

Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken unter menscheninduzierten Lasten

PD Dr.-Ing. Michael Kasperski · Ruhr-Universität Bochum · 44780 Bochum · Deutschland

1. Problemstellung

Für den entwerfenden Ingenieur stellen die menscheninduzierten Nutzlasten eine erhebliche Herausforderung im Entwurf dar. Neben den statischen Lastanteilen sind oftmals zusätzlich die dynamischen Lastanteile hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Tragwerkssicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen. Die deutsche Norm DIN 1055 Teil 3 (Oktober 2002) [1] gibt dabei praktisch keine Hilfestellung: Sie fordert zwar grundsätzlich, daß Tragwerke, die durch Menschen zu Schwingungen angeregt werden können, gegenüber den Resonanzeffekten auszulegen sind, Regelungen zu Lastansätzen sowie Hinweise auf Gebrauchstauglichkeitskriterien fehlen allerdings vollständig.

Durch Personen induzierte, zeitlich veränderliche Lasten entstehen immer dann, wenn Nutzer sich bewegen. Resonanzeffekte können auftreten, wenn die Bewegungen in einem Grundrhythmus wiederholt werden und dabei eine Eigenfrequenz des Tragwerks anregen. Dabei können grundsätzlich Bewegungsformen mit und Bewegungsformen ohne Ortswechsel unterschieden werden. Zu den Fortbewegungs- oder Lokomotionsformen gehören Gehen, Rennen und Tanzen, zu den Bewegungsformen, bei denen im wesentlichen nur die Körperhaltung geändert wird, gehören Klatschen, Fußstampfen, Schunkeln, in den Knien Wippen und Hüpfen.

Die Gruppe von betroffenen Strukturen umfaßt alle Fußgängerbauwerke (Fußgängerbrücken und Übergänge, Treppen) sowie alle Flächen, die der Ansammlung von Personen dienen können. Hierzu zählen insbesondere Sport- und Spielflächen (z.B. Tanzsäle, Sporthallen, Gymnastikräume und Bühnen), Publikumsflächen in Theatern und Kinos, sowie Konzertsäle und Tribünen. Neben der Tragsicherheit ist immer auch die Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen. Hinsichtlich der möglichen Auswirkungen von Schwingungen auf den Nutzer stehen dabei die Fragen nach dem Komfort und der Sicherheit der Nutzer im Vordergrund.

Grundsätzlich werden in den modernen Entwurfskonzepten für Tragwerke die beiden sich gegenüberstehenden Größen Beanspruchung E und Beanspruchbarkeit R als zufällig streuende Größen behandelt. Entwurfsziel ist das Erreichen eines geforderten Mindestwertes der Zuverlässigkeit, die als Wahrscheinlichkeit mit dem Bezugszeitraum projektierte Lebensdauer zu spezifizieren ist. In einem vereinfachten Ansatz werden im Rahmen der Ungleichung $E_d \leq R_d$ die jeweiligen Entwurfswerte verglichen. Diese sind über Zielwerte ihrer jeweiligen Überschreitens- bzw. Unterschreitenswahrscheinlichkeit festgelegt. Mit den Zielvorgaben aus DIN 1055 Teil 100 [2] ergibt für den Nachweis der Tragsicherheit der Entwurfswert der Einwirkungen als die Amplitude, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 2.5% in der Lebensdauer überschritten wird. Werden im Rahmen des Gebrauchstauglichkeitsnachweises Beschleunigungen betrachtet, ergibt sich als Forderung für den Entwurfswert der Einwirkungen eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 5% in der Lebensdauer. Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis von Tragwerken, die durch Menschen zu Schwingungen angeregt werden, erfolgt somit praktisch mit der gleichen Last wie der Tragsicherheitsnachweis.

2. Idealisierte Lastmodelle und grundsätzliche Entwurfsstrategien

Die Forschungsaktivitäten der vergangenen Jahrzehnte haben für praktisch jede relevante Bewegungsform des Menschen zu idealisierten Lastmodellen geführt. Im folgenden sollen beispielhaft die üblichen Lastmodelle für Gehen und Hüpfen diskutiert werden. Die Einwirkungen infolge Gehens werden auch in neueren Untersuchungen [3] häufig über gemessene Lasten eines Fußes modelliert. Dabei wird unterstellt, daß die induzierten Lastzeitverläufe des linken und rechten Fußes identisch sind, die Lastmuster sich perfekt rhythmisch wiederholen und die Fortbewegungsgeschwindigkeit konstant ist. Bei der Fortbewegungsart Gehen besteht andauernder Bodenkontakt mit mindestens einem Fuß. Zu Beginn und Ende eines Schrittes haben beide Füße Bodenkontakt. Zeichnet man den Lastzeitverlauf $F_1(t)$ eines Fußes auf, ergibt sich der periodische Lastverlauf für Gehen wie folgt:

$$F(t) = \begin{cases} F_1(t) + F_1(T_1 - t_{\text{tfs}} + t) & t \leq t_{\text{tfs}} \\ F_1(t) & t_{\text{tfs}} < t \leq T_1 - t_{\text{tfs}} \end{cases} \quad (1)$$

- $F_1(t)$ - Lastzeitverlauf eines Fußes
- T_1 - Kontaktzeit für einen Fuß
- t_{tfs} - Dauer der Zweifußstandphase

