypothese 4 erläutert, haben.

Der Aspekt der Zielsetzung konnte in Gesprächen mit Studierenden und anhand der im folgenden ausgewerteten Fragebögen etwas beleuchtet werden. Die Studierenden, die bereits in einem Ingenieurbüro arbeiten und sich selbst Ziele für die nahe Zukunft gesetzt haben, wählten immer eher Module, die mit ihrer Tätigkeit im Ingenieurbüro im Zusammenhang standen. Studierende die noch unschlüssig über ihre Planung sind, waren eher offen, ein Modul oder eine Projektarbeit im Bereich der Forschung zu belegen, um auch in dieses Feld Einblick zu erhalten.

### 8.2.2. Interesse an der Teilnahme bei Forschungsprojekten

Um zu ermitteln, wie viele Studierende generell Interesse an einer solchen Projektarbeit haben, wurde an 65 Studierende aus der Vertiefungsrichtung KIB der Fragebogen aus Anhang B ausgegeben.

Aus dieser Gruppe studieren 25 Personen im 5. Fachsemester, 38 im 7. Fachsemester und 2 Studierende kommen aus höheren Semestern. Die Gruppe teilte sich in 42 männliche, 23 weibliche und null diverse Teilnehmer.

Die Möglichkeit an dem Forschungsprojekt teilzunehmen ist insgesamt bei 83 % der Teilnehmer bekannt. Während bei den Studierenden aus dem siebten oder höheren Fachsemestern alle das Projekt kennen, kennen aus dem 5. Semester nur 70 % die Teilnahmemöglichkeiten. Auf die Frage, ob eine Teilnahme im Rahmen eines Wahlpflichtmoduls oder einer Abschlussarbeit geplant sei, antworteten 31 Studierende mit *Nein*, einer mit *Ja*, und 33, vornehmlich aus dem 5. Semester, gaben an noch *unentschlossen* zu sein.

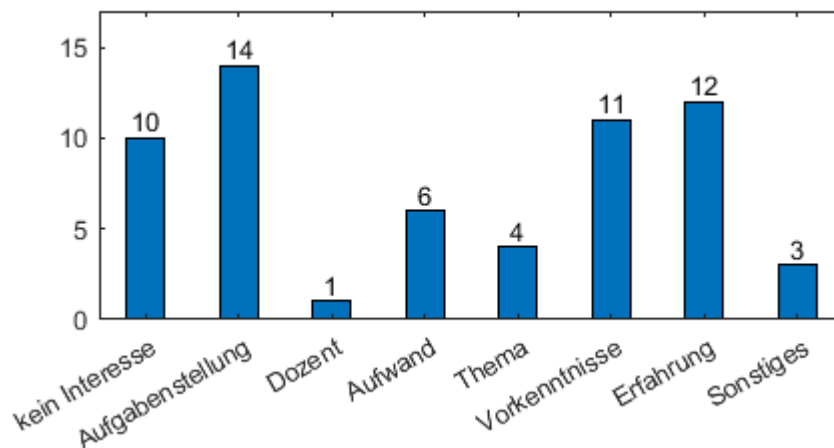


Abbildung 8.5.: Gründe gegen eine Teilnahme am Forschungsprojekt (Mehrfachantwort möglich)

In Abbildung 8.5 sind die verschiedenen Gründe, warum die Studierenden nicht am Forschungsprojekt teilnehmen wollen, aufgelistet. Es waren Mehrfachantworten möglich. 10 der 31 Studenten haben generell kein Interesse an forschendem Arbeiten, vier haben kein Interesse an Forschung im Bereich Baudynamik, für 14 aus dieser Gruppe ist die unklare Aufgabenstellung bei Auswahl der Wahlpflichtmodule ein Problem. Für sechs Studierende steht der zeitliche Aufwand im Vergleich mit anderen Modulen im Vordergrund. Elf bzw. zwölf Studierende wollen kein Projekt in dem Bereich durchführen, weil ihnen Vorkenntnisse im Bereich Baudynamik und Erfahrung im Umgang mit Messtechnik fehlt, obwohl während der Projektvorstellung immer erläutert wird, dass keine Vorkenntnisse erforderlich sind. Im Punkt *Sonstiges* gaben drei Studierende an, schon ein Thema für die Abschlussarbeit zu haben und keine weiteren Wahlpflichtmodule zu benötigen. Die Aspekte zu den Punkten *Aufgabenstellung*, *Vorkenntnisse in der Baudynamik* und *Erfahrung mit Messtechnik* stehen in einem Zusammenhang mit der erhöhten Furchtlosigkeit der Teilnehmergruppe.

Tabelle 8.2.: Interesse Messtechnik und Forschung

	Ja	Nein	k.A
Erfahrung mit Messtechnik	5	58	2
Interesse am Durchführen von Versuchen	38	26	1
Interesse an Forschung	40	22	3

Auch die in Tabelle 8.2 dargestellten Ergebnisse aus dem Fragebogen lassen auf den Einfluss der Furchtlosigkeit bei der Auswahl eines Projektes im Bereich forschenden Lernens schließen. Die Studierenden geben an, keine Erfahrung im Umgang mit Messtechnik zu haben, würden den Umgang mit Messtechnik aber gerne erlernen. Außerdem wird ein Interesse an forschendem Arbeiten bekundet. Trotzdem geben knapp 30% der Studierenden eine nicht komplett festgelegte Aufgabenstellung als Grund an, das Modul nicht zu belegen.

Am Ende des Fragebogens wurden die Studierenden gebeten anzugeben, in welchen Bereichen sie an einem Forschungsprojekt mit einer Projektarbeit teilnehmen würden. In Abbildung 8.6 sind die Ergebnisse dargestellt und man kann vermuten, dass bei der Wahl einer anderen Forschungsfrage anstelle der Thematik aus der Baudynamik, die Teilnehmerzahlen vielleicht größer wären.

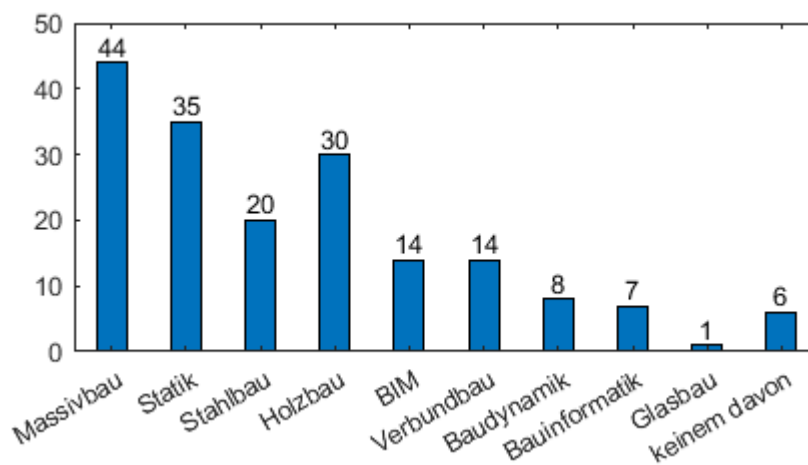


Abbildung 8.6.: Interesse an Forschungsgebieten

## 8.3. Verlaufsprozesse

### 8.3.1. Entwicklung Wiki

Das als virtuelle Forschungsumgebung genutzte Wiki wurde im März 2017 in ILIAS eingerichtet. Seitdem sind nun in sechs Semestern Aufgabenstellungen bearbeitet und das Wiki nach jeder Arbeit ergänzt worden. Zu Beginn wurden von den Projektbetreuern Wiki-Seiten zu den Grundlagen erstellt. Hierbei wurden die Themen

- Vorstellung Forschungsprojekt
- Grundlagen Baudynamik
- Grundlagen Messtechnik
- MEDA (Software zur Erfassung von Schwingungen)
- VDI 2038
- Grundlagen fußgängerinduzierte Schwingungen

erstellt, um den ersten Studierenden eine Einarbeitung zu ermöglichen. Im Rahmen der Projektarbeiten eins bis drei (siehe Tabelle 8.1) wurden zum Teil auch Grundlagenseiten erstellt oder in diese Inhalte eingefügt. Die Seitenzahlen des Wikis haben seitdem jedes Semester zugenommen und es sind relevante Inhalte dazu gekommen.

