



Schwingungsbemessung von Geschossdecken Erläuterungen



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|------------------------------------------------------|----|
| 1. | Bemessungsgrundlagen | 4 |
| 1.1. | Lasten | 4 |
| 1.2. | Schwingungswahrnehmung und Wahrnehmungsklassen..... | 4 |
| 1.3. | Schwingungsbewertung..... | 6 |
| 2. | OS-RMS-Verfahren..... | 7 |
| 2.1. | Einführung | 7 |
| 2.2. | Berechnung mit Übertragungsfunktionen | 8 |
| 2.3. | OS-RMS-Wert | 8 |
| 2.3.1. | Standardisierter Lastansatz für das Gehen..... | 9 |
| 2.3.2. | Wichtung | 10 |
| 2.4. | Bestimmung des OS-RMS ₉₀ -Wertes..... | 10 |
| 2.5. | Handberechnungsverfahren | 12 |
| 3. | Weitere Berechnungsverfahren | 13 |
| 3.1. | Modale Überlagerung | 13 |
| 3.1.1. | Resonanzschwingung..... | 13 |
| 3.1.2. | Transiente Schwingung..... | 14 |
| 3.1.3. | Wichtungsfaktoren | 14 |
| 3.1.4. | Ergebnisdarstellung..... | 14 |
| 3.1.5. | Genauere Beschreibung des Berechnungsverfahrens..... | 15 |
| 3.2. | Weitergehende Schwingungsbetrachtung | 15 |
| 3.3. | Vereinfachtes Verfahren | 15 |
| 4. | Verbessern des Schwingungsverhaltens | 16 |
| 4.1. | Erhöhung der modalen Masse..... | 16 |
| 4.2. | Einstellen der Frequenz | 17 |
| 4.3. | Steigerung der Dämpfung..... | 17 |
| 4.4. | Bauliche Maßnahmen | 17 |
| 4.5. | Sanierungsmaßnahmen | 17 |
| 5. | Literatur | 19 |

Zusammenfassung

Dieses Dokument enthält Erläuterungen zu dem Bemessungsleitfaden für Deckenschwingungen. Es stellt ebenfalls alternative und allgemeinere Verfahren vor, mit denen das dynamische Verhalten von Decken infolge von Anregungen durch den Menschen bestimmt werden kann.

Die theoretischen Verfahren, die hier und im Bemessungsleitfaden vorgestellt werden, wurden im Rahmen des RFCS-Forschungsprojektes "Vibration of Floors" erarbeitet. Der Bemessungsleitfaden und die Erläuterungen werden im Rahmen des RFCS-Projektes "HIVOSS" verbreitet.

1. Bemessungsgrundlagen

1.1. Lasten

Die Masse des Tragwerks hat sowohl auf die Eigenfrequenz als auch auf die Größe der Schwingung einen wesentlichen Einfluss. Daher ist es sehr wichtig, dass die in der dynamischen Berechnung angesetzte Masse, die Masse repräsentiert, die unter normalen Nutzungsbedingungen vorliegt. Eine zu hohe Masse verringert bei angenommener gleicher Frequenz die Schwingungsantwort. Bei der Bemessung sollte die einfache Tragwerksmasse plus der Ausbaumasse wie Deckenverkleidungen und Installationen angesetzt werden. Wenn der Planer die fest installierte Ausbaumasse ausreichend genau kennt, dann kann ein Zuschlag für temporäre Massen gegeben werden. Allgemein wird empfohlen, die Zuschläge nicht höher als 10 % der bekannten Ausbaumasse anzusetzen. Üblicherweise wird die Personenmasse von Nutzern nicht gesondert berücksichtigt. Bei sehr leichten Deckenkonstruktionen jedoch ist diese Masse bedeutend und kann berücksichtigt werden.

1.2. Schwingungswahrnehmung und Wahrnehmungsklassen

In gleicher Weise wie das Hören ist die Wahrnehmung von Schwingungen frequenzabhängig: das menschliche Ohr kann Töne sehr geringer oder sehr hoher Frequenz nicht wahrnehmen. In gleicher Weise nimmt der Mensch sehr hohe Körperschwingungen nicht wahr. Diesem Umstand wird durch die Anwendung von frequenzabhängigen Wichtungsfaktoren Rechnung getragen. Ebenfalls hängt die Größe der Schwingungswahrnehmung von der Schwingungsrichtung zum Körper ab. Zur Verdeutlichung zeigt Bild 1.1 das körperbezogene Koordinationssystem, bei dem die z-Achse mit der Richtung des Rückgrats übereinstimmt. Der Grenzwert für die Wahrnehmbarkeit von Schwingungen ist für z-Richtung höher als in x- oder y-Richtung. Die Empfindlichkeit gegen Schwingungen in x- oder y-Richtung ist also größer.