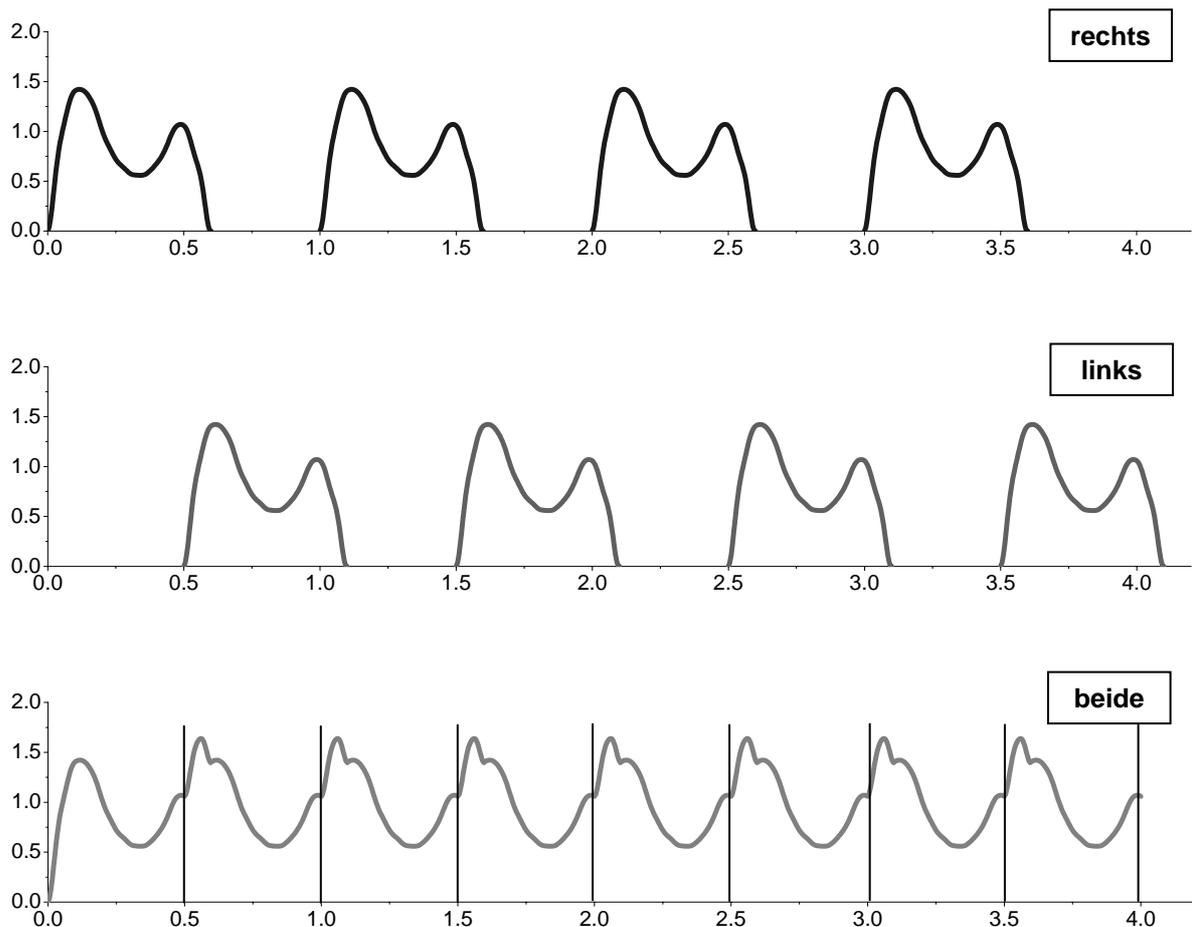


Bild 1: Idealisierter Lastzeitverlauf für Gehen mit Schrittfrequenz 2 Hz

Die Dauer der Zweifußstandphase erhält man aus der Forderung, daß das Integral über die Periode $T_1 - t_{\text{tfs}}$ das Eigengewicht G ergibt:

$$\int_{t=0}^{T_1 - t_{\text{tfs}}} F(t) dt = G \quad (2)$$

Die Schrittperiode T_s ergibt sich dann zu:

$$T_s = T_1 - t_{\text{tfs}} \quad (3)$$

Die periodische Funktion $F(t)$ kann in eine Reihe von harmonischen Funktionen wie folgt entwickelt werden:

$$F(t) = G \cdot \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_h \cdot t + \Phi_n) \right] \quad (4)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \Phi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

$$a_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} F(t) \cdot \cos(n \cdot f_s \cdot t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s} F(t) \cdot \sin(n \cdot f_s \cdot t) dt$$

mit f_s Schrittfrequenz $f_s = 1/T_s$.

Die Gehgeschwindigkeit v_s und die Schrittfrequenz f_s sind über die Schrittlänge l_s gekoppelt:

$$v_s = f_s \cdot l_s \quad (5)$$

Das idealisierte Lastmodell enthält nur Lastanteile zu den ganzzahligen Vielfachen der Schrittfrequenz, d.h. eine Person, die mit 2 Hz ein Bauwerk oder ein Bauteil überquert, kann nur Eigenfrequenzen mit 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz usw. anregen.

In Tabelle 1 sind die einzelnen harmonischen Einträge für die vertikale Richtung nach ISO 10137 [4] für die Einwirkungen infolge Gehens zusammengestellt. Dabei wird als grundlegende Schrittfrequenz ein Bereich von 1.2 bis 2.4 Hz unterstellt. Für den Fall mehrerer Fußgänger N und nicht koordinierter Bewegungen wird ein Koordinationsfaktor Co vorgeschlagen, der sich wie folgt ergibt:

$$Co(N) = \sqrt{N}/N \quad (6)$$

Tabelle 1: Lastamplituden der Harmonischen für die vertikalen Einwirkungen infolge Gehens nach ISO 10137 [4]

Harmonische n	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Lastamplitude c_n	$0.52 - 0.53 \cdot (2.3 - f)$	0.1	0.06	0.06	0.06

Die Einwirkungen infolge rhythmischen Hüpfens können in einem idealisierten Modell für eine Einzelperson als eine sich fortlaufend wiederholende Abfolge von Einzelpulsen modelliert werden (Bild 2). Während der Kontaktzeit der Person mit dem Untergrund kann der Lastzeitverlauf als Halbsinuswelle dargestellt werden, in der anschließenden Flugphase ist die Last null.

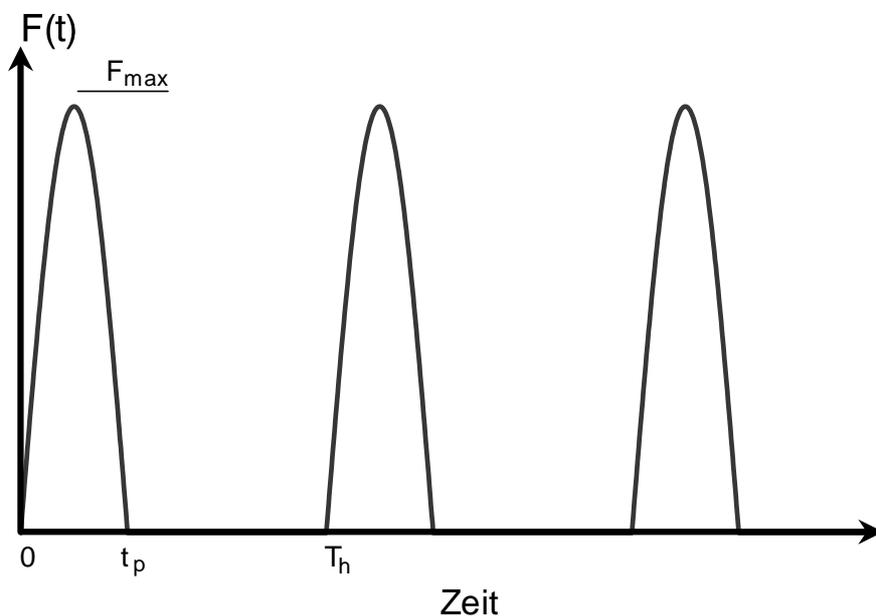


Bild 2: Idealisierter Lastzeitverlauf für die Einwirkungen infolge Hüpfens einer Einzelperson

Der Kraftzeitverlauf ergibt sich dann zu:

$$F(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot t / t_p) & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p < t \leq T \end{cases} \quad (7)$$

G - Gewichtskraft der Person

k_p - Stoßfaktor = F_{\max} / G

t_p - Kontaktdauer mit Untergrund

T_h - Hüpfperiode = $1 / f_h$

f_h - Hüpf Frequenz

Im ideal-stationären Zustand ist die Höhe des Lastpulses k_p von der relativen Kontaktzeit t_p / T_h abhängig:

$$k_p = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_h}{t_p} \quad (8)$$

Für eine dynamische Analyse ist es auch hier zweckmäßig, den periodischen Lastzeitverlauf in eine Fourierreihe zu entwickeln. Da die obige Funktion bei einer Verschiebung des Zeitnullpunktes um $t_p/2$ symmetrisch wird, ergeben sich nur Cosinus-Anteile c_n :

$$F(t) = G \cdot \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_h \cdot (t - t_p / 2)) \right] \quad (9)$$

Die Lastamplituden c_n hängen nur von der relativen Kontaktzeit ab. Ist für eine bestimmte Hüpfhöhe die relative Kontaktzeit bekannt, können die harmonischen Lastanteile entsprechend Bild 3 entnommen werden.

