



SCHWINGUNGSNACHWEISE IM HOLZBAU NACH NEUEM EUROCODE 5

Institut für Holzbau
der Hochschule Biberach

Bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Patricia Hamm
Johannes Ruf, M. Eng.

26. Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einwirkungen	2
2.1	Last infolge Gehen und Laufen	3
2.2	Impulsartige Last	5
3	Nachweis nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6]	6
3.1	Wahl des Performance-Level	7
3.2	Allgemeine Infos für den Nachweis	8
3.3	Frequenzkriterium	9
3.4	Beschleunigungskriterium für Level I bis IV	12
3.5	Steifigkeitskriterium	13
3.6	Geschwindigkeitskriterium	15
4	Levelzuordnung	17
5	Literaturverzeichnis	18
A	Subjektive Bewertung und Gegenüberstellung	19

1 Einleitung

Schon im Jahr 1931 wurden durch Reiher u. Meister [13] erste Untersuchungen zum menschlichen Empfinden gegenüber Erschütterungen durchgeführt. Da der Mensch im Laufe der Zeit immer sensibler sowie bewusster im Hinblick auf rechtliche Aspekte gegenüber Schwingungen geworden ist (vgl. VDI 2038-Blatt 1 [15]), haben sich sowohl die Untersuchungsmethoden als auch die Nachweisverfahren für Schwingungen infolge von Personeneinwirkungen geändert.

Die Reaktion des Menschen auf Schwingungen ist stets subjektiv. Das Empfinden gegenüber Schwingungen:

- nimmt mit zunehmender Schwingdauer zu.
- nimmt ab, je näher man an der Schwingungsquelle ist und je bewusster man sich der Ursache ist.
- nimmt mit steigender körperlicher Aktivität ab.
- nimmt mit wachsender Gewöhnung ab.

Außerdem hängt das Empfinden von der Amplitude der Schwingbeschleunigung ($f < 8 \text{ Hz}$) und der Schwinggeschwindigkeit ($f > 8 \text{ Hz}$) ab.

Um diese Faktoren angemessen zu berücksichtigen, hat sich das Nachweisverfahren für Schwingungen von einem einfachen Durchbiegungsnachweis (DIN 1052 [3]) hin zu einem umfassenden Verfahren nach Winter u. a. [17] entwickelt, auf das in DIN EN 1995-1-1/NA:2013 [5] verwiesen wird. Mit der neuen Generation des Eurocodes wird die Forschungsarbeit in den entsprechenden Normenentwurf integriert. Gleichzeitig wurden bestehende Ansätze im Nachweisverfahren angepasst und weiter verfeinert.

In diesem Beitrag wird das Nachweisverfahren nach FprEN 1995-1-1:2025 [6] detailliert vorgestellt. Dabei wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nur das Kapitel 9 von [6] aufgeführt. Der Anhang E nach [6] für "komplexere Geometrien oder eine genauere Leistungsbeschreibung" wird in diesem Beitrag nicht behandelt.

Für das Nachweisverfahren nach [6] gelten die Grundlagen der Baudynamik, welche z.B. [17] entnommen werden können. Aufbauend auf den Grundlagen werden die Einwirkungen in Kapitel 2 aufgeführt. In Kapitel 3 wird das Nachweisverfahren erläutert und abschließend eine Empfehlung für die Zuordnung der Grenzwerte gegeben.

2 Einwirkungen

Erst durch eine äußere Einwirkung wird ein System in Schwingungen versetzt. Nach Bachmann u. Ammann [1] werden vier verschiedene dynamische Lastarten unterschieden:

- harmonische Last (z.B. Maschinen)
- periodische Last (z.B. Maschinen, Menschen, Wind)
- transiente Last (z.B. Wind, Erdbeben, Schienen- und Straßenverkehr)
- impulsartige Last (z.B. Aufprall, Explosion)

Mögliche zeitliche Verläufe dieser dynamischen Lasten sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

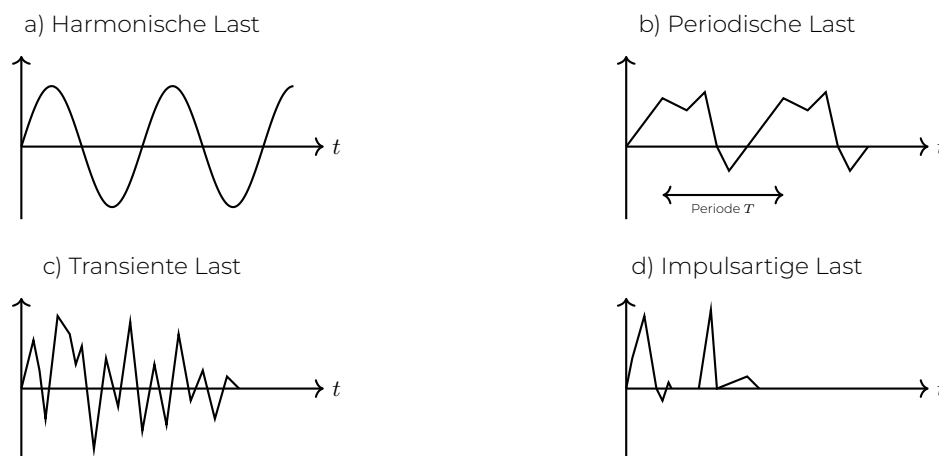


Abbildung 2.1: Zeitverlauf dynamischer Lasten nach [1].

Da in diesem Beitrag ausschließlich Decken betrachtet werden, werden nur personeninduzierte Einwirkungen näher erläutert. Diese zählen laut [1] zu den periodischen Lasten, wobei auch transiente Lasten auftreten können.

Die periodischen Lasten resultieren nach [1] und [9] hauptsächlich aus menschlichen Bewegungsformen wie:

- Gehen
- Laufen (Joggen)
- Hüpfen
- Tanzen

Diese vier Bewegungsformen unterscheiden sich insbesondere durch die Schrittfrequenz und die einwirkende Kraft, siehe hierzu Kapitel 2.1 und 2.2.

2.1 Last infolge Gehen und Laufen

Gehen und Laufen sind die gängigsten Bewegungsformen des Menschen und treten im Alltag häufig auf. Der Hauptunterschied zwischen Gehen und Laufen liegt in der sogenannten Schrittfrequenz f_w sowie darin, dass beim Gehen immer ein Fuß Kontakt zum Untergrund hat, während beim Laufen zwischen den Schritten eine „Flugphase“ auftritt [2]. Die mittlere Schrittfrequenz f_w beim Gehen beträgt nach Matsumoto u. a. [10] etwa 2 Hz . Dieser Wert basiert auf einer Messung mit 505 Probanden, die auf einer Fußgängerbrücke gegangen sind. Die ermittelten Werte finden sich auch in ISO 10137 [7] und VDI 2038-Blatt 1 [15] wieder.

