

Problemstellungen der menscheninduzierten Einwirkungen auf Tragwerke in der Praxis: Lastansätze und Bewertungskriterien

Nouman Elias¹, Hamid Sadegh-Azar¹, Frank Klimaszyk²

¹Lehrstuhl Statik und Dynamik der Tragwerke - RPTU Kaiserslautern

²bwp Burggraf + Weber Beratende Ingenieure GmbH, München

Zusammenfassung: Menscheninduzierte Schwingungen von Baustrukturen sind kein neues Phänomen, gewinnen aber mit steigenden Anforderungen an Bedeutung. Schlanke und filigrane Konstruktionen können durch den Menschen angeregt und in ihrer Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt werden. Eine konservative Auslegung erfordert erhöhten Aufwand und treibt die Kosten in die Höhe. Dieser Beitrag regt eine Diskussion über die grundlegende Methodik zur Untersuchung von menscheninduzierten Schwingungen an. Darüber hinaus wird ein kurzer Überblick über aktuelle Lastansätze und geltende Anhaltswerte gegeben. Die reine Berechnung dynamischer Parameter zur Bestimmung der Schwingungsanfälligkeit ist mit vielen Unsicherheiten verbunden, die eine genaue Vorhersage der Schwingungsamplituden in der Praxis erschweren.

1 Einführung

Die zunehmende Verwendung filigraner, schlanker und weitgespannter Bauweisen sowie ressourcenschonender und innovativer Materialien hat zu erhöhter Anfälligkeit von Bauwerken und Strukturen für Schwingungen geführt. Besonders bei weitgespannten Konstruktionen, wie Stadien, Schulen, Sporthallen und Fußgängerbrücken, ist die Beurteilung des Schwingungsverhaltens ein wichtiger Bestandteil der Auslegung. Menscheninduzierte Schwingungen können die Wahrnehmungsschwelle überschreiten, das Wohlbefinden negativ beeinflussen oder sogar Panik auslösen und damit die Gebrauchstauglichkeit und sogar die Tragsicherheit beeinträchtigen. Konservative Bemessungsansätze führen oft zu hohen konstruktiven Anforderungen und Kostensteigerungen. In diesem Beitrag werden realistische Lastansätze, Berechnungs- und Bewertungsmethoden zur effizienten Beurteilung von Schwingungen in weitgespannten Strukturen diskutiert, um eine effektive und kosteneffiziente Auslegung zu ermöglichen und eventuell notwendige nachträgliche Bauwerksertüchtigungen zu vermeiden.

Häufig werden bei der dynamischen Auslegung gegen menscheninduzierte Schwingungen sehr konservative Annahmen getroffen, die in der Realität nicht oder nur selten auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die VDI 2038-1 [1], die für den Lastfall Springen im Fitnessbereich eine Personendichte von 0,25-0,5 Pers/m² angibt. Diese Angabe führt in vielen Fällen, insbesondere bei der Auslegung von Großsporthallen, zu unrealistischen Annahmen von sehr großen und synchron hüpfenden Menschenmassen. Darüber hinaus können bei der Berechnung infolge konservativ angenommener niedriger Dämpfung und geringer Steifigkeit (aufgrund von beispielsweise Rissbildungen im Beton im Zustand II) sehr hohe Amplituden ermittelt werden, die jedoch nur durch aufwendige und kostenintensive Maßnahmen wie Versteifungen oder Schwingungstilger in den Griff zu bekommen sind. Die Konservativität der Annahmen resultiert aus den Unsicherheiten bezüglich der einwirkenden Lasten sowie den schwer abschätzbaren dynamischen Eigenschaften der Baustrukturen. In der Regel wird nach Fertigstellung des Bauwerks, oft noch im Rohbauzustand, ein Anregungsversuch durchgeführt. Dabei versuchen meist ungeschulte Personen, das Bauwerk synchron anzuregen, um es in Schwingung zu versetzen. Die realen Einwirkungen, die später durchtrainierte bzw. hoch motiviertes Personal wie beispielsweise Tanz- und Aerobic-Gruppen oder Fußballfans mit Trommeln entstehen, werden bei solchen Schwingungsversuchen nicht berücksichtigt.