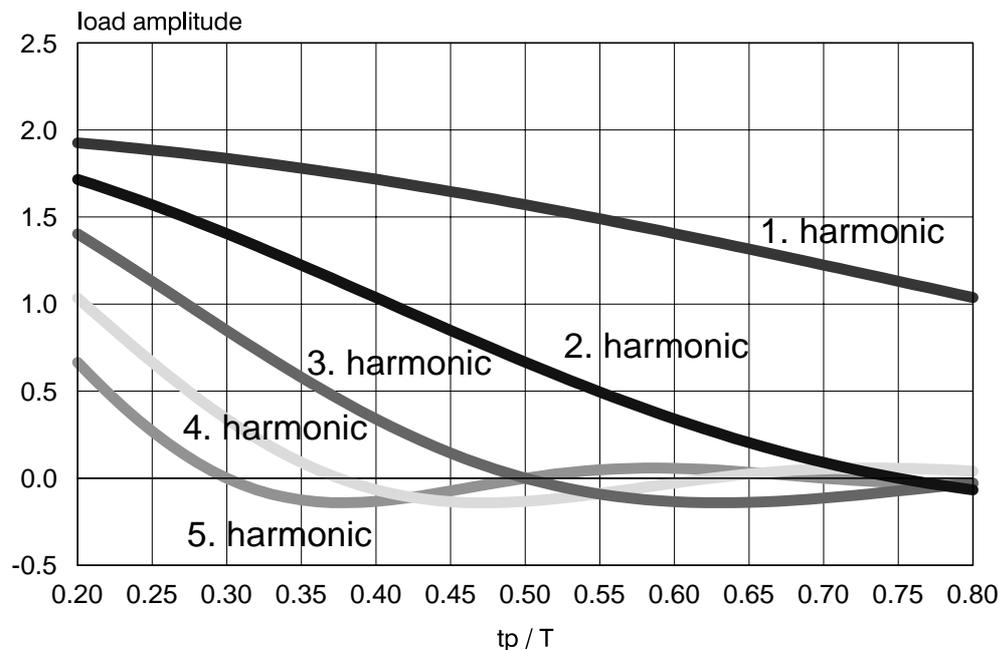


Bild 3: Abhängigkeit der harmonischen Lastanteile von der relativen Kontaktzeit

Vereinfacht hat die Britische Norm BS6399 im Jahre 1996 [5] eine relative Kontaktzeit von $1/3$ empfohlen. Dann ergeben sich folgende harmonische Lastamplituden c_n für die Frequenzanteile $n \cdot f_h$:

$$c_1 = 1.80 \quad c_2 = 1.30 \quad c_3 = 0.68 \quad c_4 = 0.18 \quad (10)$$

Aus biomechanischen Gründen muß mit steigender Frequenz die relative Kontaktzeit zunehmen, so daß die Lastamplituden c_n für steigende Hüpfhöhe abnehmen. ISO 10137 [4] spezifiziert daher wirklichkeitsnäher die Werte in Tabelle 2 in Abhängigkeit der Frequenz. Dabei wird für die Grundfrequenz ein Bereich von 1.5 bis 3.0 Hz unterstellt.

Tabelle 2: Lastamplituden der Harmonischen für die vertikalen Einwirkungen infolge Hüpfens nach ISO 10137 [4]

Harmonische n	n = 1	n = 2	n = 3
Lastamplitude c_n	$2.1 - 0.15 \cdot f$	$1.9 - 0.34 \cdot f$	$1.25 - 0.33 \cdot f$

Eine größere Gruppe von Personen kann ihre rhythmischen Bewegungen nicht perfekt synchronisieren. Die effektive Last einer Gruppe von N Personen ist entsprechend geringer als das N-fache der Last einer Einzelperson. In einem stark vereinfachenden Ansatz kann die Koordination mit einem globalen Koordinationsfaktor erfaßt werden. Die Britische Norm BS6399 [5] empfiehlt $C_0 = 2/3$ für eine größere Gruppe. Dieser Wert ergibt sich bei Annahme eines gleichverteilten Phasenversatzes des Pulsbeginns zwischen den einzelnen Individuen einer Gruppe.

Eine dynamische Berechnung mit den oben aufgeführten idealisierten Lastmodellen ist grundsätzlich nicht erforderlich, wenn die Eigenfrequenzen des untersuchten Tragwerks außerhalb des Bereichs von Anregefrequenzen infolge der rhythmischen Aktivitäten der Nutzer liegen. Für Fußgängerbauwerke ergibt sich dann die Forderung, insbesondere Eigenfrequenzen zwischen 1.6 Hz und 2.4 Hz zu meiden [6]; für Decken und Tribünen wird in der Britischen Norm eine Mindestfrequenz von 8.4 Hz empfohlen [5].

3. Gebrauchstauglichkeitskriterien

Schwingungen können von einem passiven Menschen bereits ab sehr kleinen Amplituden wahrgenommen werden. Im Frequenzbereich von 1 bis 10 Hz ist praktisch jeder Mensch in der Lage, vertikale Beschleunigungen von 0.1 m/s^2 zu fühlen. Für sich bewegende Personen liegen die Wahrnehmbarkeitsschwellen deutlich höher und hängen von der Art der Bewegung ab.

Grundsätzlich sind im Nachweis der Gebrauchstauglichkeit Kriterien bezüglich dem Wohlbefinden und der Sicherheit der Nutzer zu berücksichtigen. Der unerfahrene Nutzer wird in der Regel bei massiven Bauwerken keine großen Schwingamplituden erwarten. Entsprechend können Schwingungen ab einer bestimmten Größe Unsicherheit und Angst auslösen.

Das Empfinden von Unwohlsein und Angst hängt nicht ausschließlich von den schwingungstechnischen Parametern Frequenz und Amplitude ab, sondern wird durch eine Vielzahl von individuellen Gegebenheiten wie Erwartung und Erfahrung, Wahrnehmung der Umgebungsbedingungen und grundlegende Stimmung beeinflusst. Somit kann von einer beobachteten Schwingamplitude, die bei einer bestimmten Gelegenheit zu keinen Komfort- oder Sicherheitsproblemen geführt hat, nicht auf den allgemeingültigen Fall geschlossen werden, daß bei Nichtüberschreitung dieses Wertes bei anderen Gelegenheiten oder an anderen Orten ebenfalls keine Komfort- und Sicherheitsprobleme entstehen werden. Entsprechend schwierig gestaltet sich die Festlegung von Gebrauchstauglichkeitskriterien, so daß in ISO 10137 grundsätzlich alle empfohlenen Werte mit dem Hinweis 'in the absence of more definitive data' kommentiert werden.

Grundsätzlich scheint der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich der Auswirkungen von Schwingungen auf die Nutzer weniger wichtig als der Nachweis der Tragfähigkeit. Die Folgen einer vorübergehend zu großen Schwingamplitude, die den Komfort einiger Nutzer beeinträchtigen, lassen sich nur schwer aufrechnen gegen die Kosten, die entstehen, um ein Tragwerk weniger schwingungsanfällig auszulegen.

Mit dem Kriterium Auslösen von Angst ergibt sich allerdings eine ganz besondere Bedeutung für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit. Entwurfsziel ist es, für Fußgängerbauwerke und Versammlungsstätten bei Massenveranstaltungen Schwingamplituden zu vermeiden, die bei einzelnen Nutzern Angst auslösen. Angst ist ansteckend und wer allein in der Körperhaltung eines Menschen Angst erkennt, stellt sich unbewußt auf Flucht ein. Das überraschende und angstaussdrückende Aufschreien eines Nutzers aufgrund einer zu großen Schwingamplitude kann somit insbesondere bei Massenveranstaltungen zum Auslösen einer Panik führen. Die Folgen der Überschreitung des entsprechenden Gebrauchstauglichkeitszustandes sind dann Verletzte und im schlimmsten Fall Tote.

ISO 10137 empfiehlt entsprechend für Fußgängerbauwerke, die bei Massenveranstaltungen als Zuwegung benutzt werden, die Einhaltung der Grenzwerte für aktive Personen (Bild 4). Dabei sind die Standardabweichungen der Beschleunigungsamplituden über einen Mittelungszeitraum von 1s heranzuziehen.