Andere Studien, wie Willford u. a. [16], geben eine mittlere Gehfrequenz von $f_w = 1,8 \text{ Hz}$ an. Bachmann u. Ammann [1] differenzieren Gehen und Laufen noch weiter. Dort wird das Gehen in drei Stufen unterteilt (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Zuordnung von Schrittfrequenz f_w , Geschwindigkeit v_s und Schrittlänge l_s beim Gehen und Laufen [1].

	f_w [Hz]	v_s [m/s]	l_s [m]
langsames Gehen	$\approx 1,7$	1,1	0,60
normales Gehen	$\approx 2,0$	1,5	0,75
rasches Gehen	$\approx 2,3$	2,2	1,00
normales Laufen	$\approx 2,5$	3,3	1,30
rasches Laufen (Rennen)	$> 3,2$	5,5	1,75

Der Kraft-Zeitverlauf für Gehen oder Laufen stellt eine periodische Last dar. Diese kann mittels Fourier-Transformation in harmonische Anteile zerlegt werden:

$$F(t) = F_0 \cdot \left(1 + \sum \alpha_i \cdot \sin(i \cdot f_w \cdot 2\pi \cdot t - \varphi_i) \right) \quad (2.1)$$

- Mit
- $F(t)$ Einwirkende Kraft über die Zeit t [N]
 - F_0 Eigengewicht einer Person [N]
 - α_i Fourierkoeffizienten [-]
 - i Faktor zur Berechnung der Vielfachen der Schrittfrequenz [-]
 - f_w Schrittfrequenz [Hz]
 - t Zeit [s]
 - φ_i Phasenverschiebung [-]

Die Kraft infolge eines Schrittes setzt sich somit aus dem Eigengewicht der Person und den harmonischen Anteilen zusammen. Das angesetzte Gewicht einer Person variiert je nach Quelle zwischen 700 N [17] und 800 N [1], ebenso wie viele Harmonische Anteile berücksichtigt werden (Nach Winter u. a. [17] 3 Anteile oder nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] und Kramer [8] 4 Anteile).

Der resultierende Zeitverlauf weist zwei Maximalwerte auf: Der erste tritt beim Auftreffen des Fußes auf die Oberfläche auf, der zweite beim Abstoßen für den

nächsten Schritt [2]. Zwischen diesen beiden Ereignissen findet das Abrollen des Fußes statt, was zu einem sattelförmigen Verlauf führt. Wie aus dem Kraftzeitverlauf in Abbildung 2.2 ersichtlich, ist der erste Maximalwert stets höher als der zweite. Mit steigender Schrittfrequenz nimmt laut [2] die Differenz zwischen Maximal- und Sattelpunkt zu.

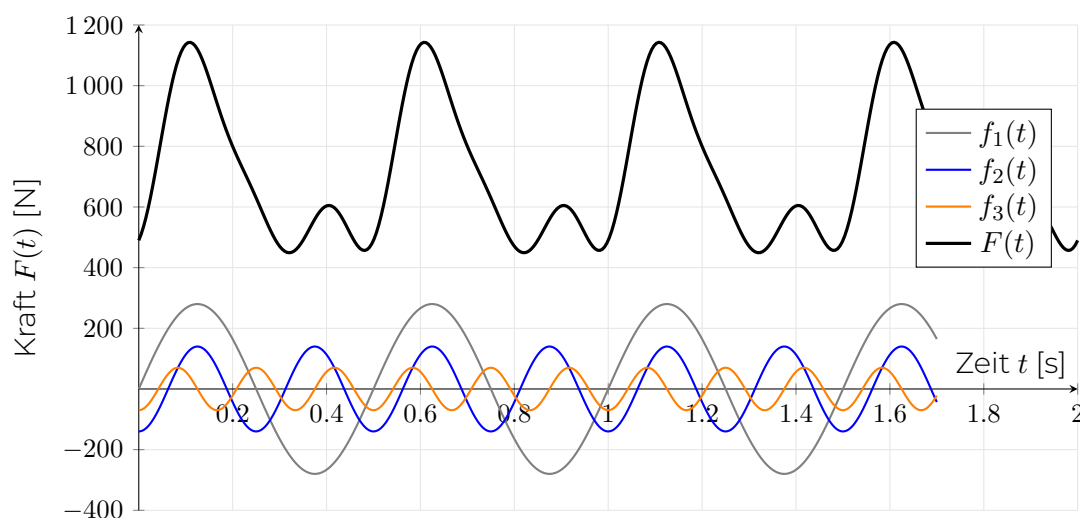


Abbildung 2.2: Kraftzeitverlauf beim Gehen mit einer Schrittfrequenz von $2,0 \text{ Hz}$ und die ersten 3 harmonischen Anteile ($f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$).

Neben Gehen und Laufen gibt es weitere periodische Einwirkungen wie Tanzen oder Hüpfen. Die daraus resultierende Kraft kann analog zu Gleichung 2.1 ermittelt werden, wobei die entsprechenden Werte für die Fourierkoeffizienten Tabelle 2.2 entnommen werden können.

Tabelle 2.2: Unterschiedliche personeninduzierte Einwirkungen und deren Schrittfrequenzen sowie Fourier-Last-Koeffizienten.

Bewegungsart	Frequenz f_{vp} in Hz	α_v			Quelle
		α_{v1}	α_{v2}	α_{v3}	
Gehen	1,6 bis 2,4	0,4 bis 0,5	0,1 bis 0,2 ^{a)}	0,06 bis 0,1 ^{a)}	[15, S. 46]
	1,2 bis 2,4	0,37($f - 1,0$)	0,1	0,06	[7, S. 23]
	1,6 bis 2,2	0,5	0,2	0,1	[11, S. 8]
Laufen	2,0 bis 3,5	bis 1,6	bis 0,7	bis 0,2	[15, S. 46]
Springen (Fitness)	1,8 bis 3,4	1,7 bis 1,9	1,1 bis 1,6 ^{b)}	0,5 bis 1,1 ^{a)}	[15, S. 46]
Aerobic	2,0 bis 2,75	1,5	0,6	0,1	[11, S. 8]
Tanzen	1,5 bis 3,0	bis 0,5	bis 0,15	bis 0,1	[15, S. 46]

Hinweis zur Phasenverschiebung: ^{a)} $\varphi_2 = \varphi_3 = \frac{\pi}{2}$

^{b)} $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi(1 - f \cdot t_{\text{Bodenkontakt}})$, $\varphi_1 = 0$

Je nach Literatur können die Beiwerte leicht variieren.

Da beim Beschleunigungsnachweis nach [6] eine Eigenfrequenz der Decke von mind. 4,5 Hz vorausgesetzt wird, ist Resonanz nur mit dem 3. oder 4. harmonischen Anteil möglich. Um den Berechnungsaufwand für diese harmonische Kraft zu reduzieren, wird in FprEN 1995-1-1: 2025 [6] ein fixer Wert von 50 N für die dynamische Kraft angenommen. Es ist jedoch zu beachten, dass sich dieser

Wert ausschließlich auf das Gehen bezieht. Andere Einwirkungen sind individuell zu betrachten.

2.2 Impulsartige Last

Je nach Verhältnis der Schrittfrequenz zur Eigenfrequenz kann ein Resonanzaufbau bzw. das Abklingen der Schwingungen zwischen zwei Schritten beobachtet werden. In diesem Fall wird der Schritt eher als impulsartige Einwirkung angesehen.

Die impulsartige Last entsteht auch durch den einzelnen Schritt, jedoch wird hier keine Resonanz aufgebaut. Die beiden Fälle sind in Abbildung 2.3 und 2.4 dargestellt.

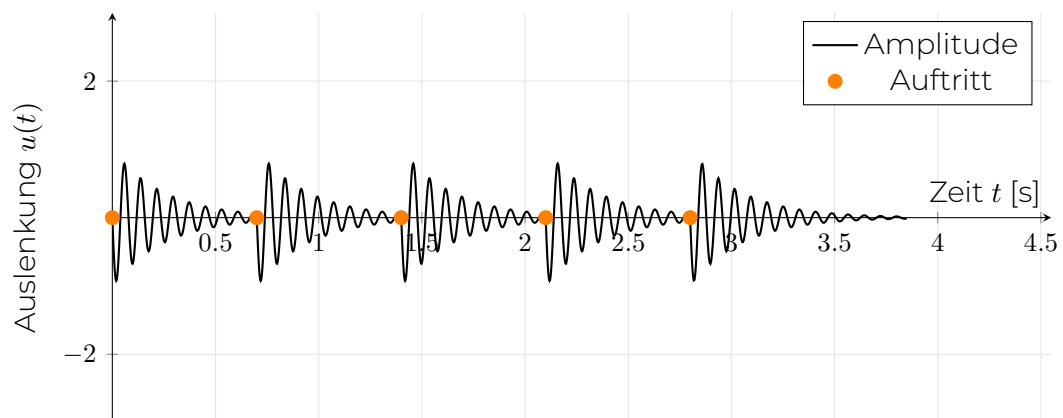


Abbildung 2.3: Schwingungsantwort des einzelnen Schrittes, wenn eine impulsartige Last vorliegt.