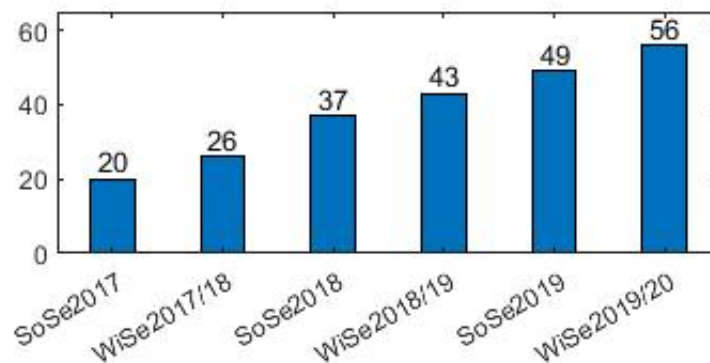


Abbildung 8.7.: Anzahl der Wiki-Seiten je Semester

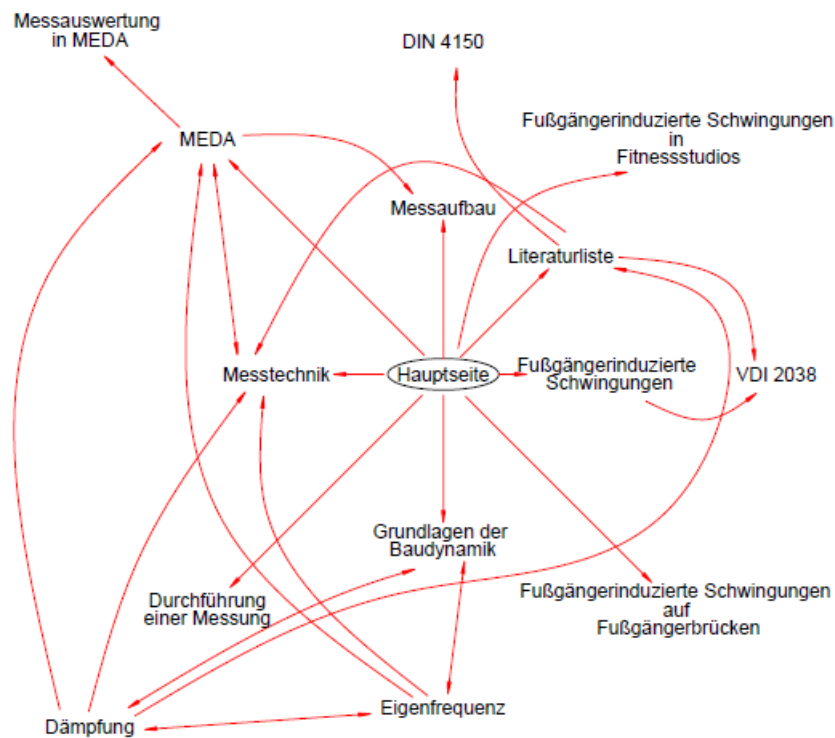


Abbildung 8.8.: Wiki-Seiten und Verknüpfungen zum Start des Projektes im März 2017

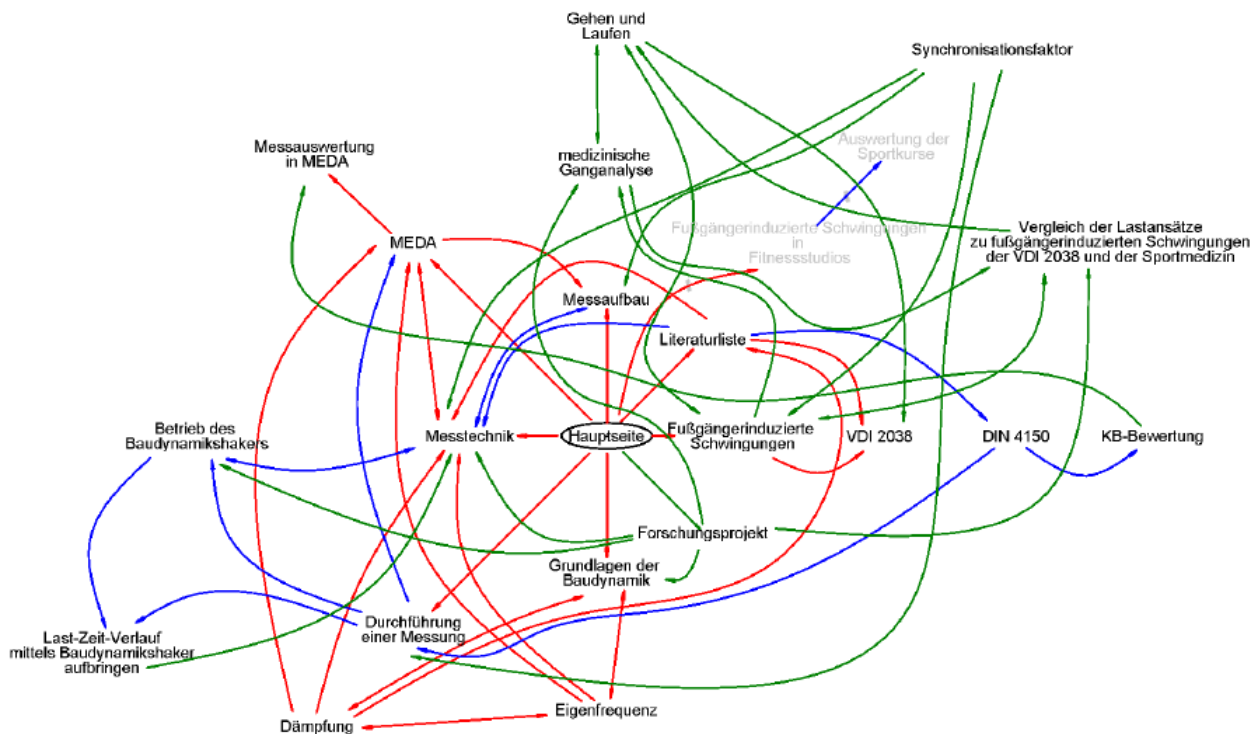


Abbildung 8.9.: Wiki-Seiten und Verknüpfungen nach zwei Semestern im März 2018

Die Abbildungen 8.8 und 8.9 zeigen exemplarisch, wie sich das Wiki über die Zeit entwickelte und Seiten und Verlinkungen hinzu gekommen sind.

Die Lesezugriffe auf das Wiki allgemein steigen immer zu Beginn eines Semesters, wenn sich neue Studierende in ihr Projektthema einarbeiten, und zum Ende des Semesters, wenn die Studierenden ihre eigenen Wiki-Seiten erstellen und verlinken müssen. Dies ist an den Peaks in Abbildung 8.10 deutlich zu erkennen.

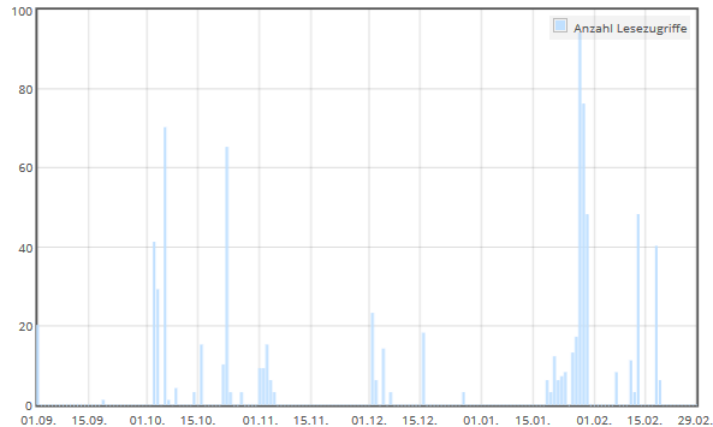


Abbildung 8.10.: Lesezugriffe auf das Wiki am Beispiel des Wintersemesters 19/20

Des Weiteren ist es wichtig, regelmäßig nach verwaisten Seiten zu suchen. Diese Seiten sind üblicherweise leer und haben einen Rechtschreibfehler im Titel. Da Ilias keine integrierte Rechtschreibprüfung hat und, sobald man einen Link zu einer Wiki-Seite in einem Textblock erstellt hat, diese Seite erstellt, kommen so pro Semester vier bis fünf verwaiste Seiten zustande, die aus der Statistik entfernt werden müssen.

Um die Übersichtlichkeit des Wikis zu erhalten, wurden im Projektverlauf vier sogenannte Themen-Hauptseiten erstellt (siehe Abbildung 8.11). Dies soll den Studierenden eine Orientierung im Wiki nach den Hauptthemen ermöglichen und ihnen die Einordnung der eigenen Seite erleichtern.

In Anhang D ist eine Auflistung aller im Rahmen dieser Arbeit durch die Autorin oder Projektteilnehmer entstandenen Wiki-Seiten zu finden.

## Hauptseite

Dieses Wiki soll es ermöglichen, sich schnell in das Thema "Fußgängerinduzierte Schwingungen" und die zugehörigen [Grundlagen](#) sowie die [Messtechnik](#) und Messsoftware [MEDA](#) einzuarbeiten.

Wie in einem Wiki üblich, kann jede/r Nutzer/in Seiten erstellen und bearbeiten, Verknüpfungen erstellen und die Ergebnisse seiner Arbeit darstellen. Um die Übersichtlichkeit des, mit der Zeit immer größer werdenden, Wikis zu gewährleisten, sind alle Themen in die großen Hauptthemen einzusortieren.

Dies wären:

- [Baudynamik Grundlagen](#)
- [Messtechnik Grundlagen](#)
- [MEDA Grundlagen](#)
- [Grundlagen zu fußgängerinduzierten Schwingungen](#)

Auf der Seite [Forschungsprojekt](#) ist eine Beschreibung der gesamten Forschungsfrage enthalten. Außerdem wird auf dieser Seite immer wieder der aktuelle Stand dargestellt.

Außerdem wird eine [Literaturliste](#) gepflegt, in der relevante Fachliteratur, Veröffentlichungen, sowie Normen und Richtlinien zu finden sind. Auf der [Seitenliste](#) sind alle in diesem Wiki vorhandenen Seiten alphabetisch gelistet.

Auf der Seite [Fußgängerbrücken](#) befindet sich eine Auflistung von Brücken in Köln und in der unmittelbaren Umgebung, die zur Orientierung bei der Auswahl einer geeigneten Brücke für eine Messung dienen soll.



Für die Mitarbeit an diesem Wiki ist sich unbedingt an die Vorgaben aus dem [HowTo:Wiki](#) zu halten.



Abbildung 8.11.: Startseite des Wikis

### 8.3.2. Beratung

Die Beratung der einzelnen Projektgruppen findet regelmäßig statt. Dabei ist es angedacht sich wöchentlich, spätestens aber alle zwei Wochen zusammenzusetzen, um die Studierenden optimal beraten zu können.

