

Menscheninduzierte Schwingungen

– Erfahrungen aus der Praxis –

Dr.-Ing. Franz-Hermann Schlüter, Dipl.-Ing. Hans Cüppers
Prof. Eibl + Partner GbR, Ingenieure im Bauwesen, Karlsruhe
www.iibw.de

1 Einführung

Neue Bauweisen und die Verwendung hochfester Werkstoffe führen zu immer schlankeren und leichteren Tragkonstruktionen. Dies führt immer häufiger zu Schwingungsproblemen, die auf das Gehen oder Laufen von Menschen oder auf rhythmische Aktivitäten wie Hüpfen, Tanzen, Mitwippen, Fußstampfen oder andere sportliche Übungen zurückzuführen sind. Derartige "menscheninduzierte Schwingungen" können sowohl zu Problemen der Gebrauchsfähigkeit als auch zu einer Einschränkung der Standsicherheit oder der Dauerhaftigkeit von Baustrukturen führen. Auch können die auftretenden Schwingungen schon bei relativ geringen Schwingungsamplituden – insbesondere von an den Aktivitäten unbeteiligten Personen – als unangenehm, störend, belästigend oder unakzeptabel empfunden werden. Im Extremfall können solche Schwingungen zu unvorhersehbaren panikartigen Reaktionen der betroffenen Personen führen.

Da bei der Auslegung von Bauwerken für menscheninduzierte Schwingungen ingenieurmäßige Festlegungen und Annahmen zu treffen sind, die sowohl über die statische Betrachtung als auch über das von sonstigen Schwingungsuntersuchungen gewohnte Maß hinausgehen, soll im folgenden über spezifische Besonderheiten und Erfahrungen mit dieser Problematik berichtet werden, die die Verfasser bei der Untersuchung menscheninduzierter Schwingungen in der Praxis gewinnen konnten. Auf die vielfachen Berechnungsmethoden der Baudynamik soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Hierzu wird auf die Fachliteratur verwiesen.

2 Prinzipielles Vorgehen und Rechenannahmen

Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Bauwerken und Bauteilen sind zunächst die Eigenfrequenzen den möglichen Erregerfrequenzen oder Vielfachen davon gegenüberzustellen. Kann aufgrund eines zu geringen Frequenzabstandes eine Anregung von Resonanzschwingungen nicht ausgeschlossen werden, sind detaillierte Schwingungsberechnungen durchzuführen, wobei die möglichen Erregerfrequenzen konservativ auf die Eigenfrequenzen

des Tragwerks abzustimmen sind. Die sich daraus ergebenden extremalen Schwingungsantworten im Resonanzbereich hängen wesentlich von der im System vorhandenen Dämpfung sowie dem Verhältnis der maximalen Anregungskraft zur Gewichtskraft der beteiligten Massen ab und sind schließlich mit zulässigen Werten zu vergleichen.

Für die praktische Anwendung lassen sich schwingungsfähige Systeme oftmals auf einfache Grundsysteme zurückführen, deren dynamisches Verhalten mit bekannten Näherungsformeln (vgl. [1],[2],[3]) ermittelt werden können. Hierfür müssen die effektiven Steifigkeiten und Massen sowie die wirksame Dämpfung bekannt sein. Die anzusetzende Steifigkeit kann in der Regel mit den üblichen ingenieurmäßigen Verfahren recht gut bestimmt werden. Bei Bauteilen aus Stahlbeton wäre z.B. in diesem Zusammenhang zu überprüfen, ob diese unter der angenommenen Belastung noch im Zustand I (ungerissener Querschnitt) verbleiben oder ob der Zustand II berücksichtigt werden muss. Die Abschätzung der effektiven Massen gestaltet sich bereits etwas schwieriger. Hier sind die tatsächlich vorhandenen ständigen Lasten zugrunde zu legen. Für Geschossdecken wären z.B. außer ihrem Eigengewicht auch noch der Bodenaufbau, abgehängte Installationsleitungen oder Unterdecken und Brandschutzbekleidungen zu berücksichtigen. Insbesondere bei relativ leichten Tragsystemen mit einem großen Verkehrslastanteil sind darüber hinaus noch Zusatzmassen zur Berücksichtigung der wahrscheinlich vorhandenen Verkehrslasten anzusetzen, da diese zu einem deutlichen Absinken der Eigenfrequenzen führen können. Der Ansatz der „Volllast“ aus der Statischen Berechnung führt meist zu unrealistisch niedrigen Eigenfrequenzen. Die wirksame Masse kann schließlich mit Hilfe von „Massenfaktoren“ für verschiedene statische Tragsysteme abgeschätzt werden (vgl. [2],[3]).

Aufgrund ihrer Bedeutung und ihres großen Schwankungsbereiches gehört die zutreffende Abschätzung der Dämpfung zu den mitentscheidenden Aufgaben bei einer Schwingungsrechnung. Dämpfungswerte sind vom Tragsystem, von der Bauweise, von der Nichtlinearität des Werkstoffverhaltens, von Verschiebungen oder Schlupf in Verbindungen und auch von der absoluten Größe der Beanspruchung bzw. Schwingungsamplituden abhängig. Besonders geringe Dämpfungswerte sind etwa bei geschweißten Stahlkonstruktionen zu erwarten. Sehr niedrige Dämpfungswerte ergeben sich auch bei Fußgängerbauwerken, weshalb dort sogar die Ausbildung des Geländers nennenswerten Einfluss auf die Dämpfung haben kann. In Gebäuden können sekundäre Bauteile wie nichttragende Zwischenwände, abgehängte Decken und Installationsleitungen, aufgeständerte Fußböden oder Bodenbeläge zu einer höheren Dämpfung führen.

Gesicherte Dämpfungswerte lassen sich eigentlich nur durch Messungen am ausgeführten Bauwerk ermitteln. Um Schwingungsuntersuchungen in der Entwurfsphase von Bauwerken durchführen zu können, müssen jedoch Zahlenwerte für die zu erwartende Dämpfung des Systems angenommen werden. Materialdämpfung, Systemdämpfung und Abstrahlungsdämpfung werden zu einem integralen Dämpfungsmaß zusammengefasst. Nach eigenen Erfahrungen aus Berechnungen und Messungen können für baupraktische Untersuchungen im Zusammenhang mit der hier diskutierten Problematik Dämpfungsmaße (Lehr'sches Dämpfungsmaß) von $D=0.5\%$ bis $D=2.0\%$ der kritischen Dämpfung angenommen werden. Die Abschätzung sollte aber unter Beachtung der Streubreite der oben genannten Einflüsse eher konservativ erfolgen.

Vorsicht ist bei der Entnahme von Dämpfungswerten aus der Literatur geboten, da oftmals nicht angegeben wird, für welchen Beanspruchungsbereich die Dämpfungen gelten. So dürfen bei der Untersuchung menscheninduzierter Schwingungen keinesfalls die hohen Dämpfungswerte, die bei Erdbebenbeanspruchungen angesetzt werden, unterstellt werden. Für die Praxis brauchbare Anhaltswerte für baustoffbezogene Dämpfungsmaße D bei Beanspruchungen im elastischen Bereich sind in Tabelle 1 wiedergegeben (vgl. auch [1]-[3]).