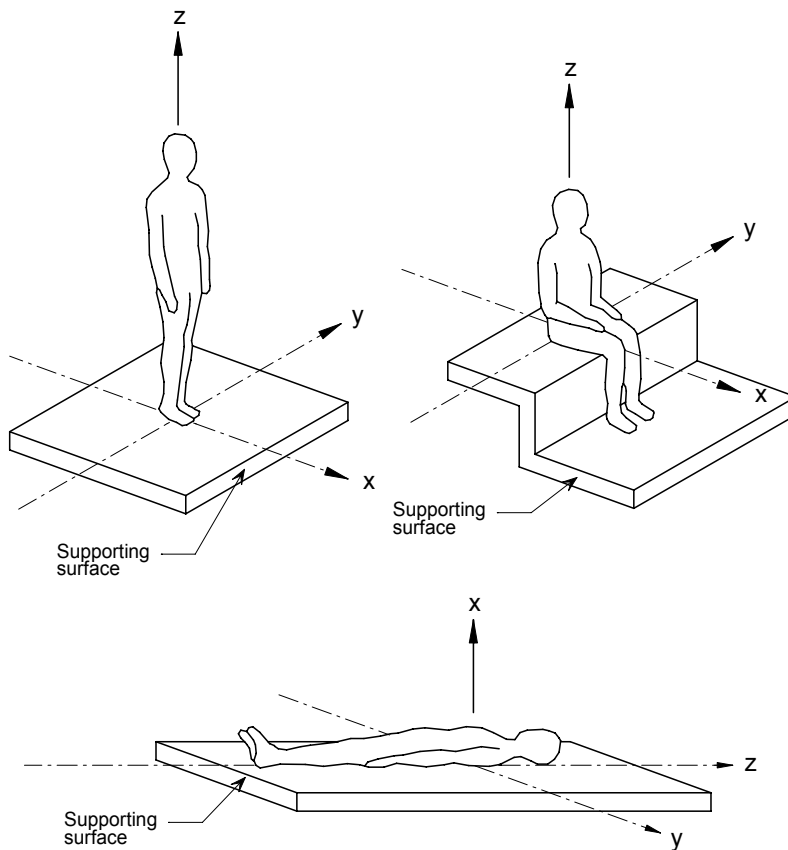


Bild 1.1 Schwingungsrichtungen wie in ISO 10137 angegeben

Verschiedene Normen wie z.B. ISO 10137 [4] geben frequenzabhängige Richtungsfaktoren, sogenannte Wichtungsfunktionen an. Je nach Schwingungsrichtung und Aktivität der Person existieren verschiedene Wichtungsfunktionen. Ebenfalls sind die Wichtungsfunktionen von der Größe, auf die sie angewendet werden – Geschwindigkeit oder Beschleunigung – abhängig. Meistens zielt die Schwingungsbemessung darauf ab, Komfortbeeinträchtigungen zu vermeiden. Unter Operationsälen müssen Schwingungen so berechnet werden, dass die Ruhe von Handbewegungen oder der Blick dadurch nicht beeinflusst werden. Für die Wahrnehmbarkeit und den Komfort werden die gleichen Wichtungsfunktionen verwendet. Allerdings ist der Grenzwert für die Wahrnehmung geringer (d.h. eine Schwingung kann wahrgenommen werden, ohne sie als unkomfortabel wahrgenommen wird). Für die Kontrolle der Handbewegung und des Blickes gibt es gesonderte Wichtungsfunktionen. Die Wichtungskurven für die z-Achse (W_b) und die x- und y-Achse (W_d) zeigt Bild 1.2.

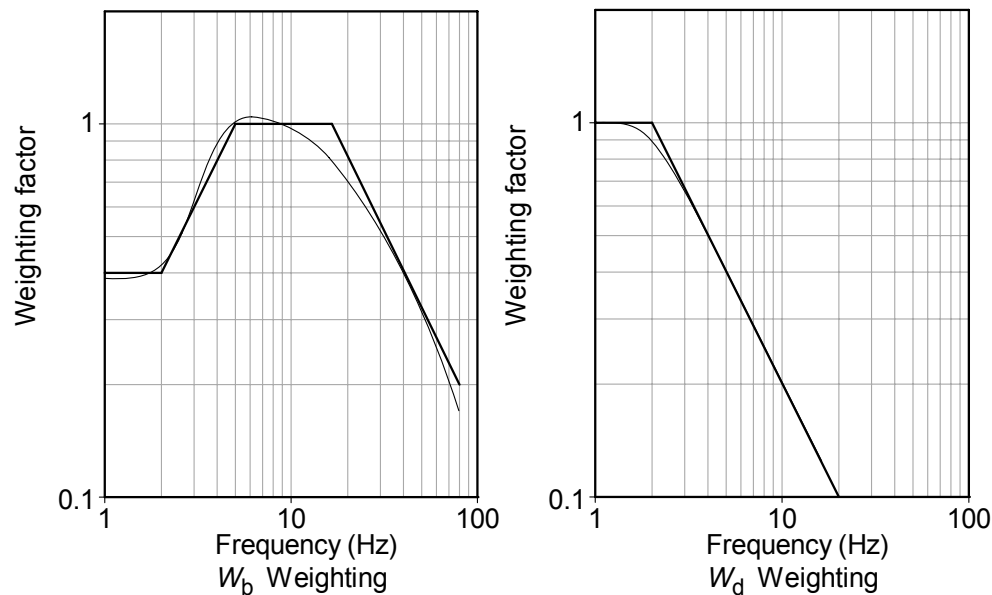


Bild 1.2 Frequenz-Wichtungsfunktionen W_b und W_d für Beschleunigungen

Zur Veranschaulichung des Gebrauchs wird hier die Wichtungsfunktion für die z-Richtung herangezogen. Eine Sinusschwingung bei 8 Hz ist genauso wahrnehmbar wie eine Sinusschwingung bei 2.5 Hz oder 32 Hz mit doppelten Amplituden.

1.3. Schwingungsbewertung

Die dynamische Antwort eines Tragwerks auf eine Schwingungsanregung wird sich je nach dem wie die Erregerfrequenz und die Tragwerkseigenfrequenz zueinander liegen entsprechend einer der Darstellungen in Bild 1.3 einstellen.

