

Ersatzmodellierung fußgängerinduzierter Lasten bei Seilbrücken mittels künstlicher neuronaler Netze

Felix Mols

1. Motivation und Ziel

Filigrane Fußgängerbrücken sind im Allgemeinen schwingungsanfällige Konstruktionen. Der Stand der Technik ermöglicht die Untersuchung von fußgängerinduzierten Lasten durch numerische Methoden und realitätsnahe Lastannahmen. Die Bandbreite der wählbaren Parameter und Modelle ist allerdings groß. Soll die Unschärfe berücksichtigt werden, z.B. im Rahmen einer stochastischen Bemessung, führt dies zu einem stark erhöhten Rechenaufwand [2]. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Ersatzmodell zu entwickeln, das sich wiederholt schnell auswerten lässt. Dazu wird ein Regressionsmodell mit einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) aufgebaut.

2. Strategie der Ersatzmodellierung

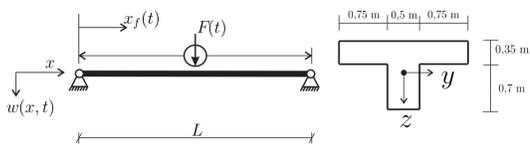


Abbildung 1: Einfeldträger unter harmonischer Wanderlast

Als Brückenmodell wird zunächst ein Einfeldträger verwendet, wofür eine analytische Lösung vorhanden ist. Der Übergang eines Fußgängers kann als bewegliche und oszillierende Einzellast abgebildet werden. Hierfür wird ein Fourier-Reihen-Ansatz nach ISO-10137 [3] gemacht:

$$F_F = P \left(1 + \sum_{i=1}^5 DLF_i \sin(\Omega t_i) \right)$$

$$DLF_i = \begin{cases} 0.37 \left(\frac{\Omega}{2\pi} - 1 \right) & \text{für } i = 1 \\ 0.1 & \text{für } i = 2 \\ 0.06 & \text{sonst} \end{cases}$$

Damit ist es möglich, die Bewegungsgleichung der balkenartigen Struktur entweder numerisch oder analytisch zu lösen. Aufbauend auf diesen Lösungen wird ein Modell erzeugt, mit dem die Schwingungsantwort der Struktur aus dem Eingangssignal berechnet werden kann. Nach der Fouriertransformation (DFT) und Normierung der Zeitreihen in den Spektralbereich werden Datenpaare aus der Schrittfrequenz $\Omega_{i,\text{Fußgänger}}$ und dem Spektrum $w(\omega)_{i,\text{Fußgänger}}$ erzeugt. Auf Grundlage dieser Datenpaare kann das Netz trainiert werden, sodass einem $\Omega_{i,\text{Fußgänger}}$ die korrespondierende Schwingungsantwort $w(\omega)_{i,\text{Fußgänger}}$ zugeordnet werden kann. Durch eine inverse Fouriertransformation (iDFT) wird abschließend der Zeitverlauf der Schwingung ermittelt.

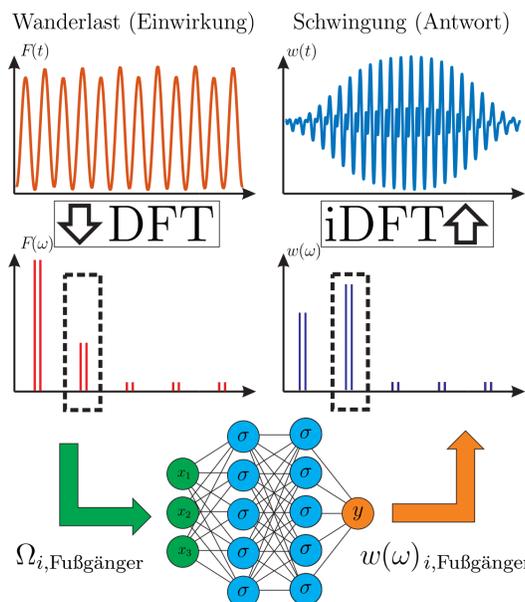


Abbildung 2: Schematisches Vorgehen bei der Ersatzmodellierung

3. Anwendung: Monte-Carlo-Simulation (MCS)

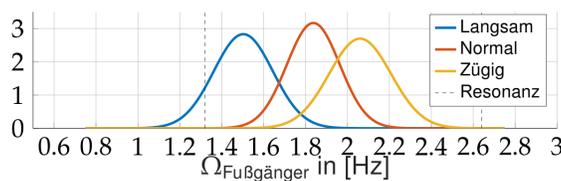


Abbildung 3: Normalverteilung der Schrittfrequenzen nach Gehabsicht [1]

