

Vorschlag für die Formulierung dynamischer Lasten bei leichten Deckensystemen mit Erregerfrequenzen über 7,5 Hz

Dipl.-Ing. Ina Gerasch
grbv Ingenieure im Bauwesen, Hannover

Dipl.-Ing. Wolf -Jürgen Gerasch
Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover

ZUSAMMENFASSUNG: Bei der Berechnung des Schwingungsverhaltens von Geschossdecken, die durch gehende Menschen zu Schwingungen angeregt werden können, wurde bisher vorwiegend die Resonanzregung als kritisch angesehen.

Schwingungsmessungen an verschiedenen Geschossdecken, bei denen Resonanz ausgeschlossen werden konnte, führten trotzdem zu Schwingungsamplituden, die die Gebrauchstauglichkeit einschränken können.

Die Simulation der Antworten mit FE-Modellen führten zu keinen Ergebnissen, die mit den Messergebnissen übereinstimmen.

Der Ansatz des EC 5 ist ebenso wenig geeignet, um eine wirklichkeitsnahe Berechnung durchzuführen.

In der Medizin ist bekannt, dass beim Gehen ein kurzer Impuls beim Aufsetzen der Ferse erzeugt wird. Im angelsächsischen Sprachraum wird von heel strike gesprochen. Dieser Impuls beansprucht die Gelenke im Fuß und in den Beinen. Außerdem wirkt dieser Impuls auch auf die Geschossdecke in den Gebäuden.

Es wird gezeigt, dass unter der Berücksichtigung dieses Impulses eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Antwort der Geschossdecken beim Gehen möglich ist.

1. EINLEITUNG

Die Konstruktionen für Geschossdecken von z.B. Bürogebäuden, Krankenhäusern, Labors usw. weisen verstärkt immer größere Spannweiten auf und werden immer leichter. Treten dynamische Einwirkungen auf, wie z.B. Lasten die von Personen in die Konstruktionen eingeleitet werden, so besteht die Gefahr, dass die Gebrauchstauglichkeit der Geschossdecken nicht gegeben ist. Es werden dabei nur die Schwingungen untersucht, die beim Gehen von Personen über Geschossdecken verursacht werden. Bewegungsarten, die nur selten in den Gebäuden auftreten, werden nicht betrachtet.

2. EINGANGSGRÖSSEN (DYNAMISCHE EINWIRKUNGEN)

2.1 PERIODISCHE LASTEN

Geht eine Person auf einer Geschossdecke, so werden von ihr periodische Lasten in die Konstruktion eingeleitet. Es handelt sich dabei um Lasten, die drei senkrecht zueinander liegende Richtungen aufweisen.

Anders als z.B. bei Fußgängerbrücken ist allein die Last in Vertikalrichtung für das Schwingungsverhalten der Geschossdecken von Interesse.

Ein typischer Zeitverlauf der dynamischen Last ist in Bild 1 dargestellt.

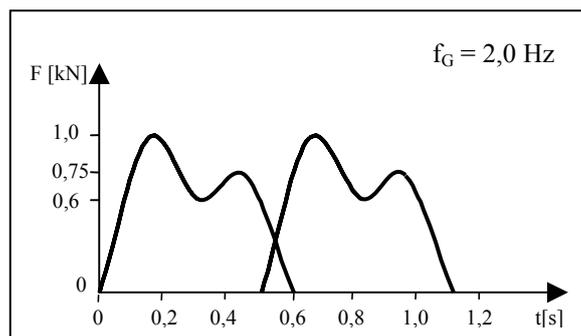


Abbildung 1: Zeitverlauf (Gehen)

Das Frequenzspektrum weist drei Fourierkoeffizienten auf, die von Bedeutung sein können (Bild2).

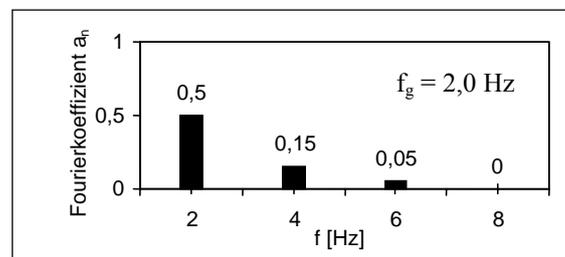


Abbildung 2: Spektrum (Gehen)

Die Schrittfrequenz ist zu $f = 2,0$ Hz gewählt, da die Personen entsprechend der Häufigkeitsverteilung (Bild 3) vorwiegend mit dieser Geschwindigkeit auf den Geschossdecken gehen.

Da beim Gehen die Schrittfrequenz bei maximal

$f = 2,5$ Hz

liegt, ist eine Resonanz im Frequenzbereich bis

$f = 7,5$ Hz

grundsätzlich nicht auszuschließen.