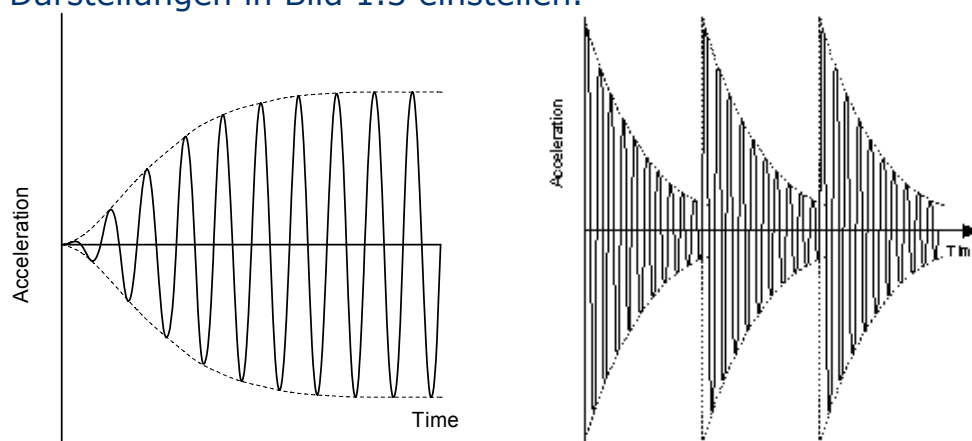


Bild 1.3 Systemantworten

Wenn die Erregerfrequenz (oder eine höhere Harmonische der Erregung) mit der Eigenfrequenz der Decke zusammen fällt, dann wird sich die Systemantwort wie in Bild 1.3, links, darstellen: ein Anstieg der Einhüllenden von Null auf einen konstanten Wert. Diese Schwingungsantwort wird Resonanz (wegen der Resonanz von Decke und Anregung) oder konstante Antwort genannt. Bei Schwingungsanregung durch Gehen tritt diese

Schwingungsantwort nur auf, wenn die ersten Eigenfrequenzen unter 9-10 Hz liegen.

Wenn die Erregerfrequenz deutlich unter der Eigenfrequenz der Decke liegt, dann tritt ein Kurvenverlauf wie in Bild 1.3, rechts auf, der transiente (anklingende) Antwort genannt wird. In diesem Fall reagiert die Decke auf die Anregung so, als würde es sich um eine Folge Impulsen handeln, wobei die Schwingung zwischen zwei Schritten abflaut. Diese Art der Anregung kann auf den OS-RMS₉₀ Grafiken erkannt werden, weil die Kurvenverläufe weniger frequenzabhängig werden. Dies zeigt, dass die Schwingungsantwort von konstant auf veränderlich wechselt.

2.OS-RMS-Verfahren

2.1. Einführung

Das "One-step root mean square (OS-RMS)" Verfahren (Deutsch: Effektivwert des Einzelschrittes) wurde auf Grundlage eines ECSC-Forschungsprojektes [1] entwickelt. Dieser Abschnitt beschreibt kurz das OS-RMS-Verfahren, das die Grundlage der Nachweise bildet.

Der OS-RMS-Wert gibt die Schwingungsantwort einer Decke an, die durch das Gehen einer Person angeregt wird. Der Wert wird anhand gemessener oder berechneter Deckeneigenschaften und einer Standardfunktion für eine Person mit bekannten Körpergewicht und Schrittfrequenz bestimmt.

Bei der Berechnung des OS-RMS-Wertes müssen der Ort der Anregung und der Ort, an dem die Schwingungsantwort bestimmt wird, nicht unbedingt zusammen liegen. Außerdem wird angenommen, dass der Anregungsort unverändert bleibt. Der Laufpfad der gehenden Person wird also vernachlässigt. Allgemein werden die Orte der Anregung und der Bestimmung der Schwingungsantwort dort festgelegt, wo mit den größten Amplituden zu rechnen ist (häufig die Deckenmitte).

Im Rahmen des Nachweises wird das 90%-Fraktil des OS-RMS-Wertes für verschiedene Personen mit unterschiedlichem Körpergewicht und unterschiedlicher Gehgeschwindigkeit (Schrittfrequenz) bestimmt. Dieser Fraktilwert wird als OS-RMS₉₀ bezeichnet und wird mit den empfohlenen Werten in Tabelle 1 des Bemessungsleitfadens verglichen.

Für ein gegebenes Körpergewicht und gegebene Schrittfrequenz kann ein einzelner OS-RMS-Wert mit einem der folgenden Verfahren bestimmt werden:

1. Handrechenverfahren
2. Mit Übertragungsfunktionen auf der Grundlage von Messungen

3. Mit Übertragungsfunktionen auf der Grundlage einer FEM-Berechnung der Decke

Das Handrechenverfahren wird im Leitfaden beschrieben und kann auf Decken angewendet werden, die einfach durch einen "Einmasse-Schwinger" abgebildet werden können. Die Grundlage des Handrechenverfahren sind Übertragungsfunktionen. Bild 2.1 stellt die drei Verfahren einander gegenüber.

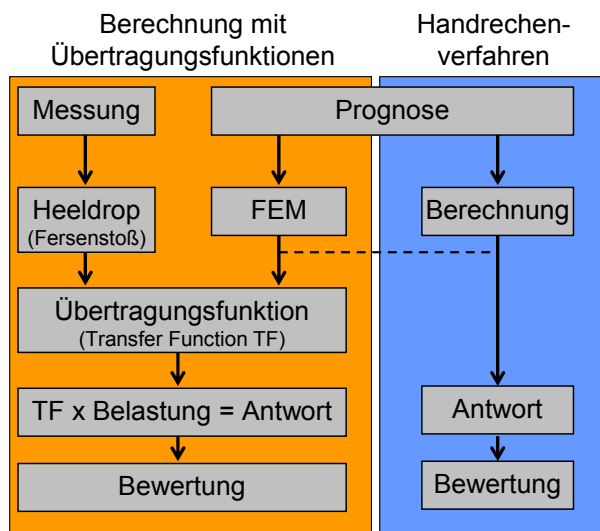


Bild 2.1: Vereinfachte Darstellung der Verfahren zum Nachweis nach der OS-RMS-Methode

2.2. Berechnung mit Übertragungsfunktionen

Bei der Berechnung mit Übertragungsfunktionen werden die Deckeneigenschaften durch Frequenz-Antwort-Funktionen (FRF-frequency response function) auch Übertragungsfunktion genannt, beschrieben.

Durch die Anwendung einer standardisierten Lastfunktion für das Gehen auf die Übertragungsfunktion kann der OS-RMS-Wert berechnet werden.

Dieses Verfahren kann sowohl auf die gemessene als auch auf mit FE berechnete Decken angewendet werden.

Die Anwendung der Übertragungsfunktion erfolgt im Frequenzbereich.

Alternativ kann auch eine FE-Berechnung im Zeitbereich geführt werden. Allerdings wäre das sehr zeitaufwendig, da zur Bestimmung des OS-RMS₉₀-Wertes viele Berechnungen erforderlich sind.

