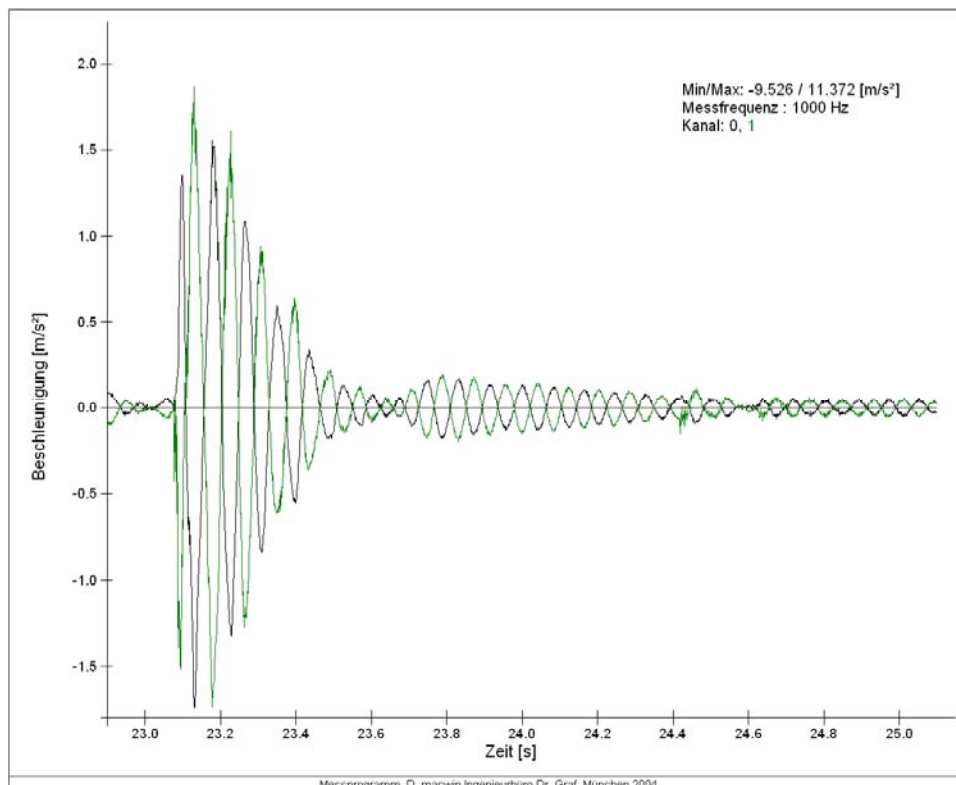


Schwingungsverhalten von Holzdecken



Dr.-Ing. Bernhard Mohr

DR. SCHÜTZ INGENIEURE
Beratende Ingenieure im
Bauwesen GmbH
87435 Kempten im Allgäu
www.drschuetz-ingenieure.de
info@drschuetz-ingenieure.de

1. Grundlagen

Allgemeines zu Bauwerksschwingungen

Bauwerksschwingungen sind abhängig von

- den Gebäudeeigenschaften oder Tragwerkeigenschaften:
 - Masse
 - Steifigkeit
 - Dämpfung und
- den Anregungseigenschaften:
 - Kraft - Größe, Richtung und Periodizität
 - Einwirkungsdauer
 - Impulsgröße
 - Zahl der Wiederholungen bei periodischen Anregungen, Periodendauer.

Für Bauwerksschwingungen sind die Frequenzen bis ca. 80 Hz zu berücksichtigen (vgl. DIN 4150 bzw. VDI 2057). Bei Wohnungsdecken sind die Frequenzen unter ca. 40 Hz maßgebend. Bei üblichen Holzbalkendecken treten Frequenzen zwischen 5 und 12 Hz häufig auf. Bei Anregung durch Personen wird von personeninduzierten Schwingungen gesprochen.

Menschliches Empfinden von Schwingungen

Das menschliche Empfinden gegenüber Schwingungen

- ist abhängig von der Schwing**beschleunigung** bei Frequenzen geringer als etwa 8 Hz (vgl. Bild 1),
- ist abhängig von der Schwing**geschwindigkeit** bei Frequenzen von mehr als etwa 8 Hz,
- nimmt mit der Schwingdauer zu,
- nimmt zu mit zunehmender Anzahl der Impulse,
- nimmt ab mit der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingungsursache,
- nimmt ab mit zunehmender Körpertätigkeit,
- nimmt ab mit größerer Dämpfung,
- hat, wie das subjektive Empfinden der Lautstärke, logarithmischen Charakter und
- ist stark subjektiv.

Für die Bemessung wurden in [10] - nach Studium der Literatur und mehreren eigenen Messungen mit Befragung der Benutzer - folgende Grenzwerte bei abklingenden Schwingungen für Decken in Wohngebäuden vorgeschlagen (vgl. Bild 1: $a_{\text{grenz1}} = 0,4 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{grenz2}} = 0,1 \text{ m/s}^2$). Jüngere Untersuchungen von Hamm und Richter [8] verwenden modifizierte Grenzwerte (siehe auch Abs. 4.).

Es gibt einen Unterschied zwischen:

- der Möglichkeit der Übertragung in einen benachbarten Raum,
- der Anzahl der Impulse - einen oder mehrere und
- den Ansprüchen der Benutzer - niedrig oder hoch.

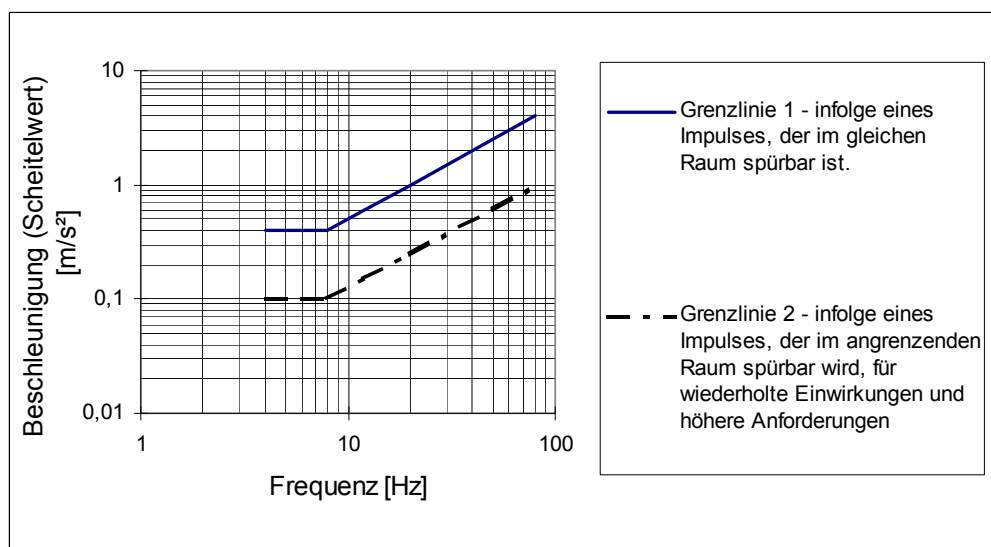


Bild 1: Abhängigkeit der Schwingbeschleunigung von der Frequenz (aus [10])

Zur Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit wird durch den Einsatz von Materialien mit größeren Festigkeiten, neuen flächigen Bauarten und dem Wunsch, größere Spannweiten zu überbrücken, immer häufiger maßgebend. Neben den Durchbiegungsanforderungen ist vor allem die Schwingungsanfälligkeit zu beachten. (Ab ca. 3,0 m Spannweite wird bei einer Durchbiegungsanforderung von $\ell/300$ und einem Lastverhältnis von $g = q = 0,5 E_k$ die Deckenfrequenz von 8,0 Hz erreicht.)

Deckenschwingungen sind kein spezielles Problem für den Holzbau. Sie betreffen auch weitgespannte Stahl- und Stahlverbunddecken. Das Empfinden der Schwingungen ist baustoffunabhängig, wobei Leichtbauweisen (i.d.R.: Stahl, Holz und der Verbundbau Beton - Stahl) eher betroffen sind.

In diesem Beitrag werden überwiegend Wohnungsdecken behandelt. Decken von Industriehallen, Kaufhäusern, Sportstätten, Fabrikationsstätten etc. unterliegen anderen Anforderungen und werden hier nur am Rande angesprochen.

Derzeit gilt die DIN EN 1995-1-1:2010-12 ([5], inkl. NA). Hierin sind klare Regeln für die Begrenzung der Schwingungen bei Wohnungsdecken enthalten (siehe Abschnitt 3).

Zur Dämpfung

Die Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 8/2004 [2], nennt Dämpfungskennwerte für Holzdecken, an der TU Graz wurden weitere Werte ermittelt:

Tabelle 1: Dämpfungswerte (Tabelle 9/8 aus [2], [10], SIA 265)

Deckenaufbau	ξ
Decken ohne schwimmenden Estrich	0,01
Decken aus verleimten Brettstapel-Elementen mit schwimmendem Estrich	0,02
Holzbalkendecken und mechanisch verbundene Brettstapeldecken mit schwimmendem Estrich	0,03

Gewählte Bezeichnungen (unvollständig):

lateinische Buchstaben:

- a: Schwingbeschleunigung [m/s^2]
a: Grenzwert für die Steifigkeitsanforderung nach EC5, Bild 7.2
- b: Deckenbreite
b: Grenzwert für die Massenanforderung nach EC5, Bild 7.2
b: Trägerbreiten
- E_k : Charakteristischer Wert der Einwirkungen
E: Elastizitätsmodul
 $E_{0,\text{mean}}$: Elastizitätsmodul, parallel zur Faser
(EI)_l: äquivalente Plattenbiegesteifigkeit der Decke in Längsrichtung, „Längssteifigkeit“
(EI)_b: äquivalente Plattenbiegesteifigkeit der Decke in Querrichtung, (EI)_b < (EI)_l
f: Frequenz
 f_1 : 1. Eigenfrequenz (maßgebend), in der Literatur teilweise mit f_e bezeichnet
F: Kraft [kN]
g: Eigengewichtsbelastung [kN/m^2]
h: Trägerhöhe
K: Steifigkeit
m: mittlere Masse aus Eigengewicht [kg/m^2], näherungsweise: $m = 100 \text{ g}$
 n_{40} : Anzahl der Schwingungen 1. Ordnung mit einer Resonanzfrequenz bis zu 40 Hz.
q: Verkehrslast, teilweise in der Literatur noch mit p bezeichnet.
v: Schwinggeschwindigkeit [m/s]
w: vertikale Durchbiegung [m bzw. mm]

Griechische Buchstaben

- ψ_2 : Kombinationsbeiwert für quasiständige Lasten
 α : Fourierkoeffizient
 β : Beiwert
 ξ : modaler Dämpfungsgrad
 υ : Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion für idealen Einheitsimpulses (1 Ns)
 ℓ : Deckenspannweite

Index

- G: unter Eigengewicht
inst: Anfangs-
Q: unter Verkehrslast
F: mitwirkend unter Einzellast
UZ: Unterzug
EF: Einfeldträger, für einen ideellen Einfeldträger

2. Anforderungen

DIN 1052, Ausgabe 4/1988, [4]:

Hier ist kein Schwingungsnachweis explizit enthalten. Die Gebrauchstauglichkeit soll allein über die Durchbiegungsanforderung sichergestellt werden.