Tabelle 1: Anhaltswerte für Dämpfungen

Bauart	Lehr'sche Dämpfung D	Log. Dekrement δ
Stahlbetontragwerke	0.010 – 0.020	0.063 – 0.126
Spannbetontragwerke	0.008	0.05
Stahlkonstruktionen geschweißt	0.005	0.031
Stahlkonstruktionen geschraubt	0.010	0.063
Verbundkonstruktionen	0.015	0.094
Holzkonstruktionen	0.015 – 0.030	0.094 – 0.189

3 Lastannahmen für "Gehen" und "Hüpfen"

Aus der Vielzahl der möglichen rhythmischen Aktivitäten von Menschen, die zu einer Schwingungsanregung von Tragwerken führen können, sind vor allem Gehen, Laufen und Hüpfen zu betrachten. Bei bestimmungsgemäßem Gebrauch eines Tragwerks ist zumeist das Gehen – unter Umständen aber auch das Laufen oder Hüpfen – von Personen als möglicher

Anregungsmechanismus zu untersuchen. In Sport- und Versammlungsstätten können synchronisierte rhythmische Bewegungen wie Wippen und Hüpfen zahlreicher Personen zu beachtlichen Resonanzschwingungen führen. Mutwilliges Anregen kann durch Schaukeln, Stampfen, Wippen oder Hüpfen erfolgen. Die Übergänge zwischen den obigen Belastungsarten sind fließend. Eine grobe Unterscheidung kann danach erfolgen, ob ständig Bodenkontakt vorhanden ist (Gehen) oder dieser zeitweilig unterbrochen wird (Laufen und Hüpfen). Eine rhythmische Anregung durch Menschen kann im Frequenzbereich von 1.5 bis 3.5 Hz und Vielfachen hiervon erfolgen.

„Normales Gehen“ erfolgt mit einer Schrittfrequenz f_s von 1.7 bis 2.3 Hz. Für eine Einzelperson lässt sich für numerische Untersuchungen die nachfolgende harmonische Lastfunktion (Gl. 3.1) verwenden (vgl. [2]):

$$P(t) = G \left(1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \sin(2\pi n f_s \cdot t + \varphi_n) \right) \quad n = 1, 2, 3; \quad f_s = 1.7 \text{ bis } 2.3 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Dabei kann von einem Eigengewicht von $G = 0.80 \text{ kN}$ pro Person als Durchschnittswert angesetzt werden. In der Gl. 3.1 kann von Anteilsfaktoren $\alpha_1 = 0.40$ für die 1. Harmonische und $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.10$ für die 2. und 3. Harmonische sowie Phasenwinkeln von $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$ ausgegangen werden.

"Hüpfen am Ort" mit gleichzeitigem Auftreten beider Füße stellt bei den vielfältigen Arten rhythmischer Bewegungen bei Sport-, Fitness-, Musik- und Tanzveranstaltungen sowie bei mutwilliger Anregung hinsichtlich der dynamischen Wirkung für die Auslegung von Bauteilen den ungünstigsten Lastfall dar. Hüpfen erfolgt mit einer Anregungsfrequenz von 1.5 bis 3.5 Hz, wobei der letztere Wert als physiologische Obergrenze angesehen werden kann. Bei rhythmischen Aktivitäten über einen längeren Zeitraum oder im Falle einer größeren Menschengruppe dürften allerdings kaum höhere Hüpf frequenzen als 3.0 Hz möglich sein. In [5] werden daher Hüpf frequenzen von 1.5 bis 3.0 Hz vorgeschlagen.

Aufgrund der praktischen Bedeutung dieser Anregung soll im Folgenden hierfür die entsprechenden transiente Belastungsfunktion sowie ein aus einem Antwortspektrum ermittelter quasi-statischer Lastansatz wiedergegeben werden.

In der Literatur sind Ansätze zur Beschreibung des Belastung infolge Hüpfen wiedergegeben. Hier ist insbesondere Bachmann [2] zu nennen, der sich eingehend mit dieser Problematik be-

fasst hat. Auch die Verfasser haben hierzu bereits vor einigen Jahren eigene experimentelle Untersuchungen am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe durchgeführt. Systematisch wurde die von hüpfenden Personen auf eine leichte Holzplattform ausgeübte Belastung bei verschiedenen Hüppfrequenzen messtechnisch erfasst und ausgewertet. Auch wurde das synchrone Hüpfen mehrerer Personen betrachtet. Selbst bei Gruppen bis 10 Personen ist bei genauer Vorgabe des Taktes, z.B. durch Rockmusik, ein weitgehend synchrones Hüpfen ohne nennenswerte Reduzierung der effektiven Last zu beobachten.

Für die mathematische Beschreibung des Zeitverlaufs der dynamischen Last infolge „Hüpfen“ kann hinreichend genau eine idealisierte Lastfunktion in Form eines Halbsinusmodells verwendet werden, die vom Verhältnis der Kontaktzeit t_p zur Hüppperiode T_0 abhängt (vgl. auch [2]):

$$P(t) = P_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_0}{t_p} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_p} \cdot t\right) \quad \text{für } t \leq t_p \quad (3.2)$$

$$= 0 \quad \text{für } t_p < t < T_0$$

mit

$$P_0 = G \cdot n \cdot k_s \quad (3.3)$$

- G Eigengewicht einer durchschnittlichen Person, z.B. 0.80 kN
 n Anzahl der ein Bauteil belastenden Personen, z.B. 0.5 Personen pro m bzw. m²
 k_s Faktor zur Berücksichtigung der Synchronität bei vielen hüpfenden Personen, z.B. $k_s = 1,0$ für $n < 10$ und $k_s = 0,8$ für $n \geq 10$
 T_0 Hüppperiode, Kehrwert der Frequenz $f_s = 1.5$ bis 3.5 Hz
 t_p Kontaktzeit, $t_p = 0.15$ s bei einer einzelnen Person und $t_p = 0.20$ s bei einer Menschengruppe (> 5 Personen)

Der Zeitverlauf entsprechend Gl. 3.2 ist beispielsweise für zwei verschiedene Hüppfrequenzen in Bild 1 wiedergegeben. Als ruhende Last ist in beiden Fällen $P_0 = 1$ kN angenommen. Aus der Bedingung der Gleichheit der potentiellen Energie folgt die Forderung, dass das Integral der dynamischen Belastungsfunktion über die Periodendauer T_0 dem Integral der statischen Last gleich sein muss. Hieraus ergibt sich für den Maximalwert der Last die Beziehung:

$$\max P = P_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_0}{t_p} \quad (3.4)$$

Bei einer Hüppfrequenz von $f_s = 1.8$ Hz beträgt $\max P/P_0 = 4.36$,

bei $f_s = 3.0$ Hz $\max P/P_0 = 2.62$.