2.3. OS-RMS-Wert

Der OS-RMS-Wert wird aus der Schwingungsantwort einer Decke auf eine standardisierte Lastfunktion für das Gehen bestimmt. Es handelt sich um den Effektivwert der gewichteten Geschwindigkeit an einem Punkt der Decke

innerhalb eines Zeitintervalls. Das Zeitintervall wird von einem Spitzenwert im Zeitsignal bis zum nächsten (oder vorherigen) Spitzenwert festgelegt, siehe Bild 2.2.

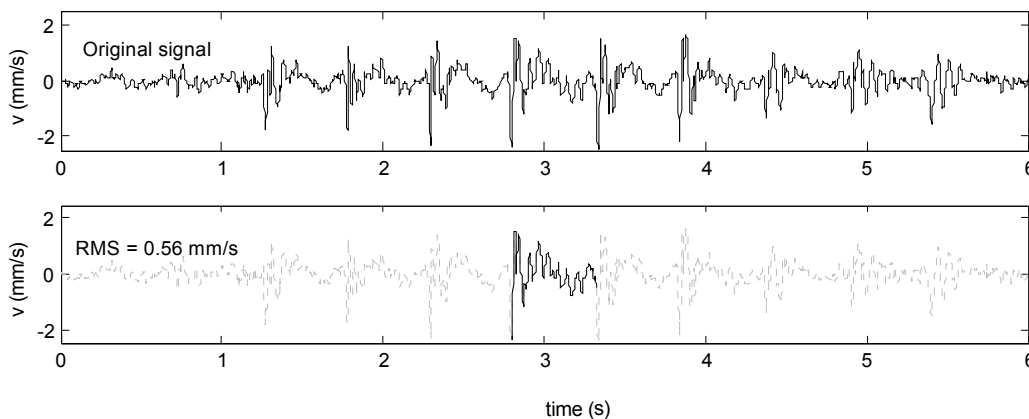


Bild 2.2: Auswahl des Zeitintervalls aus seinen Zeitschrieb der gewichteten Geschwindigkeit zur Bestimmung des OS-RMS-Wertes

Nach dieser Definition entspricht das Zeitintervall, über das der OS-RMS-Wert bestimmt wird, der Dauer eines Einzelschrittes. Dadurch wird ein gleichbleibendes Maß für die Schwingung definiert¹.

2.3.1. Standardisierter Lastansatz für das Gehen

Dieser Lastansatz beschreibt eine Serie aufeinanderfolgender Schritte, wobei der Einzelschritt durch ein Polynom beschrieben wird. Die normalisierte Schrittlast wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\frac{F(t)}{G} = K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3 + K_4 t^4 + K_5 t^5 + K_6 t^6 + K_7 t^7 + K_8 t^8$$

Dabei ist G das Körpergewicht. Die Koeffizienten K_1 bis K_8 sind von der Schrittfrequenz (f_s) abhängig; sie werden in Tabelle 2.1 angegeben. Die Dauer der Lasteinwirkung t_s wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$t_s = 2.6606 - 1.757 \cdot f_s + 0.3844 \cdot f_s^2$$

Für $t > t_s$, $F(t) = 0$.

Tabelle 2.1: Koeffizienten K_1 bis K_8 für eine vorgegebene Schrittfrequenz (f_s)

| | $f_s \leq 1.75$ | $1.75 < f_s < 2$ | $f_s \geq 2$ |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| K_1 | $-8 \times f_s + 38$ | $24 \times f_s - 18$ | $75 \times f_s - 120.4$ |
| K_2 | $376 \times f_s - 844$ | $-404 \times f_s + 521$ | $-1720 \times f_s + 3153$ |
| K_3 | $-2804 \times f_s + 6025$ | $4224 \times f_s - 6274$ | $17055 \times f_s - 31936$ |
| K_4 | $6308 \times f_s - 16573$ | $-29144 \times f_s + 45468$ | $-94265 \times f_s + 175710$ |
| K_5 | $1732 \times f_s + 13619$ | $109976 \times f_s - 175808$ | $298940 \times f_s - 553736$ |
| K_6 | $-24648 \times f_s + 16045$ | $-217424 \times f_s + 353403$ | $-529390 \times f_s + 977335$ |
| K_7 | $31836 \times f_s - 33614$ | $212776 \times f_s - 350259$ | $481665 \times f_s - 888037$ |
| K_8 | $-12948 \times f_s + 15532$ | $-81572 \times f_s + 135624$ | $-174265 \times f_s + 321008$ |

¹ So definierte OS-RMS-Werte können eindeutig miteinander verglichen werden. Wenn andernfalls ein festes Intervall größer als die Dauer eines Schrittes gewählt würde, dann würde der Effektivwert von der Schrittfrequenz und der Intervallgröße abhängen.

Die standardisierte Last für das Gehen erhält man durch wiederholen der Schrittlast in Intervallen von $1/f_s$. Beispiele für den Einzelschritt und das Gehen zeigt Bild 2-3.

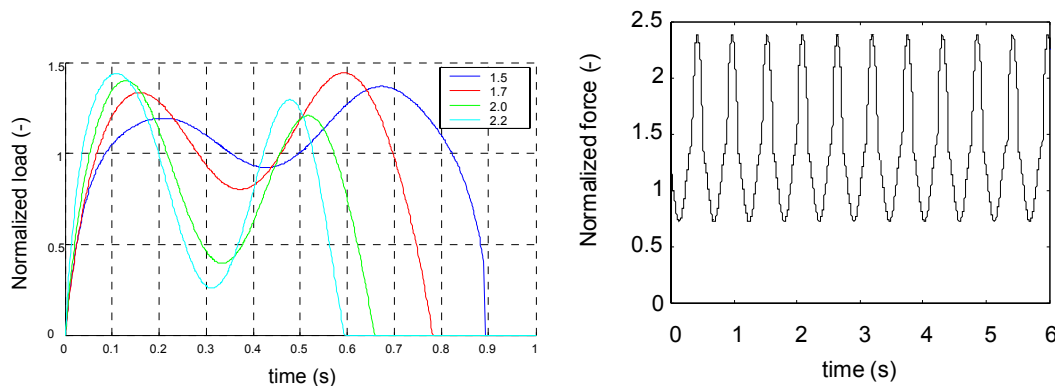


Bild 2-3: Schrittlast für verschiedene Schrittfrequenzen (links); Beispiel für das Gehen (rechts)