DIN 1052, Ausgabe 12/2008, [3]:

Im Gegensatz zur DIN 1052, Ausgabe 4/1988, findet sich in DIN 1052, Ausgabe 12/2008 [3], ein vereinfachter Schwingungsnachweis in Gestalt eines Durchbiegungsnachweis:

„Bei Decken unter Wohnräumen sollten, um Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden, die am ideellen Einfeldträger ermittelten Durchbiegungen $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst}$ aus ständiger und quasi-ständiger Einwirkung auf 6 mm begrenzt werden. Die Spannweite des Einfeldträgers ist bei Mehrfeldträgern die größte Feldweite ℓ . Die elastische Einspannung in Nachbarfelder darf bei der Berechnung $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst}$ berücksichtigt werden.“ [DIN 1052, 12/2008 [3], Abs. 9.3]

Mit diesem Nachweis wird für Einfeldträger sichergestellt, dass die 1. Eigenfrequenz f_1 der Decke größer als 7,2 Hz ist. Ansonsten werden "besondere Untersuchungen" erforderlich, die in der Norm nicht näher bezeichnet werden. In den Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 8/2004, werden Nachweise, Erläuterungen und Bemessungshilfen angegeben, auf die sich der Eurocode 5 bezieht.

Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1:2010-12, [5]):

Im Eurocode 5, der i.d.R. bauaufsichtlich eingeführt ist, finden sich im Vergleich zu anderen Eurocodes ausführliche Regelungen zur Schwingungsproblematik. Es ist folgender Ablauf vorgesehen:

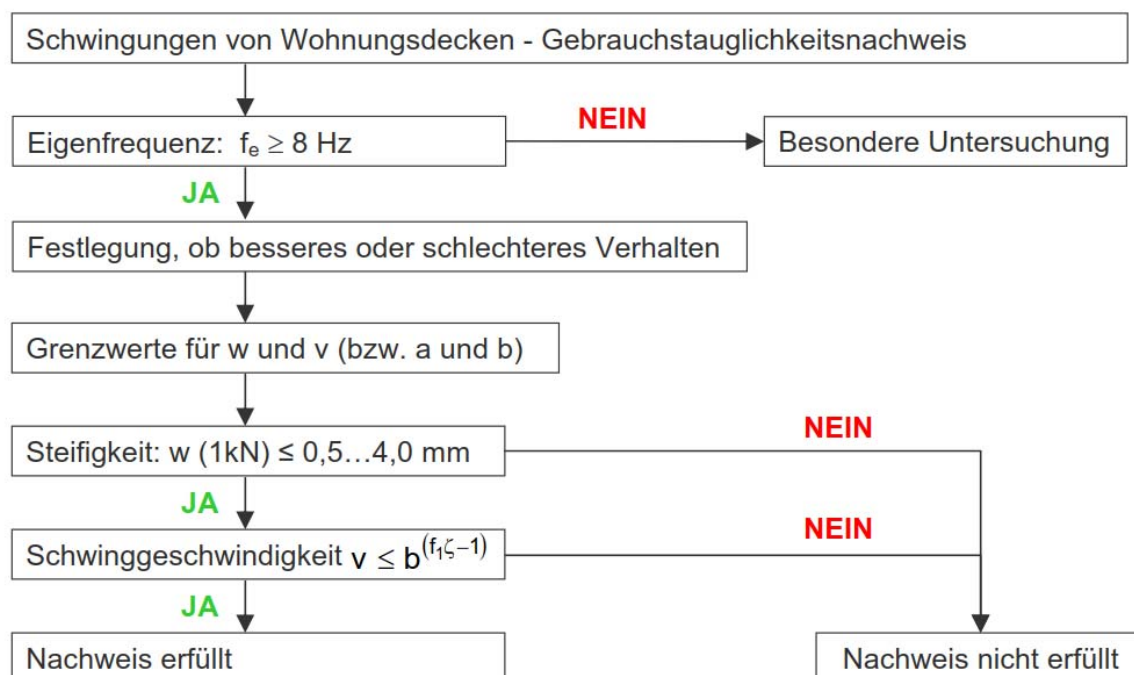


Bild 2: Flussdiagramm für die Nachweise nach Eurocode 5 aus [7]

Im Nationalen Anwendungsdokument zum Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08) wird ausgeführt:

NDP (National zu bestimmender Wert) zu 7.3.1:

„Es gilt der in DIN EN 1995-1-1 empfohlene Bereich der Grenzwerte.“

NCI (Nationale Ergänzung) zu 7.3.3:

„Für Bauteile ohne nennenswerte Querbiegesteifigkeit kann die Schwinggeschwindigkeit auch nach [NA.3] (Anm. d. Verf. : Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08, vgl. [2]), mit zugehöriger Erläuterung, ermittelt werden.“

Dann gibt es hierzu eine Anmerkung:

„Genauere Angaben zu sinnvollen Grenzwerten für unterschiedliche Deckensysteme sind [NA.7] (Anm. d. Verf.: Forschungsbericht von Winter, Hamm und Richter [14]) zu entnehmen.“

Allgemeine Literatur (siehe [1], [8], [9], [10], [11] und [12])

Aus den Bemessungsvorschlägen der Literatur lassen sich folgende Zielrichtungen ableiten:

- Die Decken dürfen bei oft wiederholten Einwirkungen (i.d.R. Fußtritte) nicht durch Resonanz zu unzulässigen Schwingungsamplituden angeregt werden. Dazu wird entweder ein Mindestwert für die 1. Eigenfrequenz der Decken gefordert oder es muss eine dynamische Rechnung durchgeführt werden, die einen Beschleunigungswert infolge dieser Einwirkungen ermittelt und diesen mit einem Grenzwert vergleicht.
- Die Decke muss eine Mindeststeifigkeit besitzen. Damit sollen in erster Linie Einwirkungen aus Impulsen mit einer längeren Einwirkungsdauer (z.B. ein einzelner Fußauftritt) begrenzt werden.
- Die Decke muss auch für Impulse von kurzer Einwirkungsdauer bemessen sein. Hier kommt der Deckenmasse eine erhebliche Bedeutung zu.

Daraus ergeben sich drei voneinander unabhängige Anforderungen:

- Frequenzanforderung (Abschnitt 3.1 und 3.4.1)
- Steifigkeitsanforderung (Abschnitt 3.2)
- Massenanforderung (Abschnitt 3.3 und 3.4.2)

Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit

Tabelle 2: (siehe Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004, Tabelle 9/1):

Tabelle 9/1. Zusammenstellung von Gebrauchstauglichkeitsnachweisen

	Nachweisgröße	Grenze	Aussage, Ziel	Quelle
1	Durchbiegung w	$w < \ell/x$	<i>Steifigkeit</i> geringe Verformung	DIN 1052, 9.2
2	Durchbiegung $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{q,inst}$ unter quasi- ständiger Last $g + \psi_2 \cdot p$	$w < 6 \text{ mm}$	<i>Frequenz</i> > etwa 8 Hz: keine weitere Untersuchung	DIN 1052, 9.3
		$w > 6 \text{ mm}$	<i>Frequenz</i> < etwa 8 Hz: besondere Untersuchung Zeilen 6 und 7	
3	Frequenz	$f > 8 \text{ Hz}$	<i>Frequenz</i> keine Resonanzuntersuchung, aber: Durchbiegung Zeile 4, Impuls Zeile 5	prEN 1995-1-1 7.3.3
		$f < 8 \text{ Hz}$	besondere Untersuchung Zeilen 6 und 7	
4	Durchbiegung infolge Einzellast F	$w/F < 0,5 \text{ bis } 4 \text{ mm/kN}$	<i>Querverteilung</i> geringe Verformung	prEN 1995-1-1 7.3.3
5	Geschwindigkeit infolge Impuls $I = 1 \text{Ns}$ (bis 40 Hz)	$v < b^{(f_1 \cdot \xi - 1)}$ $50 < b < 150$ $\xi = 0,01$	<i>Schwinggeschwindigkeit</i> hochfrequente Bewegung	prEN 1995-1-1 7.3.3 OHLSSON (1995)
6	Besondere Unter- suchung Geschwindigkeit Fersenauftritt $I = 55 \text{Ns}$, $t_i = 0,05 \text{ s}$	$v < 6 \cdot b^{(f_1 \cdot \xi - 1)}$	<i>Schwinggeschwindigkeit</i> Schwingung infolge Tritt	MOHR (2001)
7	Besondere Untersuchung: Beschleunigung Resonanzuntersuchung	$a < 0,1 \text{ m/s}^2$ $a < 0,35 \text{ bis } 0,7 \text{ m/s}^2$	<i>Wohlbefinden</i> spürbar, nicht störend	

Anmerkungen zu Tabelle 2:

Zu Zeile 1: Gewöhnlicher Durchbiegungsnachweis. Mehrere Nachweise sind zu führen.

Zu Zeile 2: In diesem Durchbiegungsnachweis ist die Frequenzanforderung $f_1 \geq 7,2 \text{ Hz}$ indirekt enthalten (Frequenzkriterium).

Zu Zeile 3: Mit dem Frequenznachweis ist im Regelfall der Durchbiegungsnachweis nach Zeile 2 erfüllt. Weil die quasiständigen Lasten wegfallen, ist die Grenzfrequenz höher.