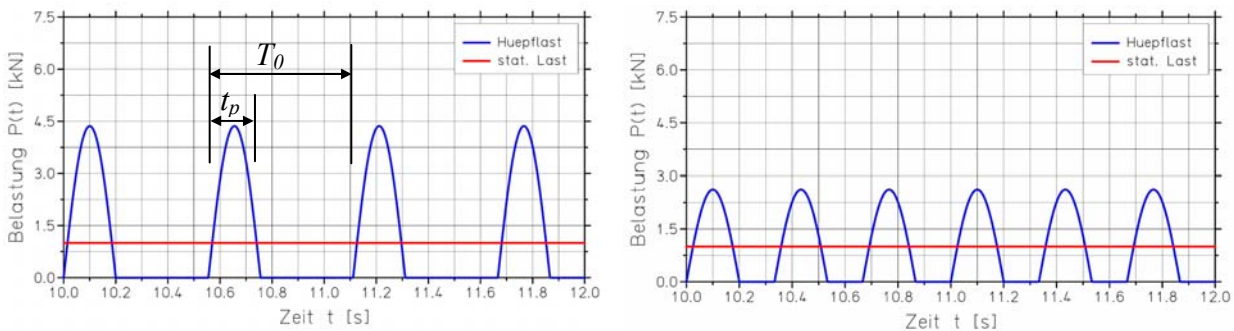


Bild 1: Belastungsfunktion Hüpfen mit $t_p = 0.2$ s bei einer Hüpf Frequenz $f_s = 1.8$ Hz ($T_0 = 0.555$ s) bzw. $f_s = 3.0$ Hz ($T_0 = 0.333$ s) für eine Einheitslast $P_0 = 1$ kN.

Unter Ansatz der Belastungsfunktion nach Gl. (3.2) können die Systemantworten der beaufschlagten Strukturen mittels einer dynamischen Analyse ermittelt werden. Wie bereits angemerkt, muss die Anregungsfrequenz auf die Eigenfrequenzen des Systems abgestimmt werden. Den häufigsten Anwendungsfall stellt ein Einmassenschwinger als einfachstes schwingendes System dar. Balken und Platten lassen sich recht einfach in solche Systeme überführen. Sie sind charakterisiert durch die Eigenfrequenz, die eindeutig vom Verhältnis der Steifigkeit zur Masse bestimmt wird. So liegt es nahe, nicht jedes Mal für ein konkretes Einmassensystem eine erzwungene Schwingung zu berechnen, sondern – ähnlich wie bei der Auslegung für Erdbeben geläufig – Antwortspektren zu bilden. Für eine bestimmte Belastungsfunktion mit der Hüpf Frequenz f_s werden eine Vielzahl von Einmassensystemen im Frequenzbereich von 0.1 bis 20 Hz berechnet, die maximalen Systemantworten registriert und über die jeweilige Eigenfrequenz aufgetragen. Anschließend wird die Anregungsfrequenz im interessierenden Bereich variiert und erneut eine Vielzahl von Einmassensystemen berechnet. Aus den vielen Antwortspektren wird schließlich ein einhüllendes Antwortspektrum gebildet, dass die maximalen Systemantworten unter der ganzen Bandbreite der möglichen Anregungen darstellt.

Das Bild 2 gibt das Antwortspektrum der Federkraft des Einmassensystems bei verschiedenen Dämpfungen wieder. Diese ist gleichbedeutend mit der effektiven Ersatzlast, die im statischen Fall die gleiche Systemantwort hervorruft wie die dynamische Last. Man erkennt, dass bei kleinen Dämpfungsmaßen von $D=0.5\%$ eine sehr starke Resonanzhöhung im Bereich von 2 bis 4 Hz stattfindet. Gegenüber der ruhenden Last von $P_0 = 1$ N treten hier Lasten von über 120 N auf. Selbst bei einer Dämpfung von $D=2\%$ beträgt der Überhöhungsfaktor noch über 40. Deutlich ist an dem Diagramm festzustellen, dass ab Systemfrequenzen

von 6.5 bis 7 Hz keine nennenswerte Überhöhungen mehr zu verzeichnen sind. Die effektiven Lasten werden hier durch die üblichen Verkehrslasten abgedeckt.

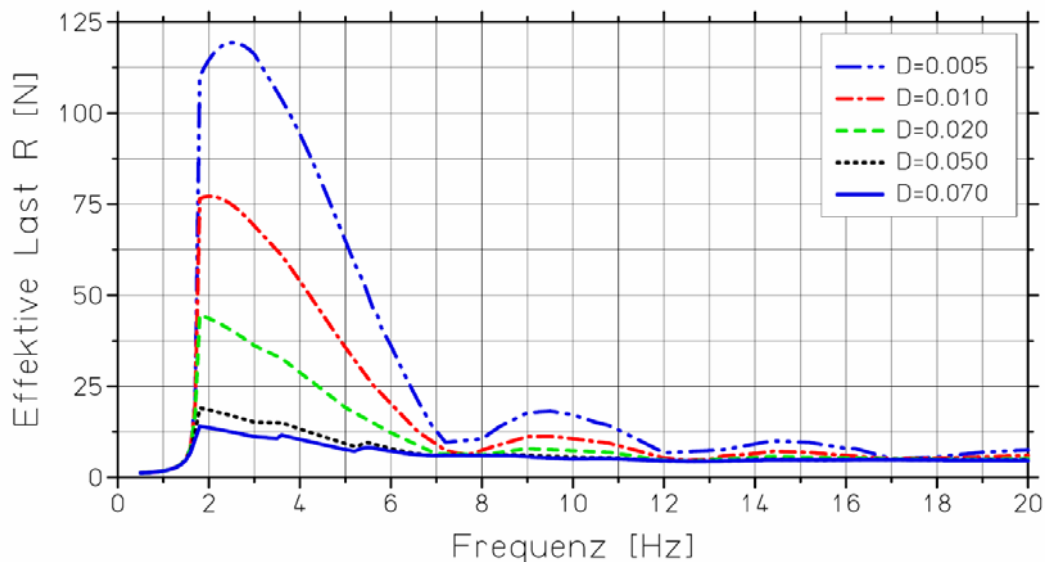


Bild 2: Effektive statische Ersatzlast für den Lastfall Hüpfen infolge Einheitslast $P_0 = 1$ N bei verschiedenen Lehr'schen Dämpfungsmaßen D ;
Anregung erfolgte nach Gl. (3.2) im Frequenzbereich $f_s = 1.8$ bis 3.0 Hz, $t_p = 0.20$ s

Ergänzend zu dem Spektrum der effektiven statischen Ersatzlast in Bild 2 sind in Bild 3 die Antwortspektren der Beschleunigung und Geschwindigkeit für eine Masse von $M=1$ kg wiedergegeben. Die tatsächlichen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten sind umgekehrt proportional zu der effektiven Masse des betrachteten Systems.