2 Untersuchung von menscheninduzierten Schwingungen

2.1 Berechnungsmethodik in der Praxis

Die Auslegung gegen menscheninduzierte Schwingungen erfordert eine sorgfältige Untersuchung der dynamischen Parameter einer Konstruktion sowie eine Definition der Belastungsszenarien. Im Folgenden wird das Vorgehen bzw. die Berechnungsmethodik in der Praxis zur Untersuchung von menscheninduzierten Schwingungen detailliert erläutert.

Der erste Schritt bei der Auslegung gegen menscheninduzierte Schwingungen ist in der Regel, die dynamischen Parameter der Konstruktion mittels eines FE-Modells numerisch zu berechnen. Dabei werden Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen ermittelt, um das Schwingungsverhalten der Konstruktion zu analysieren. Für eine grobe Abschätzung der Schwingungsamplituden und die grobe Verifikation der komplexen numerischen Berechnungen werden in der Regel Handrechnungen mit vereinfachten Systemen verwendet (äquivalente Einmassenschwinger). Eine numerische Modellierung von ganzen Gebäudeteilen ist jedoch von großer Bedeutung, um wesentliche Einflüsse benachbarter und angrenzender Tragstrukturen einschließlich deren Lasten, Massen, Steifigkeiten und räumliche Effekte nicht zu vernachlässigen.

Nach Abschluss der ersten Berechnung erfolgt die Definition der dynamischen Belastung durch Personen, wobei ein möglichst realistisches, aber gleichzeitig ungünstiges Anregungsszenario ausgewählt wird. Dieses Szenario wird auf der Basis von Erfahrungswerten, Richtlinien oder auch durch Messungen festgelegt. Die Belastung wird dabei von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, beispielsweise die Art des Gebäudes, die Anzahl und Gewichtung der Personen, die Art der Nutzung sowie der Frequenzbereiche der Anregung.

Im nächsten Schritt wird die dynamische Antwort des Systems auf Belastung durch Personen und die zu erwartenden Schwingungsamplituden ermittelt. Diese werden dann anhand von Anhaltswerten nach geltenden Regelwerken wie der VDI 2038-2 [2] oder der ISO 10137 [3]

oder nach individuell mit dem Bauherrn festgelegten Grenzwerten beurteilt. Für die Berechnung der maximalen Schwingungsamplituden ist es sinnvoll, ein Worst-Case-Szenario zu wählen, das über die normale Nutzung hinausgeht, z. B. synchron hüpfende Personen mit einer Dichte von 1 Person pro 1,25 m² gemäß [3]. Um die statische Bemessung auf die maximalen prognostizierten Schwingungsamplituden abzustimmen, wird eine quasistatische Ersatzlast basierend auf den prognostizierten Amplituden berechnet und mit der angenommenen Verkehrslast verglichen. Überschreiten die prognostizierten Schwingungsamplituden die Anhaltswerte, werden Maßnahmen zur Schwingungsminderung untersucht. Dies reichen von geringfügigen konstruktiven Änderungen bis hin zum Einbau von Schwingungstilgern oder kompletten Änderungen des Konstruktionskonzeptes. Stellt sich der Einbau von Schwingungstilgern als geeignete Maßnahme heraus, wird zum einen die Wirksamkeit der Schwingungstilger numerisch nachgewiesen und zum anderen werden die Schwingungstilger in die statische Berechnung einbezogen, um ihre konstruktiven Anschlüsse zu planen. Häufig werden die Tilger erst nach einer Schwingungsmessung vor Ort im Bauendzustand eingebaut, um sie präzise auf die tatsächliche Eigenfrequenz der Konstruktion abzustimmen. Ggf. ist nach dem Einbau der Tilger eine Feinjustierung erforderlich.