Zu Zeile 4: Die Durchbiegung unter Einzellast ist nach Meinung des Verfassers bei den meisten Decken maßgebend für das Schwingungsempfinden (Steifigkeitskriterium).

Zu Zeile 5: Der Nachweis begrenzt die Schwingungen nach kurzen Impulsen (z.B.: Stößen). Es ist maßgebend für leichte Decken (Massenkriterium), aber wenig relevant [8].

Zu Zeile 6: Modifiziertes Massenkriterium von Zeile 5 als besonderer Nachweis vorgesehen.

Zu Zeile 7: Dynamischer Nachweis, wenn das Frequenzkriterium (Zeile 2 oder 3) nicht eingehalten werden kann.

3. Zur Berechnung und Nachweisführung

3.1. Frequenzanforderung nach Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1) [5]

3.1.1 Bedeutung

Mit der Frequenzanforderung soll verhindert werden, dass mehrere Schritte hintereinander die Decke aufgrund ihrer Resonanznähe zu unzulässigen Schwingungen anregen. Die für einen Nachweis erforderlichen dynamischen Rechnungen wurden von Kreuzinger und Mohr [10] für mehrere, übliche Deckenkonfigurationen im Holzbau durchgeführt. Sie halten deswegen bei Wohnungsdecken eine Grenzfrequenz von 8 Hz für sinnvoll, um die Resonanzgefahr infolge mehrerer Schritte zu beschränken.

Wenn die Frequenzanforderung ($f_1 \leq 8 \text{ Hz}$) nicht eingehalten wird, sollte eine besondere Untersuchung (vgl. 3.4) durchgeführt werden. (7.3.3 (1) aus [5])

3.1.2 Einfeldträger

Die Eigenfrequenz eines Einfeldträgers mit gelenkiger Lagerung, vertikal unverschieblich und einer Spannrichtung wird folgendermaßen ermittelt:

$$f_1 = \frac{\pi}{2\ell^2} \sqrt{\frac{(EI)_\ell}{m}} \quad (7.5 \text{ aus [5]})$$

Zahlenbeispiel: Einfeldträger mit einer Deckenfeldbreite von $b = 7,0 \text{ m}$:

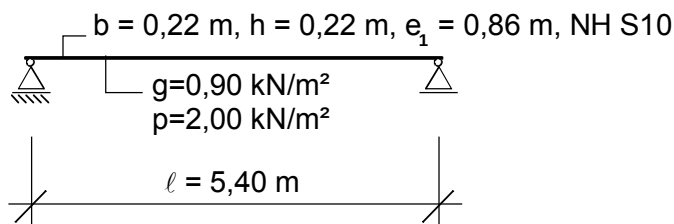


Bild 3: Einfeldträger

$$f_1 = \frac{\pi}{2\ell^2} \sqrt{\frac{(EI)_\ell}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot 5,40^2} \sqrt{\frac{2,497 \cdot 10^6}{90}} = 8,97 \text{ Hz}$$

Die 1. Eigenfrequenzen anderer statischer Systeme können der Literatur (z.B. [10], [11]) entnommen werden. Hier bieten auch die Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 8/2004, [2] eine Hilfestellung. Ggf. ist geeignete Software einzusetzen.

Die Anforderung nach Eurocode 5 mit $f_1 \geq 8,0 \text{ Hz}$ wird näherungsweise erfüllt, wenn die Durchbiegungsanforderung $w_g \leq 5 \text{ mm}$ eingehalten wird.

$$w_g = \frac{5}{384} \cdot \frac{g \cdot \ell^4}{(EI)_\ell} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,90 \cdot 10^{-3} \cdot 5,40^4}{2,497} = 3,99 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,99 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$$

Bedeutung: Bei der Lastkonstellation $g = q = 0,5 E_k$ ergibt sich für eine Decke mit $5,4 \text{ m}$ Spannweite eine Durchbiegung unter Volllast und ohne Kriechen von $2 \cdot 5 \text{ mm} = 10 \text{ mm}$. Das entspricht dem Wert $w_{g+q,inst} = \ell/540$.

3.1.3 Zweifeldträger

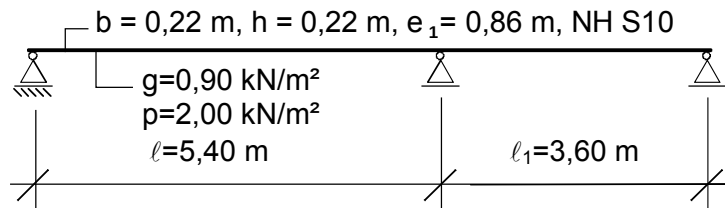


Bild 4: Zweifeldträger

Die Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004, geben die 1. Eigenfrequenzen bei Zweifeldträger in Abhängigkeit eines Faktors k_f (siehe Tabelle 3) und den 1. Eigenfrequenzen der ideellen Einfeldträger an:

Zahlenbeispiel:

$$f_1 = k_f \cdot f_{1,EF} = 1,213 \cdot 8,97 \text{ Hz} = 10,88 \text{ Hz} > 8,0 \text{ Hz}$$

Der Schwingungsnachweis wird so eingehalten.

Tabelle 3: k_f nach Tabelle 9/3 der Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004 /2/:

ℓ_1 / ℓ	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
k_f	1,00	1,09	1,15	1,20	1,24	1,27	1,30	1,33	1,38	1,42	1,56



3.1.4 Mehrfeldträger

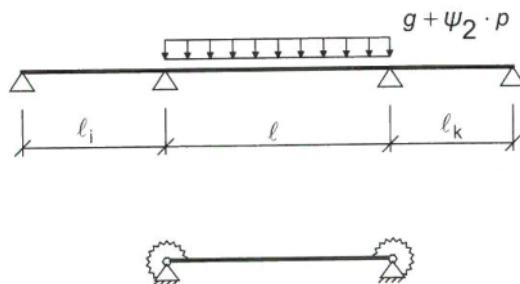


Bild 5: Modell Mehrfeldträger

(Bild 9.3 aus [2])

Es wird die größte Feldweite als ℓ angesetzt. Hier darf nach DIN 1052, Ausgabe 12/2008, die elastische Einspannung in Nachbarfelder mit den Längen ℓ_1 (und ggf. ℓ_2 bei Dreifeldträgern) bei der Berechnung der Durchbiegung verwendet werden. Dies erfolgt über Ersatzdrehfedern und wird in den Erläuterungen näher beschrieben.

Ersatzdrehfedern:

$$\text{Links: } K_i = \frac{3 \cdot EI_i}{\ell_i} = 0 \quad (\text{da Gelenk})$$

$$k_i = \frac{K_i \cdot \ell}{3 \cdot EI_\ell} = 0$$

$$\text{Rechts: } K_k = \frac{3 \cdot EI_k}{\ell_k} = \frac{3 \cdot EI}{\ell_1} = \frac{3 \cdot 2,497 \text{ MNm}^2 / \text{m}}{3,60 \text{ m}} = 2,081 \text{ MNm} / \text{m}$$

$$k_k = \frac{K_k \cdot \ell}{3 \cdot EI_\ell} = \frac{2,081 \text{ MNm} / \text{m} \cdot 5,40 \text{ m}}{3 \cdot 2,497 \text{ MNm}^2 / \text{m}} = 1,50$$

Aus Tabelle 4 (siehe Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004, [2] Tabelle 9/2) ergibt sich der Beiwert β zu:

$$\beta = 0,65 \text{ und}$$

$$w_g = \beta \cdot w_{g,EF} = 0,65 \cdot 3,99 \text{ mm} = 2,59 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$$

Nachweis eingehalten.

Tabelle 4: Beiwert β (Tabelle 9/2 der Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004, [2])

K_k k_i	0 ↓	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0		∞
0	1,000								
0,25	0,880	0,782							
0,5	0,800	0,715	0,657						
1,0	0,700	0,631	0,583	0,520					
2,0	0,600	0,544	0,506	0,455	0,400				
4,0	0,522	0,475	0,443	0,400	0,354	0,314			
8,0	0,474	0,431	0,400	0,363	0,322	0,286	0,262		
∞	0,415	0,399	0,352	0,316	0,280	0,250	0,229		0,200

Bei Mehrfeldträgern ist die Anwendung eines Stabwerkprogrammes, das auch die Eigenfrequenz ermitteln kann, sinnvoll.

3.1.5 Platten

In den meisten Fällen werden im Holzbau keine Platten, die auch statisch als Platten tragen, verwendet. Bei Brettspertholztafeln ist dies nur dann legitim, wenn sichergestellt ist, dass in Querrichtung keine Stöße vorhanden sind, welche die Steifigkeit in Querrichtung abmindern. Dies ist aus baupraktischer Sicht i.d.R. nicht umsetzbar. Vorstellbar sind Holz-Beton-Verbund-Bauweisen, bei denen in Querrichtung die Betonplatte mitträgt oder Decken mit sehr steifen Estrichen, die in beide Richtungen angesetzt werden dürfen.

Bei Platten ermittelt sich die 1. Eigenfrequenz zu:

$$f_1 = f_{1,1} \frac{\pi}{2\ell^2} \sqrt{\frac{(EI)_\ell}{m}} \cdot \sqrt{1 + \frac{(EI)_b}{(EI)_\ell} \cdot \frac{\ell^4}{b^4}}$$

Werte zur Bestimmung der Quersteifigkeit finden sich unter Abschnitt 3.2.

3.1.6 Sonstige Systeme

Sonstige Systeme können mit der Finiten-Elemente-Methode nachgerechnet werden. Dabei können die Eigenfrequenzen bestimmt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Massen richtig ermittelt werden (Tipp: Die Ausbaulasten können über die Wichte beim Material berücksichtigt werden.).