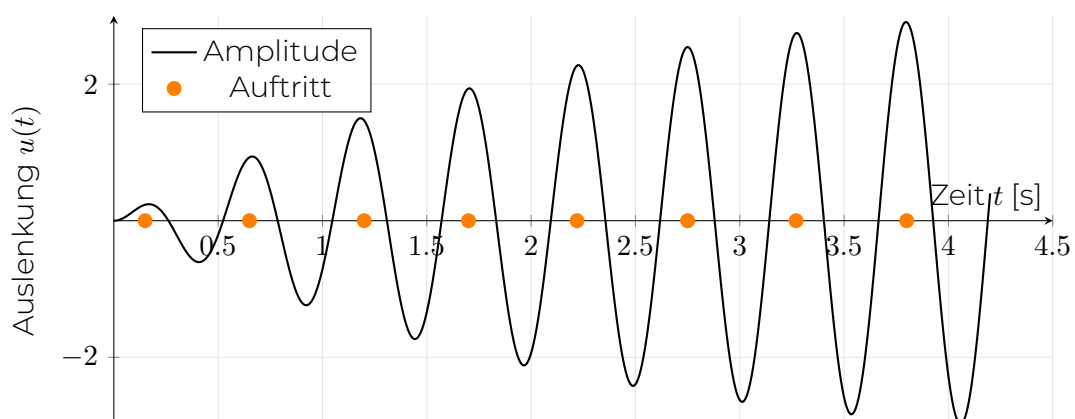


Abbildung 2.4: Schwingungsantwort des einzelnen Schrittes, wenn Resonanz vorliegt.

Für niedrige Eigenfrequenzen ($f_e \leq 4 \cdot f_w$) müssen nach [6] beide Schwingungsarten nachgewiesen werden.

3 Nachweis nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6]

FprEN 1995-1-1: 2025 [6] bietet im Vergleich zu Winter u. a. [17] für den Schwingungsnachweis ein deutlich umfangreicheres Bewertungsschema. Anstatt der bekannten zwei bzw. drei Einstufungen wird es acht Unterteilungen geben, die sogenannten 'Performance-Level'. Mit diesen Level werden die Grenzwerte definiert (siehe Tabelle 3.1), nach denen das Nachweisverfahren durchzuführen ist.

Tabelle 3.1: Schwingungskriterien für Decken entsprechend deren Performance-Level (Aus [6, Tabelle 9.1]).

	Performance-Level für Decken							
Kriterien	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Für alle Decken in den Nutzungskategorien A, B, C1, C3 und D nach prEN 1991-1-1:2023								
Frequenzkriterien	$f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$				$f_1 \geq f_{1,lim}^a$			
Steifigkeitskriterien	$w_{1kN} \leq w_{lim} \text{ mm}$							
Durchbiegungsgrenzwert w_{lim}^b	$w_{lim} = w_{lim,max}$				$w_{lim} = \max \left\{ w_{lim,max} \frac{3,6}{l}; 0,5 \right\} \leq w_{lim,max}$			
Oberer Durchbiegungsgrenzwert $w_{lim,max}$	0,25	0,5	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	
Geschwindigkeitskriterien	$v_{rms} \leq v_{rms,lim} \text{ m/s}$							
Grenzwert des Effektivwertes der Geschwindigkeitsreaktion $v_{rms,lim}$	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,0024	0,0036	0,0042	0,0048
Zusätzlich für Decken mit resonanter Reaktion der Grundfrequenz $f_1 < f_{1,lim}^a$								
Beschleunigungskriterien	$a_{rms} \leq a_{rms,lim} \text{ m/s}^2$				Nicht zutreffend			
Grenzwert des Effektivwertes der Beschleunigung $a_{rms,lim}$	0,02	0,04	0,06	0,08				
^a Der Grenzwert der Grundfrequenz, oberhalb dessen keine resonante Reaktion auftreten wird [siehe auch Gleichung (9.12)], in Hz.								
^b In der Gleichung zur Berechnung von w_{lim} ist l die betrachtete Deckenspannweite (siehe auch 9.3.2.1(3)), in m.								

In FprEN 1995-1-1: 2025 [6] werden Nachweise zu Eigenfrequenz, Durchbiegung unter Einzellast, Schwinggeschwindigkeit und je nach Performance-Level auch Schwingbeschleunigung gefordert. Dafür wird ein vereinfachtes Nachweisverfahren bereit gestellt, das für Decken mit annähernd rechteckigen Grundrissen verwendet werden kann. "Für komplexere Geometrien oder eine genauere Leistungsvorhersage dürfen Deckenschwingungen mittels umfassender dynamischer Berechnung nachgewiesen werden" [6]. Hierfür werden im Anhang E in FprEN 1995-1-1: 2025 [6] entsprechende Gleichungen zur Verfügung gestellt.

In diesem Beitrag wird nur auf das vereinfachte Nachweisverfahren eingegangen. Der Ablauf des Nachweisverfahrens ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

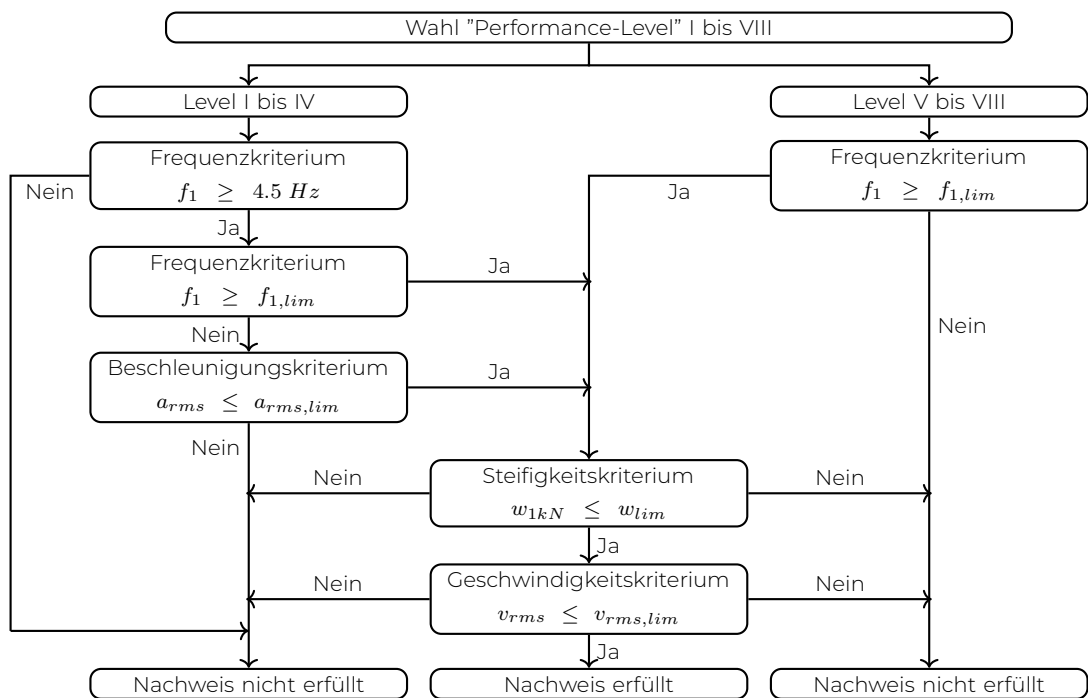


Abbildung 3.1: Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] in Anlehnung an [14].