Insgesamt erfordert die Auslegung gegen menscheninduzierte Schwingungen eine interdisziplinäre Herangehensweise, die sowohl Kenntnisse im Bereich der Tragwerksplanung als auch der Baudynamik umfasst. Eine frühzeitige Einbindung aller relevanten Fachdisziplinen kann dazu beitragen, Probleme frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Tragfähigkeit zu gewährleisten.

2.2 Berechnungsannahmen für das numerische Strukturmodell

Die Berechnung von Schwingungen erfordert zahlreiche Annahmen, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, da es oft schwierig ist, sie auf der sicheren Seite zu bestimmen. Generell ist zu beobachten, dass bei numerischen Berechnungen häufig Annahmen getroffen werden, die zu einer Unterschätzung der Eigenfrequenz des Systems führen. Dies kann z.B. durch eine geringere Steifigkeit oder höhere Lasten und Massen geschehen, da weichere Strukturen in der Regel leichter angeregt werden können.

2.2.1 Steifigkeit

Die Abschätzung der Steifigkeit ist ein komplexes Thema. Numerische Modelle gehen oft von idealen Materialeigenschaften und perfekten geometrischen Formen aus. In der Realität können jedoch aufgrund von Materialinhomogenitäten, Fertigungstoleranzen oder anderen Faktoren Abweichungen auftreten. So wird z.B. für Stahlbeton in [4], [5] und [6] der dynamische Elastizitätsmodul des Betons für sehr kurze Einwirkungen gegenüber dem mittleren Elastizitätsmodul des Betons E_{cm} um etwa 10% erhöht. Andererseits kann die Steifigkeit der gerissenen Querschnitte, wie sie beim Stahlbeton im Zustand II, deutlich geringer sein. Außerdem wird der in der Norm angegebene Elastizitätsmodul des Betons nicht von vielen Betonwerken garantiert.

2.2.2 Randbedingungen

Die Festlegung der richtigen Randbedingungen für das numerische Modell ist entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse. Oftmals sind jedoch gewisse Unsicherheiten oder Unvollständigkeiten bei den Randbedingungen vorhanden. Bei kleinen Verformungen, wie sie typischerweise bei Deckenschwingungen auftreten, kann die gelenkige Lagerung

aufgrund der geringen Verschiebungen und Verdrehungen nicht wirklich wirksam sein. In solchen Fällen kann es realistischer sein, eine volle Einspannung oder zumindest eine biege- steife Lagerung anzunehmen, um das Tragverhalten der Decke bei Schwingungen genauer abzubilden [5]. Es ist jedoch zu beachten, dass die genaue Modellierung der Rand- bedingungen von der spezifischen Situation und den Eigenschaften der Decke abhängt. In einigen Fällen kann eine gelenkige Lagerung ausreichend sein, während in anderen Fällen eine biegesteife Annahme erforderlich ist. Es ist wichtig, die Randbedingungen entsprechend den technischen Anforderungen angemessen festzulegen.

2.2.3 Lasten & Massen

Die Lasten sind für die Eigenfrequenzberechnung möglichst realistisch anzusetzen und im Gegensatz zur statischen Berechnung möglichst nicht zu überschätzen. Höhere Lasten bzw. Massen verringern einerseits das Verhältnis von Systemantwort zu Anregung, andererseits verringern sie die Eigenfrequenz und erhöhen damit die Anregbarkeit. Ob sich dies günstig oder ungünstig auswirkt, hängt von der Dämpfung und der Eigenfrequenz des Systems ab. Diese Abhängigkeit wird im normierten Beschleunigungsantwortspektrum in Abb. 1 [7] deutlich sichtbar. Eine Verdoppelung der Masse führt bei einem Einmassenschwinger zu einer Reduktion der Eigenfrequenz um den Faktor $1/\sqrt{2}$. Bei einer Dämpfung von 0,5% und einer Eigenfrequenz von 6,5 Hz führt eine Verdoppelung der Masse in etwa zu einer Verdoppelung der Schwingungsamplitude. Bei einer Eigenfrequenz von 4 Hz und einer Dämpfung von 1 % führt eine Verdoppelung der Masse jedoch zu einer Reduzierung der Schwingungs- amplitude auf ca. 70 %. Wichtig ist auch eine realistische Abschätzung der Stahlbetongewichte, die je nach Betonzuschlag und Bewehrungsgehalt deutlich von den üblichen 25 kN/m³ abweichen können.