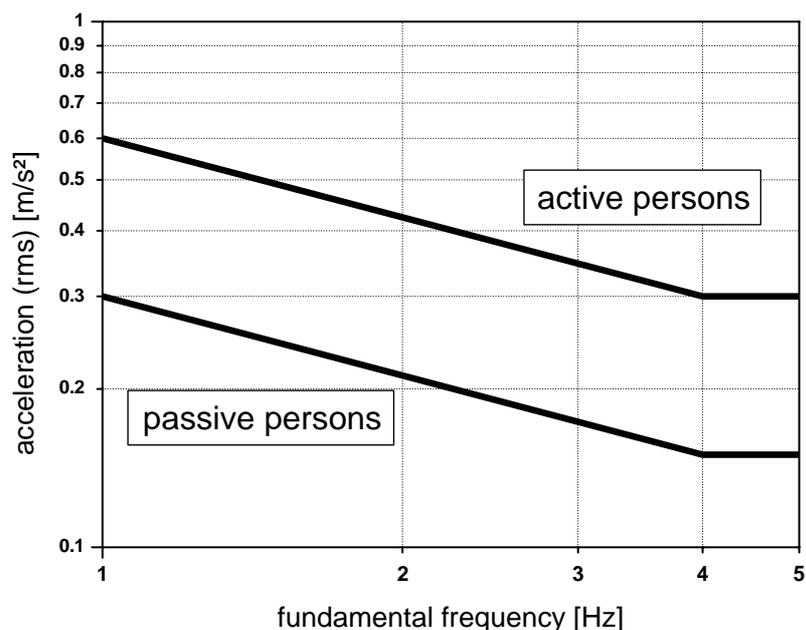


Bild 4: Gebrauchstauglichkeitskriterium für Fußgängerbauwerke nach ISO 10137 [4]

Für Decken von Versammlungsstätten und für Tribünen wird ebenfalls in ISO 10137 das Szenario Auslösen einer Panik behandelt. Außerdem wird als Gebrauchstauglichkeitskriterium der Komfort der passiven Personen berücksichtigt. Den Grenzwerten in Bild 5 sind für den Nachweis des Komforts die Standardabweichungen der Beschleunigungen gemittelt über 10s gegenüberzustellen, für das Kriterium Auslösen einer Panik beträgt die empfohlene Mittelungszeit 1s.

Üblicherweise liegen den Gebrauchstauglichkeitskriterien in Normen und Regelwerken sogenannte 'mean-vote-values', also Mittelwerte aus Befragungen, zugrunde. Die tatsächlich großen Streuungen der Antworten finden in den Normangaben bisher keine Berücksichtigung. Entsprechend bedeutet die Nicht-Überschreitung des Komfort-Grenzwertes nicht, daß sich alle Nutzer wohlfühlen, sondern es können sich im ungünstigsten Fall 49.9% aller Nutzer durch die Schwingungen belästigt fühlen.

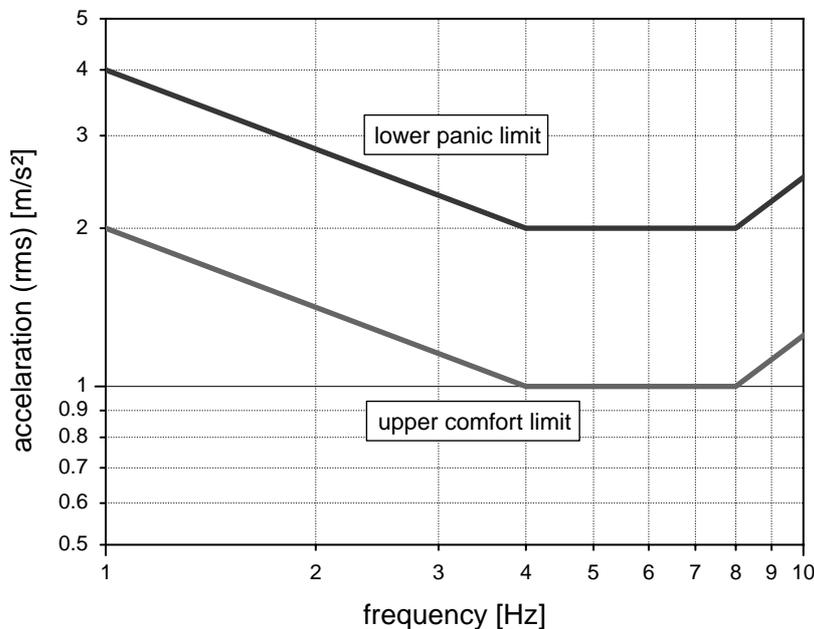


Bild 5: Gebrauchstauglichkeitskriterien für Decken von Versammlungsstätten und für Tribünen nach ISO 10137 [4]

4. Wirklichkeitsnahe Lastmodelle

Idealisierte Lastmodelle haben in der Regel den Anspruch, einfach und konservativ zu sein. Augenscheinlich überkonservative Regelungen finden allerdings in der Entwurfspraxis wenig Akzeptanz und verleiten dazu, im Entwurf mit punktuellen Forschungsergebnissen oder weiterführenden Methoden wie Simulation zu arbeiten.

Die Festlegung des Koordinationsfaktors ist hierfür ein typisches Beispiel. Grundsätzlich erscheint es sinnvoll, den Koordinationsfaktor für die einzelnen Harmonischen separat anzugeben, da sich die zufälligen Abweichungen vom perfekt synchronisierten Bewegungsablauf in den höheren Harmonischen stärker auswirken werden. In der Dänischen Norm DS 410 [7] finden sich in den Lastansätzen für dynamische Einwirkungen entsprechend für die ersten drei harmonischen vertikalen Lastamplituden individuelle Koordinationsfaktoren. Die Regelungen der Dänischen Norm basieren auf den Ergebnissen einer punktuellen Forschung von Hansen [8]. Auf der Grundlage von Versuchen werden die Einwirkungen nach Tabelle 3 spezifiziert. Zunächst fällt auf, daß im Gegensatz zu den Angaben der Britischen Norm die Lastamplituden für Hüpfen in der dritten Harmonischen auf ca. 30% reduziert sind. Die Spaltenüberschriften suggerieren außerdem, daß Hüpfen auf Tribünen mit festen Sitzen aufgrund mangelnden Raums nicht möglich ist. Die Regelungen decken dann offensichtlich die Einwirkungen infolge von In den Knien Wippen ab.

Es stellt sich die Frage, welchen Platz die Aktivität Hüpfen auf der Stelle tatsächlich erfordert. Bild 6 zeigt hierzu die Position der effektiven Last einer auf einer Kraftmeßplatte zu $f = 2.4$ Hz hüpfenden Person. Die effektive Last wandert mit jedem einzelnen Hüpfen in beiden horizontalen Richtungen hin und her. Die Position der effektiven Last verbleibt aber deutlich in der üblicherweise auf Tribünen zur Verfügung stehenden Fläche von 50 cm seitwärts und 40 cm nach vorne. Daß auf Tribünen mit fest installierten Sitzen tatsächlich Fußballfans hüpfen, zeigen die Beobachtungen in den Stadien.

Tabelle 3: Lastamplitude der Harmonischen Amplituden für die Einwirkungen infolge Nutzeraktivitäten nach DS 410

Harmonische	freie Bewegungsmöglichkeit, z.B. Fitneß Center	eingeschränkte Bewegungsmöglichkeit, z.B. Tribüne mit festen Sitzen
n=1	1.6	0.4
n=2	1.0	0.25
n=3	0.2	0.05