Zu Beginn ihrer Projektarbeit sollen die Studierenden einen Arbeitsplan erstellen, in dem sie ihr Projekt in grobe Arbeitsschritte wie *Recherche*, *Durchführen von Versuchen*, *Auswertung* und *Ausarbeitung* aufteilen und diese in einem Zeitplan zusammenfassen. Nach diesem Termin werden dann die Kalenderwochen festgelegt, in denen die Studierenden eigene Versuche durchführen sollen und es wird besprochen, welche Arbeitspunkte bis dahin durchgeführt sein müssen.

Wie schon in Kapitel 7.3.3 beschrieben, wird dokumentiert, wenn es Probleme im Projektablauf gibt, die im Rahmen der weiteren Durchführung vermieden werden sollen. Ein Hauptproblem stellte die Terminierung der Versuche außerhalb des Labors im Wintersemester dar. Da ein Teil der Messtechnik empfindlich gegen Nässe ist und nicht bei Minusgraden eingesetzt werden darf, mussten mehrere Termine für die Messungen festgelegt werden, um dann, wenn eine belastbare Wetterprognose vorliegt, einen dieser Termine auszuwählen. Seit der Errichtung einer 10 Meter langen Versuchsbrücke vor dem KIB-Labor der Hochschule wurden in den Wintersemestern nur noch Aufgabenstellungen vergeben, die an dieser Brücke durchgeführt werden konnten, um den Studierenden Planungssicherheit zu geben.



### 8.3.3. Projektfortschritt

Anhand des in Kapitel 7.3.4 beschriebenen Leitfadens wurde jede abgegebene Arbeit schematisch ausgewertet. Dabei sind folgende Feststellungen getroffen worden:

- Die Aufgabenstellungen 1-5, 9 und 11 behandeln Themen zum ersten Mal. Die anderen Aufgabenstellungen vertiefen die gewonnenen Ergebnisse und führen diese Projekte fort.
- Die Studierenden haben grundsätzlich einen guten Überblick über die sinnvolle Fortführung ihrer Aufgabenstellung.
- Die Versuchsreihen der Studierenden werden gut dokumentiert und sind reproduzierbar. Die Studierenden werden aber auch bei allen Messungen von einem Projektbetreuer unterstützt.
- Die Wiki-Seiten sind gut in den Gesamtkontext verlinkt und für nachfolgende Studierende auch auffindbar.

### 8.3.4. Anpassungen im Verlauf des Projektes

#### 8.3.4.1. Änderung der Wiki-Struktur

Im Verlauf der Projektarbeiten musste im Wiki die Grundstruktur angepasst werden. Während zu Beginn der Durchführung alle Seiten ausschließlich im Fließtext verlinkt waren, mussten, um eine übersichtliche Nutzung zu gewährleisten, Hauptseiten für die einzelnen Kapitel eingeführt werden.

#### Baudynamik Grundlagen

##### Seitenübersicht [\[Ausblenden\]](#)

- 1 Allgemein
- 2 Seitenauflistung

#### 1 Allgemein

Auf den Wiki Seiten, die den Grundlagen der Baudynamik zugeordnet sind, werden grundlegende Begriffe der Baudynamik erläutert. Diese Erläuterungen dienen zum Einstieg in das Thema der Baudynamik. Im folgenden Abschnitt sind die bisher erstellten Wiki Seiten im Bereich Grundlagen der Baudynamik aufgelistet. Die Studierenden sollen neu erstellte Wiki Seiten, die im Zuge einer Projektarbeit zum Thema Grundlagen der Baudynamik angelegt wurden, sinnvoll in die Auflistung der Seiten einordnen. Eine Verlinkung auf die hier zu sehenden Seiten kann ebenso von anderen Wiki Seiten erfolgen.

#### 2 Seitenauflistung

##### ▶ GRUNDLAGEN DER BAUDYNAMIK

##### ▼ EIGENFREQUENZ

##### [Eigenfrequenz](#)

- Eine Begriffserklärung zur Eigenfrequenz
- Eine Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten zur messtechnischen Ermittlung von Eigenfrequenzen

##### [Messtechnische Untersuchung der Eigenfrequenz](#)

- Ermittlung der Eigenfrequenz nach unterschiedlichen Methoden an zwei Brücken im Kölner Umland

##### ▶ DÄMPFUNG

##### ▶ STEIFIGKEIT EINES BAUTEILS BERECHNEN

##### ▶ LINEARITÄT DES SCHWINGUNGSVERHALTENS

Abbildung 8.12.: Übersichtsseite zu Baudynamik-Grundlagen

In Abbildung 8.12 ist beispielhaft die Übersichtsseite zum Thema *Baudynamik Grundlagen* dargestellt. Die weiterführenden Seiten sind in sogenannten Akkordeons eingeklappt nach Themen

sortiert aufgeführt. Hinter jedem Hyperlink ist eine kurze Beschreibung des Inhalts zu finden. Diese Änderung wurde eingeführt, nachdem dass Wiki circa 25 Seiten hatte. Ohne diese inhaltliche Strukturierung wurden Seiten nicht mehr korrekt verlinkt oder wurden nicht gefunden.

#### 8.3.4.2. Änderung der Abgabefristen

In den ersten beiden Semestern des Projektes wurden die schriftliche Ausarbeitung und die Wiki-Seite zeitgleich abgegeben. Die Wiki-Seiten wiesen zu dieser Zeit jedoch häufig Mängel in der Qualität auf, da die Studierenden den Schwerpunkt ihrer Zeit auf die Fertigstellung der schriftlichen Ausarbeitung setzten. Nach dem Feedback der Projektbetreuer mussten die Studierenden ihre Wiki-Seiten umfangreich überarbeiten und äußerten anschließend häufig das Gefühl, keine gute Projektarbeit abgeliefert zu haben, dabei waren die Probleme meist in Form und Wiedergabe der erzielten Erkenntnisse und nicht in der Qualität der Ergebnisse an sich begründet.

Um diese Situation etwas zu entzerren, wurde sich dazu entschlossen, die Abgabefrist der Wiki-Seite eine Woche nach Abgabetermin der schriftlichen Ausarbeitung zu setzen. So haben die Studierenden die Möglichkeit, ihre fertige Ausarbeitung als Grundlage für die Wiki-Seite zu nutzen und die Aussagen dieser auf einer Seite zusammen zu fassen und für das Wiki aufzubereiten. Als Resultat mussten in den so erstellten Wiki-Seiten weniger Punkte überarbeitet werden.

### 8.4. Akzeptanz und Wirkung

Die Teilnehmer sollten, nach Beendigung ihrer Arbeit, im Rahmen eines Interviews ihre Eindrücke zu Lehrkonzept und Projektdurchführung schildern. Nicht alle Studierenden kamen der Bitte nach einem Gesprächstermin nach, und so wurden 8 Studierende interviewt. Die Interviews wurden aufgenommen und verschriftlicht. Auch bei Gruppenarbeiten fanden die Interviews einzeln statt, um zu verhindern, dass nur einer der Teilnehmer spricht und der andere lediglich seine Zustimmung äußert, ohne seine Antworten selbst zu formulieren.

Allen befragten Studierenden ist die Relevanz ihrer Arbeit im Gesamtkontext klar. Sie konnten einordnen, ob es sich um eine Grundlagenarbeit handelt, auf deren Basis andere Studierende weiterarbeiten, oder ob sie ein Thema abgeschlossen haben und die Ergebnisse aus vorangegangenen Arbeiten zusammengeführt haben.

Als persönliche Motivation wurden folgende Punkte dargelegt:

- Interesse an forschendem Arbeiten und Messtechnik allgemein
- Den Wunsch, mal etwas praktischer zu arbeiten und selbst Versuche durchzuführen
- Interesse am Thema Baudynamik

Die befragten Teilnehmer hatten alle keine Vorkenntnisse im Bereich Baudynamik oder forschendem Arbeiten. Dies sei jedoch nie ein Hinderungsgrund, sondern eher ein Ansporn gewesen, um sich mit neuen Inhalten zu beschäftigen.

Das Lehrkonzept wurde von den Studierenden positiv bewertet. Durch die Nutzung des Wikis konnten sie schnell einen Überblick über bisher getätigte Projektarbeiten gewinnen und konnten sich schnell in die erforderlichen Grundlagen einarbeiten. Die von anderen Studierenden verfassten Wiki-Seiten reichen aus, um sich einen Überblick über das Thema zu verschaffen, bei auf dieser Projektarbeit aufbauenden Aufgabenstellungen benötigen die Studierenden aber die komplette Ausarbeitung, um nicht nur Ergebnisse, sondern auch Methoden und herangezogene Grundlagen nachvollziehen zu können.

Als Kritik wurde genannt, dass ILIAS keine Rechtschreibprüfung für die Texteingabe anbietet, und auch ein nachträgliches Installieren von Wörterbüchern im Browser führt zu keiner Markierung von Rechtschreibfehlern im ILIAS-Eingabefeld.

## 9. Fazit

### 9.1. Fazit zum E-Learning-Konzept

Die Möglichkeiten E-Learning-Tools zur Verknüpfung von Lehre und Forschung zu nutzen sind sehr vielfältig. Eine klare Zieldefinition und Übersicht über die Vor- und Nachteile einzelner Tools ist erforderlich, um ein passendes E-Learning-Konzept zu erstellen.