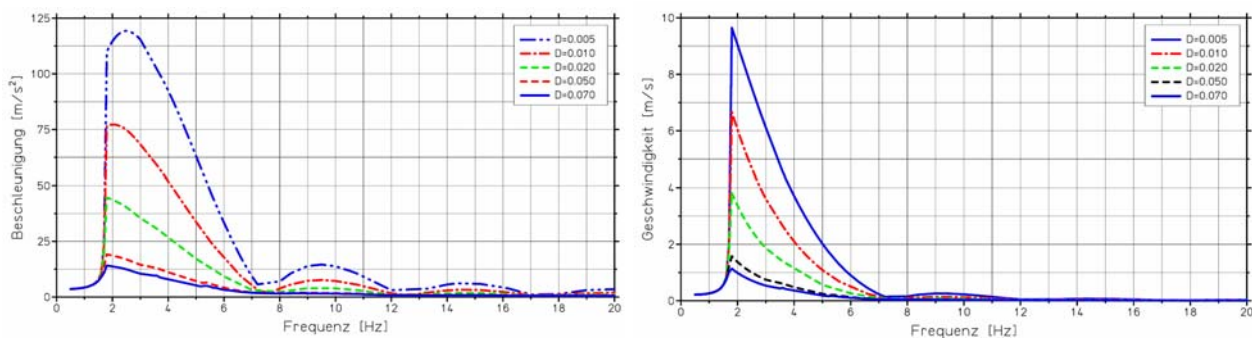


Bild 3: Antwortspektrum der Beschleunigung a und Geschwindigkeit v infolge Hüpfen mit $P_0 = 1$ N, effektive Systemmasse $M = 1$ kg

Eine praktische Untersuchung und Bemessung für den Lastfall Hüpfen bei Sport- und Versammlungsstätten kann für ein System, dass sich in einen Einmassenschwinger überführen lässt, mit den oben angegebenen Antwortspektren wie folgt durchgeführt werden:

- 1) Klären der Aufgabenstellung: Erfolgt die Anregung planmäßig, zufällig oder mutwillig? Wie viele Personen sind an der Anregung beteiligt? Wie groß ist die Personendichte bzw. Massenbelegung pro m^2 (z.B. 0.5 Personen zu 80 kg pro m^2)? Inwieweit ist ein synchrones Verhalten der Personen möglich (z.B. Sport mit Musik, Fans bei Rockkonzerten usw.)?
- 2) Wahl des dynamischen Systems und Bestimmung von effektiver Steifigkeit k_{eff} , effektiver Masse M_{eff} und Dämpfung
- 3) Bestimmung der Eigenfrequenz; wenn größer als 7 Hz, keine weiteren Untersuchungen, sondern statische Auslegung für übliche Verkehrslast
- 4) Bestimmung der effektiven Belastung aus P_0 nach Gl. (3.3)
- 5) Ermittlung der effektiven statischen Ersatzlast durch Multiplikation des Diagrammwertes aus Bild 2 (in Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Systems und der Dämpfung) mit der tatsächlich vorhandenen ruhenden Last P_0 ; Nachweis der Standsicherheit mit dieser statischen Ersatzlast
- 6) Ermittlung der effektiven Beschleunigungen a_{eff} und Schwinggeschwindigkeiten v_{eff} aus den Diagrammen in Bild 3 (Einheiten N, kg, m, s beachten!):

$$a_{eff} = a \cdot P_0 [N] / M_{eff} [kg] \quad \text{in } [m/s^2]$$

$$v_{eff} = v \cdot P_0 [N] / M_{eff} [kg] \quad \text{in } [m/s]$$

- 7) Vergleich mit zulässigen Werten

4 Zulässige Schwingungsgrößen

Als „unzulässig“ sind nicht nur Schwingungen anzusehen, die eine Schädigung von Bauwerken oder eine Einschränkung der Gebrauchsfähigkeit oder Dauerhaftigkeit zur Folge haben, sondern auch solche, die auf Dauer zu einer Beeinträchtigung des Wohlbefindens von Menschen führen. Hierbei ist allerdings unbedingt zu beachten, dass Schwingungen von verschiedenen Menschen stark unterschiedlich wahrgenommen werden können.

Das subjektive Empfinden von Schwingungen wird dabei nicht nur durch direkte Effekte (Frequenz, Größe, Dauer, Richtung der Erschütterung etc.) sondern auch wesentlich durch indirekte Effekte (Umgebungsgeräusche, Höhe über Grund, Kenntnis der Erschütterungsquelle, Erwartungshaltung, Gewöhnung an Schwingungen, äußere Erscheinung einer Baustruktur, Vertrauen

in eine Baustruktur etc.) beeinflusst. Bekannt ist eine subjektiv stärkere Wahrnehmung von Erschütterungen, wenn gleichzeitig hörbare Geräusche (Maschinenbrummen, Türenklappen, Gläserklirren usw.) oder sichtbare Bewegungen von Gegenständen (Tassen, Gläser, Lampen, usw.) auftreten. Bei diesen Erscheinungen muss es sich jedoch nicht zwangsläufig um unzulässige Schwingungen von Bauteilen handeln; vielmehr ist anzunehmen, dass Resonanzschwingungen sekundärer Bauteile wie z.B. Türen, Fenster, leichter Trennwände oder Wandschränke vorliegen. Großen Einfluss auf das menschliche Empfinden haben auch die Körperposition (liegend, stehend, sitzend), die Aktivität während der Wahrnehmung der Schwingungen (Ruhe oder intensive Bewegung) und der Gesundheitszustand der beteiligten Personen. Sehr empfindliche Menschen können unter Umständen bereits Schwingungen als störend empfinden, die nur geringfügig über der Wahrnehmungsgrenze liegen.

Dem subjektiven Empfinden von Schwingungen entsprechend werden auch in der Literatur bzw. in den Normen zumeist Bereiche zulässiger Größen mit relativ breiter Streuung vorgeschlagen, die aber nicht als starr einzuhaltende „Richtwerte“ sondern als Anhaltswerte und Empfehlungen anzusehen sind. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob es sich bei den Angaben um Effektivwerte (RMS-Werte) oder um Spitzenwerte handelt. Als Ergebnisse von Schwingungsmessungen werden in der Regel Effektivwerte angegeben. Neben Schwingwegen und Schwinggeschwindigkeiten sind für die Beurteilung von Schwingungen vor allem die auftretenden Beschleunigungen von Interesse, da diese maßgeblich das menschliche Empfinden bestimmen.