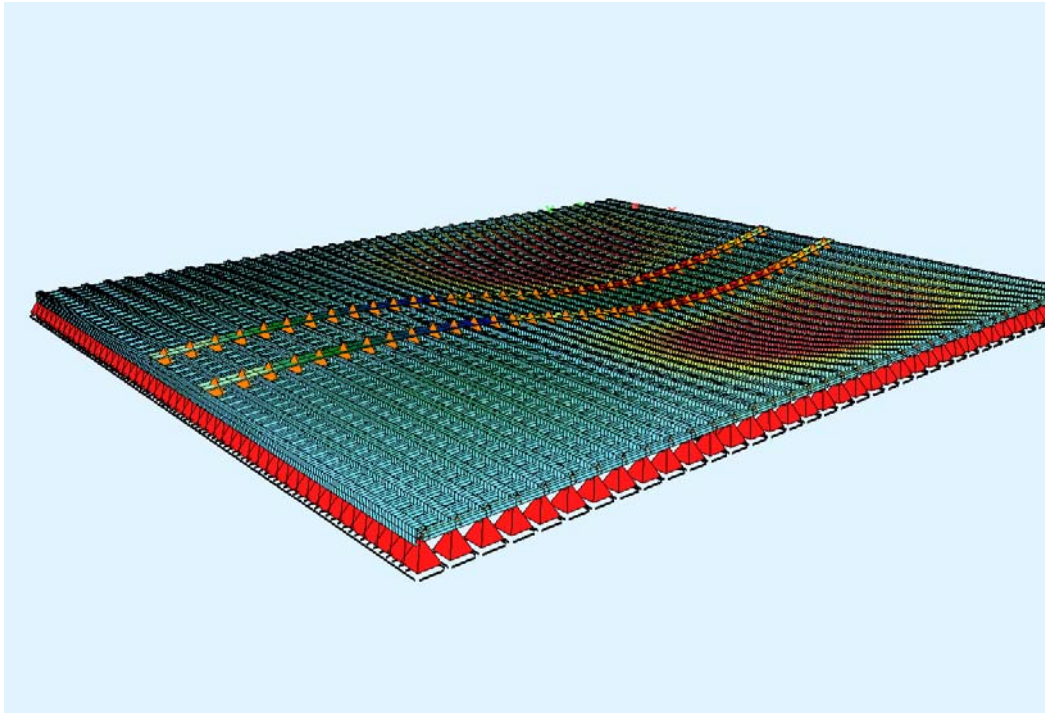


Bild 6: Bsp.: FE-Modell: Holzbalkendecke auf 2 Stahlunterzügen $f_1 = 10,28$ Hz.

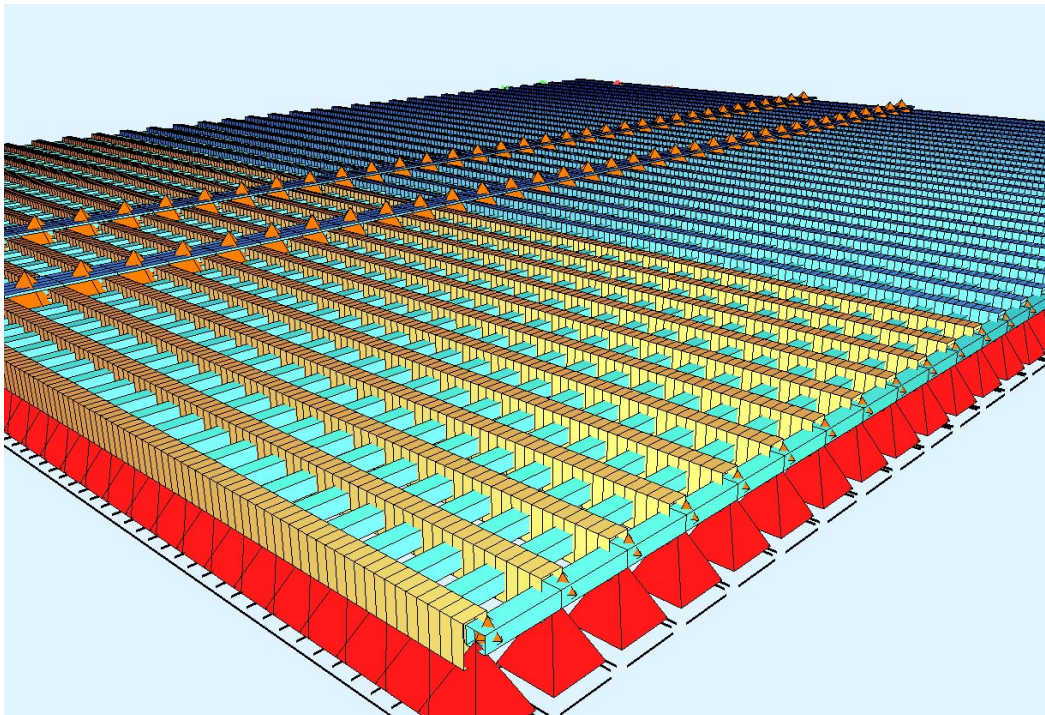


Bild 7: Bsp.: Modellierung der Quersteifigkeit über idealisierte Stäbe

3.2 Steifigkeitsanforderung

3.2.1 Einführung

Eurocode 5 gibt in Abschnitt 7.3.3 (2) eine kombinierte Anforderung an. Diese besteht aus zwei kombinierten Nachweisen. Sie lauten:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad [\text{mm/kN}] \quad (7.3 \text{ aus [5]})$$

und

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad [\text{m}/(\text{Ns}^2)] \quad (7.4 \text{ aus [5]})$$

Bei diesem kombinierten Nachweis wird zwischen einem besseren und schlechteren Schwingungsverhalten unterschieden. Die Grenzwerte werden im folgenden Diagramm (Bild 8) dargestellt.

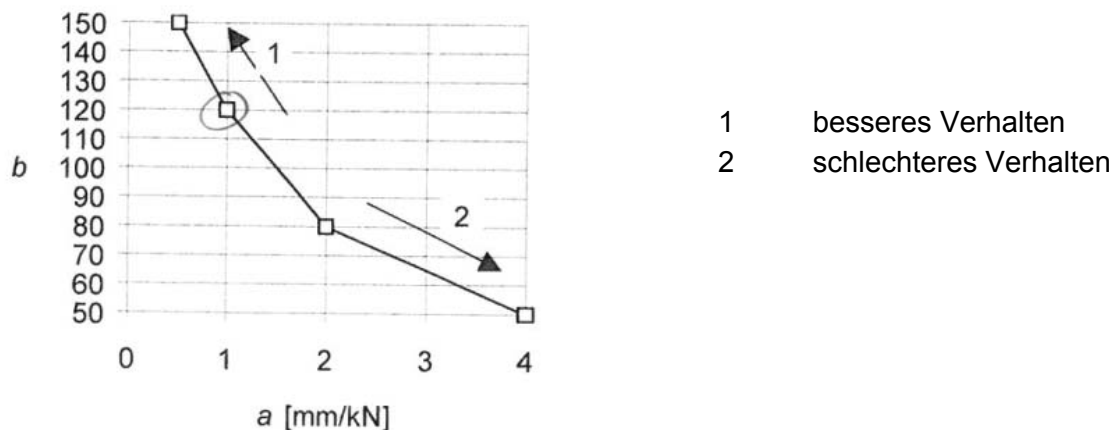


Bild 8: Grenzwerte nach Eurocode 5

(Bild 7.2 aus [5])

Bezeichnungen:

- w: größte vertikale Anfangsdurchbiegung infolge einer konzentrierten statischen Einzellast F, an beliebiger Stelle wirkend und unter Berücksichtigung der Lastverteilung ermittelt
- v: Einheitsimpulsreaktionsgeschwindigkeit für idealen Einheitsimpuls (1 Ns)

Nachfolgend werden die Nachweise zunächst getrennt (in Abschnitt 3.2 und 3.3) betrachtet.

3.2.2 Bedeutung der Steifigkeitsanforderung

Untersuchungen [10] haben gezeigt, dass die Grenzbeschleunigungen der Grenzlinie 1 nach Bild 1 dann eingehalten werden, wenn die Durchbiegung w unter einer Einzellast F folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{w}{F} \leq \frac{1,0 \text{ mm}}{1 \text{ kN}}$$

Dieser Zusammenhang ist dadurch zu erklären, dass beim Gehen durch jeden Schritt eine Einzellast auf das Deckensystem aufgebracht wird. Wenn der Fuß wieder angehoben wird, schwingt die Decke aus (ähnlich dem Zupfen einer Seite). Die Schwingungsgröße ist dabei abhängig von der Größe der Auslenkung und somit von der vertikalen Durchbiegung.

Zu beachten ist, dass die Tragkonstruktionen der Deckenbalken (z.B. Wände und Unterzüge) Beiträge zur vertikalen Durchbiegung w ergeben. Dies ist zu berücksichtigen. Für Unterzüge sollten die Durchbiegungen begrenzt werden:

$$\frac{w_{UZ}}{F} \leq \frac{0,1 \dots 0,25 \text{ mm}}{1 \text{ kN}}$$

3.2.3 Mitwirkende Breite

Mit Hilfe der mitwirkenden Breite für die Durchbiegung b_F , die hier für eine übliche Holzdecke angewendet werden kann, ist die Durchbiegung unter Einzellast sehr anschaulich und einfach zu berechnen:

$$b_F = \frac{1}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_\ell}} \cdot \ell \leq b$$

$$w = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot \ell^3}{b_F \cdot (EI)_\ell}$$

Die oben behandelte Beispieldecke (Einfeldträger) wird von einem Bohlenbelag aus NH C24 (30 mm) bedeckt. Über der Trittschalldämmung sind OSB-Platten (19 mm) eingebaut. Daraus ist die äquivalente Plattensteifigkeit in Querrichtung der Decke zu ermitteln:

$$(EI)_b = \sum_i (EI)_{b,i} = 11000 \cdot \frac{0,03^3}{12} + 5000 \cdot \frac{0,019^3}{12} = 0,02761 \text{ MNm}^2/\text{m}$$

Die mitwirkende Breite im Beispiel ergibt sich zu:

$$b_F \approx \frac{1}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_\ell}} \cdot \ell = \frac{1}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{0,02761}{2,497}} \cdot 5,40 \text{ m} = 1,592 \text{ m}$$

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 1 kN berechnet sich somit zu:

$$w = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot \ell^3}{b_F \cdot (EI)_\ell} = \frac{1}{48} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 5,40^3}{1,592 \cdot 2,497} = 0,825 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,825 \text{ mm} < 1,0 \text{ mm}$$

Der Nachweis der Steifigkeitsanforderung für Grenzlinie 1 wird eingehalten. Die Bewertung nach Eurocode ergibt ein „besseres Verhalten“. Die Durchbiegung entspricht einer Schwinggeschwindigkeit von ca. 7 mm / s.

