

Dynamische Tragwerksanalyse von Fußgängerbrücken mit unscharfen Parametern

Marc Fina, Maximilian Schweizer, Werner Wagner, Steffen Freitag

Institut für Baustatik, Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird eine adäquate Unschärfequantifizierung zur Modellierung von fußgängerinduzierten Schwingungen vorgestellt. Die Berücksichtigung der Unschärfe ermöglicht eine Neubewertung des Komforts von Fußgängerbrücken, mit dem Ziel die Robustheit und die Ressourceneffizienz der Brückenkonstruktionen zu erhöhen. Das Vorgehen wird an einem 3D-Finite-Elemente-Modell einer bestehenden Fußgängerbrücke demonstriert.

1 Einleitung

Das Streben nach erhöhter Materialersparnis bei Fußgängerbrücken führt zu immer schlankeren und leichteren Bauweisen. Allerdings wird dadurch die Sensitivität gegenüber menscheninduzierten Schwingungen erhöht und der Komfort für Fußgänger maßgeblich beeinflusst. Eine unzureichende Beachtung dieser Schwingungen kann zu einem nachträglichen Einbau von Dämpfersystemen und damit zu erheblichen finanziellen Mehrkosten führen. Faktoren wie z.B. Geschlecht, Alter und Körpergewicht eines Fußgängers haben einen großen Einfluss auf dessen Gangart. Die Anwendung von deterministischen Fußgänger-Lastmodellen erfordert die Kenntnis der einzelnen Parameter. Diese hängen von den genannten und vielen weiteren Faktoren ab. Oftmals sind hierzu keine ausreichenden Daten vorhanden.

In der Baupraxis werden für die Bemessung vereinfachte harmonische Lastmodelle für Einzellasten, Fußgängergruppen und Fußgängerströme angewendet, was zu einer konservativen Auslegung führt. Im Anhang der Entwurfsrichtlinie DIN EN 1990 [18] werden durch begrenzte Beschleunigungen in vertikaler und horizontaler Richtung Komfortkategorien (CL) für Fußgänger definiert. Allerdings wird darin angemerkt, dass die Höhe des Komforts von unterschiedlichen Faktoren abhängt, wie z.B. dem Standort der Brücke, der Höhe des Bauwerks, der Beschaffenheit der Lauffläche und der Erwartung von Schwingungen aufgrund des Erscheinungsbilds der Brücke. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass Menschen unterschiedliche Empfindungen und Toleranzen gegenüber Schwingungen aufweisen. Insgesamt kann die Wahrnehmung von Schwingungen eine hochindividuelle

Angelegenheit sein. Deshalb ist eine Angabe von starren Komfortkategorien mit deterministischen („scharfen“) Grenzwerten beispielsweise für die Beschleunigung widersprüchlich. In diesem Beitrag wird daher eine adäquate Unschärfequantifizierung zur Modellierung von fußgängerinduzierten Schwingungen vorgestellt. Hierfür wird das Konzept der polymorphen Unschärfemodellierung [13] angewendet. Das Attribut „polymorph“ beschreibt in diesem Konzept die Zusammenfassung verschiedener Unschärfemodelle, d.h. die Basismodelle Zufallsvariable, Intervallvariable und Fuzzy-Variable sowie Kombinationen dieser Basismodelle, um die natürliche Variabilität (aleatorische Unschärfe), die Unvollständigkeit und Ungenauigkeit (epistemische Unschärfe) der Daten zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine angemessene Unschärfequantifizierung basierend auf verfügbaren Informationen, ohne eine Präzision zu suggerieren. In der Forschung werden polymorphe Unschärfemodelle für verschiedene Problemstellungen des Bauwesens bereits erfolgreich eingesetzt. Einige Anwendungsbeispiele finden sich z.B. in der Strukturmechanik [13, 26], bei der Stabilität von Tragwerken [6, 8, 9, 10] und bei der Tragwerksoptimierung [7, 12] sowie viele weitere.