2.3.2. Wichtung

Der OS-RMS-Wert wird anhand der gewichteten Geschwindigkeitsantwort an einem Punkt der Decke bestimmt. Die gewichtete Geschwindigkeit wird durch Anwendung der nachstehenden Wichtungsfunktion bestimmt:

$$|H(f)| = \frac{1}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}}$$

Dabei beträgt $f_0=5.6$ Hz und die Referenzgeschwindigkeit ist 1.0 mm/s. Durch die Division mit der Referenzgeschwindigkeit wird gewichtete Schwingungsantwort dimensionslos.

2.4. Bestimmung des OS-RMS₉₀-wertes

Oben wurde bereits erläutert, dass der Nachweis mit dem OS-RMS₉₀-Wert erfolgt. Dieser Wert wird durch die Berechnung der OS-RMS-Werte aller möglichen Kombinationen der in Tabelle 2-2 angegebenen Körpergewichte und Schrittfrequenzen bestimmt. Nach der Tabelle sind also $35 \times 20 = 700$ OS-RMS-Werte zu bestimmen. Über die Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) jeder Kombination wird die kumulative Häufigkeit des OS-RMS-Wert bestimmt. Der OS-RMS-Wert, der mit einer Häufigkeit von 90% auftritt, ist der OS-RMS₉₀-Wert².

² Das entspricht der Annahme eines zufällig verteilten OS-RMS-Wertes und es wird der 90%-Wert gesucht.

Tabelle 2-2: Summenhäufigkeitsverteilungen für Schrittfrequenz und Körpergewicht

| Kumulative Wahrscheinlichkeit | Schritt-Frequenz f_s (Hz) | Kumulative Wahrscheinlichkeit | Masse (kg) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------|
| 0.0003 | 1.64 | 0.0000 | 30 |
| 0.0035 | 1.68 | 0.0002 | 35 |
| 0.0164 | 1.72 | 0.0011 | 40 |
| 0.0474 | 1.76 | 0.0043 | 45 |
| 0.1016 | 1.80 | 0.0146 | 50 |
| 0.1776 | 1.84 | 0.0407 | 55 |
| 0.2691 | 1.88 | 0.0950 | 60 |
| 0.3679 | 1.92 | 0.1882 | 65 |
| 0.4663 | 1.96 | 0.3210 | 70 |
| 0.5585 | 2.00 | 0.4797 | 75 |
| 0.6410 | 2.04 | 0.6402 | 80 |
| 0.7122 | 2.08 | 0.7786 | 85 |
| 0.7719 | 2.12 | 0.8804 | 90 |
| 0.8209 | 2.16 | 0.9440 | 95 |
| 0.8604 | 2.20 | 0.9776 | 100 |
| 0.8919 | 2.24 | 0.9924 | 105 |
| 0.9167 | 2.28 | 0.9978 | 110 |
| 0.9360 | 2.32 | 0.9995 | 115 |
| 0.9510 | 2.36 | 0.9999 | 120 |
| 0.9625 | 2.40 | 1.0000 | 125 |
| 0.9714 | 2.44 | | |
| 0.9782 | 2.48 | | |
| 0.9834 | 2.52 | | |
| 0.9873 | 2.56 | | |
| 0.9903 | 2.60 | | |
| 0.9926 | 2.64 | | |
| 0.9944 | 2.68 | | |
| 0.9957 | 2.72 | | |
| 0.9967 | 2.76 | | |
| 0.9975 | 2.80 | | |
| 0.9981 | 2.84 | | |
| 0.9985 | 2.88 | | |
| 0.9988 | 2.92 | | |
| 0.9991 | 2.96 | | |
| 0.9993 | 3.00 | | |

2.5. Handberechnungsverfahren

Für das Handrechenverfahren wurden die OS-RMS₉₀-Werte und deren statistische Auswertung im Vorhinein vorgenommen. Dabei wurde das Tragwerk als Einmassenschwinger abgebildet. Die so bestimmten OS-RMS₉₀-Werte sind in die Bemessungsdiagramme des Leitfadens eingetragen worden.

Dadurch ist es ausreichend, die modalen Größen (Masse, Steifigkeit und Dämpfung) des Tragwerks zu bestimmen, um dann den OS-RMS₉₀-Wert aus den Diagrammen abzulesen.

3. Weitere Berechnungsverfahren

3.1. Modale Überlagerung

Alternativ zur Berechnung mit Übertragungsfunktionen und der statistischen Bewertung nach dem OS-RMS-Verfahren können auch Verfahren der modalen Überlagerung zur Bestimmung von Deckenschwingungen durch Fußgänger verwendet werden. Deckenschwingungen können durch Gehen oder lebhafte Bewegungen wie beim Aerobic oder Tanzen auftreten. Bei dem hier vorgestellten Verfahren wird das Deckensystem durch ein Finite-Element-Modell (FEM) berechnet und so die modalen Eigenschaften wie Frequenzen, modale Massen und Schwingungsformen bestimmt.