Hinweise: Der kleinste Wert nach Eurocode 5 beträgt 0,5 mm / 1 kN.

Für die erhöhten Anforderungen nach Grenzlinie 2 gilt:

$$\frac{w}{F} \leq \frac{0,25 \text{ mm}}{1 \text{ kN}}$$

Zur Berechnung der Quersteifigkeiten werden folgende Werte in der Literatur angegeben:

Kreuzinger und Mestek [13], (zit. in [8]) geben näherungsweise folgende Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit der Deckenkonstruktion an:

- Brettstapel, genagelt oder gedübelt: $(EI)_b = 0,0005 (EI)_e$
- Brettstapel, geklebt: $(EI)_b = 0,03 (EI)_e$

Bei den Berechnungen darf die Biegesteifigkeit des Estrichs auch in Längsrichtung tragfähigkeitserhöhend, aber ohne Berücksichtigung der Steineranteile, d.h. ohne eine Verbundwirkung angesetzt werden [7]. Für einige Estricharten werden folgende Elastizitätsmoduln verwendet:

- Zementestrich: $E = 25.000 \text{ MN/m}^2$
- Anhydritestrich: $E = 14.000 \text{ MN/m}^2$
- Gussasphaltestrich: $E = 10.000 \text{ MN/m}^2$

3.2.4 Steifigkeitsanforderung bei Zweifeldträgern

Zwei- und Mehrfeldträger sind aufgrund der Durchlaufträgerwirkung für eine Belastung unter Einzellast steifer als Einfeldträger. Die berechneten Durchbiegungen sind daher kleiner. Dies ist zunächst eine günstige Wirkung. Weil aber im benachbarten Deckenfeld ebenfalls eine Verformung durch die personeninduzierte Anregung auftritt, können hier Personen gestört werden. Diese Personen sind meist in Ruhe und nehmen die Anregungen verstärkt wahr. Aus diesem Grunde wurde in [10] bei der Bewertung unterschieden, ob eine störende Schwingungsübertragung möglich ist oder nicht. Die Grenzwerte für die Durchbiegung unter Einzellast dürfen beim Durchlaufträger um 40% erhöht werden, wenn er als Einfeldträger berechnet wurde. Hieraus entstanden zwei Nachweisformate:

$$\frac{w_{EF}}{F} \leq \frac{1,4 \text{ mm}}{1 \text{ kN}} \quad \text{ohne störende Übertragung (Grenzlinie 1) oder}$$

$$\frac{w_{EF}}{F} \leq \frac{0,35 \text{ mm}}{1 \text{ kN}} \quad \text{mit störender Übertragung (Grenzlinie 2).}$$

w_{EF} ist dabei die Durchbiegung eines ideellen Einfeldträgers mit der größten Spannweite.

Der von Hamm und Richter [8] vorgeschlagene Weg vermeidet diese (in der Praxis schwierige) Differenzierung und gibt an:

$$\frac{w_{EF}}{F} \leq \frac{1,0 \text{ mm}}{2 \text{ kN}} = \frac{0,5 \text{ mm}}{1 \text{ kN}} \quad \text{normale Anforderung (Decken einer Nutzungseinheit)}$$

$$\frac{w_{EF}}{F} \leq \frac{0,5 \text{ mm}}{2 \text{ kN}} = \frac{0,25 \text{ mm}}{1 \text{ kN}} \quad \text{erhöhte Anforderungen (zwischen 2 Nutzungseinheiten)}$$

Dieser Ansatz ergab bei den durchgeführten Versuchen eine gute Korrelation zum bewerteten Schwingungsempfinden der Decken.

3.2.5 Steifigkeitsanforderung bei sonstigen Systemen

Da die Ermittlung der Durchbiegungen an der ungünstigsten Stelle i.d.R. nicht mit geschlossenen Formeln zu ermitteln ist, wird vorgeschlagen, das statische System (z.B. Holzbalken auf Unterzügen, oder auskragende Bereiche) mit Stabwerksprogrammen nach der Finiten-Elementen-Methode zu rechnen. Gute Programme ermöglichen es die 1. Eigenfrequenzen zu ermitteln. Die vertikalen Durchbiegungen werden dadurch ermittelt, dass die Einzellast ingenieurmäßig an die ungünstigste, d.h. „weichste“ Stelle, gestellt wird und die Verformung an dieser Stelle abgelesen wird.

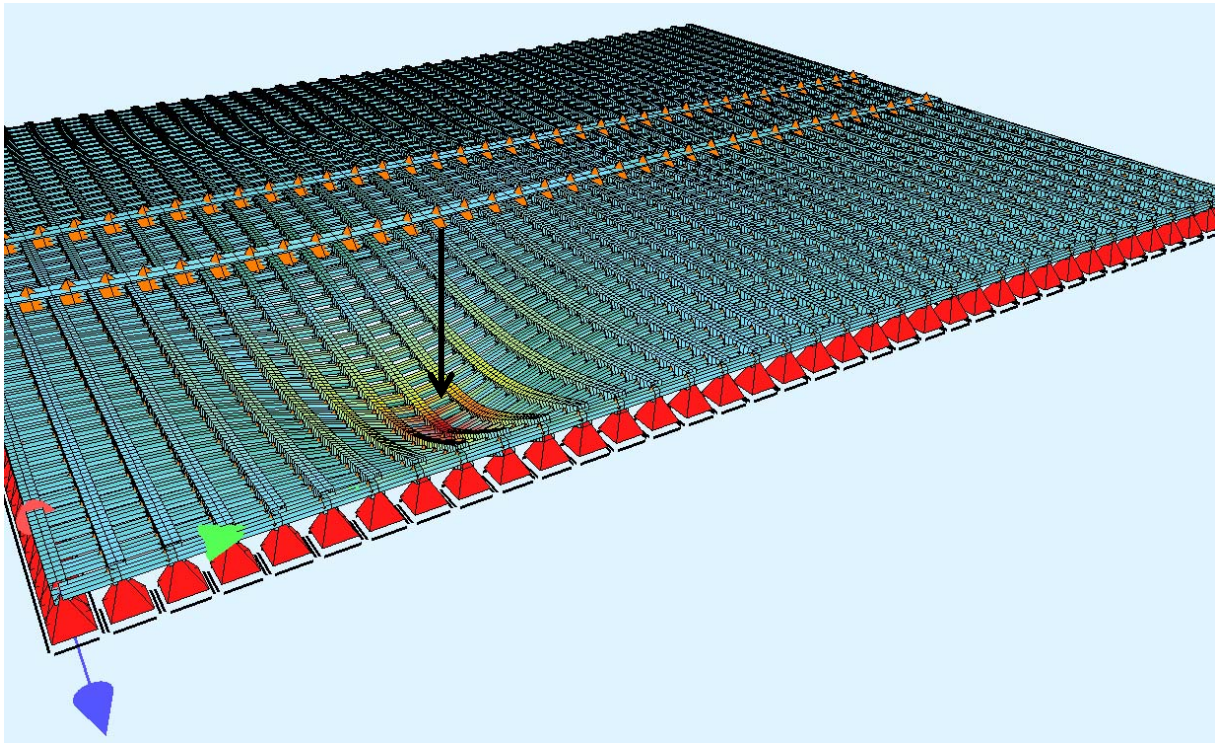


Bild 9: Bsp.: Holzbalkendecke auf zwei Stahlträger aufgelagert.

3.3 Massenanforderung

3.3.1 Einführung und Bedeutung

Wie in 3.2.1 erwähnt sind die Nachweise zweigeteilt zu erstellen. Nachfolgend wird nun die Einheitsimpulsreaktion behandelt. Die Anforderung lautet:

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad [\text{m}/(\text{Ns}^2)] \quad (7.4 \text{ aus [5]})$$

Der Wert b wird als Grenzwert zwischen 50 und 150 gesehen [2]. Nach Meinung des Verfassers sollte ein Mindestwert von 120 eingehalten werden, um ein besseres Schwingungsverhalten zu erlangen.

Die Massenanforderungen hat die Aufgabe die Reaktion kurzzeitiger Impulse zu begrenzen. Hier gilt im Wesentlichen der Impulserhaltungssatz.

$$I = m \cdot v \quad \Leftrightarrow \quad v = \frac{I}{m} \quad (\text{Physik, Formelsammlung})$$

Das heißt der Masse der Decke kommt eine entscheidende Bedeutung zu, die Steifigkeit hat eine untergeordnete Bedeutung.

3.3.2 Nachweis der Massenanforderung

Die Einheitsimpulsreaktion wird folgendermaßen berechnet. Zunächst wird nach Ohlsson [11] die Anzahl der Schwingungen 1. Ordnung mit einer Resonanzfrequenz bis zu 40 Hz ermittelt:

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{\ell} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_\ell}{(EI)_b} \right\}^{0,25}$$

Beispiel:

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{8,97} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{7,0}{5,4} \right)^4 \cdot \frac{2,497}{0,02761} \right\}^{0,25} = 8,33$$

(Hinweis: Dadurch, dass eine relativ geringe Quersteifigkeit vorhanden ist, können sich die einzelnen Balken nahezu unabhängig voneinander verformen, so dass für jeden Balken eine Eigenform zu berücksichtigen ist. In unserem Beispiel sind 9 Balken mit 8 Zwischenfeldern vorhanden.)

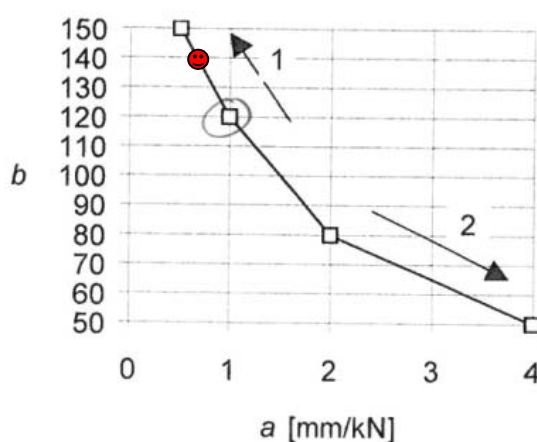
Der zweite Schritt besteht darin, dass die Einheitsimpulsreaktion ermittelt wird:

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{mb\ell + 200} = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 8,33)}{90 \cdot 7,0 \cdot 5,4 + 200} = 0,0060 \frac{m}{s} / (1Ns)$$

Der Grenzwert für $b = 150$ ermittelt sich zu

$$v_{\text{grenz}} \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} = 150^{(8,97 \cdot 0,01 - 1)} = 0,0104 \frac{m}{s} / (1Ns)$$

Der Grenzwert wird eingehalten. Es ist ein „besseres“ Schwingungsverhalten vorhanden.