In diesem Beitrag wird das Konzept der polymorphen Unschärfe an einer bestehenden Fußgängerbrücke demonstriert, die mit einem 3D-Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) simuliert wird. Dabei werden die Strukturparameter und ein Lastmodell basierend auf einer Fourier-Reihe mit verschiedenen Unschärfemodellen beschrieben. Die unscharfen Ergebnisgrößen, z.B. die Beschleunigungen, werden innerhalb der Komfortklassen der Entwurfsrichtlinien ausgewertet. Die Berücksichtigung der Unschärfe soll eine Neubewertung des Komforts von Fußgängerbrücken ermöglichen mit dem Ziel, die Robustheit und die Ressourceneffizienz der Brückenkonstruktion zu erhöhen.

2 Modellierung menscheninduzierter Lasten

2.1 Deterministische und (semi-)probabilistische Lastmodelle

In der Bemessungsrichtlinie DIN EN 1991-2 [19] sind verschiedene dynamische Lastmodelle für Fußgängerbrücken angegeben.

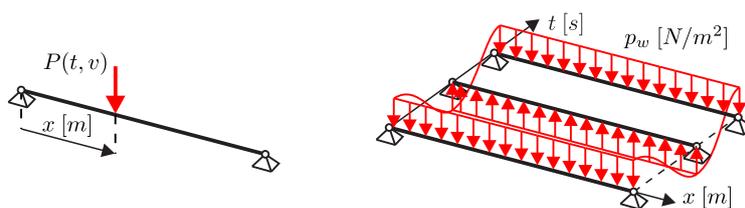


Abbildung 1: Lastmodelle für einzelne Fußgänger oder eine Fußgängergruppe (links) und einen Fußgängerstrom (rechts) nach DIN EN 1991-2 [19]

Einzelne Fußgänger oder Fußgängergruppen werden als Einzellast und ein Fußgängerstrom als Streckenlast modelliert, siehe Abb. 1. Beispielsweise wird die gleichmäßig harmonische Last $p_w(t)$ [N/m²] für einen Fußgängerstrom in [19] als Kosinusfunktion angegeben

$$p_w(t) = P_w \cdot \cos(2\pi \cdot f_s \cdot t) \cdot n' \cdot \psi_w \text{ [N/m}^2\text{]}. \quad (1)$$

Darin ist $P_w \cdot \cos(2\pi \cdot f_s \cdot t)$ die harmonische Last infolge eines einzelnen Fußgängers mit einer Schrittfrequenz f_s beim Gehen, n' ist die äquivalente Anzahl von Fußgängern auf der belasteten Oberfläche, und ψ_w ist ein Abminderungskoeffizient mit dem berücksichtigt wird, dass mit einer Wahrscheinlichkeit die Schrittfrequenz (Gehen) den kritischen Bereich der betrachteten Eigenfrequenzen der Brücke erreicht. Durch diese Vereinfachung werden die Fußgänger nicht als separate, unabhängige Belastungen betrachtet, sondern als verschmierte Ersatzbelastungen. In den Lastmodellen werden deterministische Größen mit konservativen Annahmen definiert, sodass Resonanzeffekte vermieden werden.

Mit dem Ziel die Fußgängerlasten präziser zu beschreiben, werden in zahlreichen Forschungsarbeiten Versuche zur Gangart eines Fußgängers durchgeführt. Während des Gehens erzeugt ein Fußgänger eine dynamische, zeitabhängige Kraft, die Komponenten in alle drei Richtungen aufweist: vertikal, lateral und longitudinal [2]. Die vertikale Komponente gilt aufgrund ihrer höheren Amplitude als maßgebend. Die vertikalen Last-Zeit-Verläufe von drei aufeinanderfolgenden Schritten und deren Überlagerung sind beispielhaft in Abb. 2 dargestellt. Der Abstand und die zeitliche Verzögerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schritten entsprechen der Schrittweite l_s und der Schrittdauer T_s .

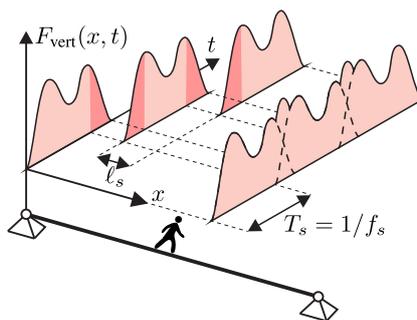


Abbildung 2: Eine Darstellung menscheninduzierter Lasten

Die induzierten Lasten sind näherungsweise periodisch. Deshalb kann die gesamte dynamische Last, z.B. für die vertikale Komponente, mit der Fourier-Reihe