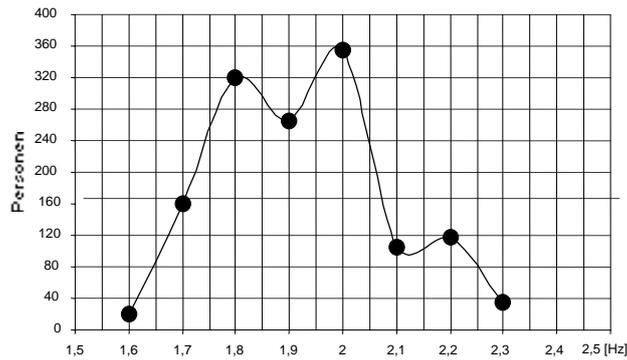


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Schrittfolgen

Bei leichten und schwach gedämpften Geschossdecken können trotz der kleinen dynamischen Last der 3. Erregerfrequenz Schwingungsamplituden mit Erregerfrequenzen von $f > 5,0$ Hz erzeugt werden, die die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktionen massiv beeinträchtigen können. (Bild 4)

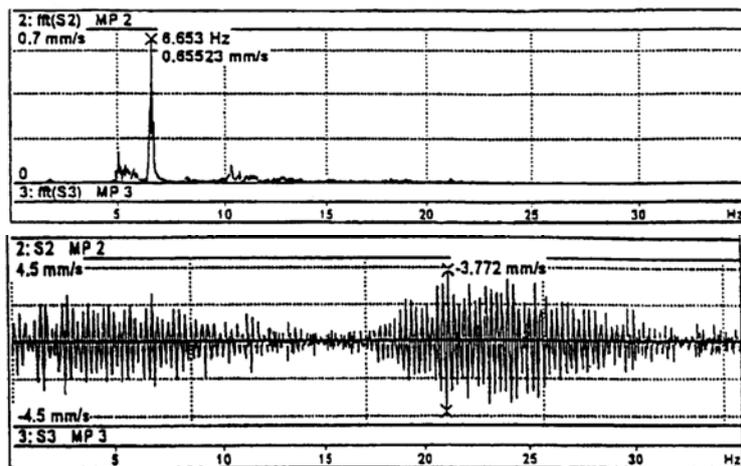


Abbildung 4: Gehen auf einer Geschossdecke (Zeitverlauf und Spektrum)

2.2 TRANSIENTE ERREGUNG

In der Medizin wird der Einfluss der zyklischen Einwirkung beim Gehen auf die Beanspruchung der Sprunggelenke, der Knie und der Hüftgelenke seit Jahrzehnten untersucht (Nigg, 1983). Wesentlich bei dieser Betrachtung ist nicht der tieffrequente Zeitverlauf entsprechend Bild 1, sondern die erste Amplitudenspitze im Zeitverlauf entsprechend Bild 5 (Riskowski, 2005). In Abhängigkeit vom Schuhwerk bildet sich der Impuls unterschiedlich aus.

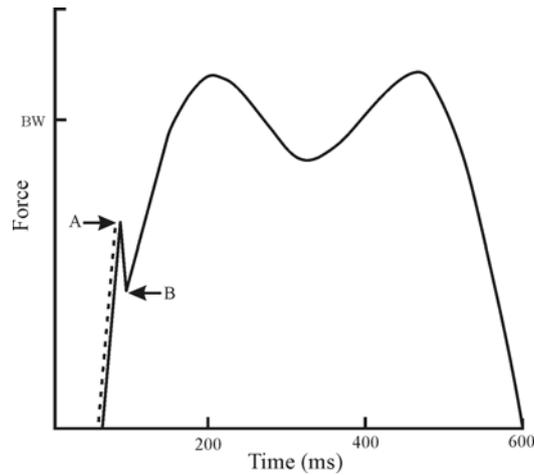


Abbildung 5: Zeitverlauf (Gehen) Fersenstoß (heel strike)

Die Impulsdauer liegt beim Gehen bei $\tau = 0,015 \div 0,050$ s, sodass das Spektrum die wesentliche Amplitudenspitze im Frequenzbereich von $f = 10 \div 70$ Hz aufweist. In Bild 6 ist das Erregerspektrum für eine Impulsdauer von $\tau = 0,035$ s und einer Impulskraft von etwa 50% des Körpergewichtes dargestellt.

Für die dynamische Belastung von Baukonstruktionen (Geschossdecken) wurde der Fersenstoß (heel strike) bisher nicht betrachtet. Unsere Untersuchungen haben aber zu dem Ergebnis geführt, dass bei vielen Geschossdecken die wesentlichen Schwingungen durch den Fersenstoß (heel strike) verursacht werden.