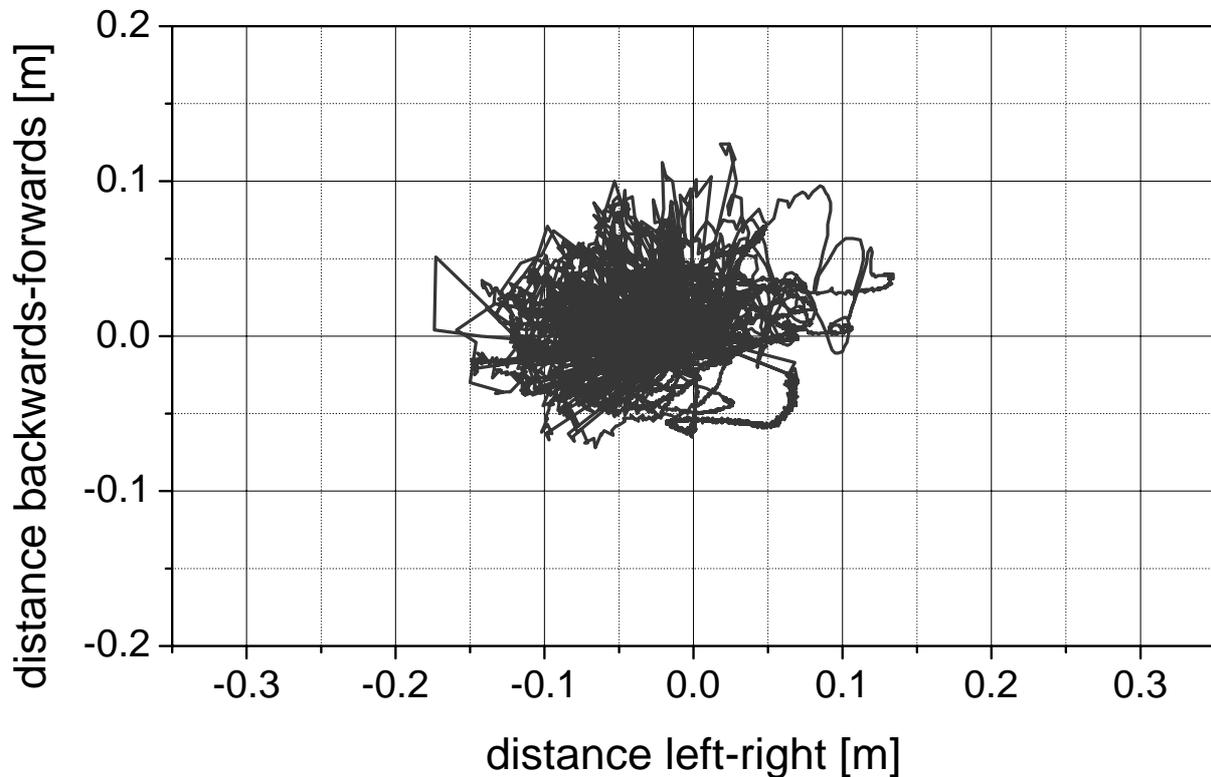


Bild 6: Beispiel für den Platzbedarf für die Aktivität Hüpfen auf der Stelle bei $f = 2.4$ Hz

Als nächstes gilt es zu beurteilen, ob die Regelungen der Dänischen Norm andere Aktivitäten als Hüpfen hinreichend genau abbilden. In Bild 7 sind hierfür die in eigenen Versuchen ermittelten Amplituden in der ersten Harmonischen für die vertikalen Einwirkungen infolge In den Knien Wippen dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf 52 getesteten Personen bei einer Taktvorgabe von 2.2 Hz bis 2.8 Hz. Die beobachteten Lastamplituden der ersten Harmonischen liegen erheblich über dem in der Dänischen Norm empfohlenen Wert von 0.4. Das Lastmodell der Dänischen Norm ist für Tribünen mit festen Sitzen deutlich auf der unsicheren Seite.

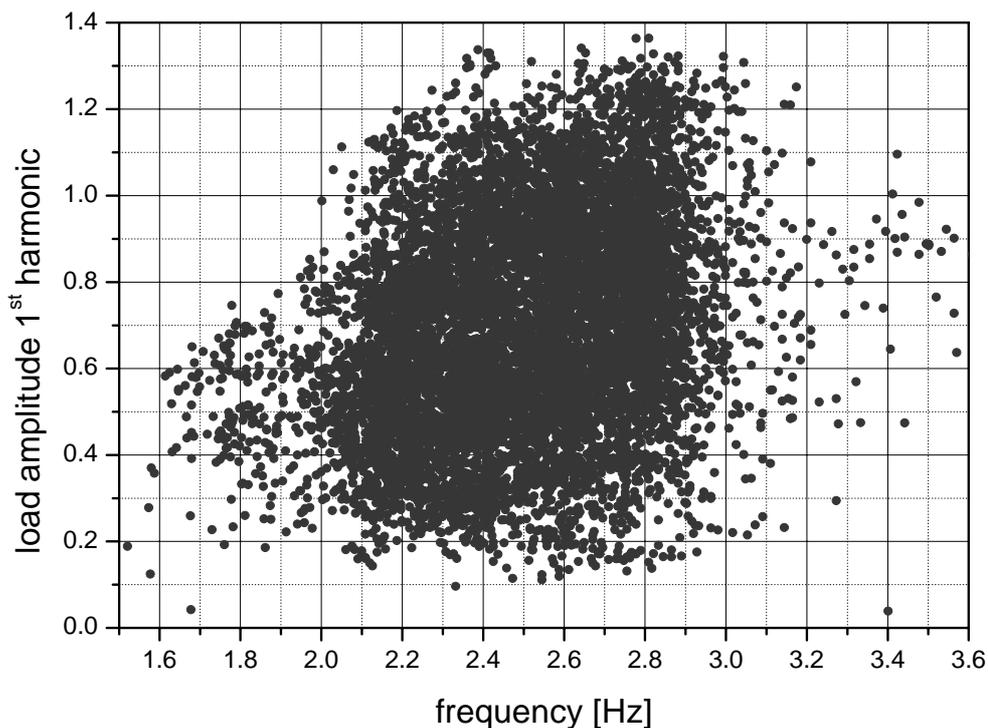


Bild 7: Lastamplituden der vertikalen Einwirkungen infolge In den Knien Wippen bei Taktvorgabe von 2.2 bis 2.8 Hz, Versuche Forschungsteam EKIB mit 52 Personen

Für den Koordinationsfaktor finden sich in der Dänischen Norm relativ komplizierte Ausdrücke, die einerseits die Personenanzahl und andererseits das Tragverhalten mit berücksichtigen. In Bild 8 sind die Koordinationsfaktoren für Hüpfen auf einem gelenkig gelagerten Balken ohne Einschränkung der Bewegungsfreiheit dargestellt. Die Herleitung der Koordinationsfaktoren beruht auf Versuchen mit einer Gruppe von 10 Personen. Während für die erste Harmonische die Koordination unabhängig von der Personenanzahl auf dem Wert für perfekte Synchronisation verharret, fallen die Koordinationsfaktoren für die höheren Harmonischen merklich ab. Da die Versuche nur auf 10 Personen basieren, ist der vorgeschlagene Kurvenverlauf mehr oder weniger spekulativ.

Tatsächlich ist die Koordination einer größeren Gruppe eine zufällige Größe, die insbesondere von den rhythmischen Grundfähigkeiten der beteiligten Individuen abhängt. Ohne Kontrolle der rhythmischen Grundfähigkeiten der untersuchten Personen verbleiben Versuchsergebnisse schwer interpretierbar. Zu den rhythmischen Grundfähigkeiten gehören die Fähigkeit 'Erkennen des Rhythmus' (die Bewegung ist zu einem vorgegebenen Takt im Mittel synchronisiert) und 'Halten des Rhythmus' (die Bewegung zeigt im Einzelnen mehr oder weniger große Ab-

weichungen zu der mittleren Synchronisation) [9]. Diese Grundfähigkeiten sind individuelle Parameter, die über Lernen in gewissen Grenzen veränderbar sind. Somit ist es sinnvoll, für die Anwendung in der Praxis nach Bauwerkskategorien zu unterscheiden. Für Fitneß Center ist von einer hohen Koordination auszugehen, da die Nutzer synchrone rhythmische Bewegungen unter Anleitung eines Trainers üben und außerdem die Nutzer i.d.R. sportliche Personen sind. Für Veranstaltungshallen kann eine geringe Koordination unterstellt werden, da die Nutzergruppe sich aus unsportlichen und sportlichen Personen zufällig zusammensetzt und die Gruppe als ganzes eine rhythmisch koordinierte Bewegung zuvor nicht geübt hat. Für Stadiontribünen kann von einem mittleren Koordinationsniveau ausgegangen werden, da z.B. Fußballfans sich als große Gruppe während der Saison alle vierzehn Tage zum gemeinschaftlichen Hüpfen zum Zweck der Anfeuerung der Heimmannschaft zusammenfinden.