$$F_{\text{vert}}(t) = G \cdot \left(1 + \sum_i^n DLF_i \sin(2\pi \cdot i \cdot f_s \cdot t - \varphi_i) \right) \quad (2)$$

dargestellt werden. In Gl. (2) repräsentiert G das Gewicht des Fußgängers, f_s die Schrittfrequenz, DLF_i die Fourier-Koeffizienten (auch dynamische Lastfaktoren (DLF'n) genannt) und φ_i den Phasenverschiebungswinkel der i -ten harmonischen Schwingung. Zur Darstellung eines Last-Zeit-Verlaufs, wie in Abb. 2, werden nicht alle Fourier-Koeffizienten (DLF'n) benötigt. Oftmals sind wenige Harmonische ausreichend. Diese werden in einigen Forschungsarbeiten in Abhängigkeit der Schrittfrequenz f_s angegeben. Insbesondere der erste Koeffizient DLF_1 weist eine starke Korrelation mit der Schrittfrequenz f_s auf. Verschiedene Last-Zeit-Funktionen auf Basis einer Fourier-Reihe, die durch Verwendung der gegebenen DLF_i - f_s -Funktionen in [1, 5, 15, 24, 27, 14] resultieren, sind in Abb. 3 für eine Schrittfrequenz von $f_s = 2,0 \text{ Hz}$ dargestellt. In Abb. 3 ist eine große Variation der DLF'n zu beobachten.

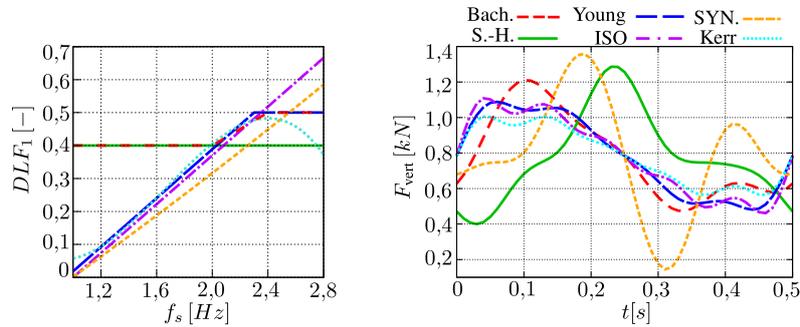


Abbildung 3: Dynamischer Lastfaktor DLF_1 (links) und zugehörige Fourier-Reihen (rechts) für die Last F_{vert} verschiedener Modelle, ausgewertet für eine Schrittfrequenz $f_s = 2,0 \text{ Hz}$ und einem Körpergewicht $G = 0,8 \text{ kN}$

Welche Fourier-Reihe am besten geeignet ist, ist nicht eindeutig. Deshalb ist die Definition eines deterministischen Modells für unterschiedliche Gangarten nicht zielführend.

2.2 Lastmodell für Fußgänger mit unscharfen Parametern

Ein Vorschlag für einen probabilistischen Ansatz ist z.B. in [15] gegeben. Hier werden die DLF 'n auf Basis von 40 Testpersonen als Zufallsvariablen definiert. Oftmals werden Normalverteilungen angenommen und von verschiedenen Autoren werden unterschiedliche Verteilungsparameter angegeben. Die Ungewissheit über die Art der Verteilung und der dazugehörigen Parameter erschwert eine probabilistische Modellierung von Fußgängerlasten. Im vorliegenden Beitrag wird das Ziel verfolgt, diese Ungewissheiten mit polymorphen Unschärfemodellen zu quantifizieren. Das Vorgehen zu einem Lastmodell für Fußgänger mit unscharfen Parametern ist in Abb. 4 dargestellt.