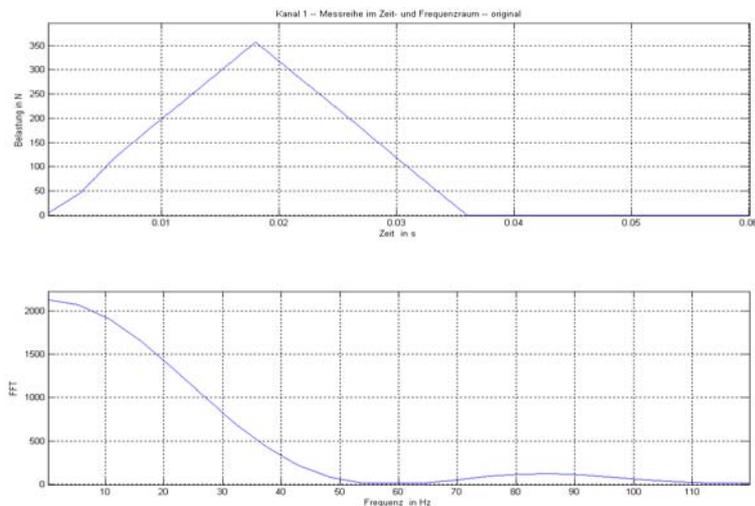


Abbildung 6: Zeitverlauf und Spektrum des Fersenstoßes

Die Antwort der Geschossdecken auf die Impulseinwirkung kann besonders in Bürogebäuden, Krankenhäusern und Labors störend sein und die Anforderungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllen.

3. ZULÄSSIGE SCHWINGUNGSAMPLITUDEN

Der Eurocode 5 befasst sich mit zulässigen Schwingungsamplituden auf Holzbalkendecken in Wohngebäuden. Im Gegensatz zur DIN 1052 erfordert die Bemessung von Holzbalkendecken nach EC 5 einen Schwingungsnachweis.

Die zulässige Schwinggeschwindigkeitsamplitude für einen Einheitsimpuls von $J = 1$ [Ns] liegt bei etwa

$$v_{\max} = 15 \text{ mm/s.}$$

Die DIN 4150, Teil 2 lässt für selten auftretende Schwingungen eine Maximalamplitude von

$$v \cong 6 \text{ mm/s}$$

zu. Treten die Schwingungen häufiger am Tag auf, so ist eine Schwinggeschwindigkeitsamplitude von

$$v \leq 1,0 \text{ mm/s}$$

anzustreben.

Entsprechend der ISO 2631 kann eine Schwinggeschwindigkeitsamplitude von

$$v \leq 1,0 \text{ mm/s}$$

auch in Bürogebäuden akzeptiert werden.

Wesentlich kleiner sind die Schwinggeschwindigkeitsamplituden, die in Krankenhäusern auftreten dürfen.

VDI 2057 $v \leq 0,44 \text{ mm/s}$ (Krankenzimmer)

$$v \leq 0,22 \text{ mm/s (OP-Saal).}$$

Diese Schwingungsamplituden müssen noch unterschritten werden, wenn hochempfindliche Geräte (z.B. Mikrochirurgischer OP-Betrieb) im Einsatz sind.

$$v \leq 0,1 \text{ mm/s}$$

4. BERECHNUNG DER ANTWORT DER GESCHOSSDECKEN BEI DYNAMISCHER EINWIRKUNG

4.1 PERIODISCHE ERREGUNG

Bemerkenswerte Schwingungsamplituden treten nur dann auf, wenn eine Erregerfrequenz der periodischen Erregung mit einer Eigenfrequenz der Deckenkonstruktion übereinstimmt.

Es ist besonders bei schwach gedämpften Konstruktionen davon auszugehen, dass der stationäre Schwingungszustand nicht erreicht wird, da die Erregung nicht ausreichend lange einwirkt (Gerasch, 2001).

Somit kann die Schwinggeschwindigkeitsamplitude folgendermaßen berechnet werden:

$$v(t) = \frac{\alpha_n \cdot G}{M_{gen.} \cdot \omega_0 \cdot 2D} \cdot (1 - e^{-\omega_0 \cdot D \cdot t})$$

- α_n : Fourierkoeffizient (Bild 2)
- G: Körpergewicht
- $M_{gen.}$: Gen. Masse der Geschosdecke
- ω_0 : Eigenkreisfrequenz
- D: Lehrsche Dämpfung
- t: Dauer der Erregung (Resonanz)

Die Berücksichtigung des Einflusses mehrerer Personen ist in den betrachteten Gebäuden nicht wesentlich. Auf der sicheren Seite liegend kann die Berechnung für maximal zwei Personen durchgeführt werden.

4.2 TRANSIENTE ERREGUNG (IMPULS)

Die Antwort der Geschosdecken auf eine Impulserregung, bei der die Impulsdauer wesentlich kürzer als die Eigenschwingungsdauer ist

$$\tau \ll T$$

kann zu

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{p_0 \cdot \omega_0}{k_{gen.}} \cdot (1 - \cos \omega_0 t) \\ &= \frac{p_0}{\sqrt{k_{gen.} \cdot m_{gen.}}} \cdot (1 - \cos \omega_0 t) \\ &= \frac{p_0}{\omega_0 \cdot m_{gen.}} \cdot (1 - \cos \omega_0 t) \end{aligned}$$

mit:

- p_0 : Maximale Kraftamplitude des Impulses
- $k_{gen.}$: gen. Steifigkeit

berechnet werden.

Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der tiefsten Eigenfrequenz oder der Masse, ohne dass sich der andere Parameter verändert, die Schwingungsamplitude reduziert.

5. MESSUNG DES SCHWINGUNGSVERHALTENS VON GESCHOSS-DECKEN

5.1 STAHLKONSTRUKTION

Es wurden intensive Schwingungsmessungen an leichten Geschossdecken durchgeführt (Bild 7).



Abbildung 7: Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer

Der Aufbau und die Tragkonstruktion ist dem Bild 8 zu entnehmen.

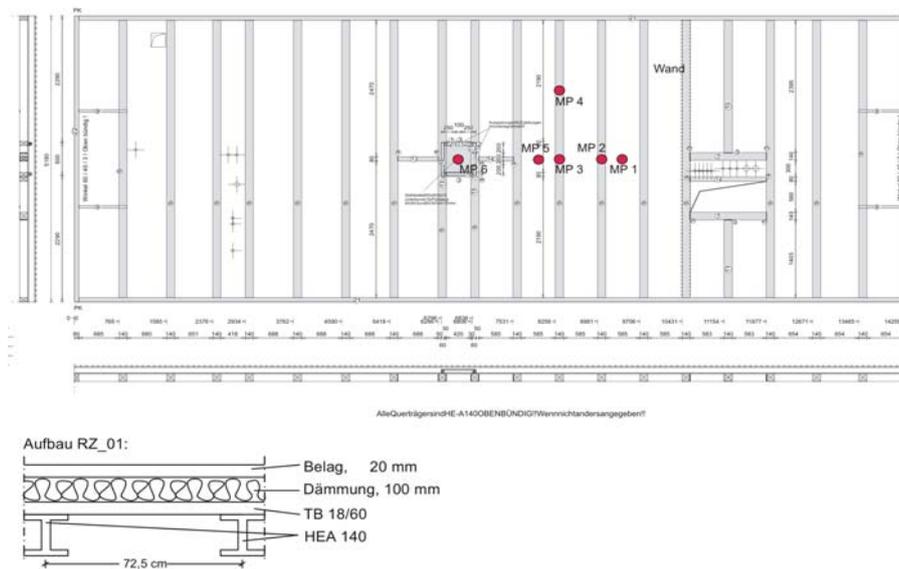


Abbildung 8: Messpunkte und Deckenaufbau

Wegen des hohen Erregerspektrums beim Fersenstoß wurden die Schwingungen nicht nur auf dem Belag, sondern auch des Stahlträgers und des Trapezbleches, gemessen (Bild 9).



Abbildung 9: Messensoren (Stahlträger, Trapezblech)

Die tiefste Eigenfrequenz ergab sich zu (Bild 10).

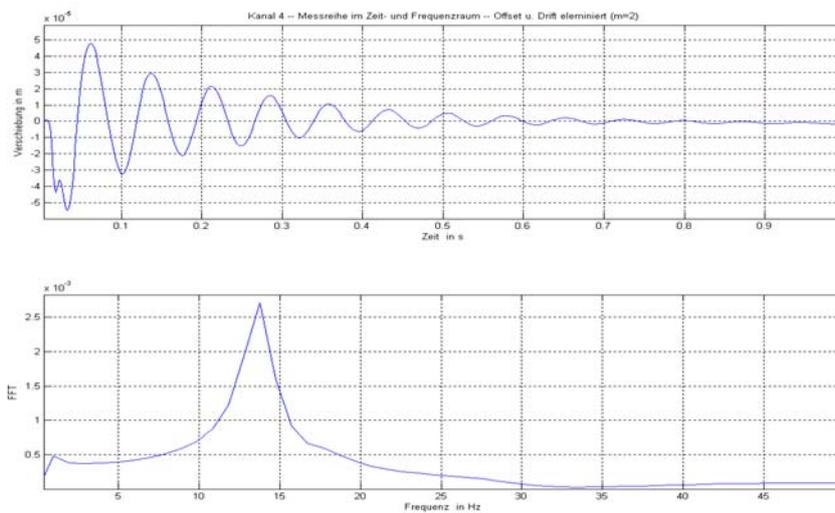


Abbildung 10: Freie Schwingung (Messung)

$$f = 13,6 \text{ Hz}$$

$$\delta = 0,34 \quad (\delta: \text{log. Dekrement})$$

Geht eine Person auf der Geschossdecke (OP-Saal), so treten Maximalamplituden von

$$v_{\max} \cong 6,0 \text{ mm/s}$$

direkt neben der sich bewegenden Person auf der Geschossdecke auf (Bild 11).

