

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abstract .....                                                                                     | I   |
| Kurzfassung .....                                                                                  | III |
| 1 Einleitung .....                                                                                 | 1   |
| 1.1 Motivation .....                                                                               | 1   |
| 1.2 Stand aktueller Regelwerke .....                                                               | 2   |
| 1.3 Stand der Forschung .....                                                                      | 5   |
| 1.3.1 Ganganalyse .....                                                                            | 5   |
| 1.3.2 Kategorisierung der Methoden zur Kontaktkraftermittlung .....                                | 6   |
| 1.3.3 Lastmodelle .....                                                                            | 6   |
| 1.3.3.1 Zeitbereichsmodelle .....                                                                  | 6   |
| 1.3.3.2 Frequenzbereichsmodelle .....                                                              | 7   |
| 1.3.4 Mensch-Struktur-Interaktion .....                                                            | 7   |
| 1.4 Ziel der Arbeit .....                                                                          | 10  |
| 1.5 Aufbau der Arbeit .....                                                                        | 11  |
| 2 Mensch-Struktur-Interaktion .....                                                                | 12  |
| 2.1 Grundlagen der Mensch-Struktur-Interaktion .....                                               | 12  |
| 2.2 Modelle und Methoden zur Berücksichtigung der Mensch-Struktur-Interaktion –<br>Literatur ..... | 13  |
| 2.2.1 Wandernde Last (Moving Force) .....                                                          | 13  |
| 2.2.2 Wandernde Masse (Moving Mass) .....                                                          | 13  |
| 2.2.3 Wanderndes Massen-Feder-Dämpfer-Modell (engl. Moving Mass-Spring-<br>Damper-Model) .....     | 14  |
| 2.2.4 Invertiertes Pendel Modell (Inverted-Pendulum Model) .....                                   | 15  |
| 2.2.5 Mensch-Modell ohne Interaktion unter Berücksichtigung der Bipedie .....                      | 16  |
| 2.2.6 Bodylink-Modell .....                                                                        | 17  |
| 2.3 Modelle und Methoden zur Berücksichtigung der Mensch-Struktur-Interaktion –<br>Normen .....    | 17  |
| 2.4 Zusammenfassung .....                                                                          | 18  |
| 3 Versuchstechnik zur Erfassung der MBI .....                                                      | 20  |
| 3.1 Übersicht der aktuellen Messtechnik zur Erfassung der Menschbewegung .....                     | 20  |
| 3.1.1 Kraftmessplatten .....                                                                       | 20  |
| 3.1.2 Motion Capturing .....                                                                       | 21  |
| 3.1.3 Ermittlung der Bodenreaktionskräfte mittels IMU .....                                        | 22  |
| 3.1.4 Druckmesssohlen und instrumentierte Schuhe .....                                             | 22  |

|         |                                                                                               |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2     | Struktur zur Untersuchung der Mensch-Struktur-Interaktion – vollskalige Fußgängerbrücke ..... | 23 |
| 3.2.1   | Anforderungen .....                                                                           | 23 |
| 3.2.2   | Entwurf und Konstruktion .....                                                                | 24 |
| 3.2.3   | Erweiterung für horizontale Schwingungen .....                                                | 26 |
| 3.2.4   | Numerische Vorberechnungen .....                                                              | 28 |
| 3.3     | Verwendete Messtechnik und Equipment .....                                                    | 30 |
| 3.3.1   | Technik zur Erfassung der Menschbewegung .....                                                | 30 |
| 3.3.2   | Gerätschaft zur Messung der Kontaktkraft-Zeitverläufe .....                                   | 31 |
| 3.3.3   | Gerätschaften zur Aufnahme der Strukturbewegung und Systemidentifikation .....                | 31 |
| 3.3.3.1 | Optische Aufnahmen .....                                                                      | 32 |
| 3.3.3.2 | Beschleunigungssensoren .....                                                                 | 32 |
| 3.3.3.3 | Impulshammer .....                                                                            | 33 |
| 3.3.3.4 | Hydrodynamischer Shaker .....                                                                 | 33 |
| 3.3.3.5 | Smartphones zur triaxialen Schwingungsmessung (mit iDynamics App) .....                       | 34 |
| 3.4     | Zusammenfassung .....                                                                         | 34 |
| 4       | Systemidentifikation .....                                                                    | 36 |
| 4.1     | Experimentelle Modalanalyse (EMA) .....                                                       | 37 |
| 4.2     | Operative Modalanalyse (OMA) .....                                                            | 38 |
| 4.3     | Ausschwingversuche .....                                                                      | 38 |
| 4.4     | Modale Masse .....                                                                            | 40 |
| 4.5     | Zusammenfassung .....                                                                         | 42 |
| 5       | Experimentelle Analysen zur Mensch-Struktur-Interaktion .....                                 | 43 |
| 5.1     | Vorbereitungen zur Erfassung der Mensch-Struktur-Interaktion .....                            | 43 |
| 5.2     | Kontaktkraftermittlung mittels Motion Capturing .....                                         | 45 |
| 5.3     | Messungen auf der Kraftmessplatte (ohne Interaktion) .....                                    | 52 |
| 5.4     | Messungen auf dem starren Boden .....                                                         | 54 |
| 5.5     | Erfassung der vertikalen Mensch-Struktur-Interaktion beim Gehen auf der Fußgängerbrücke ..... | 57 |
| 5.6     | Messungen auf der Brücke .....                                                                | 61 |
| 5.6.1   | Strukturantwort und erste Ansätze .....                                                       | 62 |
| 5.6.2   | Gehtempo .....                                                                                | 69 |
| 5.6.3   | Analytische Berechnung .....                                                                  | 71 |
| 5.7     | Kontaktkräfte mit und ohne Interaktion .....                                                  | 79 |
| 5.8     | Zusammenfassung .....                                                                         | 81 |
| 6       | Ermittlung der Fourier Koeffizienten der Kontaktkräfte .....                                  | 82 |
| 6.1     | Fourier-Analyse .....                                                                         | 82 |

---

|       |                                                                                                       |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2   | Fourier-Koeffizienten ohne Interaktion.....                                                           | 86  |
| 6.3   | Fourier-Koeffizienten mit Interaktion.....                                                            | 90  |
| 6.3.1 | Korrelationsstudien .....                                                                             | 90  |
| 6.3.2 | Entwicklung von Ansätzen zur Berücksichtigung der Interaktion .....                                   | 96  |
| 6.3.3 | Anwendung der Ansätze zur Berücksichtigung der Interaktion zur verbesserten Schwingungsprognose ..... | 103 |
| 6.4   | Zusammenfassung.....                                                                                  | 107 |
| 7     | Mehr-Körper-Simulations-Modell des Menschen .....                                                     | 109 |
| 7.1   | Entwicklung eines Mehr-Körper-Simulation-Modells des Menschen.....                                    | 109 |
| 7.2   | Optimierung des Modells.....                                                                          | 118 |
| 7.3   | Zusammenfassung.....                                                                                  | 121 |
| 8     | Zusammenfassung .....                                                                                 | 124 |
| 9     | Fazit .....                                                                                           | 127 |
| 10    | Ausblick.....                                                                                         | 128 |
| A     | Anhang .....                                                                                          | 131 |
| A.1.  | Pläne der untersuchten Fußgängerbrücke .....                                                          | 131 |
|       | Abbildungsverzeichnis.....                                                                            | 136 |
|       | Tabellenverzeichnis.....                                                                              | 141 |
|       | Literaturverzeichnis .....                                                                            | 142 |