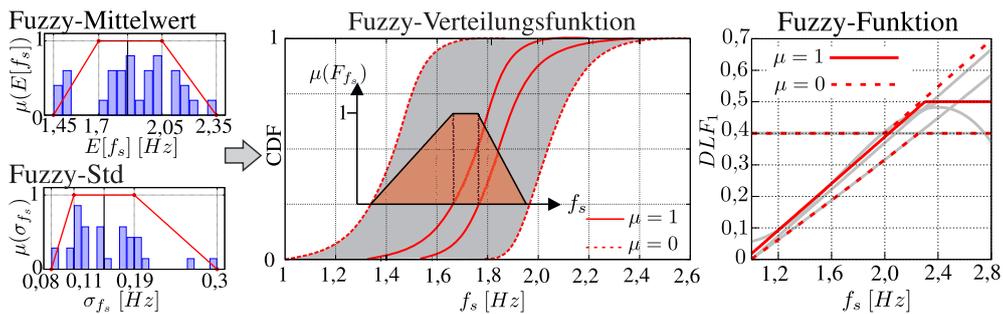


Abbildung 4: Der Weg zu einem Lastmodell für Fußgänger mit unscharfen Parametern

Zuerst werden aus verschiedenen Quellen [3, 4, 16, 17, 20, 21, 22, 28] die Verteilungsparameter der Schrittfrequenz zusammengestellt. Die angegebenen Mittelwerte und Standardabweichungen (Std) werden auf Basis einer Histogramm-Darstellung als Fuzzy-Variablen definiert. Der Vorteil einer Fuzzy-Variable ist, dass die Daten mit einer Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$

bewertet werden können. Das Ergebnis ist eine Fuzzy-Verteilungsfunktion der Schrittfrequenz, siehe Abb. 4. Dieses Unschärfemodell wird in [13] Fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierte Zufallsvariable (fp-r) genannt. Zusätzlich werden die Funktionen der dynamischen Lastfaktoren für unterschiedliche Modelle aus Abb. 3 in Abhängigkeit der Schrittfrequenz als Fuzzy-Funktion quantifiziert.

3 Beispiel einer Fußgängerbrücke aus der Baupraxis

Das Lastmodell für Fußgänger mit unscharfen Parametern wird an einem 3D-FE-Modell des „Jägerstegs“ über die A8 bei Wurmberg demonstriert, siehe Abb. 5.



Abbildung 5: Jägersteg über die A8 bei Wurmberg

Die Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von 50 m ist als Verbundträger mit einer Betonplatte und einer Fachwerkkonstruktion aus verschweißten Stahlrundrohren ausgeführt. Das FE-Modell in FEAP [25] besteht aus insgesamt 1119 Knoten und 914 Elementen. Dabei werden Schalenelemente für die leicht gekrümmte Fahrbahn und 3D-Bernoulli-Balken-Elemente für die Fachwerkkonstruktion verwendet. Das FE-Modell, der Querschnitt und die ersten drei Eigenformen sind in Abb. 6 dargestellt.

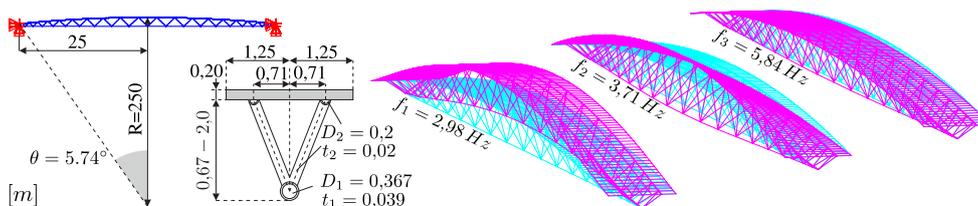


Abbildung 6: FE-Modell, Querschnitt und erste drei Eigenformen der Fußgängerbrücke

Für die Fußgänger-Modellierung wird die Lauffläche in drei Bahnen eingeteilt, die zufällig von den Fußgängern ausgewählt werden können. Insgesamt wird ein Fußgängerstrom mit 40 Fußgängern als Einzellasten modelliert. Die dynamische Analyse wird mit dem Newmark-Verfahren durchgeführt. Die Schrittfrequenz f_s wird als fp-r-Variable und die dynamischen Lastfaktoren als Fuzzy-Funktion modelliert, siehe Abb. 4. Die Materialparameter wie E-Modul und Dichte von Stahl und Beton werden als Gauß-Zufallsvariablen definiert mit den Mittelwerten $E[E_c] = 34000 \text{ MN/m}^2$, $E[E_s] = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ und $E[\rho_c] = 2,5 \text{ t/m}^3$, $E[\rho_s] = 7,85 \text{ t/m}^3$. Der Variationskoeffizient beträgt 10% für den E-Modul und 5% für die Dichte, siehe [23]. Die Dämpfung wird auf Basis von [5] als Fuzzy-Variable