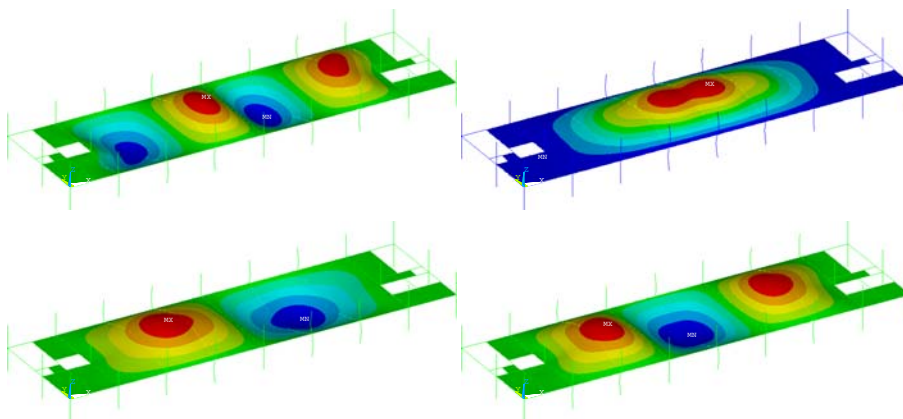


Bild 3.1: Schwingungsformen eines üblichen Deckensystems

Wenn die Schwingungsformen bestimmt wurden, werden in einer Antwortberechnung die Beschleunigungen der Decke bestimmt. Die aufgebrachtten Lasten werden dadurch bestimmt, dass sie unter Verwendung von Fourier-Koeffizienten in ihre Frequenzanteile zerlegt werden. Durch die Verwendung von Bemessungswerten für die Fourier-Koeffizienten wird die Anforderung, Bandbreiten von Schrittfrequenz und Körpergewicht zu berücksichtigen, dadurch erfüllt, der Bemessungswert der Beschleunigung direkt für die ungünstigste Schrittfrequenz bestimmt wird.

Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit davon, ob eine konstante (Resonanz-) Schwingung oder eine transiente (abklingende) Schwingung erwartet wird.

3.1.1. Resonanzschwingung

Für den Resonanzfall kann die Schwingungsantwort mit einfachen dynamischen Modellen berechnet werden. Dabei ist die Beschleunigung in jeder Mode für jede Harmonische der Anregung gleich dem Verhältnis der angesetzten Last zur modalen Masse, multipliziert mit einem dynamischen Erhöhungsfaktor DMF (= dynamic magnification factor). Dieser dynamische Erhöhungsfaktor berücksichtigt auch die Tragwerksdämpfung und das Verhältnis von Schrittfrequenz (oder der untersuchten Harmonischen) zur

Tragwerkseigenfrequenz. Im ungünstigsten Fall entspricht die Schrittfrequenz der Eigenfrequenz des Tragwerks. Dann ist DMF $1/2\zeta$, wobei ζ der Dämpfungsgrad ist. Bei den meisten Decken ist der Dämpfungsgrad etwa 3%, so dass der DMF in der Größenordnung von 17 liegt. In der Berechnung wird ebenfalls die modale Amplitude am Ort der Anregung und auch am Ort der untersuchten Schwingungsantwort berücksichtigt (beide Orte können zusammenfallen oder auch nicht). Dadurch kann der Einfluss aller Eigenformen berücksichtigt werden, ohne dass die Schwingungsantwort überbewertet wird. Wenn die Beschleunigungen jeder Eigenform und jeder Harmonischen der Anregung berechnet würden, dann werden sie zu einem Effektivwert der Beschleunigung zusammengefasst. Der den Anregungsort mit dem Wahrnehmungsort in Beziehung setzt.

3.1.2. Transiente Schwingung

Im Falle der transienten (abklingenden) Schwingung am Anregungsort auf jede Eigenform eine Stoßlast aufgebracht. Die entsprechende Maximalbeschleunigung wird durch Vergleich dieser Impulslast mit der modalen Masse, der Eigenfrequenz und Eigenform berechnet. Die Abnahme der Beschleunigung wird durch die Dämpfung bestimmt. Durch das Aufsummieren der abnehmenden Beschleunigung jeder Eigenform kann der Effektivwert der Beschleunigung berechnet werden.

3.1.3. Wichtungsfaktoren

Bei der Berechnung der Beschleunigungen müssen die in Bild 1.2 dargestellten Wichtungsfaktoren berücksichtigt werden, damit die Beschleunigungen einen Bezug zur menschlichen Wahrnehmung haben. Die gewichteten Beschleunigungen können mit Grenzwerten, die z.B. in ISO 10137 oder anderen Normen gegeben werden, verglichen werden.

3.1.4. Ergebnisdarstellung

Wenn die beschriebene Berechnung für den Fall ausgeführt wird, dass der Ort der Schwingungserregung mit dem Ort der Schwingungswahrnehmung überall auf der Decke zusammen fällt, kann die Schwingungscharakteristik für die gesamte Decke wie in Bild 3.2 dargestellt werden. Dadurch kann der Architekt oder Betreiber des Gebäudes schwingungsempfindliche Nutzungsbereiche (wie z.B. Operationssäle oder Labore) im Gebäudegrundriss dort anordnen, wo geringe Schwingungen zu erwarten sind. Nicht so schwingungsanfällige Nutzungen wie Werkstätten oder Kantinen können dann in den entsprechend lebhaften Deckenbereichen angeordnet werden.

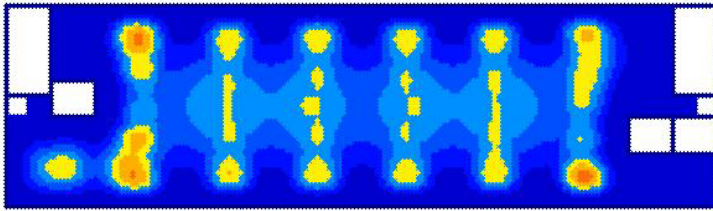


Bild 3.2: Unterschiedliche Schwingungsanfälligkeiten eines typischen Geschossdecke

3.1.5. Genaue Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Eine genaue Beschreibung der Berechnungsverfahren einschließlich der Eingabewerte wie die Fourier Koeffizienten für Gehen und Tanzen sowie in Normen angegebene Akzeptanzkriterien werden in der SCI Veröffentlichung P354 "Design of Floors for Vibration: A New Approach"[2] gegeben. Diese Bemessungshilfe enthält ebenfalls Anleitungen zur Modellierung und Berechnung von Decken mit Hilfe FEM-Programmen.