Die in diesem Projekt erwarteten Funktionen, das kollaborative Schreiben eines Wikis mit Forschungsergebnissen, der Austausch von Daten und die übersichtliche Vermittlung von Grundlageninhalten konnten gut über ein Wiki in ILIAS realisiert werden. Durch die Nutzung des LMS ILIAS hatten alle Studierenden einen problemlosen Zugang zu der erforderlichen Plattform und konnten ohne Einarbeitung in die Funktionsweise dieser direkt mit ihrer Projektarbeit beginnen. Die Studierenden nutzen die Tools regelmäßig, jedoch liegt der Schwerpunkt der Wiki-Nutzung am Projektanfang, wenn sich die Teilnehmer in die Thematik einarbeiten und zum Projektabschluss, wenn die Teilnehmer ihre eigenen Ergebnisse im Wiki darstellen und verlinken. Durch die regelmäßigen Beratungstermine arbeiten die Studierenden kontinuierlich an ihrem Projekt, erreichen die geforderten Lernziele, erlangen ein tiefgehendes Verständnis der Problematik und können ihre Projektergebnisse evaluieren und neue, sinnvolle Aufgabenstellungen kreieren.

Das Konzept ist mit der aktuellen Anzahl an Projektbetreuern und teilnehmenden Studierenden gut anwendbar. Ob diese Form der Projektrealisierung auch bei größeren Studierendengruppen erfolgen kann, muss über eine Analyse der Betreuungszeit je Gruppe ermittelt werden und kann so pauschal zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gesagt werden.

Die Analyse ergab, dass die Leistungsmotivation einen Einfluss auf die Auswahl des Wahlpflichtmodules und die Teilnahme am Forschungsprojekt hat. Insbesondere die Leistungsdimensionen *Furchtlosigkeit* und *Wettbewerbsorientierung* spielen eine Rolle. Viele Studierende bekundeten generelles Interesse an forschendem Arbeiten, wählen ihre Module aber häufig so, dass sie sicher sind, diese auch zu bestehen und von vornherein eine gute Übersicht haben, was sie erwartet. Da der Verlauf einer forschenden Arbeit aber nicht zu Beginn des Semesters prognostiziert werden kann, schrecken Studierende anscheinend vor einer Teilnahme zurück. Die teilnehmenden Studierenden weisen außerdem einen höheren Wert bei Selbstständigkeit, Beharrlichkeit und Internalität auf, was eine Präferenz zur Bearbeitung von Projektarbeiten vermuten lässt.

Der letzte Teilnahmemöglichkeit für Studierende fand im Sommersemester 2020 unter den durch die Corona-Pandemie erzwungenen Einschränkungen statt. Auch unter diesen Kontakteinschränkungen konnten die Studierenden sich gut in ihr Thema einarbeiten und ihre Fragestellung beantworten. Dadurch erwies sich das Konzept auch zum Projektabschluss als funktionierend, da auch unter einer plötzlichen Änderung der Rahmenbedingungen die Durchführung der Projekte erfolgreich stattfinden konnte.

Das Konzept soll für die Labormodule in der TH Köln verstetigt werden und bei weiteren Forschungsfragestellungen Anwendung finden. Anhand der weiteren Projektarbeiten wird sich zeigen, ob die hier getätigten Aussagen weiterhin Bestand haben oder ob sich im kommenden Semester neue Aspekte erschließen.

## 9.2. Vorschlag zur Überarbeitung der VDI 2038 Blatt 1

Um eine für den Anwender (auch ohne große Vorkenntnisse zum Thema fußgängerinduzierte Schwingungen) nutzbare Grundlage in der VDI-Richtlinie 2038 zu schaffen, wurden Entscheidungen zur Vereinfachung des Lastansatzes getroffen.

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass sich zwischen den Erregerfrequenzen  $f < 1,5$  Hz und  $f \geq 1,5$  Hz Unterschiede bei den Phasenwinkeln und harmonischen Schwingungsanteilen ergeben. Da der Frequenzbereich für Gehen in der aktuellen Fassung der VDI 2038 von  $1,6 - 2,4$  Hz angegeben wird, werden diese unterschiedlichen Ansätze der Phasenwinkel und harmonischen Lastanteile nicht weiter berücksichtigt, sondern vorgeschlagen, den Frequenzbereich so beizubehalten. Eine niedrige Schrittfrequenz und Geschwindigkeit sorgt für einen wesentlich flacheren Verlauf der Bodenreaktionskräfte der einzelnen Schritte und die typische *M-Form* der Einzelschritte prägt sich nicht stark aus. Daher ist eine dynamische Anregung bei so niedrigen Schrittfrequenzen eher unwahrscheinlich.

Ein großer Unterschied ergibt sich jedoch durch die Anzahl der anzusetzenden harmonischen Lastanteile. Bei einem Ansatz von vier Harmonischen wird die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Bodenreaktionskräften aus 812 Einzelmessungen erreicht.

Der Ansatz einer Fourierreihe wird sowohl für die Bewegungsform *Gehen* als auch für *Laufen* erhalten.

$$F_{vp}(t) = F_G + \sum_i F_G \cdot \alpha_{vi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_{vp} \cdot t + \varphi_{vi}) \quad (9.1)$$

Für Gehen werden dabei vier harmonische Lastanteile angesetzt. Dabei werden die Lastanteile  $\alpha_{vi}$  und die Phasenwinkel  $\varphi_{vi}$  wie folgt angesetzt:

Tabelle 9.1.: Beiwerte Gehen

Beiwert	Mittelwerte
$\alpha_{v1}$	$-0,975 \cdot f_{vp}^3 + 5,09 \cdot f_{vp}^2 - 8,38 \cdot f_{vp} + 4,60$
$\alpha_{v2}$	$-0,078 \cdot f_{vp}^3 + 0,45 \cdot f_{vp}^2 - 0,81 \cdot f_{vp} + 0,51$
$\alpha_{v3}$	$-0,008 \cdot f_{vp}^2 + 0,03 \cdot f_{vp} + 0,09$
$\alpha_{v4}$	$-0,08 \cdot f_{vp}^3 + 0,44 \cdot f_{vp}^2 - 0,76 \cdot f_{vp} + 0,48$
$\varphi_{v1}$	$-\frac{\pi}{2}$
$\varphi_{v2}$	$\pi$
$\varphi_{v3}$	$0$
$\varphi_{v4}$	$\pi$

Graphisch können die harmonischen Lastanteile aus folgenden Abbildungen 9.1 und 9.2 entnommen werden:

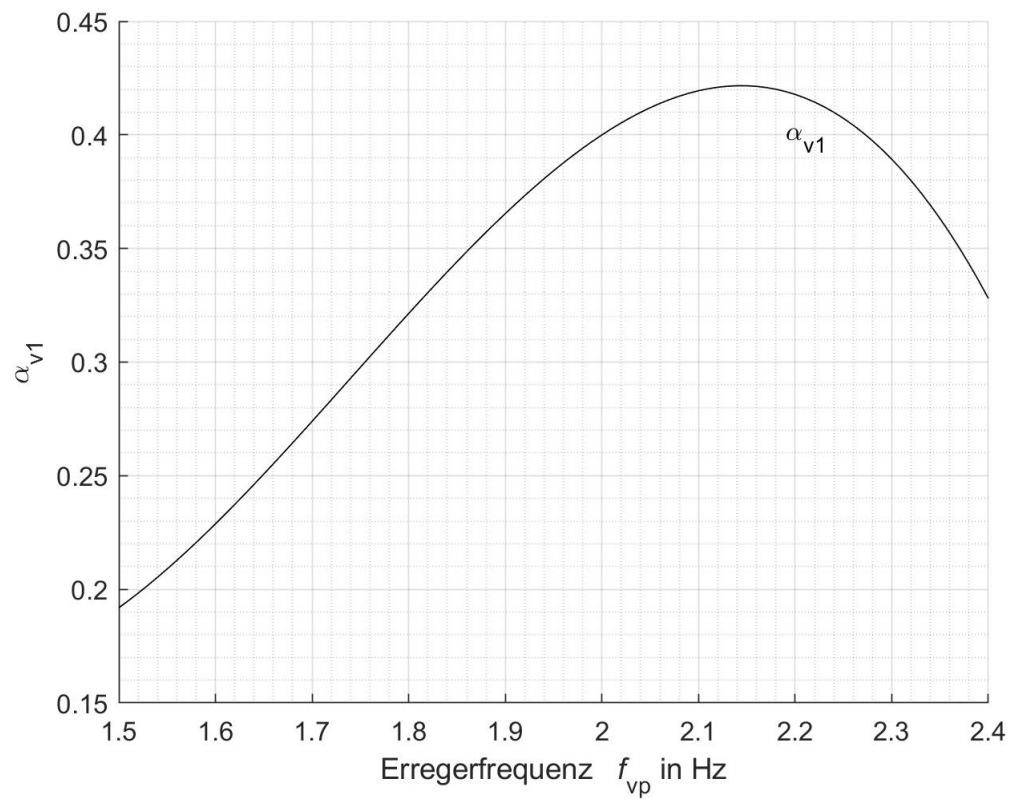


Abbildung 9.1.: Erster harmonischer Lastanteil-Mittelwerte

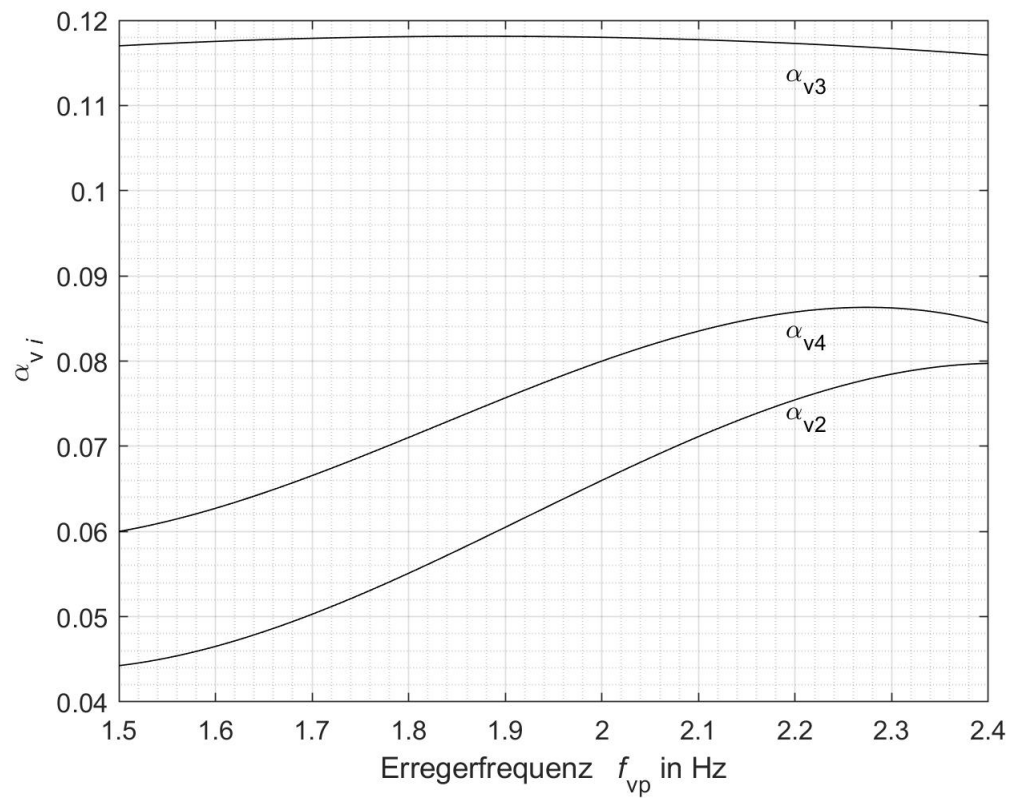


Abbildung 9.2.: Zweiter bis fünfter harmonischer Lastanteil - Mittelwerte

Diese Verläufe stellen den Mittelwert der aufgetragenen Lasten dar. Um die aus Fußgängern resultierenden Schwingungen auf der sicheren Seite abzuschätzen, können die Funktionen mit dem Faktor 2 erhöht werden.

Für die Bewegungsart *Laufen* wird ebenfalls eine Fourierreihe vorgeschlagen. Hier wird jedoch lediglich der erste harmonische Lastanteil als sinnvoll erachtet und Werte  $\leq 0$  werden nicht angesetzt.

$$F(t) = \begin{cases} F_G + F_G \cdot \alpha \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{für } F(t) \geq 0 \\ 0 & \text{für } F(t) < 0 \end{cases} \quad (9.2)$$

Als Frequenzbereich werden die Werte der VDI 2038

$$2,0 \text{ Hz} \leq f_s \leq 3,5 \text{ Hz} \quad (9.3)$$

beibehalten. Der harmonischen Lastanteil  $c$  kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\alpha = -0,45 \cdot f^3 + 3,70 \cdot f^2 - 9,69 \cdot f + 9,34 \quad (9.4)$$

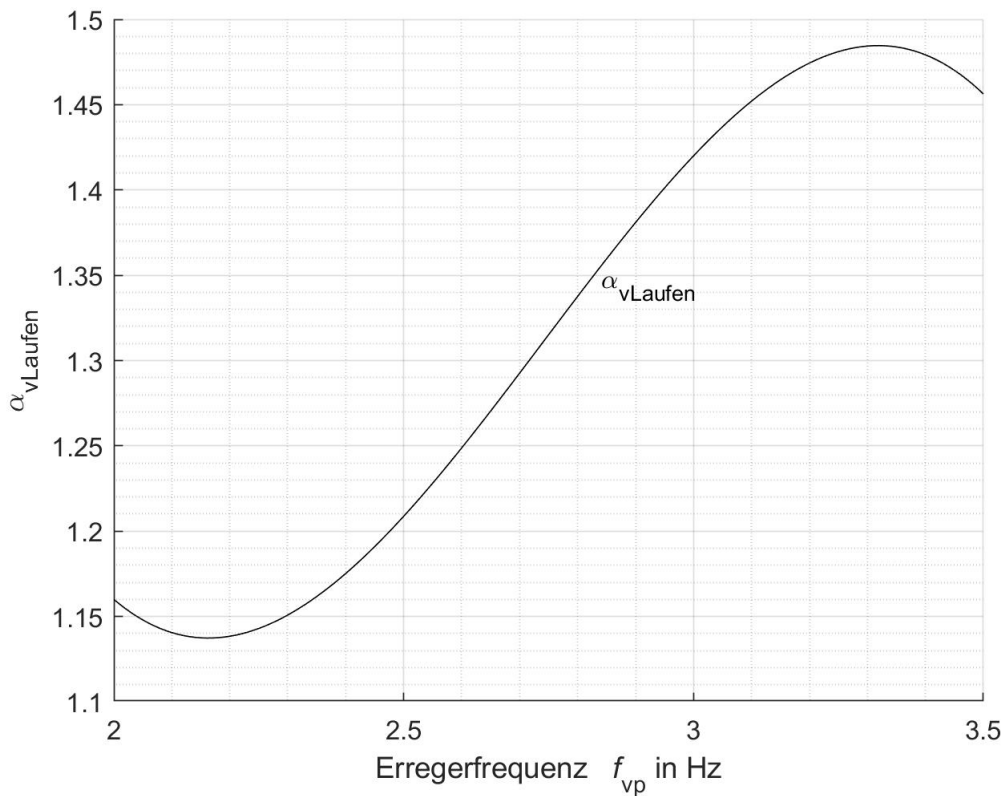


Abbildung 9.3.: Harmonischer Lastanteil für die Bewegungsform Laufen in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz

Um bei der Bewegungsart *Laufen* die Standardabweichung zu berücksichtigen, wird, da es sich hierbei um impulsartige Lasten handelt, der Wert durch einen Faktor erhöht.

$$F_{\sigma,oben}(t) = \begin{cases} F_G + 1,18 \cdot F_G \cdot \alpha \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) & \text{für } F_{\sigma,oben}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{für } F_{\sigma,oben}(t) < 0 \end{cases} \quad (9.5)$$

## 10. Ausblick

### 10.1. Ausblick zum E-Learning-Konzept

Das E-Learning-Konzept hat, wie in Kapitel 9.1 beschrieben, seinen Zweck erfüllt und ist den Ansprüchen, die daran gestellt wurden, gerecht geworden. Jedoch ist bei einer Anwendung des Konzeptes bei einer größeren Studierendengruppe, eine weitere Prüfung des E-Learning-Konzeptes ratsam. Hierbei steht insbesondere der organisatorische Aufwand und die Koordinierung verschiedener Projekte zur gleichen Zeit im Vordergrund. Da die Studierenden alle an unterschiedlichen Teilfragestellungen arbeiten, ist die Anzahl der Gruppen, die zeitgleich gut betreut werden kann, je nach Projekt, Fragestellung und Anzahl der Mitarbeiter unterschiedlich. Auch bei Anwendung des E-Learning-Konzeptes bei einem Pflichtmodul könnten die Ergebnisse anders ausfallen, da die Studierenden eine andere Motivation aufweisen.

### 10.2. Ausblick zur ingenieurwissenschaftlichen Fragestellung

Im Rahmen dieser durchgeführten Forschungsarbeit konnten nicht alle gestellten Fragen abschließend beantwortet werden. Der Fokus der Arbeit lag auf Überarbeitung der Funktion für vertikale Bodenreaktionskräfte unter Erstellung und Erprobung eines Lehrkonzeptes. Daher konnten nicht alle Aspekte aus dem Kapitel zu fußgängerinduzierten Lasten der VDI 2038 - Blatt 1 bearbeitet werden, jedoch können die Ansätze für vertikale Lasten für die Bewegungsformen *Gehen* und *Laufen* durch die in Kapitel 9.2 dargestellten Formeln dargestellt werden. Die offenen Punkte betreffen vor allem die horizontalen Kräfte und den Einfluss von Personengruppen.

Bei der Funktion zu horizontalen Lasten aus der VDI 2038 [1] lässt sich feststellen, dass der Verlauf versehentlich um den Anteil  $F_G$  zu hoch ist. Eine Anpassung der Formel auf

$$F_{hp}(t) = \sum_i F_G \cdot \alpha_{hi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_{hp} \cdot t - \varphi_{hi}) \quad (10.1)$$

wäre sinnvoll, jedoch müssten zu einer konkreten Überarbeitung der Parameter weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Der Einfluss von mehreren Personen auf der Brücke wurde im Ansatz untersucht. Hierbei bezogen sich die durchgeführten Versuche auf verschiedenen Bauwerken jedoch nur auf zusammengehörende Gruppen und untersuchten die maximal auftretende Schwingungsamplitude bei vorgegebenen Schrittfrequenzen im Vergleich zu freiem Gehen in der Gruppe. Untersuchungen zu kleinen, voneinander unabhängigen Personengruppen oder Einzelpersonen, die sich an verschiedenen Stellen der Brücke befinden, wurden nicht durchgeführt.

Auch die Betrachtung von horizontalen Schwingungen und deren Einfluss auf die Synchronisation von verschiedenen Personen wurde nicht betrachtet, obwohl dieser Aspekt für die Synchronisation wesentlich wichtiger ist als der Einfluss vertikaler Schwingungen. Zum Einen war durch die Messtechnik keine Erfassung horizontaler Kräfte möglich, zum Anderen wies keine der Brücken, an denen Versuche durchgeführt wurden, große horizontale Schwingungen auf, sodass der Einfluss dieser Horizontalschwingungen auf Personengruppen nicht untersucht werden konnte.

Mit Untersuchungen zu horizontalen Schwingungen und dem Einfluss von Personengruppen auf die Schwingungsamplitude könnte der Lastansatz nach VDI 2038 weiter verbessert werden.