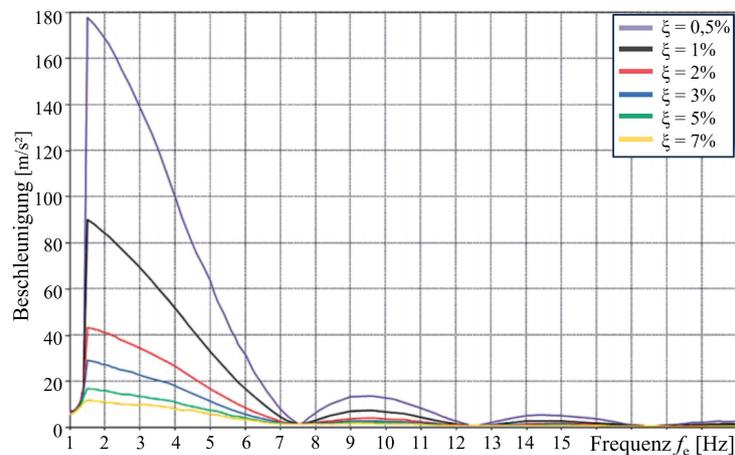


Abbildung 1: Beschleunigungsantwortspektrum: Maximalwerte der zu erwartenden Beschleunigungen der Struktur (Hüpfrequenz $f_p = 1,5$ bis $3,5$ Hz, $t_p = 0,2$ s, $Q = 1$ kN) [7]

Es ist wichtig, die Verkehrslasten realistisch anzusetzen und ggf. mit dem Bauherrn abzu- stimmen. Die Verkehrslast sollte mit einem Faktor von 10 bis 20 % berücksichtigt werden [5], wobei projektspezifische Abweichungen erheblich sein können. Bei leichten Strukturen im Vergleich zur Masse der darauf befindlichen Personen, sollte auch das Gewicht der Personen berücksichtigt werden. Wenn damit zu rechnen ist, dass der Bodenkontakt verloren geht, z. B. beim Hüpfen, ist das Personengewicht entsprechend zu reduzieren.

2.2.4 Dämpfung

Die Dämpfung ist ein essenzieller dynamischer Parameter, der besonders schwer abzuschätzen ist und einen erheblichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten von Strukturen hat. Die Dämpfung wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, u. a. von der Konstruktionsart, dem verwendeten Material, dem Ausbau der Struktur, den abgehängten Decken, den potenziellen Risse im Beton, dem Alter der Struktur, der Art der Auflagerung sowie die Personenanzahl und Nutzung. Zudem kann die Dämpfung auch von der Anregungsfrequenz und den Schwingungsamplituden abhängen, was ihre Variabilität weiter unterstreicht [3].

Aufgrund der Komplexität der Dämpfung ist ihre genaue Bestimmung oft eine Herausforderung. Der Vergleich der Literaturwerte zeigt, wie „umstritten“ sie ist. Ein Extremfall ist der besonders inhomogene Werkstoff Holz. Für diesen wird in [8] ein Dämpfungsgrad ξ von 1-3% angegeben, während der Eurocode 5 [9] der modale Dämpfungsgrad für verschiedene Deckenkonstruktionen von 1-4% vorgibt, nach VDI 2038-2 [2] ist der Dämpfungsgrad für Holzkonstruktionen mit 0,8-5% anzusetzen, während HIVOSS [5] einen mutigen Wert von 6 % angibt. Bei Stahlbeton hat der Grad der Ausprägung der Rissbildung einen erheblichen Einfluss auf die Dämpfung. Nach VDI 2038-2 [2] werden für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit Anhaltswerte für Dämpfungsgrade für ungerissenen Stahlbeton von 0,5 bis 1 % und für gerissenen Stahlbeton von 2,5 bis 5 % angegeben.