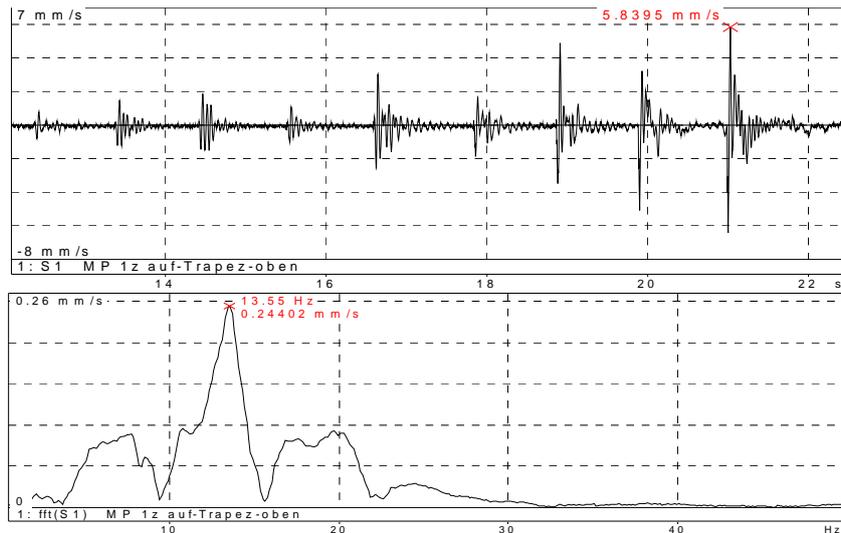


Abbildung 11: Erzwungene Schwingung (Messung)

Die Decke antwortet vorwiegend in ihrer Eigenfrequenz. Die Schwingungen sind für einen OP-Saal wesentlich zu groß.

5.2 STAHLBETONDECKE

In dem Rohbau eines Bürogebäudes wurden die Schwingungen verschiedener Stahlbetondecken-Konstruktionen gemessen (Cotardo, 2007). Typisch für die Decken wird eine Konstruktion dargestellt, die aus einem Dreifeldsystem (Platten $d = 20\text{cm}$) und einem Dreifeldsystem (Plattenbalken $b/d = 45/80\text{cm}$) besteht (Bild 12).