Seit langer Zeit ist bekannt, dass sich vor allem leichte oder weitgespannte Fußgängerbrücken zu unzulässigen Schwingungen anregen lassen; dementsprechend ist der Bereich zulässiger Größen dort relativ gut bekannt. In [2] schlägt Bachmann vor, die vertikalen Beschleunigungen von Fußgängerbrücken auf 0.50 bis 1.00 m/s² zu beschränken; der obere Wert kann für größere Brücken noch toleriert werden. Für gewöhnliche Fußgängerbrücken empfiehlt Kramer [8] maximale Beschleunigungen von 0.80 m/s² zuzulassen. Der britische Standard BS 5400 [10] begrenzt die Vertikalbeschleunigungen bei Fußgängerbrücken in Abhängigkeit von der Schrittfrequenz auf $0.5\sqrt{f}$ in [Hz], bei einer mittleren Schrittfrequenz von etwa 2.0 Hz also auf 0.70 m/s².

Für Schwingungen in Gebäuden sind je nach Nutzung weitergehende Betrachtungen erforderlich. Als grobe Anhaltswerte werden in [2] für Turn- und Sporthallen, Tanzlokale und Konzertsäle maximale Beschleunigungen von 0.50 bis 1.00 m/s² vorgeschlagen. Für Bürogebäu-

de sollten diese aber bereits unter 0.20 m/s^2 liegen. Zur Beurteilung von Schwingungen in Wohngebäuden und vergleichbar genutzten Räumen kann auch DIN 4150 Teil 2 [6] herangezogen werden. Aus gemessenen Schwingungssignalen wird dort die „maximale bewertete Schwingstärke“ $KB_{F_{\max}}$ (Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit) als Beurteilungsgröße abgeleitet und mit unteren bzw. oberen Anhaltswerten A_u bzw. A_o verglichen. Diese berücksichtigen neben der Zeitdauer und der Tageszeit des Auftretens der Schwingungen auch die Wohnumgebung und deren vorwiegende Nutzung. Die geringsten Werte ergeben sich für reine Wohngebiete und Krankenhäuser. Alles in allem ist DIN 4150 Teil 2 aber eher für die Auswertung von durchgeführten Schwingungsmessungen geeignet.

Eine noch differenziertere Betrachtung des menschlichen Empfindens von Schwingungen in Gebäuden kann nach ISO 2631-2:1989 [4] erfolgen. Dort werden zunächst frequenzabhängige Grundwerte für vertikale und horizontale Beschleunigungen bzw. Geschwindigkeiten angegeben, die anschließend noch mit Erhöhungsfaktoren zu multiplizieren sind. Diese berücksichtigen außer der Gebäudenutzung auch noch, ob die Erschütterungen ständig oder nur zeitweise auftreten und ob dies tagsüber oder nachts passiert. Da es sich hierbei auch nur um Anhaltswerte handeln kann, ist daran zu erkennen, dass die Erhöhungsfaktoren 1 bis 128 betragen können. Für den Anwender verbleibt somit ein großer Ermessensspielraum.

Eine Beurteilung der Auswirkungen möglicher Schwingungen auf bestimmte Bauteile kann z.B. nach DIN 4150 Teil 3 [7] erfolgen. Danach ist bei kurzzeitigen vertikalen Schwingungen von „Decken und ähnlichen Bauteilen“ und Schwinggeschwindigkeiten von weniger als 20 mm/s eine Verminderung der Gebrauchsfähigkeit der Decke nicht zu erwarten. Bei dauernder Einwirkung ist bei Schwinggeschwindigkeiten von unter 10 mm/s weder eine Beeinträchtigung der Standsicherheit und noch eine Verminderung der Tragfähigkeit zu erwarten.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Festlegung zulässiger Schwingungsgrößen nur im Rahmen einer ingenieurmäßigen Bewertung eines Gesamtzusammenhanges (Systemeigenschaften, Dämpfung, Lastannahmen und zulässige Werte) erfolgen kann. Trotzdem verbleiben Fragestellungen, die sich nach unserer Auffassung nicht eindeutig klären lassen – wie genau lässt sich z.B. angeben, ab welchem Beschleunigungswert Schwingungen als so bedrohlich empfunden werden, dass eine „Panik“ unter den Besuchern eines Rockkonzertes ausbricht?

5 Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Resonanzschwingungen

Grundsätzlich lässt sich die Gefahr von Resonanzerscheinungen durch die Schaffung eines ausreichenden Frequenzabstandes zwischen maßgebender Bauwerkseigenfrequenz und möglichen Erregerfrequenzen weitgehend ausschließen. Da bei menscheninduzierten Schwingungen – anders als durch Maschinen hervorgerufene Schwingungen – nicht eine bestimmte Erregerfrequenz sondern relativ große Bereiche möglicher Erregerfrequenzen vorliegen, ist hier meist nur eine Hochabstimmung der Eigenfrequenzen sinnvoll. Die Größe des erforderlichen Frequenzabstandes ist dabei von der tatsächlichen Dämpfung abhängig.

Für Geschossdecken von Turn- und Sporthallen, die konservativ auf die 2. Harmonische der Belastung durch „Hüpfen“ abgestimmt werden sollten, werden in [2] für Stahlbeton-, Spannbeton-, Verbund- und Stahlkonstruktionen minimale Eigenfrequenzen von 7.5, 8.0, 8.5 und 9.0 Hz empfohlen. Die zunehmenden Frequenzwerte werden dabei mit, zu den einzelnen Bauweisen korrespondierenden, abnehmenden Werten für Steifigkeit, Masse und Dämpfung begründet. Tanzlokale und Konzertsäle, bei denen geringere Erregerfrequenzen und wirksame Lastanteile auftreten dürften, sollten Eigenfrequenzen von mindestens 6.5 bis 8.0 Hz aufweisen. Bürogebäude, für die eine Abstimmung auf die 3. Harmonische der Belastung durch „Gehen“ vorgeschlagen wird, sollten Eigenfrequenzen von mindestens 7.5 bis 9.0 Hz aufweisen.

Nach eigener Auffassung dürften die vorstehenden Frequenzwerte aber oftmals weit auf der sicheren Seite liegen. Unter Berücksichtigung des Antwortspektrums in Bild 2 wird je nach Bauweise, Tragsystem und zu erwartender Dämpfung in praktischen Fällen vorgeschlagen, minimale Eigenfrequenzen von 6.5 bis 7.5 Hz anzustreben und ggf. die Einhaltung zulässiger Schwingungsgrößen anhand einer Schwingungsberechnung zu überprüfen.

Falls die in einer Schwingungsberechnung ermittelten Schwinggeschwindigkeiten bzw. Schwingbeschleunigungen zulässige Werte überschreiten, sind mehrere Maßnahmen denkbar. So kann eine Anhebung von Eigenfrequenzen durch eine Reduzierung der wirksamen Massen oder durch eine Erhöhung der Systemsteifigkeiten zum Ziel führen. Diese „klassischen“ Lösungen können allerdings auch zu Nutzungseinschränkungen (Raumhöhe !) führen oder einfach unwirtschaftlich werden. In diesem Fall sind daher auch Sondermaßnahmen zur Erhöhung der Systemdämpfung (z.B. die Kopplung eines Tragwerks mit viskosen Dämpfern) oder der Einsatz von Schwingungstilgern denkbar. Unter Umständen kann auch eine Kopplung von Tragwerken sinnvoll sein.