Wird die Zufallsverteilung der Schrittfrequenzen im Modell berücksichtigt, ist eine MCS erforderlich. In diesem Beispiel ist die Häufigkeitsverteilung der maximalen Beschleunigung in Feldmitte gesucht. Der Balken hat eine Länge von 25 m und damit eine Eigenfrequenz von 2,64 Hz. Der Stichprobenumfang wird auf 1000 festgelegt. Für das Training des KNNs werden 450 Samples verwendet. Der Vergleich der kumulierten Wahrscheinlichkeit zeigt, dass das KNN eine gute Approximation liefert, bei einem Bruchteil des Rechenaufwands. Lediglich im Resonanzbereich existieren Abweichungen. Die Auswertung des 95 % Quantils liefert für die verschiedenen Gehabsichten ein a_{max} von 0,71, 0,26 und 0,60 m/s^2 , beziehungsweise 0,77, 0,25 und 0,58 m/s^2 . Damit kann eine Einstufung des Komfort nach dem kommenden Eurocode 0 vorgenommen werden.

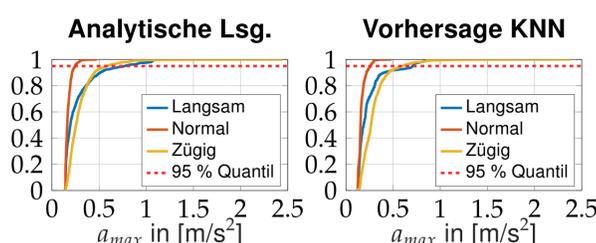


Abbildung 4: Vergleich der kumulierten Wahrscheinlichkeit der maximalen Beschleunigung

4. Baupraktisches Beispiel

Die Methode wird an einer Fußgänger-Seilbrücke erprobt. Die nichtlinearen Bewegungsgleichungen werden im Rahmen des Newmark-Verfahrens gelöst. Das KNN wird mit 470 verschiedenen Schrittfrequenzen $\Omega_{\text{Fußgänger}}$ trainiert. Die beschriebene Strategie wurde angewendet, um ein Ersatzmodell zu erzeugen, das die Beschleunigung an einem Knoten approximieren kann. In Abb. 6 sind die FEM-Lösung, die fürs Training aufbereiteten Daten und die KNN-Vorhersage für einen Übergang mit $\Omega_{\text{Fußgänger}} = 1,98 \text{ Hz}$ gegenübergestellt. Eine MCS mit dem KNN, um die Häufigkeiten a_{max} zu ermitteln, benötigt wenige Minuten anstelle von mehreren Tagen, obwohl der Stichprobenumfang bei 5000 Samples liegt.

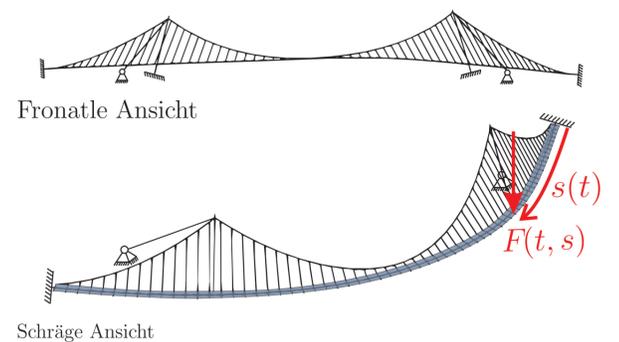


Abbildung 5: Gekrümmte Fußgänger-Seilbrücke mit Wanderlast

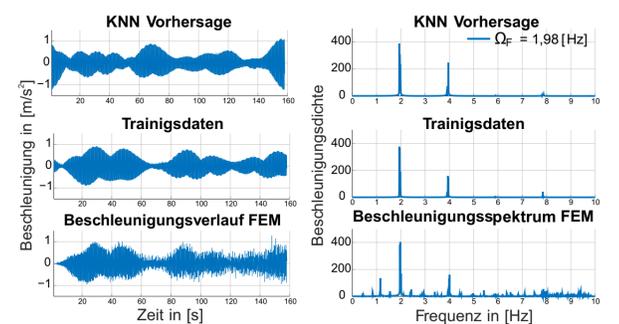


Abbildung 6: Vergleich von Spektrum und Verlauf der Schwingungsantwort

Die vorhergesagte Beschleunigung (vgl. Abb. 6) weicht im Verlauf ab, weil die zugehörigen Phasenwinkel nicht genau genug approximiert werden können. Schwingungsenergie und Extremwerte der Schwingung können allerdings zuverlässig vorhergesagt werden, weil die Amplituden insgesamt besser approximiert werden können.

Literatur

- [1] Butz, E. C.: *Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen Shaker, Aachen, 2006.
- [2] Schweizer, M. / Fina, M. / Wagner, W. / Kasic, S. / Freitag, S.: *Uncertain pedestrian load modeling for structural vibration assessment in footbridge design*. Engineering Structures 311 (2024), p. Art.-Nr.: 118070.
- [3] Technical Committee, ISO/TC 98: *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. International Organization for Standardization, 2007.