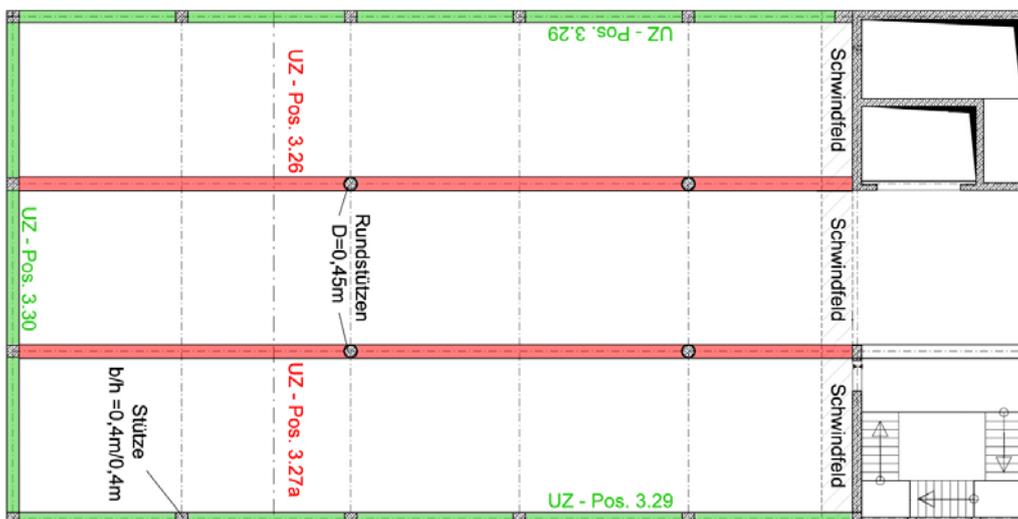


Abbildung 12: Konstruktion der Stahlbetondecke

Die freie Schwingung (Bild 13) führt zu einer tiefsten Eigenfrequenz von

$$f_0 = 10,55 \text{ Hz}$$

$$\delta = 0,11.$$

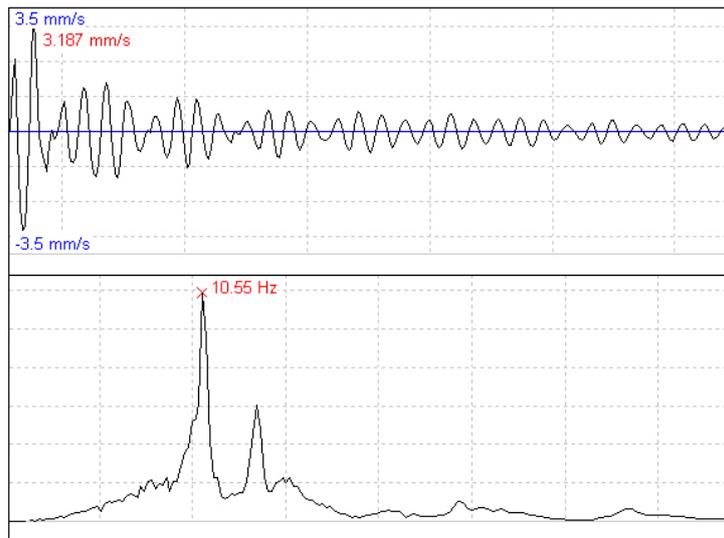


Abbildung 13: Freie Schwingung der Decke (gemessen)

Geht eine Person auf der Geschossdecke, so treten maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden (Bild 14) von

$$v = 0,92\text{mm/s}$$

auf.

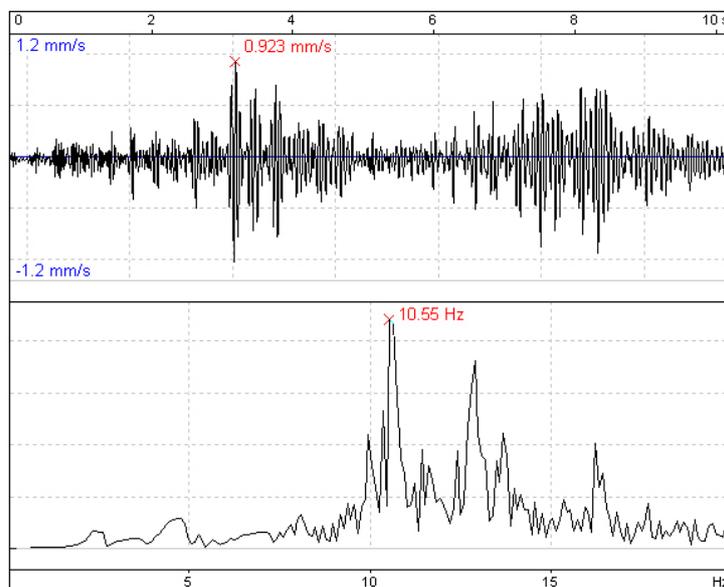


Abbildung 14: Antwort der Decke infolge Gehen (gemessen)

Das Spektrum weist die wesentliche Amplitudendichte bei

$$f = 10,55 \text{ Hz (Eigenfrequenz)}$$

auf.

Es ist zu erkennen, dass die Amplitude für Bürogebäude zu akzeptieren ist, dass die Schwingungsamplituden aber für OP-Säle zu hoch sind.

6. SIMULATION DES SCHWINGUNGSVERHALTENS DER GESCHOSS-DECKEN

Die Simulation erfolgt mit den FE-Programmen ABAQUS und ANSYS. Bei der Stahlkonstruktion wird auch der Deckenaufbau modelliert. Die Stahlbetondecke wird als Rohdecke modelliert.

6.1 STAHLKONSTRUKTIONEN

Für die FE-Modellierung wurden fünf Felder der Deckenkonstruktion berücksichtigt. (Bild 15). Für die Modellierung wurden Schalen-, Volumen- und Balkenelemente verwendet, um auch den Deckenaufbau – Belag, Dämmung, Trapezblech und Stahlträger – abbilden zu können. Anhand der Messergebnisse wurde das FE-Modell validiert. Die tiefste Eigenfrequenz (Bild 16) ergibt sich zu

$$f_0 = 13,6 \text{ Hz}$$

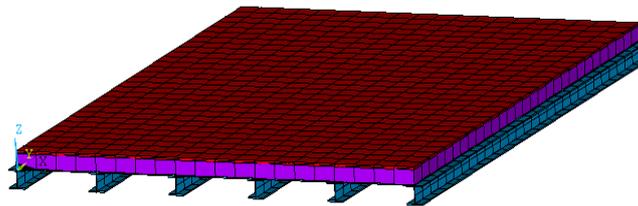
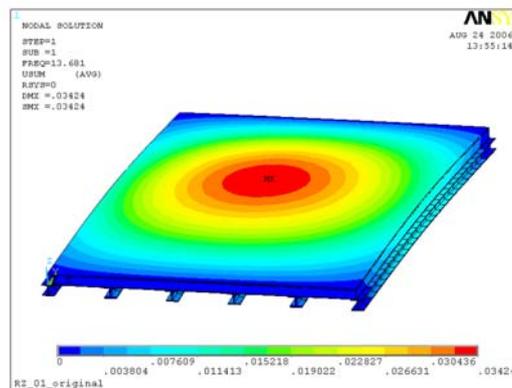


Abbildung 15: FE-Modellierung

und stimmt somit mit der gemessenen Eigenfrequenz überein.