3.1 Wahl des Performance-Level

Der erste Schritt bei diesem Nachweisverfahren ist das Festlegen des sogenannten 'Performance-Level'. Dazu gibt FprEN 1995-1-1: 2025 [6] eine Aufteilung (vgl. Tabelle 3.2) in drei Stufen (Premium-, Standard- und Grundausswahl).

Tabelle 3.2: Empfohlene Auswahl von Performance-Level für Decken für die Nutzungskategorien A (Wohnräume) und B (Büroräume) (Aus [6, Tabelle 9.2]).

Nutzungskategorie	Premiaauswahl ^a	Standardauswahl ^b	Grundausswahl ^c
A (Wohnräume)			
- Mehrparteien-Wohngebäude	Level I bis III	Level IV, V	Level VI, VII
- Einfamilienhaus	Level I bis IV	Level V	Level VI bis VIII
B (Büroräume)	Level I bis II	Level III	Level IV, V
^a Die Decke kann als annehmbar betrachtet werden. Diese Wahl ist für Decken hoher Qualität und Fälle vorgesehen, in denen die Schwingungen von einer benachbarten Wohneinheit ausgehen. ^b Deckenschwingungen können wahrnehmbar sein, aber von einer Mehrheit als annehmbar betrachtet werden. Diese Wahl ist die Standardwahl für Decken. ^c Deckenschwingungen sind häufig wahrnehmbar.			

Da diese Auswahl immer noch viel Spielraum bietet, wird in Tabelle 4.1 eine genauere Zuordnung je nach Nutzung und Anforderungen gezeigt. Sie ist als Hilfestellung für die Wahl der Level für Gebäude im D-A-CH-Raum gedacht.

3.2 Allgemeine Infos für den Nachweis

Folgende allgemeine Informationen sind beim Schwingungsnachweis nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] zu berücksichtigen.

3.2.1 Anwendung Nachweisverfahren

Das Nachweisverfahren nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] ist nur für Menschen induzierte Schwingungen in den Nutzungskategorien A, B, C1, C3 und D nach EN 1991-1-1 vorgesehen. Liegen andere dynamische Beanspruchungen vor, ist eine detailliertere Untersuchung mit genauerer Modellierung der Einwirkungen erforderlich.

3.2.2 Dämpfungsgrad ζ

Für das Nachweisverfahren in FprEN 1995-1-1: 2025 [6] werden Werte für den Dämpfungsgrad = Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ in Abhängigkeit von der Konstruktion der Decke angegeben.

- $\zeta = 0,02$ Holzbalkendecke
- $\zeta = 0,025$ Holz-Beton-Verbunddecke, Rippendecke und flächige Decken
- $\zeta = 0,03$ Holzbalkendecke mit schwimmendem Estrich
- $\zeta = 0,04$ Holz-Beton-Verbunddecke, Rippendecke und flächige Decken mit schwimmendem Estrich

Liegen gemessene Dämpfungswerte nach DIN EN 16929:2018 [4] vor, dürfen diese verwendet werden.

3.2.3 Deckenmasse

Für die Masse m wird ein eindeutiger Wert berechnet, welcher sich aus

- Masse aus ständigen Lasten (Eigengewicht)
- Eigengewicht von Trennwänden
- 10 % der charakteristischen Nutzlasten

zusammen setzt.

3.2.4 Biegesteifigkeit der Decke

Die rechnerische Gesamt-Biegesteifigkeit EI darf aus der tragenden Struktur und nichttragender Lagen (Estrich) addiert werden. Eine Verbundwirkung zwischen Decke und nichttragender Lagen wird vernachlässigt. Laut FprEN 1995-1-1: 2025 [6] darf bei CLT-Decken die rechnerische Steifigkeit mit der effektiven Steifigkeit assoziiert werden.

3.2.5 Gehfrequenz

Die Gehfrequenz f_w sollte mindestens zu $1,5 \text{ Hz}$ für Decken in Wohngebäuden und $2,0 \text{ Hz}$ für Decken in anderen Nutzungskategorien angenommen werden. Bei Decken in offenen Räumen und Fluren, in denen eine Person mehr als 10 m ungehindert in eine Richtung gehen kann, ist eine Gehfrequenz von $2,5 \text{ Hz}$ möglich. Der Grundfrequenzgrenzwert $f_{1,lim}$ berechnet sich zu

$$f_{1,lim} = 4 \cdot f_w, \quad (3.1)$$

wobei bei Mehrfamilienhäusern und den 'Performance-Level' I und II $f_{1,lim}$ mindestens zu 8 Hz angesetzt werden sollte.

3.3 Frequenzkriterium

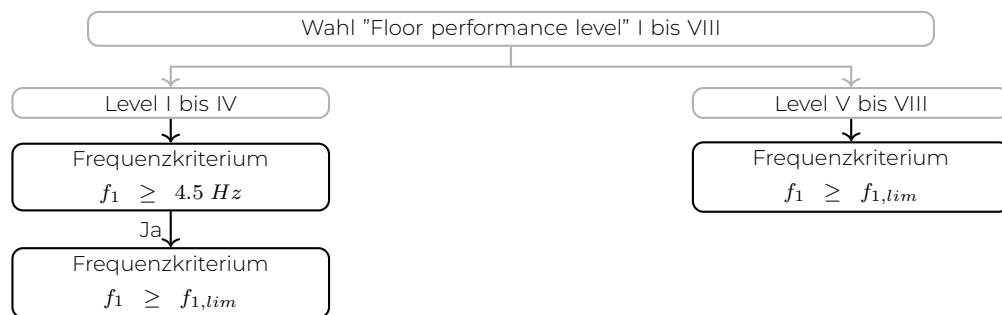


Abbildung 3.2: Ablauf zur Ermittlung der Eigenfrequenz.

Nach der Wahl des 'Performance-Level' gilt es, die Eigenfrequenz der Decke zu ermitteln, vgl. die Erläuterungen in Kapitel 3.3.1 und der Formelapparat nach [6] in Kapitel 3.3.2.

3.3.1 Grundlagen Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz beschreibt, wie oft die Schwingung pro Sekunde ausgeführt wird. Bei der Berechnung nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] wird nur die kleinste Eigenfrequenz und damit die erste Eigenform berücksichtigt, welche beim Einfeldträger die Schwingform eines Halbsinus hat (siehe Abbildung 3.3). Die Fre-

quenz f wird üblicherweise in Hz angegeben, was Schwingungen pro Sekunde bedeutet $\frac{1}{s}$.

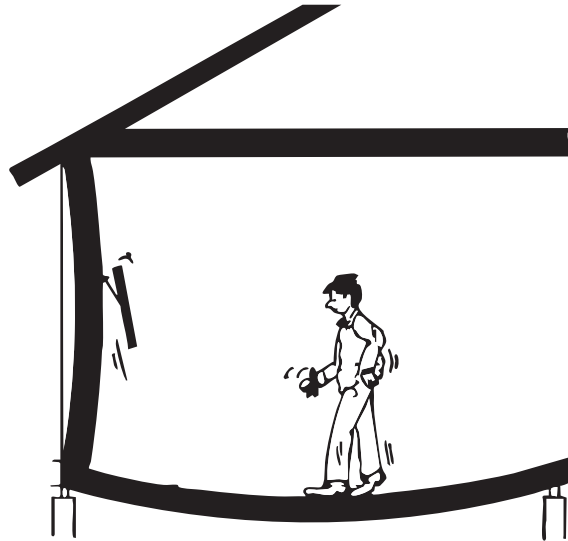


Abbildung 3.3: Erste Eigenform einer Einfelddecke (aus [12]).

3.3.2 Hinweise Eigenfrequenzberechnung nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6]

Mit Berücksichtigung der Eingangsparameter Deckenmasse m , Spannweite l und Biegesteifigkeit der Decke entlang ihrer Spannweite $(EI)_L$ kann die Eigenfrequenz ermittelt werden.