# Literatur

- [1] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 2038-Blatt 1: Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen, Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik*. Juni 2012.
- [2] Michael Kerres. *Mediendidaktik: Konzeption und Entwicklung digitaler Lernangebote*. 5., erweiterte Auflage. 2018. ISBN: 978-3-11-045683-7. DOI: 10.1515/9783110456837.
- [3] Helge Fischer. *E-Learning im Lehralltag: Analyse der Adoption von E-Learning-Innovationen in der Hochschullehre*. Wiesbaden und s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-658-02181-8. DOI: 10.1007/978-3-658-02182-5.
- [4] Ullrich Dittler, Hrsg. *E-Learning 4.0: Mobile Learning, Lernen mit Smart Device und Lernen in sozialen Netzwerken*. Berlin und Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2017. ISBN: 978-3-11-046894-6. DOI: 10.1515/9783110468946.
- [5] Patricia Arnold u. a., Hrsg. *Handbuch E-Learning: Lehren und Lernen mit digitalen Medien*. 5. Auflage. Bd. 4965. utb Pädagogik. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag, 2018. ISBN: 9783825249656.
- [6] Jürgen Handke und Anna Maria Schäfer. *E-Learning, E-Teaching und E-Assessment in der Hochschullehre: Eine Anleitung*. Informatik 10-2012. München: Oldenbourg, 2012. ISBN: 978-3-486-71684-9.
- [7] Ludwig Huber. „Forschendes Lernen: Bericht und Diskussion über ein hochschuldidaktisches Prinzip“. In: *Huber L. Forschendes Lernen: Bericht und Diskussion über ein hochschuldidaktisches Prinzip. Neue Sammlung . 1970;10(3):227–244*. (1970). URL: <http://pub.uni-bielefeld.de/publication/1781678#?;http://pub.uni-bielefeld.de/publication/1781678;http://pub.uni-bielefeld.de/download/1781678/2313418>.
- [8] Ludwig Huber u. a., Hrsg. *Forschendes Lehren im eigenen Fach: Scholarship of Teaching and Learning in Beispielen*. 1. Aufl. Blickpunkt Hochschuldidaktik. s.l.: W. Bertelsmann Verlag, 2014. ISBN: 978-3-7639-5306-6.
- [9] Gabi Reinmann. *Wie praktisch ist die Universität? Vom situierten zum forschenden Lernen mit digitalen Medien*. 2009.
- [10] Julia Ruess, Christopher Gess und Wolfgang Deicke. „Forschendes Lernen und forschungsbezogene Lehre – empirisch gestützte Systematisierung des Forschungsbezugs hochschulischer Lehre“. In: *Zeitschrift für Hochschulentwicklung* 11 (2016). DOI: 10.3217/zfhe-11-02/02.
- [11] Jenkins, Alan, Verfasser und Healey, Mick, Verfasser. „Research based-learning.. A collection of case studies in different disciplines“. In: *Fachbezogene und fachübergreifende Hochschuldidaktik* Jg. 2011 (2011). URL: <http://www.fachportal-paedagogik.de/fis/textunderscorebildung/suche/fis/textunderscoreset.html?FId=939707;http://www.ciando.com/ebook/bid-235762;http://digitool.hbz-nrw.de:1801/webclient/DeliveryManager?pid=4187733&custom\textunderscoreatt\textunderscore2=simple\textunderscoreviewer>.
- [12] Claudia Bremer. „Wikis in der Hochschullehre“. In: *Wikis in Schule und Hochschule*. Hrsg. von Michael Hrsg. Beißwenger. E-Learning. Boizenburg: Hülsbusch, 2012. ISBN: 978-3-86488-017-9.

- [13] Heiko Merle. *Ein konstruktivistisches Lehr-Lern-Konzept mit der Unterstützung von Computern im Stahlbau: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013*. Bd. H. 100. Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt. Darmstadt: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, 2013. ISBN: 9783939195344.
- [14] Maxi Kindling und Peter Schirmbacher. *Virtuelle Forschungsumgebungen zur wissenschaftlichen Zusammenarbeit*. Humboldt-Universität zu Berlin, 2012. DOI: 10.18452/6625. URL: <http://edoc.hu-berlin.de/18452/7277#?;http://edoc.hu-berlin.de/18452/7277>.
- [15] J. Mahmood u. a. „Development and validation of instrument for assessing researcher’s participation in e-collaboration“. In: *Recent Trends in Data Science and Soft Computing - Proceedings of the 3rd International Conference of Reliable Information and Communication Technology IRICT 2018 . (Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, 843:1066-1076)* (2019). ISSN: 2194-5357. DOI: 10.1007/978-3-319-99007-1\$\\backslash\$\\textunderscore}99.
- [16] Soziologisches Forschungsinstitut Göttingen. URL: <http://www.sofi-goettingen.de/projekte/verbundprojekt-virtuelle-forschungsumgebung-vfu-fuer-die-soziooekonomische-berichterstattung/was-ist-eine-vfu/>.
- [17] Jacquelin Perry u. a., Hrsg. *Ganganalyse: Norm und Pathologie des Gehens*. 1. Aufl. München: Urban & Fischer, 2003. ISBN: 3437471104.
- [18] I. A. Kramers-de Quervain, E. Stüssi und A. Stacoff. „Ganganalyse beim Gehen und Laufen“. In: *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie* 56; Jg. 2008.2 (2008), S. 35.
- [19] Jessica Rose und James Gibson Gamble. *Human walking*. Lippincott Williams & Wilkins, 2006., Philadelphia, Penn., 2006. und London, 2006. URL: <http://data.theeuropeanlibrary.org/BibliographicResource/3000076545987#?;http://data.theeuropeanlibrary.org/BibliographicResource/3000076545987>.
- [20] Hugo Bachmann und Walter Ammann. *Schwingungsprobleme bei Bauwerken: Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen*. Bd. 3d. Structural engineering documents. Zürich: Internationale Vereinigung f. Brückenbau u. Hochbau, 1987. ISBN: 3857480513.
- [21] Y. Matsumoto, H. Shiojiri und T. Nishioka. „Dynamic design of footbridges“. In: *IABSE proceedings / Mémoires AIPC* 2; Jg. 1978-08-01.P-17 (1978), S. 1. ISSN: 0377-7278. DOI: 10.5169/seals-33221.
- [22] Günther Hegewald. *Die Ganggeschwindigkeit – eine zentrale Größe in der Ganganalyse*. URL: [https://medilologic.com/wp-content/uploads/2017/06/Die\\_Ganggeschwindigkeit\\_01.pdf](https://medilologic.com/wp-content/uploads/2017/06/Die_Ganggeschwindigkeit_01.pdf).
- [23] A. Pachi und Tianjian Ji. „Frequency and velocity of people walking“. In: *The structural engineer* 83 (2005), S. 36–40.
- [24] H. Kramer und H. W. Kebe. „Durch Menschen erzwungene Bauwerksschwingungen“. In: *Der Bauingenieur* 54.5 (1979), S. 195–199. ISSN: 0005-6650.
- [25] Theodoros. Paschalidis. „Bodenreaktionskräfte gesunder Probanden und von Patienten vor und nach endoprothetischem Ersatz an der unteren Extremität“. In: *LF; (2003)* (2003). URL: <http://archiv.ub.uni-marburg.de/diss/z2003/0086/pdf/z2003-0086.pdf>; <http://archiv.ub.uni-marburg.de/diss/z2003/0086/>; <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=97547913X>.

- [26] Eva Christiane Butz und Gerhard Sedlacek. „Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen“. In: *Aachen : Shaker, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen*, 60, 154, A1, B9 S. : Ill., graph. Darst. (2006). = Zugl.: *Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2006* (2006). URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/61661#?;http://publications.rwth-aachen.de/record/61661;http://publications.rwth-aachen.de/search?p=id:%22RWTH-CONV-123299%22>.
- [27] F. W. Galbraith und M. V. Barton. „Ground Loading from Footsteps“. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 48; Jg. 1970-11-03.5B (1970), S. 1288–1292. ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/1.1912271.
- [28] British Standards Institution. *BS 5400-2:2006: Steel, concrete and composite bridges. Specification for loads*. 29.09.2006.
- [29] British Standards Institution. *BS NA EN 1991-2: UK National Annex to Eurocode 1. Actions on structures. Traffic loads on bridges*. 2003.
- [30] Iemke Roos. *Human Induced Vibrations on Footbridges: Application & comparison of pedestrian load models*. Hrsg. von Delft University of Technology. 2009. URL: [http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc\\_projects/reportRoos.pdf](http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc_projects/reportRoos.pdf).
- [31] Markus Feldmann u. a. „Human-induced vibration of steel structures (Hivoss)“. In: *Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, EUR : Research fund for coal and steel 24183, (2010)* (2010). URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/197414#?;http://publications.rwth-aachen.de/record/197414;http://publications.rwth-aachen.de/search?p=id:%22RWTH-CONV-009697%22>.
- [32] C. Sahnaci. *Menscheninduzierte Einwirkungen auf Tragwerke infolge der Lokomotionsformen Gehen und Rennen Analyse und Modellierung: Booklet*. Bochum, 2013. URL: <http://lobid.org/resources/HT018154779>.
- [33] Gerhard Müller und Michael Möser, Hrsg. *Taschenbuch der technischen Akustik: Mit 119 Tabellen*. 3., erw. und überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2004. ISBN: 978-3-540-41242-7.
- [34] Helmut Kramer. *Angewandte Baudynamik: Grundlagen und Beispiele für Studium und Praxis*. Bauingenieur-Praxis. Berlin: Ernst, 2007. ISBN: 978-3-433-01823-1.
- [35] J. H. Rainer und G. Pernica. „Vertical dynamic forces from footsteps“. In: *0711-6659* (1986). ISSN: 0711-6659. URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=306f57be-f464-4040-814c-fb37e92b4dd0#?;https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=306f57be-f464-4040-814c-fb37e92b4dd0<br>.
- [36] Christian Petersen und Horst Werkle. *Dynamik der Baukonstruktionen*. 2. Aufl. 2017. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-8348-2109-6. DOI: 10.1007/978-3-8348-2109-6.
- [37] C. Seiler und S. Huttner. „Ein einheitliches Modell zur Beschreibung von Fussgängerlasten für verschiedene Bewegungsarten - Theorie, experimentelle Messungen und praktische Anwendung“. In: *Der Bauingenieur* Jg. 2004.NOV (2004), S. 483–496. ISSN: 0005-6650.
- [38] SETRA. *Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Technical guide*. Paris, 2006.
- [39] H. Werkle und W. Puschel. „Durch Menschen induzierte Schwingungen von Fussgängerbrücken aus Aluminium“. In: *Der Bauingenieur* (2009), S. 223–235. ISSN: 0005-6650.
- [40] Paul Archbold u. a. *A Parametric Study of Pedestrian Vertical Force Models for Dynamic Analysis of Footbridges*. Germany, Europe: Dublin Institute of Technology, 2011. URL: <https://doi.org/10.21427/D79F8H#?;https://doi.org/10.21427/D79F8H>.