Die Berechnung der erzwungenen Schwingung mit dem Kraftverlauf beim Gehen ohne die Berücksichtigung des Fersenstoßes (heel strike) führte zu einer Antwort der Konstruktion, die um Faktoren zu klein ist.

Wird aber der Impuls (Bild 6) als Lastfunktion verwendet, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung des Messwertes und der Amplitude der Simulation.



Gemessene Eigenfrequenz: $f \cong 13,6 \text{ Hz}$

Abbildung 16: FEM-Berechnung, Validierung

6.2 STAHLBETONDECKE

Es wird das gesamte Deckenfeld modelliert. Die tiefste Eigenschwingungsform und Eigenfrequenz sind dem Bild 17 zu entnehmen. Unter der Berücksichtigung auch höherer Eigenfrequenzen stellt das FE-Modell ein validiertes Modell dar.

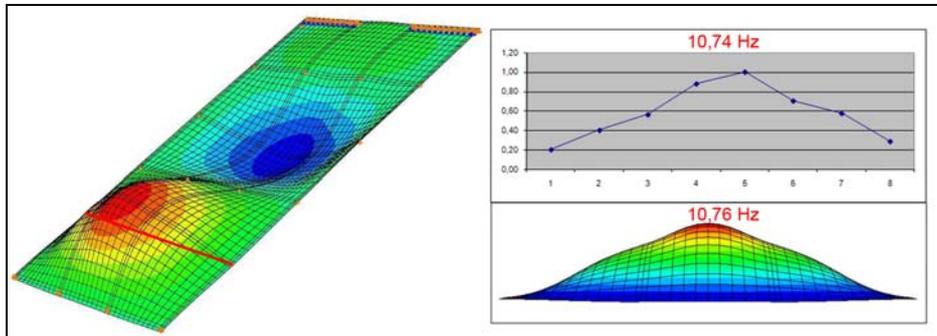


Abbildung 17: Erste Eigenform bei 10,73 Hz

Wird die Berechnung der Antwort der Geschossdecke unter der Berücksichtigung des Fersenstoßes durchgeführt, so treten Schwinggeschwindigkeitsamplituden auf, die eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Amplituden aufweisen (Bild 18).

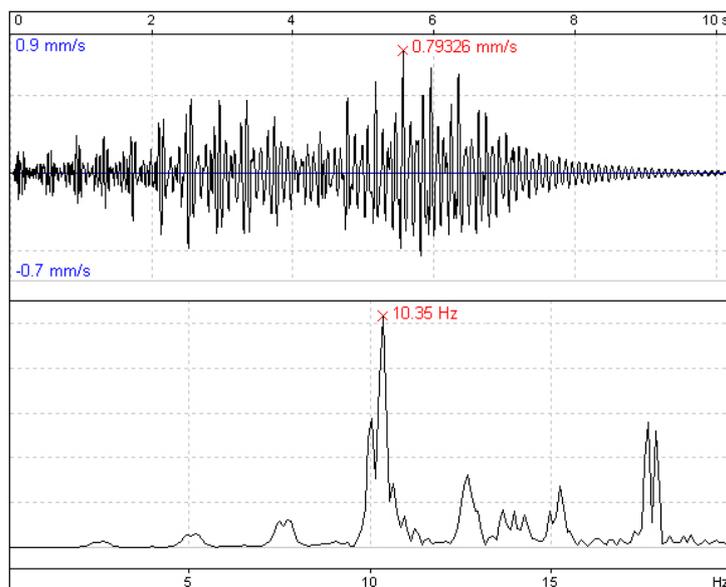


Abbildung 18: Antwort der Decke infolge Gehen (Simulation)

7. DYNAMISCHE EINWIRKUNGEN DURCH MENSCHEN

Weisen Geschossdecken in Gebäuden, bei deren Nutzung davon auszugehen ist, dass die Menschen dort vorwiegend gehen, so ist Resonanz bis zu einer tiefsten Eigenfrequenz von

$$f \leq 7,5 \text{ Hz}$$

nicht auszuschließen. Somit ist davon auszugehen, dass die Resonanzschwingungen die maximalen Schwingungsamplituden verursachen. Dabei ist davon auszugehen, dass der Einfluss von nicht mehr als zwei Personen zu berücksichtigen ist. Die Lasten in der 1. ÷ 3. Erregerfrequenz sind dem Bild 2 zu entnehmen. Für Geschosdecken, die eine tiefste Eigenfrequenz von

$$f > 7,5 \text{ Hz}$$

aufweisen, führt die Erregung durch den Fersenstoß (heel strike) zu den maximalen Schwingungsamplituden. Der Zeitverlauf eines Fersenstoßes kann entsprechend Bild 19 angesetzt werden.