Zudem wird der Beiwert $k_{e,1}$ für Decken als Zweifeldträger (l für die längere Spannweite und l_2 für die kürzere) verwendet. Dieser Wert kann Tabelle 3.3 entnommen werden oder mit Gleichung 3.2 berechnet werden.

Tabelle 3.3: Faktor zur Umrechnung der Eigenfrequenz von Einfeldträger auf Zweifeldträger aus [6].

l_2/l^a	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$k_{e,1}^b$	1,00	1,09	1,16	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,41

^a l ist die längere Spannweite eines Zweifeldträgers, l_2 die kürzere Spannweite.

^b Zwischenwerte können durch lineare Interpolation ermittelt werden.

[Kapitel
9.3.2.4(2)]

$$k_{e,1} = -x^3 + 1,45x^2 - x + 1,55 \quad \text{mit} \quad x = \frac{l_2}{l} \quad (3.2)$$

Zur Berücksichtigung einer vierseitigen Lagerung (liegt in der Regel bei einem geschlossenen Raum vor) kann der Beiwert $k_{e,2}$ verwendet werden. Hier fließt die Breite der Decke b und die Biegesteifigkeit der Decke quer zu ihrer Spannweite $(EI)_T$ ein.

[Kapitel
9.3.2.4(2)]

$$k_{e,2} = \sqrt{1 + \left\{ \frac{l}{b} \right\}^4 \frac{(EI)_T}{(EI)_L}} \quad (3.3)$$

Damit berechnet sich die Eigenfrequenz zu

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (3.4)$$

Ist die Durchbiegung w_{sys} einer Decke mit einfacher Spannweite bekannt, kann auch hiermit die Eigenfrequenz mit Gleichung 3.5 berechnet werden. Je nach Berechnung der Systemdurchbiegung muss die nachgiebige Lagerung noch eingerechnet werden oder nicht.

$$f_1 = k_{e,1} k_{e,2} \frac{18}{\sqrt{w_{sys}}} \quad (3.5)$$

Wurde die Systemdurchbiegung w_{sys} ohne nachgiebige Lagerung ermittelt, muss, wie auch bei der Frequenzberechnung nach Gleichung 3.4, die Lagerung berücksichtigt werden. Dies erfolgt mit der Verrechnung der Deckenfrequenz f_1 und der Frequenz des Auflagerträgers $f_{1,beam}$. Die Eigenfrequenz von Auflagerträgern $f_{1,beam}$ darf bei einer gleichmäßig verteilten Last aus dem darüber liegenden Deckentragwerk unter Verwendung der geeigneten Werte von EI , m und l berechnet werden.

3.3.3 Hinweise Eigenfrequenzberechnung mit Unterzug

Sollte die Decke auf einem Unterzug gelagert sein, also nachgiebig gelagert, muss die Frequenz am Gesamtsystem berücksichtigt werden. Dies wird mit folgender Gleichung berücksichtigt.

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{1,rigid}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,1}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{1,beam,2}^2}}} \quad (3.6)$$

$f_{1,rigid}$ ist dabei die Eigenfrequenz des starr gelagerten Deckenbalkens.

Wenn die Gesamtfrequenz ermittelt wurde, kann diese bei Level I bis IV mit der Mindestfrequenz von $4,5 \text{ Hz}$ verglichen werden. Ist dies eingehalten, ist noch die Überprüfung für die Resonanz, also Beschleunigungskriterium, mit $f_{1,lim}$ aus Gleichung 3.1 notwendig. Bei Level V bis VIII wird die Mindestfrequenz gleich der Grenzfrequenz $f_{1,lim}$ gesetzt, sodass keine Resonanz auftreten kann, vgl. Abbildung 2.4 und 2.3. Sind beide Nachweise erbracht, kann mit dem Steifigkeitskriterium fortgefahren werden.

3.4 Beschleunigungskriterium für Level I bis IV

Der Nachweis bezüglich der Beschleunigung ist nur in den Level I bis IV vorgesehen. Der Nachweis ist zu führen, wenn die Eigenfrequenz $f_e = f_1$ kleiner als die Grenzfrequenz $f_{1,lim}$ ist.

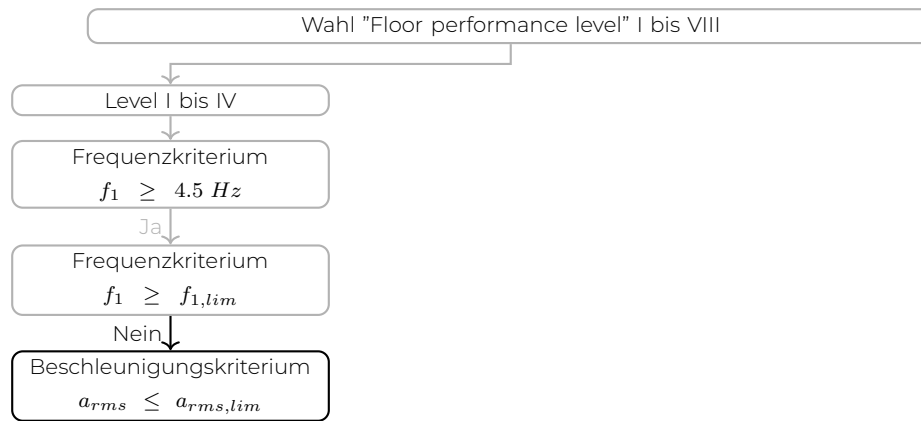


Abbildung 3.4: Ablauf zur Ermittlung der Beschleunigung.

Beim Nachweis der Beschleunigung wird vom ungünstigsten Fall, dem Resonanzfall ausgegangen. Unter Resonanz versteht man, wenn die Anregfrequenz oder ein Vielfaches $i \cdot f_w$ gleich der Eigenfrequenz f_1 ist. Als Anregfrequenz wirkt nicht nur die Gehfrequenz, sondern auch ein Vielfaches der Gehfrequenz f_w , vgl. Kapitel 2.1.

Für den Nachweis des Beschleunigungskriteriums wird der Effektivwert der Beschleunigung a_{rms} berechnet und mit dem Grenzwert nach 3.1 verglichen. Der Effektivwert ermittelt sich mit einer dynamischen Kraft von $F_{dyn} = 50 \text{ N}$, der Dämpfung ζ nach Kapitel 3.2.2, dem Beiwert zur Berücksichtigung höherer Schwingungsformen k_{res} , Resonanzbildungsfaktor μ_{res} und der modalen Masse M^* .

$$a_{rms} = \frac{k_{res} \mu_{res} F_{dyn}}{\sqrt{2} 2 \zeta M^*} \quad (3.7)$$

Der Beiwert zur Berücksichtigung höherer Moden k_{res} berechnet sich mit:

$$k_{res} = \max \left\{ 0,19 \left(\frac{b}{l} \right) \left(\frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right)^{0,25}; 1,0 \right\} \quad (3.8)$$

Mit μ_{res} wird berücksichtigt, dass in der Praxis keine vollständige Resonanz auftritt und die Schwingungsanregung durch die Position und Bewegung der gehenden Person beeinflusst wird. Der Resonanzbildungsfaktor μ_{res} wird üblicherweise zu 0,4 angenommen, wobei bei größeren Laufwegen (Laufweg größer 10 m) der Faktor zu 0,8 oder wenn volle Resonanz zu erwarten ist, zu 1,0 angenommen werden muss.

Die modale Masse M^* berechnet sich bei einer vierseitig gelagerten Decke zu

$$M^* = \frac{m \cdot l \cdot b}{4} \quad (3.9)$$

was 25 % der Gesamtmasse entspricht.