3 Lastansätze

Nach Ermittlung der Eigenfrequenz erfolgt die Untersuchung der Schwingungen infolge verschiedener Lastszenarien, beispielweise nach VDI 2038-2 [2]. Es wird empfohlen, zwischen einem häufigen Lastfall mit strenger Beurteilungsgrenze und einem seltenen Lastfall, bei dem höhere Amplituden toleriert werden, zu unterscheiden. Die Anregung der Schwingungen erfolgt bei der für das System ungünstigsten Frequenz. Diese kann entweder die Eigenfrequenz des Systems selbst sein oder bei Anregung in der 2. oder 3. Harmonischen der Hälfte bzw. dem Drittel der Systemfrequenz entsprechen. Die VDI 2038-1 [1] schreibt für verschiedene Bewegungsformen unterschiedliche Personendichten vor. Dies kann bei großflächigen Decken zu sehr hohen, oft unrealistischen Personenzahlen führen. Es empfiehlt sich daher, dies projektspezifisch mit dem Bauherrn abzustimmen.

Trotz umfangreicher Untersuchungen im letzten Jahrzehnt zu Kontaktkräften infolge menschlicher Bewegungen, basieren die Lastansätze nach aktuell geltendem Normen immer noch auf den Untersuchungen von Rainer 1986 [10] und Bachmann 1987 [4], die von einem idealisierten Modell zur Berücksichtigung ganzzahliger Vielfacher der Anregungsfrequenz ausgehen. Die dynamischen Kräfte der periodischen menschlichen Anregung werden mittels Fourier-Reihenentwicklung durch Überlagerung von harmonischen Schwingungen berechnet deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundanregungsfrequenz sind. Die jeweiligen Fourierkoeffizienten α_i können für verschiedene Bewegungsformen aus VDI 2038-1 [1] oder ISO 10137 [3] entnommen werden.

$$F_p(t) = F_G + \sum_i F_G \cdot \alpha_i \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_p \cdot t - \varphi_i) \quad (1)$$

Dabei ist F_G die Gewichtskraft der Person, α_i der Last-Koeffizient in der i -fachen Grundfrequenz, f_p die Grundfrequenz der Personenaktivität und φ_i der Phasenwinkel. Abb. 3 zeigt

den mathematischen Hintergrund der Zusammensetzung der Last aus den einzelnen Fourierkoeffizienten. Die resultierende Hüpflast ergibt sich aus der Überlagerung des statischen Anteils F_G und der harmonischen Komponenten. Je nach Anzahl der beteiligten Personen kann die resultierende Last durch Berücksichtigung der Koordinierbarkeit $C(N)$ nach ISO 10137 [3] reduziert werden.

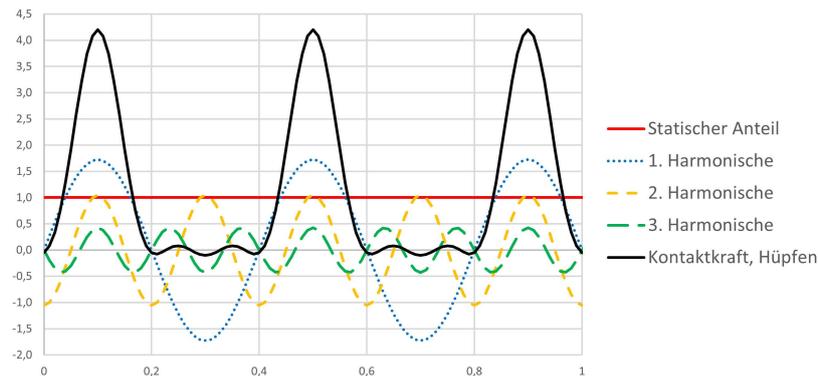


Abbildung 2: Last-Zeit-Funktion einer Hüpfanregung mit Fourier-Zerlegung in 3 Harmonische

Aktuellen Richtlinien gehen vereinfachend von einem sich rhythmisch perfekt bewegenden Menschen aus. Die Interaktion zwischen Mensch und Struktur wird dabei vernachlässigt. Eine Ausnahme bilden die IStructE-Empfehlungen [11] für die Auslegung von Zuschauertribünen, in der die Mensch-Struktur-Interaktion das erste Mal, basierend auf einem Modell publiziert von Dougill [12], Berücksichtigt wird.