Das in P354 beschriebene Verfahren führt zu gleichen Ergebnissen wie das OS-RMS₉₀-Verfahren. Der Ergebniswert ist allerdings unmittelbar mit Grenzwerte aus Normen wie ISO 10137 vergleichbar. Ebenfalls können die Schwingungsausbreitung, über die Decke, z.B. von einem belebten Flur in einem benachbarten sensiblen Bereich, und verschiedene Wichtungsfaktoren für verschiedene Szenarien berücksichtigt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, verschiedene Anregungsquellen sei es durch Gehen, Tanzen oder Maschinen und den Einfluss von Schwingungen auf bestimmte Empfänger (z.B. Störung von Messgeräten) zu untersuchen.

3.2. Weitergehende Schwingungsbetrachtung

Ein weiterer in der Bemessungshilfe P354 behandelte Aspekt ist die Erhöhung der Beanspruchung bei rhythmischer Anregung. Die durch menschliche Bewegung auf eine Decke aufgebrachte Last ist höher als die statische Last. Die dynamische Lasterhöhung beim Gehen ist jedoch unwesentlich, so dass sei durch den Ansatz der statischen Verkehrslasten mit abgedeckt ist. Jedoch kann der Ansatz der statischen Verkehrslast überschritten werden, wenn eine Gruppe von Personen sich rhythmisch bewegt (meistens bei Musik, z.B. Aerobic oder Tanz). In diesem Fall wäre die dynamische Erhöhung der Last zu berücksichtigen – in Extremfällen wären Ermüdungsprobleme denkbar.

3.3. Vereinfachtes Verfahren

Ergänzend zu der Bemessung mit Finite Elemente Programmen gibt P354 ein vereinfachtes Handrechenverfahren. Dieses Verfahren wurde auf der Grundlage einer Parameterstudie entwickelt und liefert ebenso Beschleunigungswerte, die mit Grenzwerten aus Normen verglichen werden können.

4. Verbessern des Schwingungsverhaltens

Die drei effizientesten Wege, das Schwingungsverhalten von Decken zu verbessern, können an den OS-RMS₉₀-Diagrammen abgelesen werden. Zwei Diagramme für verschiedene Dämpfungen sind in Bild 4.1 dargestellt.

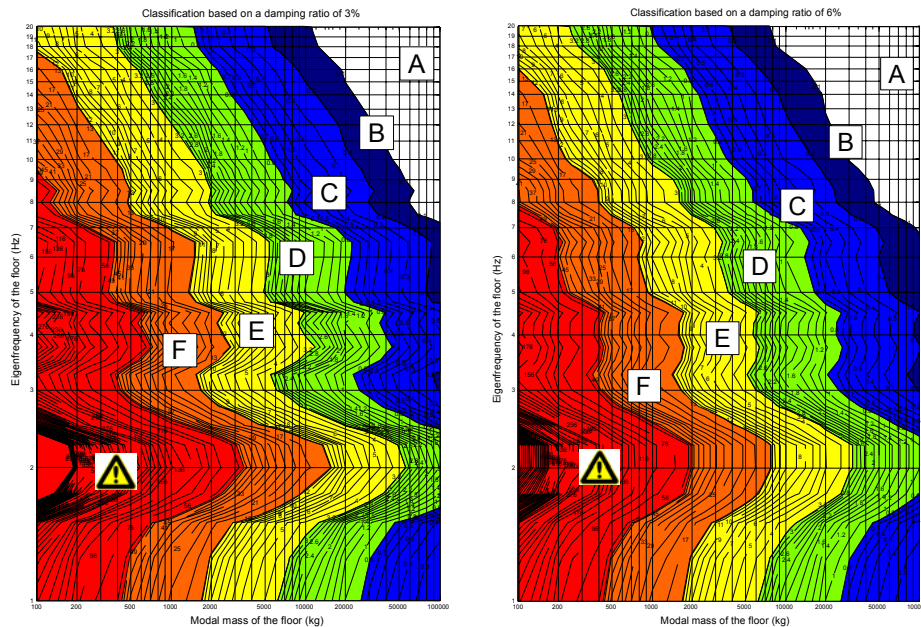


Bild 4.1 OS-RMS-Diagramme für 3 % Dämpfung (links) und 6% Dämpfung (rechts)

Aus den Diagrammen werden die drei Möglichkeiten zur Beeinflussung der Deckenschwingung deutlich: Erhöhen der modalen Masse (d.h. man geht in Diagrammen nach rechts); Einstellen der Frequenz (d.h. man bewegt sich in Diagrammen vertikal); Erhöhen der Dämpfung (d.h. Wechsel des Diagramms). Durch die Verwendung aufwendiger Berechnungsverfahren ist es zusätzlich möglich, schwingungsanfällige Bereiche einzugrenzen – das kann z.B. bei Überlegungen für Operationsräume in Krankenhäusern zweckmäßig sein.

4.1. Erhöhung der modalen Masse

Häufig ist die Erhöhung der Masse, die an der Schwingung beteiligt ist, einer der effektivsten Wege, das Schwingungsverhalten zu verbessern. Das kann entweder dadurch erreicht werden, dass das Eigengewicht erhöht wird (z.B. Erhöhung der Plattendicke oder Estrich) oder durch Einstellen der Steifigkeit der Stahlkonstruktion so, dass ein größerer Gebäudebereich zum Schwingen angeregt wird. Der größere Gebäudebereich besitzt eine größere Masse, was die Schwingungsantwort vermindert. Jedoch verändert eine Erhöhung der Masse auch die Eigenfrequenz. Es sollte also darauf geachtet werden, dass die Eigenfrequenzen nicht in einem ungünstigeren Bereich verschoben werden.

4.2. Einstellen der Frequenz

Die Frequenz einer Geschossdecke kann leicht durch eine Erhöhung der Trägersteifigkeit, bei bestehenden Bauwerken z.B. durch Flanschverstärkung, erreicht werden. Der Gewinn durch solche Maßnahmen ist jedoch unter Umständen nicht sehr groß, weit im Frequenzbereich bis 9-10 Hz keine wesentlichen Änderungen eintreten.