(Bild 7.2 aus [5])

Bild 10: Grenzwerte nach Eurocode 5 für besseres Verhalten eingehalten

3.4 Besondere Untersuchungen

3.4.1 Dynamische Rechnung zum Nachweis der Frequenzanforderung

Wenn die Frequenzanforderung (vgl. 3.1) nicht eingehalten wird, ist ein dynamischer Nachweis der resultierenden Schwingbeschleunigung zu führen. Die Schwingbeschleunigung infolge wiederholter Einwirkungen muss begrenzt werden. Dazu wird die Beschleunigung aufgrund mehrerer Schritte, wie nachfolgend dargestellt, berechnet:

$$a \approx 0,4 \frac{P_0 \cdot \alpha_i(f_1)}{M_{gen}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_1}{f_F} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(2\xi \cdot \frac{f_1}{f_F} \right)^2}} \leq a_{grenz}$$

Im Faktor 0,4 ist der Einfluss unterschiedlicher Lastangriffspunkte während des Gehens und die begrenzte Anzahl der Impulse (Deckengröße ca. 5 m) eingearbeitet.

- P_0 : Gewichtskraft der Person (i.d.R. $P_0 = 700 \text{ N}$)
 f_F : Anregungsfrequenz nach Tabelle 5
 ξ : Dämpfungskonstanten
 $\alpha_i(f_1)$: Fourierkoeffizient nach Tabelle 5 in Abhängigkeit der 1. Eigenfrequenz f_1 der Decke.

Tabelle 5: Fourierkoeffizienten und Anregungsfrequenz in Abhängigkeit der 1. Eigenfrequenz der Decke f_1 ([9, zit. in [10]]):

Frequenzbereich	Fourierkoeffizient	Anregungsfrequenz f_F	Bemerkungen
$3,4 < f_1 \leq 4,6$	$\alpha_2 = 0,2$	$f_F = f_1$	/8/
$4,6 < f_1 \leq 5,1 \text{ Hz}$	$\alpha_2 = 0,2$	$f_F = f_1$	Vereinfachung
$5,1 < f_1 \leq 6,9 \text{ Hz}$	$\alpha_3 = 0,06^*$	$f_F = f_1$	/8/
$f_1 > 6,9 \text{ Hz}$	$\alpha_3 = 0,06^*$	$f_F = 6,9 \text{ Hz}$	/8/

* $\alpha_3 = 0,10$ nach /7/, $\alpha_1 = 0,4$ für $f_1 \leq 2,5 \text{ Hz}$ ist nicht relevant, da Decke sonst zu weich.

Geändertes Zahlenbeispiel:

- Einfeldträger mit einer Deckenfeldbreite von $b = 7,0 \text{ m}$
- aber nun mit einer Masse von $m = 135 \text{ kg/m}^2$:
- $\zeta = 0,03$ (siehe Tabelle 1)

$$f_1 = \frac{\pi}{2\ell^2} \sqrt{\frac{(EI)_\ell}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot 5,40^2} \sqrt{\frac{2,497 \cdot 10^6}{135}} = 7,33 \text{ Hz}$$

$$f_1 < f_{grenz} = 8 \text{ Hz} \rightarrow \text{besondere Untersuchung}$$

Die generalisierte Masse M_{gen} wird folgendermaßen bestimmt:

$$M_{gen} \approx m \cdot \frac{\ell}{2} \cdot b_m$$

Die mitwirkende Breite b_m wird nach den Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004 mit $b/2$ angesetzt. Es wird folgender Grenzwert für die Beschleunigung vorgeschlagen:

$$a_{grenz} = 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ (vgl. Bild 1, Grenzlinie 2, } v_{grenz, f1 = 8 \text{ Hz}} \approx 2 \text{ mm/s)}$$

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned}
 M_{gen} &\approx m \cdot \frac{\ell}{2} \cdot b_m = 135 \cdot \frac{5,40}{2} \cdot \frac{7,00}{2} = 1275,7 \text{ kg} \\
 a &\approx 0,4 \cdot \frac{P_0 \cdot \alpha_i(f_1)}{M_{gen}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_1}{f_F}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(2\xi \cdot \frac{f_1}{f_F}\right)^2}} = \\
 &= 0,4 \cdot \frac{700 \cdot 0,06}{1275,7} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{7,33}{6,9}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(2 \cdot 0,03 \cdot \frac{7,33}{6,9}\right)^2}} = \\
 &= 0,4 \cdot 0,03292 \cdot 6,97 = 0,0918 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

Der Nachweis als Einfeldträger wird für das Wohlbefinden gerade noch erfüllt. In den Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 8/2004 werden die Schwingungen im folgenden Bereich als „spürbar, nicht störend“ bezeichnet:

$$a < 0,35 \text{ bis } 0,70 \text{ m/s}^2$$

Die Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004, verwenden $P_0 = 700 \text{ N}$, $\alpha_3 = 0,10$ und die Resonanz mit der 3. Eigenform. Hiermit ergibt sich die resultierende Beschleunigung bei Einfeldträgern für den Resonanzfall mit der 3. harmonischen Eigenform der Anregung folgendes:

$$a = 0,4 \cdot \frac{700 \text{ N} \cdot 0,1}{m \cdot \left(\frac{b \cdot \ell}{4}\right)} \cdot \frac{1}{2 \cdot \xi} = \frac{56}{m \cdot b \cdot \ell} \cdot \frac{1}{\xi} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Beispiel:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{56}{m \cdot b \cdot \ell} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{56}{135 \cdot 7,0 \cdot 5,40} \cdot \frac{1}{0,03} = 0,366 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \gg 0,0918 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\
 \frac{a}{a_{\text{grenz}}} &= \frac{0,366}{0,10} = 3,66 > 1,0
 \end{aligned}$$

Die Verwendung des höheren Fourierkoeffizienten α_3 führt zur größeren Beschleunigung. Der Nachweis über eine dynamische Rechnung ist bei nicht eingehaltenem Frequenzkriterium meist ebenfalls nicht durchführbar. Es muss die Steifigkeit der Konstruktion erhöht werden.

Zweifeldträger

Bei Mehrfeldträgern darf die Masse aller mitschwingender Felder berücksichtigt werden. Es wird jedoch empfohlen, bei zwei und mehr Feldern im Bedarfsfall die Auswirkungen mittels Finiten-Elemente-Programmen und dynamischen Rechnungen zu ermitteln.

Für Zweifeldträger und Platten werden in den Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 8/2004 vereinfachte Formeln und Hilfsmittel angegeben. Es entstehen folgende Nachweise, welche die Mehrmasse über einen Faktor γ nach Tabelle 6 berücksichtigt.

$$a \approx 0,4 \frac{P_0 \cdot \alpha_i(f_1)}{\gamma \cdot M_{gen}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_1}{f_F}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(2\xi \cdot \frac{f_1}{f_F}\right)^2}}$$

bzw.

$$a = \frac{56}{\gamma \cdot m \cdot b \cdot \ell} \cdot \frac{1}{\xi} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Tabelle 6: γ nach Tabelle 9/4 der Erläuterungen zu DIN 1052, Ausgabe 8/2004 /2/:

γ	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
k_f	2,00	1,40	1,15	1,05	1,00	0,969	0,951	0,934	0,927	0,918	0,912



Der Faktor $\gamma = 1,03$ ergibt hier eine unwesentliche Verbesserung.

3.4.2 Alternativer Nachweis der Massenanforderung

Für den Nachweis der Massenanforderung wurden bei Kreuzinger und Mohr [5] folgender Nachweis empfohlen. Er ist nicht im Eurocode 5 [5] enthalten, wird aber in [2] für die besonderen Untersuchungen aufgeführt. Dabei wird die Schwinggeschwindigkeit v infolge eines Fersenstoßes ("heel drops") näherungsweise ermittelt. Beim "heel drop" stellt sich eine Person auf die Zehen und lässt sich auf die Ferse fallen. Er stellt eine Einwirkung mit relativ kurzer Einwirkungsdauer dar:

$$v_{heel\ drop} \approx \frac{0,6}{m^{0,5} (EI)_\ell^{0,25} (EI)_b^{0,25}} \left[m/s \right] \quad (\text{Einheiten: } kg/m^2, \underline{MN}m^2/m, m/s)$$

Als Grenzwerte für diese Beanspruchung werden in [10] folgende Werte angegeben:

$$v_{heel\ drop, grenz} = 6 \cdot 100^{(f_1 \cdot \zeta - 1)}$$

Zahlenbeispiel mit $\zeta = 0,03$ (schwimmender Estrich):

$$v_{heel\ drop} \approx \frac{0,6}{m^{0,5} (EI)_\ell^{0,25} (EI)_b^{0,25}} = \frac{0,6}{90^{0,5} \cdot 2,497^{0,25} \cdot 0,02761^{0,25}} = 0,1234 \text{ m/s}$$

$$v_{heel\ drop, grenz} = 6 \cdot 100^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} = 6 \cdot 100^{(8,97 \cdot 0,03 - 1)} = 0,207 \text{ m/s} > 0,1234 \text{ m/s}$$

Der Nachweis wird deswegen eingehalten, weil eine hohe Dämpfung angesetzt wurde. Die Decke ist trotzdem relativ leicht.

Hinweis: Der „heel drop“ erzeugt hohe Schwinggeschwindigkeiten bzw. eine Beschleunigung von ca. 7 m/s^2 . Er sollte bei Messungen nur bei festen Unterdecken nicht aber bei historischen Putz- und Stuckdecken eingesetzt werden.

$$\sigma_{t, StegPutzdecke} = (10 + 7) m/s^2 \cdot 90 \text{ kg/m}^2 / 20\% \cdot 10^{-6} = 0,008 \text{ MN/m}^2$$

(20% = Anteil der Stege zwischen den Latten)

4. Bewertung der Nachweise

4.1 Allgemeines

Es wurden für den Forschungsbericht [10] ca. 20 Decken in Holzbauweise untersucht. Sie waren vorher vom Benutzer und von der Person, welche die Messungen durchführte, subjektiv bewertet worden. Diese Ergebnisse wurden mit den theoretischen Untersuchungen verglichen. Zudem wurden vom Verfasser mehrere Decken im Rahmen von Gutachten bei Streitfällen untersucht und bewertet.

Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbund-Decken" [14] mit ca. 130 untersuchten Decken fließen hier ein. Hamm und Richter [8] sehen nachfolgenden Zusammenhang zwischen Anforderungen und Nutzung bzw. Einbaulage. Dies ist in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Anforderungen und Nutzung bzw. Einbaulage (vgl. Tabelle 5.2 aus [6] bzw. Tab. 2 aus [8])

	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten (erhöhte Anforderungen)	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit (normale Anforderungen)	Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten
Bewertung	1,0 bis 1,5	1,5 bis 2,5	2,5 bis 4,0
Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Raumnutzung	z.B. Wohnungstrenndecken in Mehrfamilienhäusern, Decken in Büros mit PC-Nutzung oder Besprechungsräumen auch Flure mit kurzen Spannweiten	z.B. Decken in üblichen Einfamilienhäusern; Decken im Bestand oder Decken, die mit Zustimmung des Bauherren den normalen Anforderungen genügen dürfen.	z.B. Decken unter nicht genutzten Räumen oder nicht ausgebauten Dachräumen
Empfindungen des Schwingungsverhaltens	Schwingungen werden gar nicht oder nur gering spürbar, wenn man sich darauf konzentriert, und nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar, jedoch nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als (deutlich) spürbar, unangenehm und auch teilweise störend empfunden.
Frequenzkriterium $f_1 \geq f_{\text{grenz}}$	$f_{\text{grenz}} = 8 \text{ Hz}$	$f_{\text{grenz}} = 6 \text{ Hz}$	-
Steifigkeitskriterium $w(2\text{kN}) \leq w_{\text{grenz}}$	$w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$ d.h. $\frac{w}{F} \leq \frac{0,25 \text{ mm}}{1 \text{ kN}}$	$w_{\text{grenz}} = 1,0 \text{ mm}$ d.h. $\frac{w}{F} \leq \frac{0,50 \text{ mm}}{1 \text{ kN}}$	-
Genauere Untersuchung, wenn $f_1 < f_{\text{grenz}}$	$f_{\text{min}} \leq f_1 < f_{\text{grenz}}$ mit $f_{\text{min}} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$f_{\text{min}} \leq f_1 < f_{\text{grenz}}$ mit $f_{\text{min}} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{\text{grenz}} = 0,10 \text{ m/s}^2$	-
Konstruktive Anforderungen	Anordnung von schwimmendem Nass- oder Trockenestrich auf Schüttung nach Tabelle 8		-

Eine (möglichst schwere) Schüttung verbessert das Schwingungsverhalten. Je schwerer die Schüttung, desto größer die Verbesserung der subjektiven Bewertung. Als „schwere“ Schüttung werden Schüttungen mit einem Flächengewicht von mindestens 60 kg/m² bezeichnet.

Dies entspricht z.B. einer 4 cm dicken Kalk-Splitt-Schicht. Die konstruktiven Anforderungen an den Deckenaufbau finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Konstruktive Maßnahmen in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten (vgl. Tabelle 3 aus [8])

	Art des Estrichs	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten (erhöhte Anforderungen, Bewertung 1,0 bis 1,5)	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit (normale Anforderungen)
Holz-Beton-Verbunddecken		Bereits alle in situ gemessenen Rohdecken (außer der nachgiebig gelagerten) wurden mit 1,0 bis 1,5 bewertet. Sie wiesen alle ein hohes Flächengewicht von mindestens 300 kg/m ² auf.	Bereits alle in situ gemessenen Rohdecken (außer der nachgiebig gelagerten) wurden mit 1,0 bis 1,5 bewertet.
Flächige Massivholzdecken z.B.: Brettsperrholz- und Brettstapeldecken	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer oder leichter Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung *)	schwimmend auf schwerer Schüttung *)
Holzbalkendecken oder Trägerroste	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	kein Ausführungsbeispiel, das erhöhte Anforderung erfüllt, gefunden	schwimmend auf schwerer Schüttung

*) Als Beispiel für Trockenestrichaufbau, der die erhöhten Anforderungen erfüllt, wurde nur eine Brettsperrholzdecke im Labor gemessen. Die Übertragbarkeit auf in-situ-Decken ist noch nicht geklärt.

Die Vorgehensweise ist folgendermaßen:

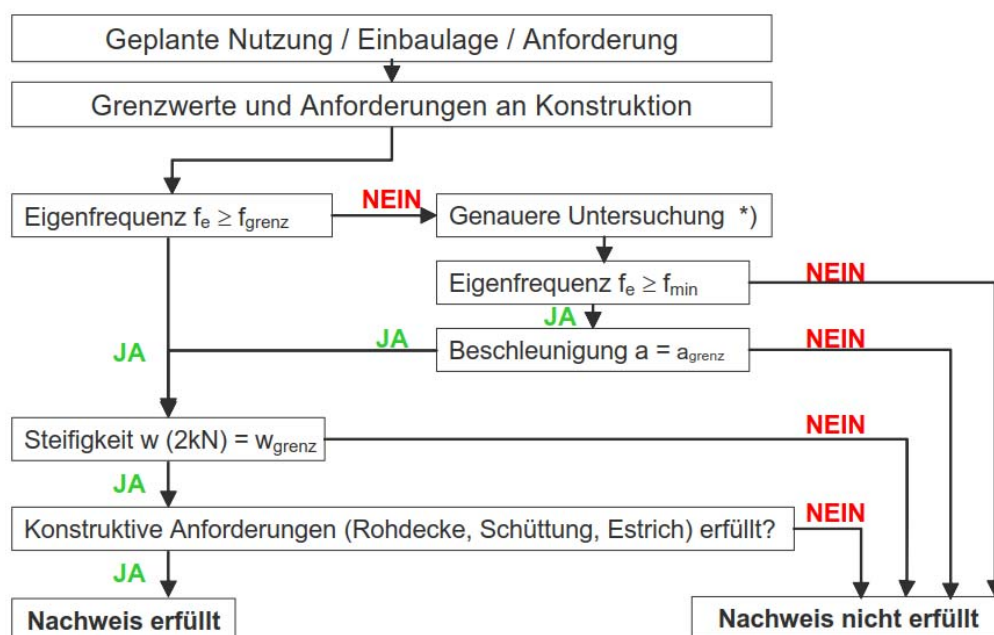


Bild 10: Nachweise nach Winter, Hamm und Richter (aus [7])

4.2 Beurteilung der Frequenzanforderung

Die meisten in [10] gemessenen Wohnungsdecken haben Frequenzen über 8 Hz. Im Bereich zwischen 8 und 10 Hz konnte eine geringfügige Erhöhung der Schwingungsamplituden festgestellt werden, wenn die Decke mit einer sehr gezielten Anregungsfrequenz (ganzzahliger Teil der 1. Eigenfrequenz der Decke in Größenordnung der Schrittfrequenz; z.B. $f_1 = 8,4$ Hz, $f_F = 8,4 / 4 = 2,1$ Hz) beansprucht wurde. Bei einer üblichen Nutzung der Wohnungsdecke ist diese Form der Anregung äußerst unwahrscheinlich.

Deswegen wurde es in [10] als ausreichend erachtet, die Anforderung

$$f_1 \geq 8 \text{ Hz}$$

zur Begrenzung der Resonanz infolge wiederholter Einwirkungen (Gehen) vorzuschlagen. Mit einer hohen Eigenfrequenz und ordentlicher Masse wird auch das Steifigkeitskriterium gut erfüllt. Wenn diese Anforderung nicht eingehalten wird ist eine dynamische Rechnung erforderlich (vgl. Abs. 3.4).

Hamm und Richter [8] schlagen folgende Grenzen vor:

$$f_1 \geq 8 \text{ Hz} \quad \text{für erhöhte Anforderungen}$$

bzw. $f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$ und $f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$

$$f_1 \geq 6 \text{ Hz} \quad \text{für normale Anforderungen.}$$

bzw. $f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$ und $a < 0,10 \text{ m/s}^2$

Dabei dürfen steifigkeitserhöhende Gegebenheiten (z.B. Drillsteifigkeit, Durchlaufwirkung) berücksichtigt werden. Steifigkeitsmindernde (z.B. weiche Unterzüge, biegeeweiche Stöße) müssen ebenso berücksichtigt werden. Die Masse m wird als reine Deckenmasse ohne Trennwandzuschlag und ohne quasiständigen Lastanteil angesetzt.

Die Messergebnisse, die bei Decken durchgeführt werden, zeigten, dass die gemessenen Eigenfrequenzen im Allgemeinen größer als die rechnerisch ermittelten sind. Eine nachträgliche Messung kann die Einhaltung der geforderten Eigenfrequenz belegen, auch wenn der rechnerische Nachweis nicht gelingt.

4.3 Beurteilung der Steifigkeitsanforderung

Die Abhängigkeit der gesamten Deckenbeurteilung von dieser rechnerischen Durchbiegung wurde in [10] dargestellt. Dabei war eine ausreichende Korrelation festzustellen. Die quantitative Auswertung ergab, dass Decken bezüglich der Gesamteinstufung mit einer Durchbiegung unter Einzellast w/F von

- 1,00 mm / 1 kN als schwingungsanfällig
- 0,50 mm / 1 kN als leicht schwingungsanfällig und unter
- 0,25 mm / 1 kN als nicht schwingungsanfällig eingestuft werden können.

Die Steifigkeitsanforderung ist nach Meinung des Verfassers für die Bewertung der Decken bezüglich ihrer Schwingungsanfälligkeit maßgebend.

Hamm und Richter [8] geben nach zahlreichen Untersuchungen folgende Bewertungen an (siehe Tabelle 7):

- $w/F \leq 0,50 \text{ mm} / 1 \text{ kN}$ für normale Anforderungen und
- $w/F \leq 0,25 \text{ mm} / 1 \text{ kN}$ für erhöhte Anforderungen

Die erhöhten Anforderungen werden auch für Wohnungstrenndecken, Bürodecken, Besprechungsräume und ähnlichem vorgeschlagen.