3.5 Steifigkeitskriterium

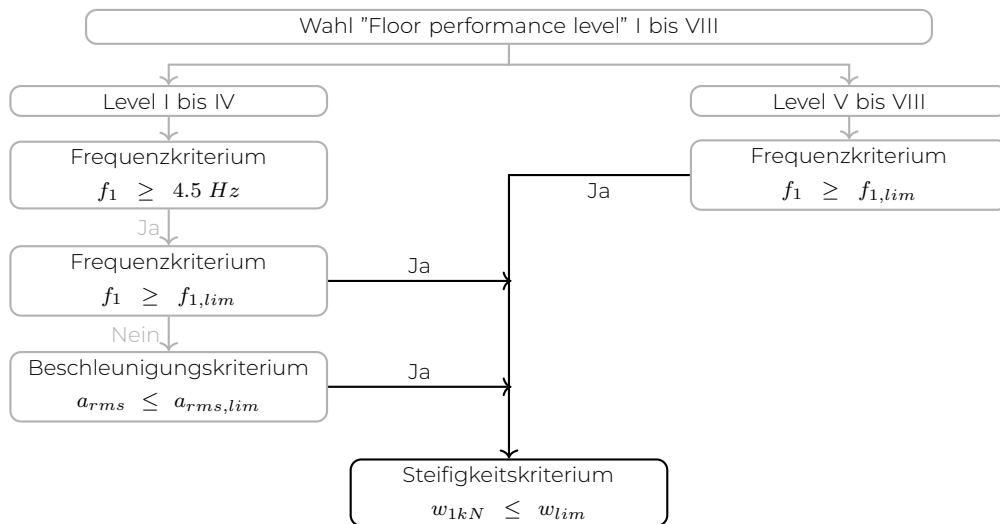


Abbildung 3.5: Ablauf zur Ermittlung der Durchbiegung unter Einzellast.

3.5.1 Grundlagen Durchbiegung

Betrachtet man Abbildung 3.6, kann das unterschiedliche Verhalten einer Decke infolge Impulsbelastung bzw. statischer Last klar erkannt werden.

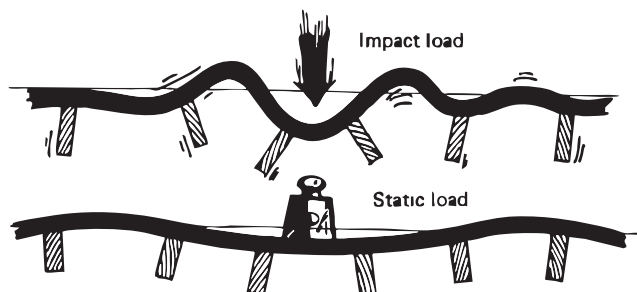


Abbildung 3.6: Unterschied von Impuls und statischer Last mit Blick auf die Querbiegesteifigkeit (aus [12]).

Ist die Querbiegesteifigkeit gering, lässt sich die Decke auch leicht in den höheren Schwingungsformen anregen (vgl. k_{res} bzw. k_{imp} in der transienten Reaktion).

Die Querbiegesteifigkeit hat auch Einfluss auf die statische Durchbiegung infolge einer Einzellast (in [6]: $w_{1\text{ kN}}$). Ist die Querbiegesteifigkeit ausreichend groß, ist das Schwingungsverhalten homogener und weniger störend. Die statische Einzellast ist ein vereinfachter Ansatz zur Beurteilung der tatsächlichen Schwingeneigenschaften quer zur Spannrichtung.

3.5.2 Hinweise Durchbiegungsberechnung nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6]

Die Verformung infolge einer vertikalen statischen Punktlast $F = 1\text{ kN}$ berechnet sich mit der Länge l der einfachen Spannweite und der effektiven Breite b_{ef} . Die effektive Breite b_{ef} darf nicht mit der Raumbreite b verwechselt werden, sondern als mittragende Breite angesehen werden.

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von $F = 1\text{ kN}$ berechnet sich demnach zu

$$w_{1\text{ kN}} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot b_{ef}} = w_{rigid} \quad (3.10)$$

Dabei ist b_{ef} die effektive Breite, welche sich mit der Längs- und Querbiegesteifigkeit berechnet.

$$b_{ef} = \min \left\{ 0,95 \cdot l \left(\frac{(EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25}; b \right\} \quad (3.11)$$

Ist eine zusätzliche Versteifung mit der Biegesteifigkeit EI quer zur Spannrichtung vorhanden, ergibt sich die effektive Breite zu

$$b_{ef} = \min \left\{ 1,07 \cdot l^{0,75} \left(\frac{EI + 0,63 \cdot l \cdot (EI)_T}{(EI)_L} \right)^{0,25}; b \right\} \quad (3.12)$$

3.5.3 Hinweise Durchbiegung mit Unterzug

Bei einer Lagerung auf nachgiebigen Auflagern muss diese ebenfalls bei der Durchbiegungsberechnung berücksichtigt werden. Dies erfolgt mit der Addition der Durchbiegung der Unterzüge zur Durchbiegung der Decke w_{rigid} . Die Durchbiegung der Unterzüge w_{beam} fließt jeweils zur Hälfte ein. Dadurch ergibt sich die Gesamtverformung infolge Einzellast zu:

$$w_{1\text{ kN}} = 0,5 \cdot w_{beam,1} + w_{rigid} + 0,5 \cdot w_{beam,2} \quad (3.13)$$

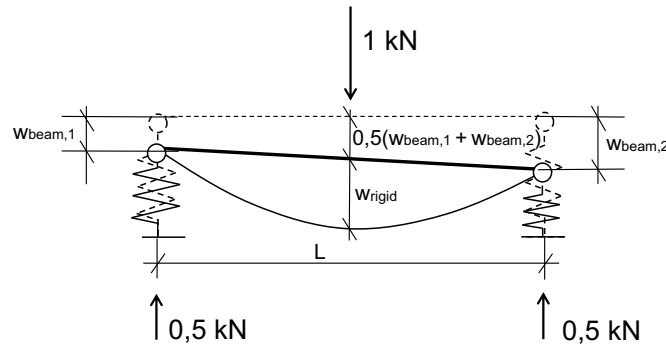


Abbildung 3.7: Gesamtverformung infolge einer vertikalen statischen Punktlast $F = 1 \text{ kN}$ bei nachgiebiger Lagerung.

3.6 Geschwindigkeitskriterium

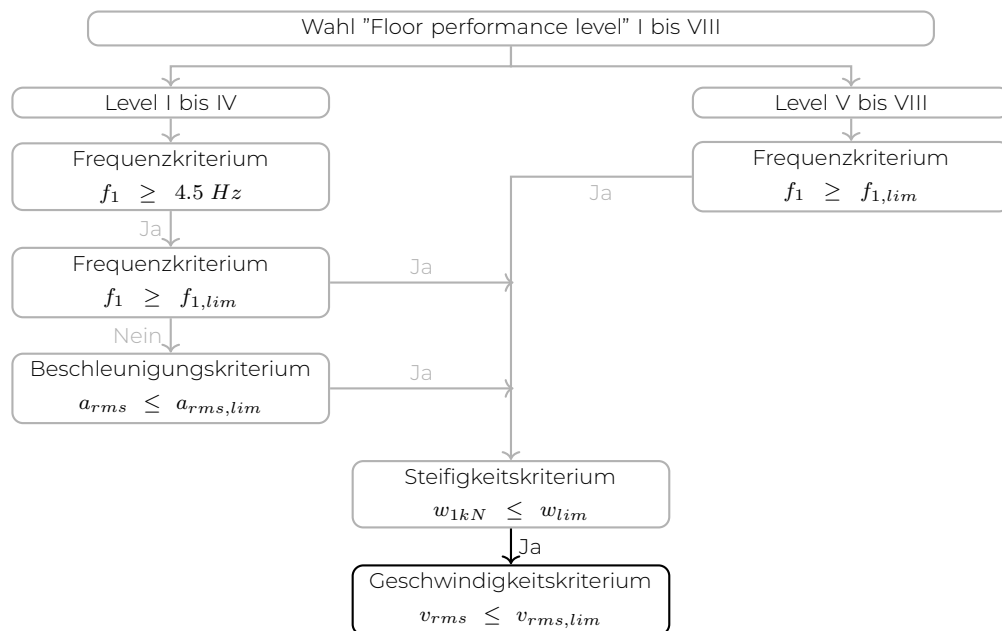


Abbildung 3.8: Ablauf zur Ermittlung der Schwinggeschwindigkeit.