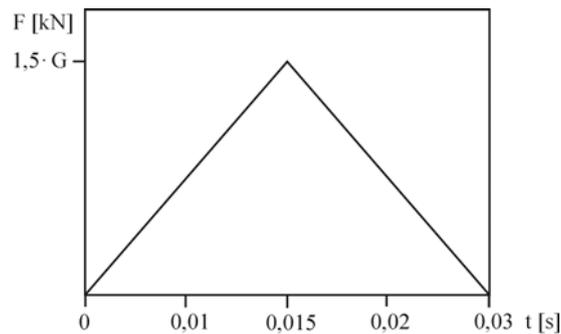


Bild 19: Fersenstoß

Da bisher intensive Untersuchungen des Fersenstoßes fehlen, wird der Zeitverlauf für die Berechnung der Antwort einer Geschosdecke vorgegeben.

Er liegt auf der sicheren Seite.

Wird davon ausgegangen, dass die tiefste Eigenfrequenz der Geschosdecke bei

$$f > 7,5 \text{ Hz}$$

liegt, so ist in Abhängigkeit von der zulässigen Schwinggeschwindigkeitsamplitude und der tiefsten Eigenfrequenz die erforderliche generalisierte Masse in Bild 20 berechnet.

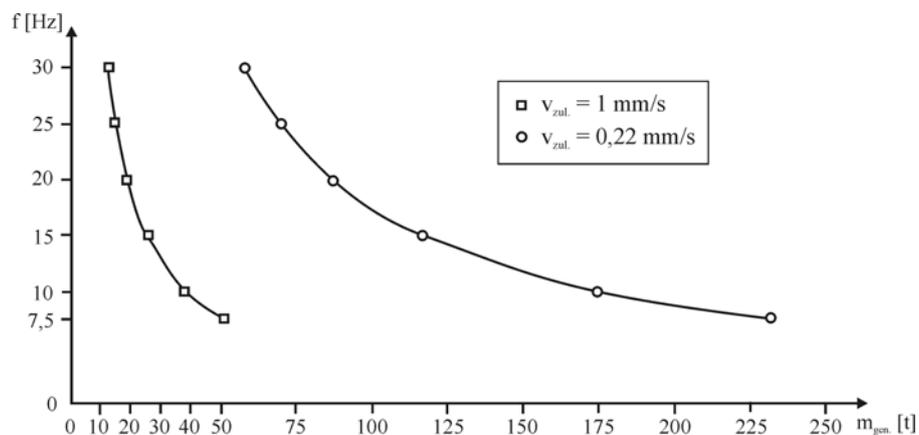


Bild 20: Erf. generalisierte Masse in Abhängigkeit von der tiefsten Eigenfrequenz (Fersenstoß)

8. AUSBLICK

Der Trend zu immer leichteren Konstruktionen und die erhöhten Anforderungen an die zulässige Schwingungsamplituden von Geschossdecken, erfordern genauere Modelle für die dynamische Einwirkung.

Für den Frequenzbereich $f \leq 7,5\text{Hz}$ liegt ein Erregerspektrum vor (Gehen), mit dem eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Schwingungsamplituden durchgeführt werden kann. Bisher fehlt ein wirklichkeitsnahes Modell für die Geschossdecken mit Eigenfrequenzen von $f > 7,5\text{Hz}$.

Die dynamische Einwirkung entsprechend des EC 5 ist nicht sehr hilfreich, um eine wirklichkeitsnahe Berechnung durchzuführen.

Wird als Einwirkung der Fersenstoß (heel strike) angenommen, so kann die Antwort der Geschossdecken wirklichkeitsnah berechnet werden. Es fehlt aber noch der Zeitverlauf des Stoßes für unterschiedliche Bodenbeläge und der Einfluss der Schuhe auf den Impuls. Der vorliegende Vorschlag liegt in jedem Fall auf der sicheren Seite.

SCHRIFTENVERZEICHNIS:

- Nigg, B.M. (Hrsg.), Kerr, B.A. (Hrsg.), 1983. Biomechanical Aspects of sport shoes and playing surfaces, International Symposium on Sportshoes and Playing Surfaces. Biomechanics Laboratory: University of Calgary. ISBN 0-88953-050-5.
- Riskowski, J.L., et. al., 2005. Proprioception, gait kinematics, and rate of loading during walking: Are they related?. Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions, 5 (4), pp. 379-387.
- Gerasch, W.-J., Wolperding, G.P., 2001. Schwingungsverhalten weitgespannter Geschossdecken in Bürogebäuden mit und ohne Schwingungsdämpfer, Bauingenieur, 76, S. 507-515.
- Cotardo, S., Job, J.-U., 2007. Messtechnische Analyse und numerische Simulation menschenereger Schwingungen von Geschossdecken. Institut für Statik und Dynamik: Leibniz Universität Hannover.