$\tilde{\xi} = \langle 0,003 \ 0,006 \ 0,006 \rangle$ definiert. Das Körpergewicht für männliche (m) und weibliche (w) Fußgänger wird ebenfalls als Gauß-Zufallsvariable definiert. Hierfür ist in [11] jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung angegeben: $E[G_w] = 71,4 \text{ kg}$, $\sigma_{G_w} = 15,1 \text{ kg}$ und $E[G_m] = 87,0 \text{ kg}$, $\sigma_{G_m} = 15,0 \text{ kg}$. Für die Unschärfemodellierung werden Ersatzmodelle aufgestellt und eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Als unscharfe Ergebnisgröße wird der Fuzzy-95%-Quantilwert der maximalen vertikalen Beschleunigung berechnet, siehe Abb. 7.

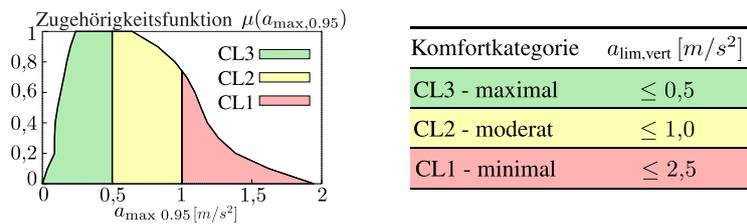


Abbildung 7: Fuzzy-95%-Quantilwert der maximalen Beschleunigung als unscharfe Ergebnisgröße (links) und die Definition der Komfortkategorien nach [18] (rechts)

Zusätzlich sind in Abb. 7 die Komfortkategorien nach [18] angegeben mit denen die Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Ergebnisgröße eingeteilt wird. Beispielsweise sind Beschleunigungen im Bereich des minimalen Komforts (CL1) vorhanden. Allerdings haben diese Beschleunigungswerte eine geringe Zugehörigkeit. Diese Darstellung der Unschärfe im Ergebnis ermöglicht eine Neubewertung des Komforts von Fußgängerbrücken.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird das Konzept der polymorphen Unschärfemodellierung an einem 3D-FE-Modell einer Fußgängerbrücke demonstriert. Das Lastmodell für Fußgänger basierend auf einer Fourier-Reihe wird mit unscharfen Parametern erweitert. Die unscharfen Ergebnisgrößen können innerhalb der Komfortklassen der Entwurfsrichtlinien ausgewertet werden. Das Ziel ist ein Umdenken einzuleiten, weg von einer deterministischen Modellierung hin zu einer Modellierung, bei der von Beginn an die Unschärfen mit passenden Modellen quantifiziert werden. Weitere Forschungsmöglichkeiten sind die Anwendung des Konzepts auf weitere Verkehrslastmodelle und die Berücksichtigung der Unschärfe bei der Optimierung von Brückenbauwerken.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts (Projektnummer 511267658) und Herrn Dr.-Ing. Slobodan Kasic (Harrer Ingenieure, Karlsruhe) für die Bereitstellung der Pläne der untersuchten Fußgängerbrücke.