Die mangelnde Kenntnis über die tatsächlich auftretenden Belastungen führt zu konservativen Annahmen, die oft zu unwirtschaftlichen Bemessungen mit aufwendigen Maßnahmen zur Schwingungsreduktion führen. Am Fachgebiet Statik und Dynamik der Tragwerke der RPTU Kaiserslautern wird derzeit an einem Ingenieurmodell gearbeitet, das die Mensch-Struktur-Interaktionen erfassen und damit die Aussagegenauigkeit von Schwingungsprognosen deutlich erhöhen soll. Hierbei werden insbesondere Korrelationen zwischen Systemeigenfrequenz, -masse, -dämpfung, Schwingamplitude und die Bewegung des Menschen untersucht.

4 Anhaltswerte

Die Bewertung von menscheninduzierten Schwingungen ist eine komplexe Aufgabe. Neben technischen Aspekten spielen auch soziale und psychologische Faktoren eine wichtige Rolle. Die Schwingungswahrnehmung hängt auch davon ab, ob eine Person aktiv an der Schwingungserzeugung beteiligt ist oder ob sie die Schwingung nur passiv wahrnimmt. Die derzeitige normative Regelung zur Festlegung von Grenzwerten für zulässige Schwingungsamplituden ist aus praktischer Sicht vage formuliert. Die Eurocodes fordern im Rahmen der Gebrauchstauglichkeit die Berücksichtigung von Schwingungen, die den Nutzerkomfort und die Funktionsfähigkeit des Bauwerks einschränken. Der Nationale Anhang zum Eurocode 0 [13] legt jedoch keine Komfortkriterien fest, sondern fordert individuelle Festlegungen in

Abstimmung mit dem Bauherrn. Dies verdeutlicht die Komplexität der Thematik und die Notwendigkeit einer differenzierten Herangehensweise.

Für die Beurteilung der resultierenden Schwingungen bieten die Ansätze in VDI 2038-2 [2] eine wertvolle Orientierung. Anhaltswerte sind z. B. in Tab. 1 für Geschossdecken in öffentlichen Gebäuden oder Gebäuden mit vergleichbarer Nutzung angegeben, wobei der angegebene KB_{Fmax} -Wert eine frequenzbewertete Schwingstärke darstellt. Um in die hohe Komfortklasse eingestuft zu werden, müssen die zulässigen Werte für niederfrequente Strukturen unterhalb der Fühlbarkeitsschwelle liegen, was äußerst strenge Kriterien sind. Eine Schwingbeschleunigung von beispielsweise 34 mm/s^2 bzw. 100 mm/s^2 entspricht bei einer harmonischen Schwingung von 5 Hz einem KB_{Fmax} -Wert von 0,45 bzw. 1,35.

Komfortniveau		Hoher Komfort	Mittlerer Komfort	Geringer Komfort
		$KB_{Fmax} < 0,2$	$0,2 \leq KB_{Fmax} \leq 1,0$	$1,0 \leq KB_{Fmax} \leq 2,5$
Bemessungs-situation GZG	Quasi-ständig zwei Personen laufen synchron im Abstand von 3 m	Sakralbauten, Konzertsäle, Bibliotheken, Kantinen	Flächen mit sehr geringen Anforderungen	Nicht empfohlen
	Häufig vier Personen laufen synchron im Abstand von 3 m	Museen, Kultur- und Mehrzweckräume Schulen, Discotheken	Sakralbauten, Konzertsäle, Bibliotheken, Kantinen	Flächen mit sehr geringen Anforderungen
	Selten Hüpfen von 1 Pers./m ² (verminderte Synchronisation) in 3 m Abstand	Flächen mit sehr hohen Anforderungen	Museen, Kultur- und Mehrzweckräume Schulen, Discotheken	Sakralbauten, Konzertsäle, Bibliotheken, Kantinen