- [41] F. A. McRobie. „Long-term solutions of Macdonald’s model for pedestrian-induced lateral forces“. In: *Journal of Sound and Vibration* 332; Jg. 2013-05-27.11 (2013), S. 2846–2855. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.12.027. URL: <https://www.sciencedirect.com/search/advanced?docId=10.1016/j.jsv.2012.12.027?>.
- [42] Bloom, Benjamin Samuel Hrsg. und Max D. Engelhart. *Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich; Taxonomy of educational objectives dt.* Beltz-Studienbuch, Teil 35. Weinheim u.a.: Beltz, 1972. ISBN: 3-407-18296-1. URL: <http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2007/10/10/file\textunderscore72/2146694.pdf>.
- [43] *Modulhandbuch: für den Bachelor-Studiengang Bauingenieurwesen: Prüfungsordnung vom 25.09.2007.* URL: [https://www.th-koeln.de/studium/bauingenieurwesen-bachelor--ordnungen-und-formulare\\_2422.php](https://www.th-koeln.de/studium/bauingenieurwesen-bachelor--ordnungen-und-formulare_2422.php).
- [44] TH Köln. *Modulhandbuch für den Master-Studiengang Bauingenieurwesen.* URL: [https://www.th-koeln.de/mam/downloads/deutsch/studium/studiengaenge/f06/2019-02-07\\_modulhandbuch\\_ma\\_ib.pdf](https://www.th-koeln.de/mam/downloads/deutsch/studium/studiengaenge/f06/2019-02-07_modulhandbuch_ma_ib.pdf).
- [45] Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co.KG. *MEDA*. 2017.
- [46] Hottinger Baldwin Messtechnik. *CatmanEasy*. 2015. URL: <https://www.hbm.com/de/2290/catman-messtechnik-software/>.
- [47] Lothar Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 14., überarb. u. erw. Aufl. Bd. Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler; Online-Ausg. Papula, Lothar: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2. Lehrbuch. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-07790-7. DOI: 10.1007/978-3-658-07790-7; URL: [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage2/2018/07/20/file\\_7/8117520.pdf](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage2/2018/07/20/file_7/8117520.pdf).
- [48] Karl Schweizer, Hrsg. *Leistung und Leistungsdiagnostik*. Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2006. ISBN: 3-540-25459-5. DOI: 10.1007/3-540-33020-8.
- [49] Heinz Schuler und Michael Prochaska. *Leistungsmotivationsinventar: Dimensionen berufsbezogener Leistungsorientierung: Manual*. 1. Auflage. Hogrefe Verlag für Psychologie, 2001.
- [50] Heinz Schuler und Andreas Frintrup. „Der Wille zählt: Leistungsmotivation“. In: *Personal - Zeitschrift für Human Resource Management* 54; Jg. 2002.1 (2002), S. 750. ISSN: 0031-5605. URL: <http://resolver.ebscohost.com/openurl?sid=EBSCO:edsjsr&genre=article&issn=00315605&ISBN=&volume=54&issue=1&date=20020101&spage=750&pages=&title=Personal&atitle=Der%20Wille%20z%C3%A4hlt%3A%20Leistungsmotivation&aualast=Heinz%20Schuler&id=DOI:;https://www.jstor.org/stable/24386221>.
- [51] Dlubal Software GmbH. *RStab*. 2018. URL: <https://www.dlubal.com/de>.