6 Ausgewählte Beispiele

Während der praktischen Tätigkeit der letzten Jahre konnten die Autoren zahlreiche Projekte zum Problemkreis "menscheninduzierte Schwingungen" bearbeiten. In diesem Abschnitt soll an drei ausgewählten Beispielen über die Erfahrungen berichtet werden.

6.1 Kinocenter mit Fitness-Studio

Kurz vor Fertigstellung eines großen Kinocenters wurde beschlossen, die Anzahl der Kinosäle von zehn auf sechs zu reduzieren und die dadurch frei werdenden beiden obersten Ebenen des Gebäudes zukünftig als Fitness-Studio zu nutzen. Da in diesem die verschiedensten Hüpf-, Tanz- und Gymnastikübungen möglich sein sollten, erwies sich praktisch nur eine Abstimmung der Geschossdecken auf die 2. Harmonische der Belastung aus „Hüpfen“ hinsichtlich Gebrauchsfähigkeit und Standsicherheit als ausreichend sicher. Hierbei wurde angenommen, dass bei einer größeren Gruppe von Menschen und der erforderlichen Synchronität kaum höhere Hüpf Frequenzen als 3.0 Hz möglich sind.

Bei der Auslegung der ca. 21.0 m weit spannenden unteren Geschossdecke, die sich unmittelbar über dem größten Kinosaal befindet, waren erhöhte ständige Lasten zu berücksichtigen, die unter anderem aus baulichen Maßnahmen zur Vermeidung einer gegenseitigen Schallübertragung zwischen Kinosälen und Fitness-Studio resultierten. Da die bereits fertiggestellten Baustrukturen und die zur Anlieferung bereit stehenden Bauteile weiterverwendet werden sollten, wurde der Abstand der vorgesehenen Stahlverbundträger auf 2.40 m halbiert und deren Untergurte durch aufgeschweißte Laschen verstärkt. Für das verstärkte Tragsystem wurde eine 1. Eigenfrequenz von 7.45 Hz ermittelt.

Die oberste Geschossdecke sollte ursprünglich als 25.0 m weit gespannte frei tragende Stahlverbunddecke ausgeführt werden. Zusätzliche Besonderheit war eine ca. 7*8 m große Deckenöffnung. Da Systemverstärkungen zu weiteren Einschränkungen der Nutzhöhe geführt hätten, wurde die oberste Geschossdecke mit der Dachdecke gekoppelt und beide an oberhalb der Dachebene befindlichen Dachträgern aufgehängt. Für das gekoppelte Gesamtsystem aus Geschossdecke, Dachdecke und Fachwerkträgern mit den jeweiligen abgehängten Massen war eine höhere Dämpfung als bei einem reinen Trägersystem zu erwarten, weshalb hier eine erste Eigenfrequenz von nur 6.5 Hz angestrebt wurde. Für das gewählte System wurden unterste Eigenfrequenzen von 6.32 Hz, 6.41 Hz und 6.97 Hz ermittelt. Diese resultierten aus unterschiedlichen Trägerabständen, die aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht mehr verändert werden konnten.

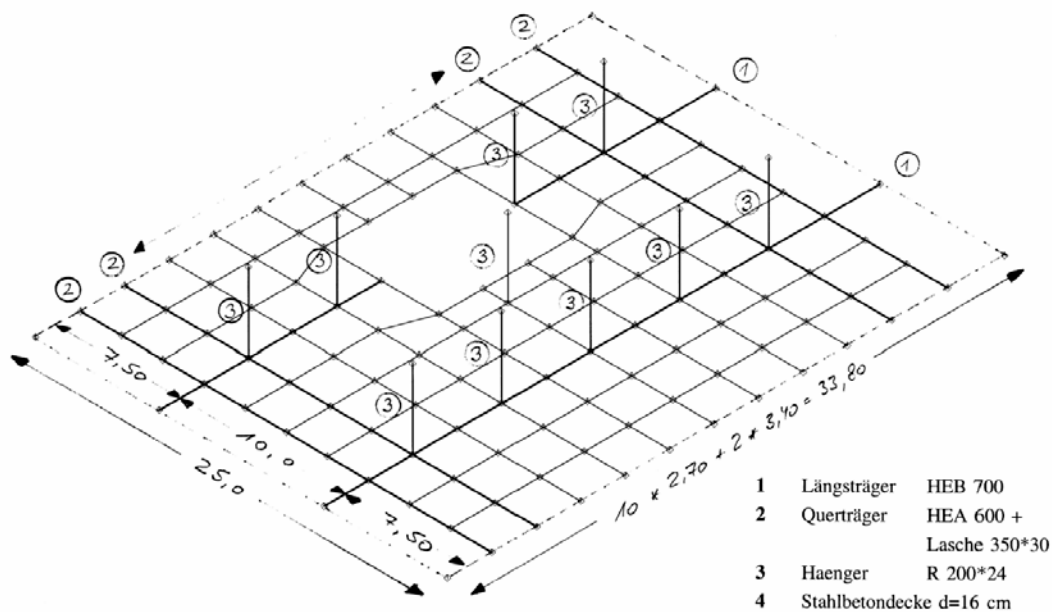


Bild 4: System der Geschossdecke des Fitness-Studios mit großer Deckenöffnung und Hängern

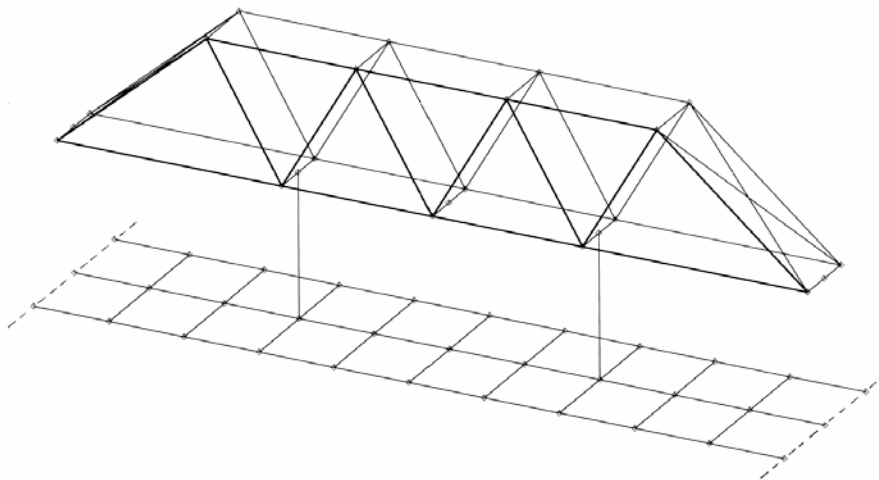


Bild 5: Systemausschnitt des Dachträgers mit angehängter Geschossdecke des Fitness-Studios

Anschließend wurden Schwingungsberechnungen durchgeführt, um die Einhaltung zulässiger Schwingungsgrößen zu überprüfen. Dabei wurde von einer maximalen Hüpf Frequenz von 3.0 Hz, einer Personendichte von 0.5 Personen/m², einem Personengewicht von 0.80 kN und bereichsweiser Vollbelegung mit bis zu 25 Personen ausgegangen. Unter Rücksichtnahme auf an der Erregung unbeteiligte Personen aber auch um eine mögliche Schwingungsanregung abgehängter Bauteile zu vermeiden, sollten die auftretenden Schwingbeschleunigungen auf 0.50 m/s² beschränkt werden.