Tabelle 1: Bemessungsszenarien und Komfortanforderungen bei Geschossdecken in öffentlichen oder vergleichbar genutzten Gebäuden [2]

Bei Nichteinhaltung strenger VDI-Werte könnte eine individuelle Absprache mit dem Bauherrn sinnvoll sein. Eine Einigung auf die Wahrnehmungsschwelle für den häufigen Lastfall und auf klar wahrnehmbare, aber nicht störende Amplituden bei dem seltenen Lastfall, kann immense Einsparpotentiale mit sich bringen. Alternativ können überhöhte Schwingungsprognosen realitätsnäher beschrieben werden, etwa durch Einführung einer Einwirkungskategorie, die die erwartete Intensität basierend auf der Nutzung berücksichtigt [13]. Abhängig von der Nutzung können die Bemessungslastfälle modifiziert werden, indem die Personendichte oder die Bewegungsform angepasst wird.

5 Fazit

Es wurde eine grundlegende Methodik zur Untersuchung von menscheninduzierten Schwingungen vorgestellt. Außerdem wurde ein kurzer Überblick über aktuelle Lastansätze und geltende Anhaltswerte gegeben. Die reine Berechnung dynamischer Parameter zur Bestimmung der Schwingungsanfälligkeit ist mit vielen Unsicherheiten verbunden, wodurch genaue Vorhersagen der Schwingungsamplituden in der Praxis schwierig sind. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit genauen Untersuchungen und neuen Ansätzen im Bereich der menscheninduzierten Erschütterungen.

Literatur

- [1] VDI 2038-1 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen. Ausgabe 2012.
- [2] VDI 2038-2 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen. Ausgabe 2013.
- [3] ISO 10137 Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Ausgabe 2007.
- [4] *Bachmann, H.; Ammann, W.* Schwingungsprobleme bei Bauwerken - Durch Menschen u. Maschinen induzierte Schwingungen, Structural engineering documents, Internat. Vereinigung für Brückenbau u. Hochbau, Zürich, 1987.
- [5] *Feldmann, M.; Heinemeyer, C.; Lukić, M. et al.* Hivoss - Human Induced Vibration of Steel Structures - Schwingungsbemessung von Decken - Leitfaden, 2008.
- [6] DIN EN 1998-1 Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. Ausgabe Dezember 2010.
- [7] *Sadegh-Azar, H.; Wörndle, P.* Menscheninduzierte Schwingungen: Methoden, Ansätze und Beispiele zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken. *In: Bautechnik* 89 (2012), Heft 7, S. 451-462.
- [8] *Müller, F.P.* Baudynamik, Betonkalender 1978. Ernst & Sohn, Berlin, 1978.
- [9] *Lißner, K.; Rug, W.* Der Eurocode 5 für Deutschland - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Kommentierte Fassung. Deutsches Institut für Normung. Ernst, Wilhelm & Sohn, Berlin, 2016.
- [10] *Rainer, J.H.; Pernica, G.* Vertical dynamic forces from footsteps. *In: Canadian Acoustics*, Vol. 14 (1986), Iss. 2, pp. 12-21.
- [11] *Institution of Structural Engineers* Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action - Recommendations for management, design and assessment. IStructE, London, 2008.
- [12] *Dougill, J.W.; Wright, J.R.; Parkhouse, J.G. et al.* Human structure interaction during rhythmic bobbing. *In: Structural Engineer* 84 (2006), Heft 22, S. 32-39.
- [13] *Holtzendorff, K.; Rosenquist, M.O.; Ludwig, M.* Modifikation von Bemessungslastfällen gemäß VDI-Richtlinie 2038 zur Untersuchung personen induzierter Schwingungen. *In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Baudynamik 2018, VDI-Berichte Heft 2321.* VDI Verlag, Düsseldorf, 2018, S. 3-16.