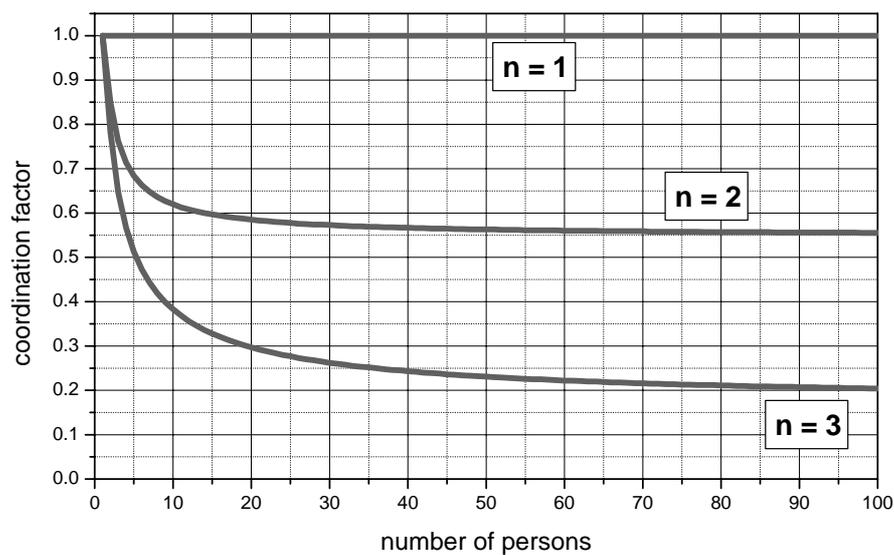


Bild 8: Koordinationsfaktor der Dänischen Norm DS 410 für die vertikalen Einwirkungen infolge von Hüpfen auf einem gelenkig gelagerten Balken

Die Beschreibung der Koordination und die Herleitung der Entwurfswerte der Koordination nur auf der Grundlage von Versuchen sind praktisch nicht möglich, weil als Fraktilwert seltene bis sehr seltene Ereignisse gesucht werden. Über die Forderung eines bestimmten Zielwertes der Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit des Entwurfswertes der Koordination mit dem Bezugszeitraum Lebensdauer ist als weitere maßgebende Variable die Anzahl von Veranstaltungen mit aktivem Publikum zu berücksichtigen. Grundsätzlich wird mit jeder weiteren Nutzung durch aktives Publikum die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Entwurfswertes anwachsen. Der entsprechende mathematische Zusammenhang ist wie folgt gegeben:

$$p_N(E > E_d) = 1 - (1 - p_1(E > E_d))^N \quad (11)$$

- N - Anzahl der Veranstaltungen mit aktiven Publikum in der Gesamtlebensdauer
- p_N - Überschreitenswahrscheinlichkeit in der Lebensdauer
- p_1 - Überschreitenswahrscheinlichkeit in einer Veranstaltung

Dabei ist es äußerst schwierig, sinnvolle Annahmen für die Anzahl von Veranstaltungen mit aktivem Publikum zu treffen. Als Mindestwert wird für den Nachweis der Tragfähigkeit die 97.5%-Fraktile der Einwirkungen gesucht. Unterstellt man für ein Fußballstadion lediglich

zwei Spitzenbegegnungen pro Jahr, bei denen das Publikum erhebliche dynamische Aktivitäten ausführen wird, ergibt sich als Zielwert für die Fraktile der Einwirkungen bei einer Lebensdauer von 50 Jahren:

$$p_1(E > E_d) = 1 - (1 - p_N(E > E_d))^{1/N} = 1 - 0.975^{1/100} = 1/3950 \quad (12)$$

Steigt die Anzahl der Veranstaltungen mit zu erwartendem aktiven Publikum weiter an, z.B. für eine Veranstaltungshalle auf mehr als 100 Veranstaltungen pro Jahr, wächst der erforderliche Fraktilewert gegen die physikalische Obergrenze. Diese Obergrenze kann in Versuchen mit großen Personengruppen nur mit unverträglichem großem Aufwand ermittelt werden. Entsprechend bietet sich hier das Werkzeug Simulation an.

Bild 9 zeigt Ergebnisse eigener Simulationsrechnungen für den zufälligen Koordinationsfaktor einer Gruppe von 10 männlichen Personen mit guten rhythmischen Grundfähigkeiten. Bezugswert für die Herleitung des Koordinationsfaktors ist dabei der Mittelwert der zufälligen maximalen Tragwerksbeschleunigungen unter einer männlichen Personen mit guten rhythmischen Grundfähigkeiten. Die Ergebnisse von 999 Simulationen sind dabei in einem Wahrscheinlichkeitspapier für die Extremwertverteilung Typ I (Gumbel-Verteilung) dargestellt. Die Ergebnisse streuen im Bereich von unter 0.50 bis über 0.95. Die mittlere Koordination liegt bei 0.73. In die Spur der Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit läßt sich eine Extremwertverteilung Typ III einpassen, womit sich eine Obergrenze ergibt, die mit Sicherheit 1 nicht überschritten werden kann. Für die Koordination einer 10er Gruppe ergibt sich dann 0.97 als Obergrenze.

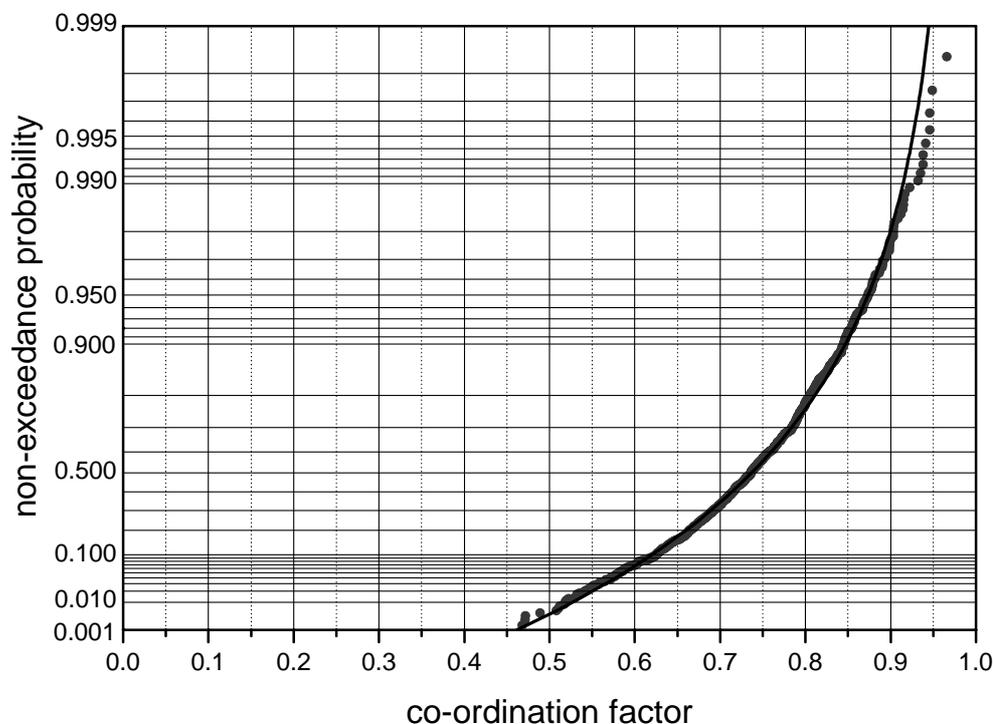


Bild 9: Zufällige Koordinationsfaktoren einer 10er Gruppe (alle Personen männlich mit guten rhythmischen Grundfähigkeiten) • Simulationsergebnisse — theoretisches Modell

Simulationsrechnungen werden heutzutage bereits vielfach in der Entwurfspraxis verwendet, so z.B. von ARUP für den Entwurf der Millennium Brücke und für die Beurteilung des Entwurfs der Tribünen des Stadions von Manchester. Grundsätzlich hängt die Qualität von Simulationen in ganz besonderem Maße von der Qualität der unterstellten Modelle und Zusammenhänge ab. Werden nicht alle Phänomene, die den zu simulierenden Prozeß beeinflussen, wirklichkeitsnah abgebildet, erhält man zwar umfangreiche Simulationsergebnisse, aber keine brauchbaren Aussagen zu der eigentlichen Fragestellung. Werden zudem zweifelhafte Annahmen in die Simulation eingeführt, leidet die Qualität der Simulationsergebnisse zusätzlich. Für die Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit der Tribüne in Manchester infolge von aktivem Publikum bei Open-Air Konzerten werden die Simulationsergebnisse von ARUP in Bild 10 herangezogen.