4.3. Steigerung der Dämpfung

Theoretisch ist dies der effektivste Weg, die Schwingung einer Decke zu reduzieren. Die Schwingungsamplitude wird bei einer Verdoppelung der Dämpfung in etwa halbiert. Allerdings ist es schwierig, an einer Geschossdecke Dämpfer anzubringen, weil diese möglichst dort zu installieren sind, wo große Amplituden auftreten. Das würde bedeuten, dass die Dämpfer in Feldmitte von Träger oder Decke anzubringen wären, was in der Regel nicht praktikabel ist. Mit Massedämpfern kann z.B. eine deutliche Dämpfungssteigerung erzielt werden. Dies ist im Allgemeinen keine Maßnahme, die im Entwurfsstadium vorgesehen wird, sondern sie wird als Abhilfemaßnahme verwendet.

4.4. Bauliche Maßnahmen

Bei besonders sensiblen Bereichen, d.h. Operationssäle, kann es empfehlenswert sein, diesen Bereich vom restlichen Gebäude zu isolieren, anstatt ihn auf die strengen Anforderungen zu bemessen. Das kann dadurch erreicht werden, dass in diesem Bereich zum Beispiel ein anderes Deckenraster verwendet wird, oder lokal steiferer Träger verwendet werden als im übrigen Gebäude oder es werden zusätzliche Stützen eingebaut. Der einfachste Weg, die bauliche Änderung zu ermitteln besteht darin, eine FEM-Modell zu erstellen und so lange zu modifizieren, bis die gewünschte Isolierung eingetreten ist.

4.5. Sanierungsmaßnahmen

Maßnahmen zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens sind häufig kostenintensiv und manchmal wegen der praktischen Randbedingungen nicht umzusetzen. In einigen Fällen kann es geeigneter sein, Maßnahmen zu ergreifen, die das Störende an einer Schwingung als solches zu ändern. Solche Maßnahmen bestehen darin, Dinge zu beeinflussen, die mit der Schwingung in Zusammenhang stehen, wie z.B. Geräusche, zeitliche Verschiebung des Vorgangs, der zur Schwingung führt, oder Grundrissänderungen, durch die Nutzer von der störenden Stelle in ungestörte Bereiche verlegt werden.

Allgemein sind die oben angegebenen Maßnahmen zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens auch als Sanierungsmaßnahmen anwendbar. Das Ändern der Deckenmasse kann effektiv sein, wobei aber darauf zu achten ist, dass die Eigenfrequenz der Decke nicht in ungünstigere Bereiche fällt, so dass sich der Effekt aufhebt oder gar verschlimmert. Die Frequenz kann zum

Beispiel durch Anschweißen zusätzlicher Flanschfläche an einen Träger angehoben werden, was in Verbindung mit einer Erhöhung der Deckenmasse (z.B. durch Estrich) zu einer deutlichen Verbesserung der dynamischen Eigenschaften führt.

Ebenfalls kann die Dämpfung erhöht werden. Übliche Verfahren dafür sind:

- ❖ Veränderung der Position von Ausbauelementen wie Trennwände
- ❖ Einbau von Massedämpfern
- ❖ Einbau von speziellen dämpfenden Materialien

Die Veränderung der Position oder der Einbau von weiteren Ausbauelementen unterstützt die Dämpfung der Decken. Weil die Dämpfung eine extrem streuende Größe ist, ist es leider nicht möglich, die Wirkung solcher Maßnahmen zu quantifizieren. Allgemein ist es erforderlich, Messungen durchzuführen um die Wirksamkeit solcher Maßnahmen zu überprüfen; schließlich kann es nötig sein, die Verbesserungsmaßnahmen durch Ausprobieren festzulegen.

Massedämpfer, die eine passive Kontrolle der Deckenbewegung ausführen, können die Schwingungsantwort auf das Gehen von Menschen reduzieren. Ein Massedämpfer (TMD = „tuned mass damper“) besteht aus einer Masse, die über ein Feder-Dämpferelement mit dem Tragwerk verbunden ist. Ein TMD ist jedoch nur wirkungsvoll, wenn die Eigenfrequenz des TMD sehr gut mit der problematischen Deckeigenfrequenz übereinstimmt. Durch Veränderungen der Masse, die allein durch das Verschieben von lokalen Nutzlasten entstehen kann, können TMDs, die für eine bestimmte Deckenfrequenz ausgelegt waren, leicht verstimmt werden. Es ist anzumerken, dass TMD nur ein begrenztes Frequenzband besitzen, in dem sie wirkungsvoll sind. Daher brauchen Decken mit mehreren problematischen Eigenfrequenzen mehrere TMDs, um die Schwingung zu verringern. Die Masse eines TMD liegt meist im Bereich von 2 % bis 5 % der modalen Masse jeder Eigenform, die gedämpft werden soll. Das kann zu Schwierigkeiten beim Nachweis der Decken führen.

Spezielle Werkstoffe werden in der Regel als konzentrierte Schichtdämpfungssysteme verwendet. Dabei werden Werkstoffe mit hoher Energiedissipation zwischen dem Tragwerk und einer zusätzlichen Stahlplatte eingebaut. Tragwerksdehnungen (Zug/Druck und Schub) werden in diese Schicht eingetragen und dissipieren die Energie. Diese Dämpfer sollten nur in passenden Fällen angewendet werden; die Wirkung kann vom Material, der Temperatur und der Dehnung abhängig sein.

5. Literatur

- [1] European Commission – Technical Steel Research: “Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls”, RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] A.L. Smith, S. J. Hicks, P. J. Devine: “Design of Floors for Vibration: A New Approach“. SCI 2007, ISBN 1-85942-176-8
- [3] Waarts, P. *Trillingen van vloeren door lopen: Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*. SBR, September 2005.
- [4] ISO 10137 – Bases for design of structure – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, International Organization for Standardization, 2007.