Für die untere Geschossdecke wurde angesichts abgehängter Decken und Installationen mit einer modalen Dämpfung von 1 % gerechnet. Es ergaben sich hier maximale vertikale Schwingbeschleunigungen von 0.44 m/s^2 . Bei den Schwingungsberechnungen für die obere Geschossdecke wurde für das gekoppelte Deckensystem mit mehrfach abgehängten Massen eine modale Dämpfung von 2% unterstellt. Für drei konservativ festgelegte mögliche Belastungszonen ergaben sich extremale Schwingbeschleunigungen von 0.45 m/s^2 bis 0.56 m/s^2 .

6.2 Mehrzweckhalle

Bei der Mehrzweckhalle „Kölnarena“ war für bestimmte Bauteile zu prüfen, ob sich diese zu unzulässigen Schwingungen anregen lassen. Da für die Herstellung des Rohbaus fast ausschließlich Stahlbeton- und Spannbetonfertigteile als Einfeldträger in den Betongüten B35 und B55 verwendet werden sollten und für diese nur geringe Dämpfungen zu erwarten waren, war es das Ziel, die Bauteile auf die 2. Harmonische der Belastung aus „Hüpfen“ hoch abzustimmen, um eine mögliche Anregung weitestgehend ausschließen zu können.

Vor Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde nachgewiesen, dass die Bauteile auch bei voller Beanspruchung im Zustand I (ungerissener Stahl- bzw. Spannbetonquerschnitt) verbleiben oder es wurde das Absinken der Steifigkeit im Zustand II (gerissener Stahlbetonquerschnitt) durch eine Reduktion der elastischen Steifigkeit berücksichtigt. Die Plattenbalken und Unterzüge im Bereich der Eisfläche, die Tribünenstufen und die darunter befindlichen „Sägezahnträger“ wurden für Eigenfrequenzen von mindestens 7.5 Hz ausgelegt. Für die diversen Querschnittstypen der im gesamten Hallenrund verlegten, unterschiedlich langen Tribünenstufen wurden dabei vereinfachend maximal zulässige Trägerlängen ermittelt. Für einzelne Treppenläufe wurden nur Eigenfrequenzen von 7.2 Hz ermittelt, was akzeptiert werden kann, da das für die Maximalbeanspruchung erforderliche, sehr schnelle synchrone Hüpfen auf den beengten Treppenstufen wohl kaum möglich sein dürfte.

Darüber hinaus wurden Schwingungsberechnungen für die außen liegenden Freitreppen, bestehend aus übereinander und nebeneinander angeordneten Treppenläufen einschließlich der Stützen und Auflager sowie der Anschlüsse an Mundlöcher und Podeste durchgeführt. In Abstimmung mit Bauherr, Planer und Bauaufsicht wurde ein Szenario unterstellt, dass bei einer Veranstaltung wie z.B. einem Rockkonzert die Treppen mit Personen besetzt sein können, die rhythmisch nach Vorgabe der Musik wippen oder gar hüpfen. Durch verschiedene konstruktive Maßnahmen konnte die kleinste Eigenfrequenz des Systems von ursprünglich ca. 2 Hz auf ma-

ximal 4.5 Hz angehoben werden. Eine weitere Anhebung auf über 7.0 Hz war nicht möglich. Folglich mussten die Auswirkungen der möglichen Anregungen durch numerische Analysen untersucht werden. Hierbei wurde angenommen, dass jede Treppenstufe eines durchgehenden Treppenlaufs mit zwei Personen zu je 80 kg besetzt ist. Die Erregerfrequenz wurde mit 2.25 Hz auf die niedrigste Eigenfrequenz des Systems von 4.5 Hz abgestimmt. Es ergaben sich rechnerisch maximale vertikale Beschleunigungen von 2.0 m/s^2 , die für Einwirkungsauern von wenigen Minuten noch unterhalb der „Ermüdungsgrenze“ nach ISO 2631 in [4] liegen und unter Berücksichtigung der hier vorliegenden Randbedingungen auf Treppenläufen akzeptiert werden konnte.

6.3 Fußballstadien Köln-Müngersdorf und Weserstadion Bremen

Im Fußballstadion Köln-Müngersdorf wurden erstmals 1987 bei einem Open-Air-Rockkonzert besorgniserregende Schwingungen der Tribünenstufen festgestellt, die ohne Zweifel auf niedrige Eigenfrequenzen von minimal 3.9 Hz zurückzuführen waren. Um die Eigenfrequenzen der Stufen zu erhöhen, wurden die Tribünen bei den folgenden Open-Air-Konzerten mit temporären Abstützungen versehen. Wegen der damit verbundenen Kosten und Nutzungseinschränkungen wurden in der Folgezeit sowohl praktische als auch theoretische Untersuchungen durchgeführt, um die auftretenden Schwingbeschleunigungen dauerhaft zu reduzieren (vgl. [11], [12]).

Bei systematischen „Aufschaukelversuchen“ vor Ort konnte nachgewiesen werden, dass sich die Stufen durch das Hüpfen von Personen in der halben Eigenfrequenz anregen lassen. Die damals gemessenen Beschleunigungen betrugen bis zu 6.2 m/s^2 . Im Frühjahr 1995 wurde eine bereichsweise Verpressung der Längsfugen der Tribünenstufen mit einem Epoxidharz durchgeführt, um die einzelnen Stufen miteinander zu koppeln. Bei einer messtechnischen Erfolgskontrolle konnte aber lediglich eine Anhebung der untersten Eigenfrequenzen von 3.9 auf 4.6 Hz festgestellt werden, was in Bezug zu der möglichen Anregung nicht ausreichend war. Auch die Dauerhaftigkeit der Kopplung konnte nicht geklärt werden. Bei den in den Folgejahren stattfindenden Open-Air-Konzerten wurde das Schwingungsverhalten der Tribünenstufen messtechnisch überwacht. Dabei ergaben sich maximale Beschleunigungen von ca. 2.0 m/s^2 ; allerdings wurden auch bei keinem der Konzerte übermäßige körperliche Aktivitäten des Publikums auf den Tribünen beobachtet. Von Seiten der Bauaufsicht wurde die Frage aufgeworfen, ab wann die im Falle von Rock-Konzerten möglicherweise auftretende Schwingungen der Tribünenstufen – diese sind für die auf den Stufen befindlichen Personen „stark spürbar“ – Angstreaktionen der Zuschauer bis hin zur Panik auslösen können.