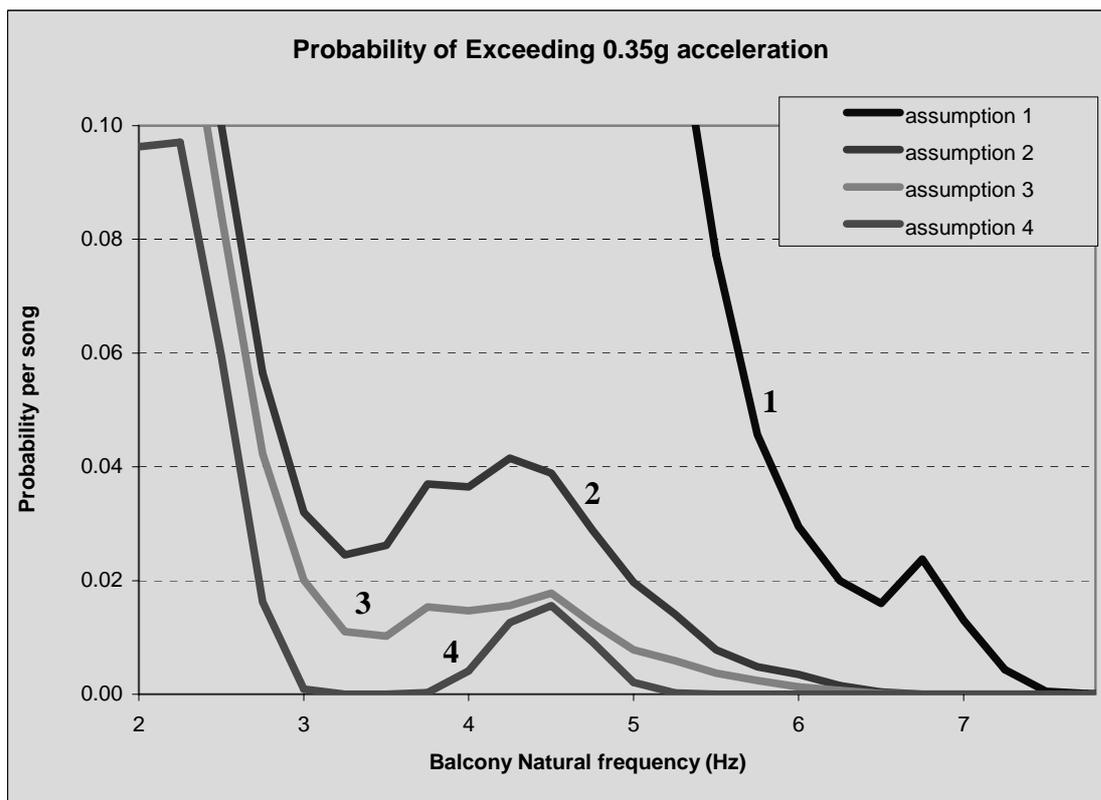


Bild 10: Ergebnisse von ARUP-Simulationsrechnungen für Tribünenschwingungen infolge aktiven Publikums bei Open-Air Konzerten [10]

Bei einer Eigenfrequenz von 5.5 Hz (Tribüne Manchester, $f_0 = 5.4$ Hz [10]) ergibt sich mit der von Null verschiedenen günstigsten Simulationsannahme eine Überschreitenswahrscheinlichkeit der Panikgrenze von 0.0037 pro Lied. Dieser Wert erscheint hinreichend klein, so daß unterstellt wird, daß die Simulation den gewünschten 'Beweis' erbringt, daß die Tribünen in Manchester kein Gebrauchstauglichkeitsproblem haben. Tatsächlich läßt sich zeigen, daß selbst diese günstigste Simulation auf ein massives Gebrauchstauglichkeitsproblem hinweist. Unterstellt man, daß pro Konzert im Mittel 25 Lieder vorgetragen werden, akkumuliert sich die Überschreitenswahrscheinlichkeit mit Gleichung (11) auf:

$$p_{\text{Konzert}}(E > E_d) = 1 - (1 - p_{\text{Lied}}(E > E_d))^{25} = 1 - 0.9963^{25} = 0.0885 \quad (13)$$

Werden in einer Lebensdauer von 50 Jahren im Mittel pro Jahr 2 Konzerte durchgeführt, akkumuliert sich die Überschreitenswahrscheinlichkeit zu:

$$p_{\text{Lebensdauer}}(E > E_d) = 1 - (1 - p_{\text{Konzert}}(E > E_d))^{100} = 1 - 0.9915^{100} = 0.9999 \quad (14)$$

Tatsächlich erbringt somit die Simulation von ARUP den Hinweis, daß bei geplanten 100 Konzerten die Panikgrenze beinahe mit Sicherheit 1 erreicht wird; die Tribüne in Manchester ist somit auf keinen Fall gebrauchstauglich hinsichtlich Einwirkungen eines hüpfenden Publikums.

Auch für das idealisierte Lastmodell für die Einwirkungen infolge Gehens wurden in jüngster Zeit experimentelle Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, wirklichkeitsnähere Beschreibungen der Einwirkungen zu erhalten. Statt lediglich die Einwirkungen infolge Aufsetzen eines Fußes zu messen, werden dabei die Einwirkungen über eine längere Sequenz von Doppelschritten auf einem Laufband vermessen [11, 12]. Aufgrund der konstanten Laufgeschwindigkeit des Bandes wird allerdings den Probanden ein gleichförmiges Gehen aufgezungen, d.h. eventuell vorhandene Unterschiede zwischen den Schrittlängen und Gehgeschwindigkeiten des rechten und linken Beins werden ausnivelliert.

Untersuchungen von Medizinern [13] haben zudem gezeigt, daß die auf Laufbändern beobachteten Gangparameter grundsätzlich von den 'natürlichen' Gangparametern signifikant abweichen. Bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit werden auf dem Laufband üblicherweise kürzere Schritte und entsprechend höhere Schrittfrequenzen beobachtet.

Eigene Untersuchungen [14] zeigen auf, daß die idealisierte Annahme identischer Lasteinträge durch das rechte und linke Bein nicht in Fällen zu wirklichkeitsnahen Beurteilungen von Tragwerksschwingungen führt. Tatsächlich zeigen sich bei praktisch jedem Menschen Unterschiede in den Gangparametern für das linke und rechte Bein. In Bild 11 sind die zugehörigen Schrittlängen eines Doppelschrittes für 251 untersuchte Personen dargestellt. Das starke Bein ist dabei als das Bein mit der größeren Schrittlänge definiert.