Der Nachweis der Geschwindigkeit ist umfangreicher, da hier mehrere Beiwerte zur Ermittlung des Effektivwerts der Geschwindigkeit v_{rms} benötigt werden. Als Einwirkung wird der mittlere modale Impuls $I_{mod,mean}$ angesetzt, welcher sich mit der Gehfrequenz f_w und der berechneten Eigenfrequenz f_1 ermittelt.

$$I_{mod,mean} = \frac{42 \cdot f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}} \quad (3.14)$$

Mit dem mittleren modalen Impuls kann die Spitzengeschwindigkeitsreaktion $v_{1,peak}$ ermittelt werden

$$v_{1,peak} = k_{red} \cdot \frac{I_{mod,mean}}{M^* + 70} \quad (3.15)$$

Hier fließt der Abminderungsbeiwert k_{red} , welcher zu 0,7 angenommen wird, und die modale Masse, welche sich für die vierseitige Lagerung nach FprEN

1995-1-1: 2025 [6] mit

$$M^* = \frac{m \cdot l \cdot b}{4} \quad (3.16)$$

berechnet, ein. Mit dem Beiwert k_{imp} zur Berücksichtigung der höheren Modi in der transienten Reaktion

$$k_{imp} = \max \left\{ 0,48 \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \cdot \left(\frac{EI_L}{EI_T} \right)^{0,25}; 1,0 \right\} \quad (3.17)$$

kann die Gesamt-Spitzen Geschwindigkeitsreaktion

$$\nu_{tot,peak} = k_{imp} \cdot \nu_{1,peak} \quad (3.18)$$

berechnet werden. Mit dieser und dem Zwischenparameter

$$\eta = \begin{cases} 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{wenn } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,9 \text{ sonst } \eta = 0,59 \quad (\text{für Balkendecken}) \\ 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{wenn } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,7 \text{ sonst } \eta = 0,67 \quad (\text{für alle anderen Decken}) \end{cases} \quad (3.19)$$

kann der Effektivwert der Geschwindigkeit

$$v_{rms} = \nu_{tot,peak} \cdot (0,65 - 0,01 \cdot f_1) \cdot (1,22 - 11 \cdot \zeta) \cdot \eta \quad (3.20)$$

bestimmt und mit den Grenzwerten nach Tabelle 3.1 verglichen werden.

4 Levelzuordnung

Betrachtet man das beschriebene Nachweisverfahren in Kapitel 3, ist klar ersichtlich, dass eine Zuordnung der Level maßgebend für den Nachweis ist. Demnach gilt es die bestehenden Zuordnungen von [17] auf die neue Unterteilung nach [6] zu adaptieren. Dabei werden die Grenzwerte von [17] auf die Grenzwerte von [6] skaliert. Die Herausforderung dabei ist, dass die bestehenden zwei bzw. drei Einstufungen (Decke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten (NE), innerhalb einer NE und keine Anforderungen) auf acht Level aufgeteilt werden. Die Einteilung erfolgt anhand der Grenzwerte, wie Frequenz, statische Durchbiegung unter Einzellast und Beschleunigung, vgl. Tabelle A.1. Eine Zuordnung der Geschwindigkeit ist nicht möglich, da bisher kein entsprechender Nachweis erforderlich war. Jedoch wird eine Bestätigung der Grenzwerte hierfür über zahlreiche in situ Messungen dargelegt. Die Ergebnisse der Messungen und der subjektiven Bewertung sind in Abbildung A.1 dargestellt. Auf Grundlage dieser Gegenüberstellungen resultiert folgende Levelzuordnung nach Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Mögliche Zuordnung der 'Performance-Level' nach FprEN 1995-1-1: 2025 [6] je nach Nutzung und Höhe der Anforderungen.

'Performance-Level'	Nutzung und Höhe der Anforderungen
Level I	Büroräume oder MFH mit hohen Anforderungen
Level II	Büroräume oder Räume in MFH mit mittleren Anforderungen, Räume in EFH mit hohen Anforderungen
Level III	Büroräume oder Räume in MFH mit mäßigen Anforderungen, Räume in EFH mit mittleren Anforderungen
Level IV	Räume in EFH mit mäßigen Anforderungen
Level V	Räume in EFH mit geringen Anforderungen
Level VI – VIII	Keine Empfehlung im D-A-CH-Raum
MFH: Mehrfamilienhaus, EFH: Einfamilienhaus	

5 Literaturverzeichnis

- [1] BACHMANN, Hugo ; AMMANN, Walter: *Schwingungsprobleme bei Bauwerken*. Zürich : Internationale Vereinigung f. Brückenbau u. Hochbau, 1987 (@Structural engineering documents 3d). – ISBN 3857480513
- [2] BAUMANN, KARL ; BACHMANN, HUGO: Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. (1988). <http://dx.doi.org/10.3929/ETHZ-A-000492712>. – DOI 10.3929/ETHZ-A-000492712
- [3] DIN 1052: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2008
- [4] DIN EN 16929:2018: *Prüfverfahren - Holzdecken - Bestimmung der Schwingungseigenschaften*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2018
- [5] DIN EN 1995-1-1/NA:2013: *Nationaler Anhang - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2013
- [6] FPEN 1995-1-1: 2025: *Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2025
- [7] ISO 10137: *Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2007
- [8] KRAMER, Helmut: *Angewandte Baudynamik: Grundlagen und Praxisbeispiele*. Ernst W. + Sohn Verlag, 2013 https://www.ebook.de/de/product/19038893/helmut_kramer_angewandte_baudynamik.html. – ISBN 3433030286
- [9] KREUZINGER, H. ; MOHR, B.: *Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz*. Technische Universität München, 1999
- [10] MATSUMOTO, Y. ; SATO, S. ; NISHIOKA, T. ; SHIOJIRI, Hiroo: A study on dynamic design of pedestrian overbridges. In: *Transactions of JSCE* 4 (1972), 01, S. 50–51
- [11] MURRAY, Thomas M. ; ALLEN, David E. ; UNGAR, Eric E.: *Floor vibrations due to human activity*. American Institute of Steel Construction, 1997
- [12] OHLSSON, Sven: *Springiness and human-induced floor vibrations*. Stockholm : Swedish Council for Building Research, 1988 (@Document 1988,12). – ISBN 9154049016. – Swedish Building Technology-Cover
- [13] REIHER, H. ; MEISTER, F. J.: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. In: *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* 2 (1931), November, Nr. 11, S. 381–386. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02578773>. – DOI 10.1007/bf02578773. – ISSN 1434–0860
- [14] RUF, Johannes ; HAMM, Patricia ; SCHNEIDER, Martin: COMPARISON OF THE CALCULATED AND MEASURED VIBRATION BEHAVIOUR OF LONG-SPAN TIMBER FLOORS. In: *World Conference on Timber Engineering 2025*, World Conference On Timber Engineering 2025, 2025 (WCTE 2025), S. 2505–2512
- [15] VDI 2038-BLATT 1: *Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik: Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen*. Düsseldorf : Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012
- [16] WILLFORD, Michael R. ; YOUNG, Peter ; CENG, MIMechE: *A design guide for footfall induced vibration of structures*. Concrete Society for The Concrete Centre London, UK, 2006
- [17] WINTER, S. ; HAMM, P. ; RICHTER, A.: *Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken*. Technische Universität München, 2010