Literatur

- [1] BACHMANN, H. : Schwingungsprobleme bei Fußgängerbauwerken. In: *Bauingenieur* 63 (1988), S. 67–75
- [2] BACHMANN, H. ; AMMANN, W. : *Vibration in Structures - Induced by Man and Machines*. Structural Engineering Documents 3e, International Association of Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zürich, 1987
- [3] BUTZ, E. : *Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen*, RWTH Aachen, Diss., 2006
- [4] EUROPEAN COAL AND STEEL COMMUNITY (ECSC): *Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and publicbuilding and gymnastic halls*. European Commission – Technical Steel Research, 2006
- [5] FELDMANN, M. ; HEINEMEYER, C. ; BUTZ, C. ; EUROPÄISCHE KOMMISSION, G. F. u. I. (Hrsg.): *Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges (SYNPEX)*. Publications Office, 2009
- [6] FINA, M. : *Polymorphe Unschärfemodellierung in der nichtlinearen Strukturmechanik – Stabilität von Schalentragwerken, räumliche Variabilität und Metamodellierung*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2020
- [7] FINA, M. ; LAUFF, C. ; WAGNER, W. : Optimal shell design with polymorphic uncertain parameters. In: BEER, M. (Hrsg.) ; ZIO, E. (Hrsg.) ; PHOON, K.-K. (Hrsg.) ; AYYUB, B. (Hrsg.): *Proc. 8th Int. Symposium on Reliability Engineering and Risk Management*. Sept. 4-7, 2022, Hannover : Research Publishing, 2022
- [8] FINA, M. ; PANTHER, L. ; WEBER, P. ; WAGNER, W. : Shell buckling with polymorphic uncertain surface imperfections and sensitivity analysis. In: *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mech. Eng.* 7 (2021), Nr. 2
- [9] FINA, M. ; WAGNER, W. ; GRAF, W. : On polymorphic uncertainty modeling in shell buckling. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 38 (2023), Nr. 18, S. 2632–2647
- [10] FINA, M. ; WEBER, P. ; WAGNER, W. : Polymorphic uncertainty modeling for the simulation of geometric imperfections in probabilistic design of cylindrical shells. In: *Structural Safety* 82, 101894 (2020)
- [11] FISCHER, B. ; SEDLMEIER, A. M. ; ET AL.: Anthropometrische Messungen in der NAKO Gesundheitsstudie – mehr als nur Größe und Gewicht. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 63 (2020), Nr. 3, S. 290–300
- [12] FREITAG, S. ; PETERS, S. ; EDLER, P. ; MESCHKE, G. : Reliability-based optimization of structural topologies using artificial neural networks. In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 70, 103356 (2022)
- [13] GRAF, W. ; GÖTZ, M. ; KALISKE, M. : Analysis of dynamical processes under consideration of polymorphic uncertainty. In: *Structural Safety* 52 (2015), S. 194–201

- [14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. 2007
- [15] KERR, C. S.: *Human Induced Loading on Staircases*, University of London, Mechanical Engineering Department, Diss., 1998
- [16] KRAMER, H. ; KEBE, H. W.: Durch Menschen erzeugte Bauwerksschwingungen. In: *Bauingenieur* 54 (1979), S. 195–199
- [17] MATSUMOTO, Y. ; SATO, S. ; NISHIOKA, T. ; SHIOJIRI, H. : A study on dynamic design of pedestrian over-bridges. In: *Transactions of the Japan Society of Civil Engineering (JSCE)* (1972), Nr. 4, S. 50–51
- [18] NABAU: *Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung, prEN 1990:2021*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021
- [19] NABAU: *Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, prEN 1991-2:2021*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021
- [20] PACHI, A. ; JI, T. : Frequency and velocity of people walking. In: *The Structural Engineer* 83 (2005), Nr. 3, S. 36–40
- [21] PETERSEN, C. ; WERKLE, H. : *Dynamik der Baukonstruktionen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- [22] SAHNACI, C. : *Menscheninduzierte Einwirkungen auf Tragwerke infolge der Lokomotionsformen Gehen und Rennen: Analyse und Modellierung*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2013
- [23] SCHUËLLER, G. : On the treatment of uncertainties in structural mechanics and analysis. In: *Computers & Structures* 85 (2007), Nr. 5–6, S. 235–243
- [24] SEILER, C. ; HÜTTNER, S. : Ein einheitliches Modell zur Beschreibung von Fußgängerlasten für verschiedene Bewegungsarten - Theorie, experimentelle Messungen und praktische Anwendung. In: *Bauingenieur* 79 (2004), S. 783–496
- [25] TAYLOR, R. : *FEAP*. <http://www.ce.berkeley.edu/projects/feap/>, 2024
- [26] WEBER, P. ; FINA, M. ; WAGNER, W. : Time domain simulation of earthquake excited buildings using a fuzzy stochastic approach. In: BEER, M. (Hrsg.) ; ZIO, E. (Hrsg.): *Proc. 29th European Safety and Reliability Conference*. Sept. 22-26, Hannover, 2019
- [27] YOUNG, P. : *Improved floor vibration prediction methodologies*. ARUP Vibration Seminar, 2001
- [28] ZIVANOVIC, S. : *Probability-Based Estimation of Vibration for Pedestrian Structures due to Walking*, University of Sheffield, Diss., 2006