Im Jahre 1995 wurden erstmals auch Schwingungen der gesamten Tribünenbinder beobachtet, was sich durch heftige Bewegungen der am auskragenden Dachträger abgehängten Lautsprecher und Beleuchtungseinrichtungen zeigte. In dynamischen Untersuchungen wurde daher das Schwingungsverhalten eines repräsentativen Binders analysiert. Dabei wurden unterschiedliche Stufenbelegungen und auf die Eigenfrequenzen des Tragwerks abgestimmte Hüpf Frequenzen untersucht. Vereinfachend wurde für das Gesamtsystem aus Stufen, Binderscheibe und Baugrund mit einer modalen Dämpfung von 5% berechnet.

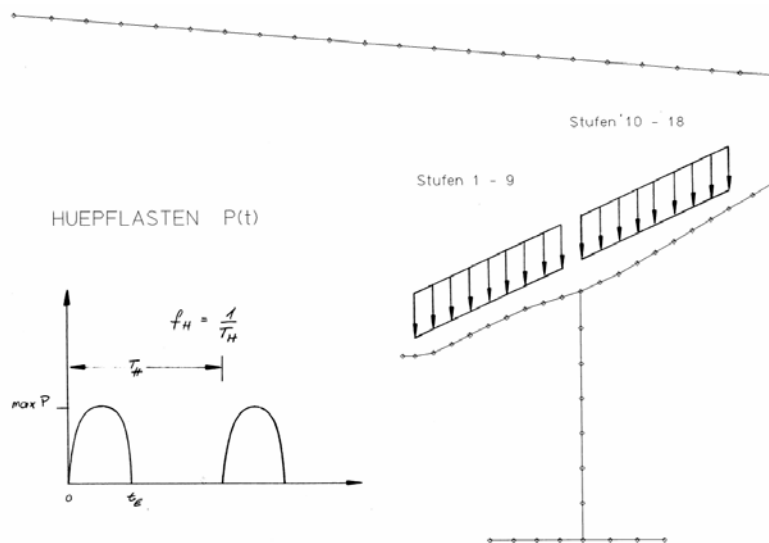


Bild 6: FE-Modell eines Tribünenbinders

Es zeigte sich, dass die beim Lastfall „Hüpfen“ resultierenden Gesamtschnittgrößen bei konservativen Lastannahmen die Auslegungsschnittgrößen durchaus überschreiten können. Da aber erst mehrere Einflussfaktoren – Vollbelegung, Liedfrequenz, Bauwerkseigenfrequenz und Publikumsaktivität – ungünstig zusammenkommen müssen, bevor die ermittelte extremale Beanspruchung auftreten kann, besitzt dieser Sonderlastfall sicherlich nur eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit. Eine geringfügige Reduzierung der üblichen Sicherheitsfaktoren kann daher akzeptiert werden. Eine Beeinträchtigung der Standsicherheit des Gesamttragwerks ist nicht zu erwarten, eine Einschränkung der Gebrauchsfähigkeit ist jedoch nicht auszuschließen.

Bereits kurz nach seiner Fertigstellung hatte das Müngersdorfer Stadion bautechnische Bekanntheit durch spektakuläre Spanngliedbrüche erlangt, die durch Korrosion des Spannstahls in offensichtlich unverpresst gebliebenen Spanngliedkanälen verursacht wurden. Darüber hinaus wies der verwendete Spannstahl eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Spannungs-Riß-Korrosion auf. Da das 1972 erbaute Müngersdorfer Stadion im Hinblick auf die Fußballwelt-

meisterschaft 2006 den heutigen Anforderungen an einen Multifunktionsarena nicht mehr entspricht, wurde es inzwischen abgerissen.



Bild 7: Untersicht der Tribünenstufen und Kragarm des Tribünenbinders

Auch beim baugleichen Weserstadion in Bremen traten Schwingungsprobleme auf. Hier wurden verschiedene Sanierungsmöglichkeiten ausgearbeitet, z.B. mit an den Stufen angeklebten Stahlprofilen zur Anhebung der Steifigkeit und damit der ersten Eigenfrequenz. Beim Neubau der Südtribüne kamen verstärkte Stufen zum Einsatz. Bei Open-Air-Rockkonzerten werden nach wie vor messtechnische Überwachungen der Beschleunigungen durchgeführt.

Zusammenfassung

Immer schlankere und leichtere Tragkonstruktionen machen in zunehmendem Maße die Auslegung von Baustrukturen gegen menscheninduzierte Schwingungen erforderlich. Für die Festlegung der Last- und Systemannahmen, die Abschätzung der Dämpfung und die Bestimmung zulässiger Schwingungsgrößen sind ingenieurmäßige Annahmen zu treffen. Nach kurzer Erörterung der hierbei auftretenden spezifischen Probleme werden für den Lastfall "Hüpfen" auf Basis des Antwortspektrenverfahrens statische Ersatzlasten angegeben, die für einfache System verwendet werden können. Abschließend wird an ausgewählten Beispielen über Erfahrungen berichtet, die die Verfasser bei der Untersuchung menscheninduzierter Schwingungen in der Baupraxis gewinnen konnten.

Literaturverzeichnis

- [1] Eibl, J., Henseleit, O., Schlüter, F.-H.:
Baudynamik. Betonkalender 1988, pp. 665-774, Ernst & Sohn: Berlin, 1988.
- [2] Bachmann, H., Amman, W.:
Schwingungsprobleme bei Bauwerken. Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. IABSE-AIPC-IVBH. ETH-Hönggerberg, Zürich: 1987.
- [3] Flesch, R.:
Baudynamik Praxisgerecht. Band I: Berechnungsgrundlagen. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin: 1993.
- [4] ISO 2631-2: 1989 (E):
Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz).
- [5] ISO 10137: 1992 (E):
Bases for design of structures - Serviceability of buildings against vibration.
- [6] DIN 4150 – Erschütterungen im Bauwesen.
Teil 2 (06/99): Einwirkungen auf Menschen.
- [7] DIN 4150 – Erschütterungen im Bauwesen
Teil 3 (02/99): Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
- [8] Kramer, H.:
Dynamische Belastung durch Fußgänger. Bauingenieur 73 (1998), Nr. 7/8 pp. 342-346.
- [9] Grundmann, H., Kreuzinger, H., Schneider, M.:
Schwingsuntersuchungen für Fußgängerbrücken. Bauingenieur 68 (1993), 215-225.
- [10] British Standards Institution, BS 5400, Part 2, Appendix C:
„Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges“, 1978.
- [11] Eibl, J., Rösch, R.: Schwingungsprobleme in einem Fußballstadion. Bauingenieur 65 (1990) 307-311. Springer-Verlag, 1990.
- [12] Bericht des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (Prof. Dr.-Ing. Eibl) vom 01.08.95: Stadion Köln-Müngersdorf, Schwingungsüberwachung und Auswertung von 3 Open-Air-Konzerten.