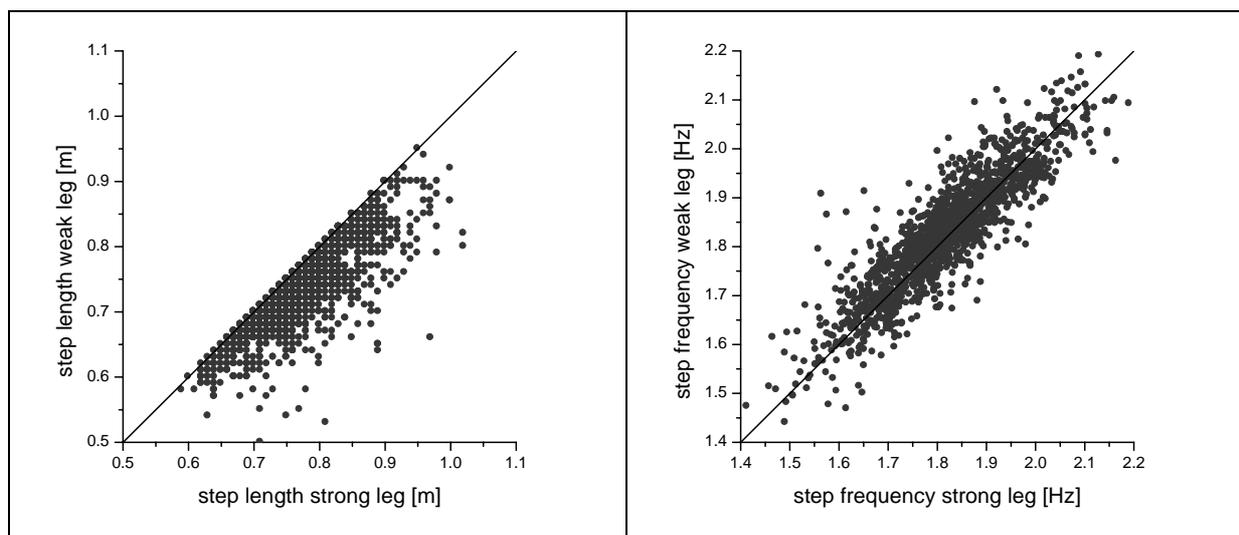


Bild 11: Zugehörige Schrittlängen und Schrittfrequenzen für das starke und schwache Bein in einem Doppelschritt, Datenbasis 251 Personen; Versuche Forschungsteam EKIB

Die Abweichungen zwischen dem rechten und linken Bein induzieren Anregungen zu Frequenzen, die nicht mit den ganzzahligen Vielfachen der mittleren Schrittfrequenz übereinstimmen, d.h. eine Person, die sich im Mittel mit einer Schrittfrequenz von 2.0 Hz fortbewegt kann u.U. ein Tragwerk mit einer Eigenfrequenz von 3.0 Hz zu merklichen resonanten Schwingungen anregen. Dieser Effekt wird insbesondere bedeutsam bei der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken, deren niedrigste Eigenfrequenz außerhalb des Bereichs der Schrittfrequenzen liegt. In Bild 12 sind die maximalen Beschleunigungsamplituden eines 10 m langen gelenkig gelagerten Balkens für die Einwirkungen Überqueren mit einer mittleren Schrittfrequenz von 1.5 Hz für eine wirklichkeitsnahe Lastsequenz und eine zwischen rechtem und linken Bein ausgemittelten Lastsequenz dargestellt. Die Unterschiede in den Beschleunigungsamplituden können den Faktor vier überschreiten.

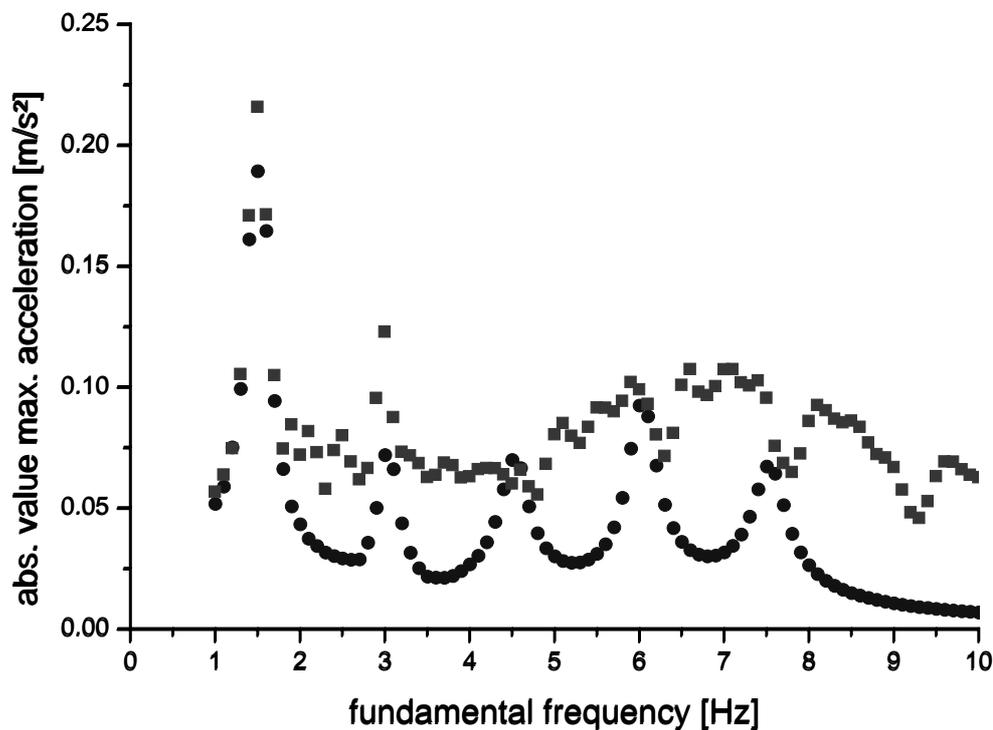


Bild 12: Absolutwerte der maximalen Beschleunigungen eines 10 m langen gelenkig gelagerten Balkens infolge Überquerens mit einer mittleren Schrittfrequenz von 1.5 Hz (• gemittelte Sequenz ■ wirklichkeitsnahe Sequenz)

5. Zusammenfassung

Die Behandlung von möglichen Tragwerksschwingungen infolge der Einwirkungen sich bewegender Personen stellen für den entwerfenden Ingenieur eine große Herausforderung dar. Nicht alle Normen geben hierzu die erforderliche qualifizierte Hilfestellung. Entsprechend stellen sich auch bei neueren Bauwerken häufig unerwünschte Schwingungen ein. Aktuelle Arbeiten des Forschungsteams EKIB zeigen eine Reihe von Möglichkeiten zur wirklichkeitsnahen Behandlung derartiger Fragestellungen auf.

6. Literatur

- [1] DIN 1055 Teil 3 - Oktober 2002
Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten
- [2] DIN 1055 Teil 100 - März 2001
Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln
- [3] Kerr S.C. & Bishop N.W.M.
Human induced loading on flexible staircases, *Engineering Structures*, 23, 37-45, 2001
- [4] ISO10137 - Committee Draft November 2005
Basis for design of structures - Serviceability of buildings and pedestrian structures against vibration
- [5] BS 6399 British Standard (1996)
Code of practice for dead and imposed loads, BSI, United Kingdom
- [6] Bachmann, H. ; Ammann, W. (1987)
Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen
Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau IVBH 1987
ISBN 3-857480513
- [7] DS 410 Dansk Standard (1998)
Code of Practice for Loads for the Design of Structures
- [8] Hansen, S.O. (2002)
Dynamic loads due to synchronized movements of people
In. Grundmann et al(eds.): *Structural Dynamics EURODYN 2002*, Balkema, Rotterdam
- [9] Agu, E & Kasperski, M.
Specification of the design loads for coordinated movements of crowds based on a random load model for jumping
In. Soize et al (eds): *Structural Dynamics EURODYN 2005*, Millpress, Rotterdam
- [10] Willford, M. (2001)
Stadium Dynamics
Safer Solutions in Sport and Leisure, Manchester, 5. April 2001
- [11] Pizzimenti, A.D. & Ricciardelli (2005)
Experimental evaluation of the dynamic lateral loading of footbridges by walking pedestrians
In. Soize et al (eds): *Structural Dynamics EURODYN 2005*, Millpress, Rotterdam
- [12] Brownjohn, J.M.W, Pavic, A. & Omenzetter, P. (2004)
A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking
Canadian Journal of Civil Engineering, Vol 31 (2004), pp 65-77
- [13] Hegewald, G (2000)
Ganganalytische Bestimmung und Bewertung der Druckverteilung unterm Fuß und von Gelenkwinkelverläufen
Dissertationsschrift, Humboldt Universität zu Berlin, Institut für Rehabilitationswissenschaften
- [14] Sahnaci, C. & Kasperski, M.
Random loads induced by walking
In. Soize et al (eds): *Structural Dynamics EURODYN 2005*, Millpress, Rotterdam