Bei komplexeren Strukturen sollte das Tragwerk mit einem geeigneten Stabwerks- oder Finiten-Elementen-Programm abgebildet werden. Hier kann zum Nachweis die Einzellast von 1 kN an der ungünstigsten Stelle angesetzt werden. Dadurch wird erreicht, dass der Einfluss aller tragenden Bauteile berücksichtigt wird. Die Verformungen werden fast ausschließlich über biegebeanspruchte Bauteile hervorgerufen.

4.4 Beurteilung der Massenanforderung

Die Einhaltung der Massenanforderung stellt bei Decken mit Schallschutzanforderungen ($m > \text{ca. } 100 \dots 150 \text{ kg/m}^2$) meist kein Problem dar. Dies belegen Untersuchungen an ca. 150 Decken ([8], [10]).

4.5 Konstruktive Maßnahmen gegen die Schwingungsübertragung in andere Räume

Die Übertragung von Schwingungen über das Tragwerk ist in benachbarte Räume möglich. Dies wird an Durchlaufsystemen deutlich. Diese Problematik existiert auch bei anderen Konstruktionen. Es ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Rahmenkonstruktionen zwischen Wand- und Deckenelementen sollten vermieden werden.
- Die Tragelemente für vertikale Lasten (Wände, Stützen) sollten übereinander stehen und ihre Lasten direkt in das Fundament ableiten.
- Leichte Trennwände, die auf leichten Decken stehen sowie oben und unten an den Decken befestigt sind, können je nach Befestigungsart Schwingungen in die obere oder untere Decke übertragen. Sie sollten ggf. übereinander stehen.
- Die Durchlaufträgerwirkung zwischen Wohnungen sollte vermieden werden, da hier eine Übertragung in das Nachbarfeld stattfindet. Über auskragende Laubengänge können Schwingungen in die Wohnungen eingetragen werden.
- Unterzüge als Zwischenaufleger sollten möglichst steif ausgeführt werden. Die Übertragung der Schwingungen zwischen zwei Einfeldträgern ist durch einen gemeinsamen „weichen“ Unterzug möglich. Unterzüge und vergleichbare Bauteile sind für erhöhte Anforderungen nach Bild 1 zu bemessen. Nach Meinung des Verfassers ist hier eine Steifigkeitsanforderung von mindestens $0,25 \text{ mm} / 1 \text{ kN}$ erforderlich, besser $0,1 \text{ mm} / 1 \text{ kN}$.

5. Auswirkungen auf die Dimensionierung

Die Auswirkungen der Schwingungsnachweise auf die Dimensionierung werden an einem Beispiel untersucht. Hier handelt es sich um eine mittelschwere Decke. Folgende Werte werden verwendet:

Eigenlasten:	$g = 2,00 \text{ kN/m}^2$
Nutzlasten:	$q = 2,00 \text{ kN/m}^2$
Deckenspannweite:	$\ell = 5,00 \text{ m}$ bzw. als Durchlaufträger $\ell = \ell_1 = 5,00 \text{ m}$
Deckenfeldbreite:	$b = 6,00 \text{ m}$
Nadelholz C 24:	$E_{0,\text{mean}} = 11000 \text{ N/mm}^2$
Zementestrich:	50 mm, hier: $(EI)_{\ell} = 0,156 \text{ MNm}^2/\text{m}$ mit $E = 15.000 \text{ MN/m}^2$
Balkenabmessungen	$h = 0,20 \text{ m}$ ($h = \text{konstant}$, um Auswirkungen darzustellen) b wird variiert, vgl. Tabelle 9
Balkenabstand:	$e = 0,64 \text{ m}$

Die Anforderungen ergeben folgende erforderliche Balkenbreiten b (Tabelle 9):

Tabelle 9: Erforderliche Breiten in Abhängigkeit des geführten Nachweises

Anforderung	erf. b_{EF}	erf. $b_{\text{Durchlaufträger}}$
Biegespannung nach DIN 1052, Ausg. 4/1988	0,120 m	0,109 m
Durchbiegung ($\ell/300$) nach DIN 1052, Ausg. 4/1988	0,170 m	0,105 m
Biegespannung nach DIN 1052, Ausg. 12/2008	0,116 m	0,116 m
Durchbiegung nach DIN 1052, Ausg. 12/2008	0,118 m	0,062 m
Biegespannung nach Eurocode 5	0,116 m	0,116 m
Durchbiegung nach Eurocode 5	0,198 m	0,106 m
Schwingungsnachweis nach DIN 1052, Ausg. 12/2008: ($f_{\text{perm}} \geq 7,2 \text{ Hz}$)	0,298 m	0,204 m (HR) 0,212 m (S1)
Erhöhte Anforderungen ans Frequenzkriterium $f_1 \geq 8 \text{ Hz}$	0,283 m	
Normale Anforderungen ans Frequenzkriterium $f_1 \geq 6 \text{ Hz}$	0,159 m	
Steifigkeitsanforderung: $w/F = 1,00 \text{ mm/kN}$	0,077 m	0,055 m
Steifigkeitsanforderung: $w/F = 0,50 \text{ mm/kN}$	0,194 m	0,139 m
Steifigkeitsanforderung: $w/F = 0,25 \text{ mm/kN}$	0,489 m	0,349 m
(Massenanforderung)	-	-)
Nach Winter, Hamm und Richter „normale Anforderung“	0,194 m	0,139 m
Nach Winter, Hamm und Richter „erhöhte Anforderung“	0,489 m	0,349 m
Gewählte Abmessungen b / h [m/m]	0,20 / 0,20 0,14 / 0,24	0,14 / 0,20 0,12 / 0,22

Hinweise zur Erstellung der Tabelle 9:

- Fourierkoeffizienten nach ISO 10137
- Beim Durchlaufträger wird keine störende Schwingungsübertragung in Nachbarmfelder angesetzt.
- Abkürzungen: HR = Handrechnung, S1 = Software 1

Bewertung aufgrund dieses Beispiels:

1. Der Verzicht auf den Schwingungsnachweis führt wegen der geringeren Durchbiegungsanforderungen zu kleineren Querschnitten. Dies bedeutet wegen den geringeren Anforderungen an die Steifigkeit aber eine höhere Schwingungsanfälligkeit.
2. Der Schwingungsnachweis wird daher als erforderlich angesehen.
3. Die Bemessung für normale Anforderungen an Holzdecken mit Schallschutzanforderungen ergibt Querschnitte, die meist als ausreichend angesehen werden. Dabei werden die Frequenzanforderung $f_1 \geq 6$ Hz und die Steifigkeitsanforderung $w/F \leq 0,50$ mm/kN eingehalten.
4. Die gewohnten Querschnittabmessungen werden sich erhöhen. Flächige Bauweisen werden zunehmen.

6. Zusammenfassende Bewertung

Beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sollte die Schwingungsproblematik, insbesondere bei weitgespannten Tragwerken, unbedingt berücksichtigt werden. Die Art der Gebrauchstauglichkeitsnachweise sollte mit den Beteiligten besprochen und vertraglich fixiert werden, da der Eurocode weit gefasste Grenzwerte hergibt. (z.B. nach Hamm und Richter [7])

Eurocode 5 sieht im Prinzip drei Nachweise vor, für drei voneinander unabhängigen dynamischen Einwirkungen:

- die Frequenzanforderung zur Verhinderung von Resonanz
- die Steifigkeitsanforderung bei „langsamen“ Impulsen und
- die Massenanforderung für „kürzere“ Impulse (oder Stöße).

Die Erläuterungen der DIN 1052, Ausgabe 12/2008 bieten einen umfangreichen Nachweiskatalog und entsprechende Hilfsmittel, die es erlauben, die Schwingungsanforderungen mit einem begrenzten Aufwand nachzuweisen. Einige Vereinfachungen führen aber teilweise zu einer ungünstigen Bemessung.

Maßgebend sind nach den neusten Untersuchungen die Frequenz- und die Steifigkeitsanforderung in Verbindung mit konstruktiven Vorgaben für den Deckenaufbau.

7 Literatur

- [1] Allen, D. E.; Rainer, J. H.: Vibration criteria for long-span floors. In: Canadian Journal of Civil Engineering 3 (1976), S. 165-173.
- [2] Blaß, H. J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, 2. Auflage inkl. Originaltext der Norm, DGfH München, März 2005.
- [3] DIN 1052, Ausgabe 12/2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- [4] DIN 1052, Teil 1, Ausgabe 4/1988: Holzbauwerke – Berechnung und Ausführung.
- [5] DIN EN 1995-1-1:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauteilen – Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. (inkl. NA+ A1+ A2)
- [6] Hamm, P.: Schwingungen bei Holzdecken – Konstruktionsregeln für die Praxis, Hochschule Biberach, Skriptum Modul Holzbau II.
- [7] Hamm, P.; Richter, A.: Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken.
- [8] Hamm, P.; Richter, A.: Personeninduzierte Schwingungen bei Holzdecken – Neue Erkenntnisse führen zu neuen Bemessungsregeln. In: Bruderverlag (Hrsg.): Ingenieurholzbau - Karlsruher Tage, Tagungsband 2009.
- [9] ISO 10137: Bases for design of structures; serviceability of buildings against vibration. 1992-04.
- [10] Kreuzinger, H.; Mohr, B.: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz. München, Technische Universität, Fachgebiet Holzbau. Forschungsbericht Januar 1999.
- [11] Ohlsson, S.: Springiness and human-induced floor vibrations floor vibrations - A Design Guide. Swedish Council for Building Research. Stockholm, Sweden 1988.
- [12] Ohlsson, S.: Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit - Schwingungen. In: Arge Holz e.V. (Hrsg.): Holzbauwerke, STEP1: Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5. (1995), Fachverlag Holz Düsseldorf 1995.
- [13] Winter, St.; Kreuzinger H., Mestek, P.: Flächen aus Brettstapeln, Brettsper Holz und Verbundkonstruktionen. Forschungsbericht im Rahmen von „Holzbau der Zukunft in der High-Tech-Offensive Zukunft Bayern, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München 2008.
- [14] Winter S., Hamm P.; Richter A.: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15283. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Technische Universität München. 2010. (zit. in [5], und [6])