# A. Pläne der Brücke



Abbildung A.1.: Grundriss der Brücke

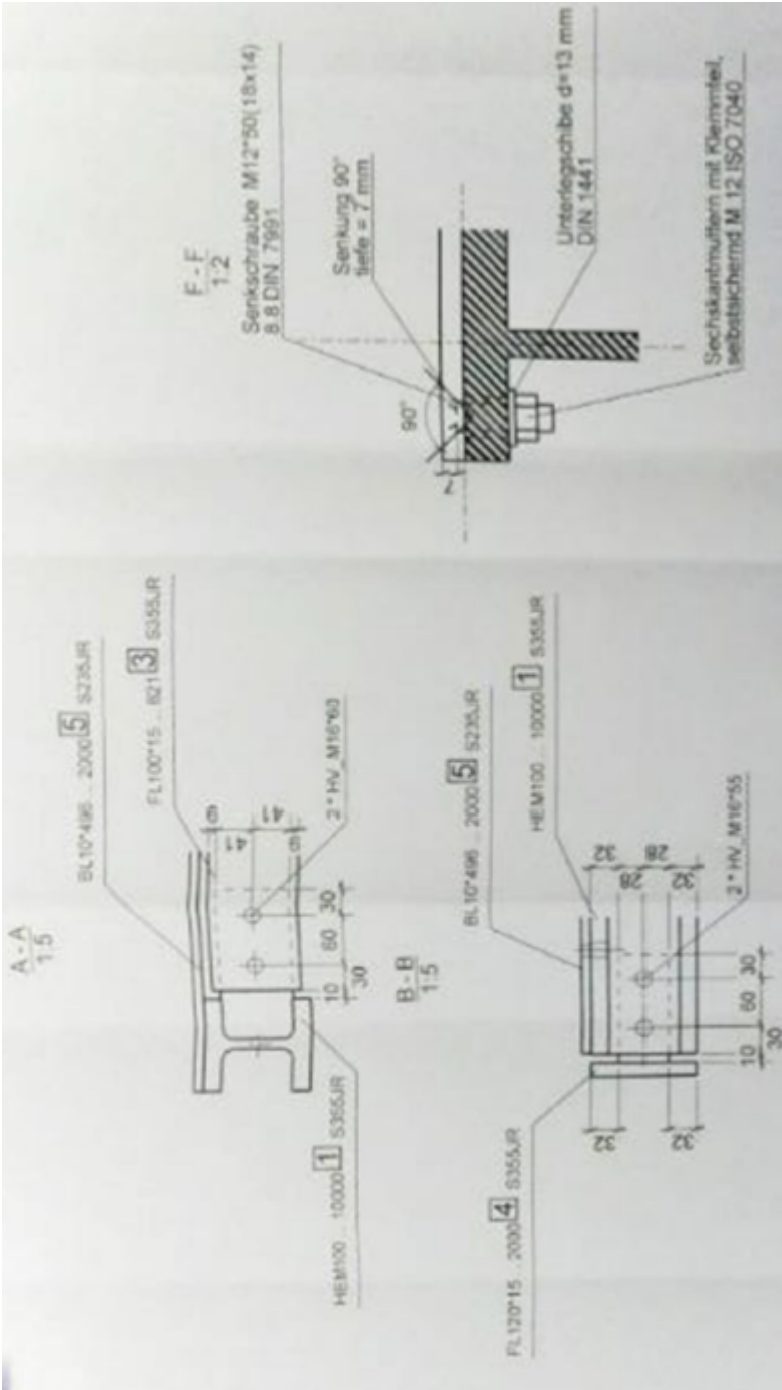


Abbildung A.2.: Anschlussdetails der Versuchsbrücke

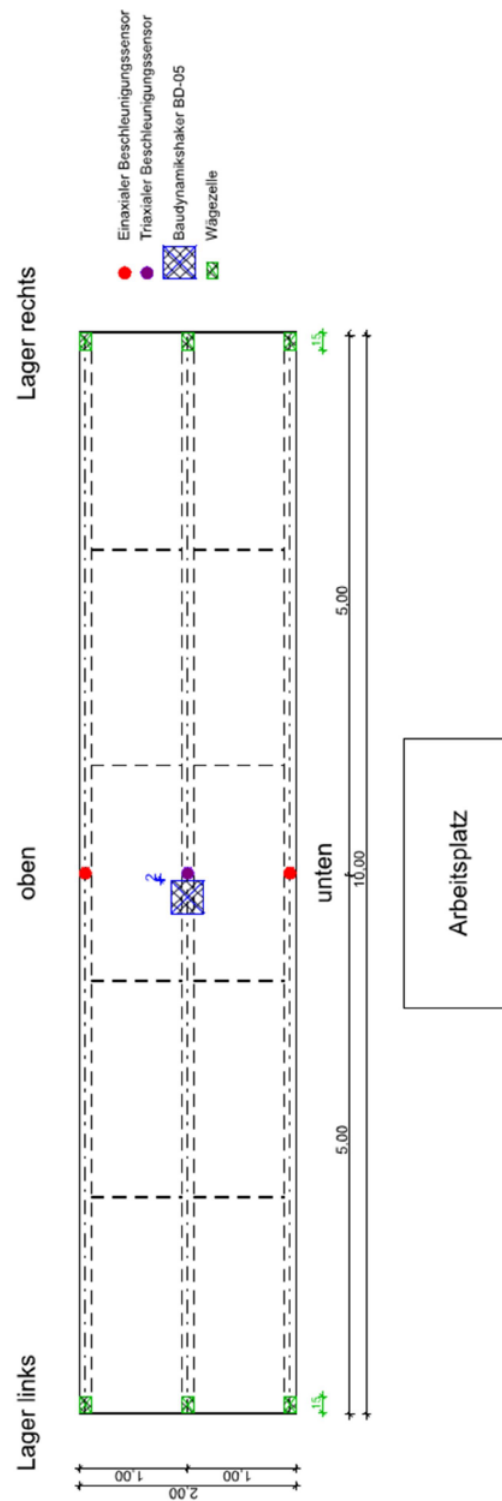


Abbildung A.3.: Schematischer Messaufbau an der Versuchsbrücke



## B. Fragebogen zur persönlichen Motivation der Studierenden

# Fragebogen zum Forschungsprojekt „Fußgängerinduzierte Schwingungen“ und „forschendem Lernen“

Semester: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ m ☐ w ☐ d

1. Ist Ihnen die Möglichkeit mit Projektarbeiten in Wahlpflichtmodulen und Abschlussarbeiten an einem Forschungsprojekt zu fußgängerinduzierten Schwingungen teilzunehmen bekannt?

☐ Ja

☐ Nein

- a. Bei „Ja“: Woher? (Mehrfachantworten möglich)

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Projektvorstellungen zu Semesterbeginn  | <input type="checkbox"/> Internet (ILIAS oder Stahlbau-Webseiten) |
| <input type="checkbox"/> Aus Gesprächen mit anderen Studierenden | <input type="checkbox"/> Sonstiges:                               |
| <input type="checkbox"/> Aushang                                 |   |

2. Überlegen Sie, im Rahmen eines Wahlpflichtmoduls oder einer Abschlussarbeit eine Projektarbeit im Forschungsprojekt durchzuführen, oder haben Sie bereits mit einem Projekt teilgenommen?

☐ Ja, ich habe schon teilgenommen oder werde sicher noch teilnehmen

☐ Ich habe mir darüber noch keine Gedanken gemacht oder bin noch unsicher

☐ Nein

- a. Bei „Ja“: In welchen Modulen ist eine Teilnahme geplant oder in Überlegung?

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> BVS          | <input type="checkbox"/> Bachelorarbeit |
| <input type="checkbox"/> VGB          | <input type="checkbox"/> WissPro        |
| <input type="checkbox"/> Masterarbeit |   |

- b. Bei „Nein“: Warum?

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Kein Interesse an forschendem Arbeiten             | <input type="checkbox"/> Unvorhersehbare Aufgabenstellung/Bearbeitung im Vergleich zu beispielsweise einer Statik |
| <input type="checkbox"/> Dozent/Betreuer des Projektes                      | <input type="checkbox"/> Zeitlicher Aufwand   |
| <input type="checkbox"/> Thematische Ausrichtung (Baudynamik)               | <input type="checkbox"/> Mangelnde Vorkenntnisse im Bereich Baudynamik  |
| <input type="checkbox"/> Mangelnde Erfahrung im wissenschaftlichen Arbeiten | <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____   |

3. Welche Punkte sind für Sie bei der Auswahl eines Wahlpflichtmoduls relevant?

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Interesse am Thema  | <input type="checkbox"/> Geschätzter zeitlicher Aufwand  |
| <input type="checkbox"/> Neue Inhalte lernen | <input type="checkbox"/> Bekannte Inhalte vertiefen  |
| <input type="checkbox"/> Dozent              | <input type="checkbox"/> Lage des Moduls im Stundenplan bzw. zeitliche Vereinbarkeit mit anderen Modulen |
| <input type="checkbox"/> Sonstiges:<br>_____ |  |

4. Haben Sie Interesse am Durchführen von Versuchen oder am Umgang mit Messtechnik?

- ☐ Ja ☐ Nein

5. Haben Sie Erfahrung in der Durchführung von Versuchen oder im Umgang mit Messtechnik?

- ☐ Ja ☐ Nein

6. Haben Sie generell Interesse an forschendem Arbeiten?

- ☐ Ja ☐ Nein

7. Bei welchen thematischen Schwerpunkten könnten Sie sich vorstellen, eine Projektarbeit im Rahmen eines Forschungsprojektes durchzuführen?

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Massivbau    | <input type="checkbox"/> Statik        |
| <input type="checkbox"/> Stahlbau     | <input type="checkbox"/> Holzbau       |
| <input type="checkbox"/> BIM          | <input type="checkbox"/> Verbundbau    |
| <input type="checkbox"/> Baudynamik   | <input type="checkbox"/> Bauinformatik |
| <input type="checkbox"/> keinem davon |  |



## C. Interviewleitfaden

# Interviewleitfaden

---

Name des Befragten:

Datum:

---

1. Wir sind hier ja im Forschungsprojekt zu Fußgängerinduzierten Schwingungen. Wie kam es dazu, dass Sie/Du jetzt hier sind/bist? **Persönliche Motivation**
2. Was war das Thema der Aufgabenstellung? **Beschreibung**
3. Wie schätzt/schätzen Du/Sie die Bedeutung der Arbeit im Gesamtkontext der Forschungsfrage ein? **Wirkung / Relevanz der Arbeit**
  - a. Woher kommt diese Einschätzung?
4. Warum haben Sie sich dazu entschlossen eine Projektarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes durchzuführen? **Persönliche Motivation**
  - a. Wie haben/hast Sie/du von der Möglichkeit zur Teilnahme erfahren?
  - b. Welche Kriterien spielten bei der Auswahl eine Rolle?
5. Welche fachlichen Vorkenntnisse hatten Sie zum Thema Ihrer Hausarbeit?
  - a. Welchen Einfluss hatte dies auf die Entscheidung hier ein Wahlpflichtmodul/ die Abschlussarbeit zu belegen?
6. Welche Erwartungen hatten Sie an die Projektarbeit?
  - a. -bezüglich des Themas/ der Aufgabenstellung?
  - b. -bezüglich der Projektdurchführung
7. Welche Erfahrungen haben Sie mit der Durchführung des Projektes gemacht? **Wirkung / Akzeptanz**
  - a. -bezüglich des Lehrkonzeptes
  - b. -bezüglich der Fragestellung
8. Welche Medien wurden genutzt, wie hingen sie zusammen und warum wurden Sie genutzt?
  - a. Welchen Vorteil brachte die Mediennutzung?
9. Wie beurteilen Sie die Durchführung der Projektarbeit mit dem eben beschriebenen Konzept? **Wirkung / Akzeptanz**
  - a. Wie verlief die Einarbeitung in das Thema mit dem Wiki und der Fachliteratur?
10. Was kann Ihrer Meinung nach zukünftig verbessert werden? **Wirkung / Akzeptanz**
11. Wollen Sie zum Abschluss noch irgendwelche Aspekte äußern, die hier jetzt nicht konkret erfragt wurden?

## D. Alphabetische Liste aller Wiki-Seiten

- Auswertung von Schwingungsmessungen zum Synchronisationsfaktor
- Auswerteprogramm
- Betrieb des Baudynamikshakers
- Baudynamik Grundlagen
- Bewertungskriterien für personeninduzierte Schwingungen nach VDI 2038 - 2
- Dauer der Zweibeinstandphase
- Die Variabilität des Gangbilds
- DIN 4150
- Durchführung einer Messung
- Dämpfung
- Eigenfrequenz
- Einfluss der Schrittweite auf Bodenreaktionskräfte beim Gehen
- Einfluss der Schrittweite auf Bodenreaktionskräfte beim Laufen
- Einfluss der Schwingung auf Bodenreaktionskräfte
- Forschungsprojekt
- Freies Gehen und Laufen
- Fußgängerbrücken
- Fußgängerinduzierte Schwingungen
- Ganganalyse
- Gehen und Laufen
- Grundlagen der Baudynamik
- Grundlagen zu fußgängerinduzierten Schwingungen
- Hauptseite
- KB-Bewertung
- Laborbrücke
- Laborbrücke - Anpassbarkeit der Eigenfrequenz
- Laborbrücke - Vergleich RFEM und Realität

- Last-Zeit-Verläufe mittels Baudynamikshaker aufbringen
- Lastansätze in der Literatur
- Linearität des Schwingungsverhaltens
- Literaturliste
- Literatur- und Grundlagenanalyse
- MEDA
- MEDA Grundlagen
- Messaufbau
- Messauswertung in MEDA
- Messtechnik
- Messtechnik Grundlagen
- Messtechnische Untersuchung der Dämpfung
- Messtechnische Untersuchung der Eigenfrequenz
- Messung der vertikalen Bodenreaktionskräfte
- Messungen mit VibMoST und Measurement Manager
- Seitenliste
- Steifigkeit eines Bauteils berechnen
- Synchronisationsfaktor
- VDI 2038
- Vergleich der Lastansätze zu fußgängerinduzierten Schwingungen der VDI 2038 und dem AS-5100
- Vergleich des Synchronisationsfaktors von drei verschiedenen Brücken
- Vergleich mit Messungen an der Laborbrücke
- Versuchsdurchführung Synchronisationsfaktor