A Subjektive Bewertung und Gegenüberstellung

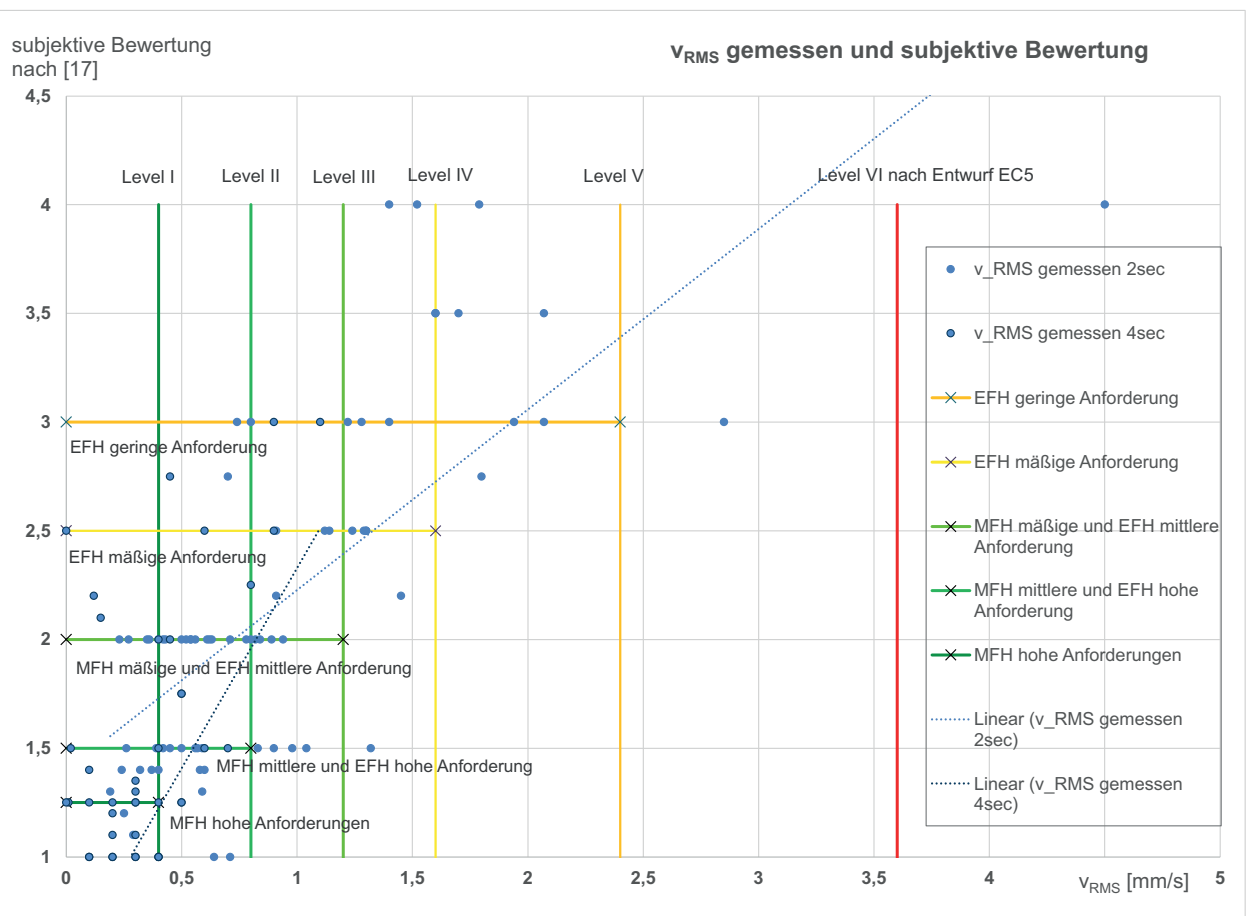


Abbildung A.1: Gegenüberstellung der subjektiven Bewertung und der gemessenen v_{rms} -Werte.

Tabelle A.1: Zuordnung nach Nutzung, 'Performance-Level' (FprEN 1995-1-1: 2025 [6]) und Nutzungseinheiten (Winter u. a. [17]).

'Performance-Level'	Nutzung	FprEN 1995-1-1: 2025 [6]			Winter u. a. [17]		
Level I	Bürräume oder MFH mit hohen Anforderungen	Mindestfrequenz	f_{min}	4,5 Hz	Decke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten	Mindestfrequenz	4,5 Hz
		Grenzfrequenz	$f_{1,lim}$	8 Hz (10 Hz)		Grenzfrequenz	8,0 Hz
		Durchbiegung	w_{1kN}	0,25 mm		Durchbiegung auf w_{1kN} umgerechnet	0,25 mm
		Beschleunigung	a_{rms}	0,02 m/s ²		Beschleunigung auf a_{rms} umgerechnet	0,035 m/s ²
		Geschwindigkeit	v_{rms}	0,0004 m/s		Geschwindigkeit	-
Level II	Bürräume oder Räume in MFH mit mittleren Anforderungen, Räume in EFH mit hohen Anforderungen	Mindestfrequenz	f_{min}	4,5 Hz	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit	Mindestfrequenz	4,5 Hz
		Grenzfrequenz	$f_{1,lim}$	8 Hz (10 Hz)		Grenzfrequenz	6 Hz
		Durchbiegung	w_{1kN}	0,25 mm		Durchbiegung auf w_{1kN} umgerechnet	0,5 mm
		Beschleunigung	a_{rms}	0,04 m/s ²		Beschleunigung auf a_{rms} umgerechnet	0,071 m/s ²
		Geschwindigkeit	v_{rms}	0,0008 m/s		Geschwindigkeit	-
Level III	Bürräume oder Räume in MFH mit mäßigen Anforderungen, Räume in EFH mit mittleren Anforderungen	Mindestfrequenz	f_{min}	4,5 Hz		Mindestfrequenz	4,5 Hz
		Grenzfrequenz	$f_{1,lim}$	6 Hz (8 Hz od. 10 Hz)		Grenzfrequenz	6 Hz
		Durchbiegung	w_{1kN}	0,50 mm		Durchbiegung auf w_{1kN} umgerechnet	0,5 mm
		Beschleunigung	a_{rms}	0,06 m/s ²		Beschleunigung auf a_{rms} umgerechnet	0,071 m/s ²
		Geschwindigkeit	v_{rms}	0,0012 m/s		Geschwindigkeit	-
Level IV	Räume in EFH mit mäßigen Anforderungen	Mindestfrequenz	f_{min}	4,5 Hz		Mindestfrequenz	4,5 Hz
		Grenzfrequenz	$f_{1,lim}$	6 Hz (8 Hz od. 10 Hz)		Grenzfrequenz	6 Hz
		Durchbiegung	w_{1kN}	1,00 mm		Durchbiegung auf w_{1kN} umgerechnet	0,5 mm
		Beschleunigung	a_{rms}	0,08 m/s ²		Beschleunigung auf a_{rms} umgerechnet	0,071 m/s ²
		Geschwindigkeit	v_{rms}	0,0016 m/s		Geschwindigkeit	-
Level V	Räume in EFH mit geringen Anforderungen	Mindestfrequenz	$f_{1,lim}$	6 Hz (8 Hz od. 10 Hz)			
		Durchbiegung	w_{1kN}	$\max\{1,25 \cdot \frac{3,6}{l}; 0,5\} \leq 1,25 \text{ mm}$			
		Beschleunigung	a_{rms}	Nicht zutreffend			
		Geschwindigkeit	v_{rms}	0,0024 m/s			
Level VI-VIII	Keine Empfehlung im D-A-CH-Raum				Keine Anforderungen		