

Zum Schwingungsverhalten von Holzdecken und Holz-Beton-Verbunddecken

Das Schwingungsverhalten wurde bei Holzdecken in der Vergangenheit häufig beanstandet. Über schwingende Decken oder klirrende Gläser im Glasschrank gab es zahlreiche Beschwerden – Gutachter und Sachverständige wurden häufig herangezogen [4]. Ein Grund hierfür mag darin liegen, dass in DIN 1052:1988 kein Schwingungsnachweis für Holzdecken gefordert wurde. Mit Einführung der neuen DIN 1052:2004 hat sich dies geändert. Die Verfasser der neuen Holzbaunorm haben das Schwingungsverhalten thematisiert. Ein Schwingungsnachweis für Decken unter Wohnräumen wird vorgestellt. Zwar handelt es sich bei diesem Nachweis nur um eine Empfehlung; bei Anwendung dieser Regel liegt jedoch ein sehr strenges Bemessungskriterium vor.

Schwingungsnachweis nach DIN 1052:2004

In Abschnitt 9.3 der DIN 1052:2004 [1] wird das Thema Schwingungsnachweis behandelt. Darin heißt es im Einzelnen:

„(1) Für Holzbauteile mit vorwiegend ruhender Belastung im Sinne der DIN 1055-3 darf ein Schwingungsnachweis in der Regel entfallen.“

„(2) 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 quasiständiger Einwirkung auf 6 mm begrenzt werden. Die Spannweite des Einfeldträgers ist bei Mehrfeldträgern die größte Feldweite I. Die elastische Einspannung in

Nachbarfelder darf bei der Berechnung der Durchbiegung $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst}$ berücksichtigt werden.“

„(3) Für Decken unter beispielsweise Turn-, Sport- oder Tanzräumen können besondere Untersuchungen notwendig sein.“

Nach [2] bezieht sich Absatz (1) auf einen Ermüdungsnachweis infolge wechselnder Spannungen bei nicht ruhender Einwirkung und muss mit einem Schwingungsnachweis noch nicht zwingend etwas zu tun haben. Absatz (2) behandelt dagegen das Schwingungsverhalten von Decken unter Wohnräumen. Der Schwingungsnachweis ist dabei unter quasi-ständiger Einwirkungskombination zu führen. $w_{G,inst}$ bedeutet in diesem Falle die Anfangsdurchbiegung der Decke infolge ständiger Last (Eigengewicht der Decke einschließlich Deckenaufbau), entsprechend $w_{Q,inst}$ die Anfangsdurchbiegung infolge veränderlicher Last. Diese darf in Abhängigkeit der vorliegenden Deckennutzung durch den Kombinationsbeiwert ψ_2 abgemindert werden. Für Wohnräume ergibt sich nach Tabelle 1 ein Kombinationsbeiwert $\psi_2 = 0,3$, d. h. bei der Berechnung der Durchbiegung am ideellen Einfeld-

träger werden neben den ständigen Einwirkungen auch 30% der veränderlichen Einwirkungen mit angesetzt. Die so ermittelte Durchbiegung sollte 6 mm nicht überschreiten.

Frequenzkriterium

Leser, die sich nicht täglich mit Deckenschwingungen beschäftigen, werden sich nun fragen, warum in DIN 1052:2004 eine Durchbiegung als Grenzkriterium für den Schwingungsnachweis angegeben ist. Die Antwort liefert Gleichung 1. Zwischen der Durchbiegung und der Eigenfrequenz am Einfeldträger existiert der folgende Zusammenhang

$$f_0 = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot w}} \quad [\text{Gleichung 1}]$$

(w ist dabei in der Einheit cm einzusetzen).

Die in DIN 1052:2004 genannte Grenzdurchbiegung unter quasi-ständiger Einwirkung von 6 mm entspricht somit einer rechnerischen Frequenz von $f_0 = 5 / (0,8 \cdot 0,6)^{0,5} = 7,22$ Hz. Holzdecken oder Holz-Beton-Verbunddecken, die Eigenfrequenzen $f_0 \geq 7,22$ Hz aufweisen, erfüllen nach DIN 1052:2004 den Schwingungsnachweis.

Autoren:
Prof. Dr.-Ing. Leander Bathon
FH Wiesbaden
Kurt-Schumacher-Ring, 18
65197 Wiesbaden
Fachgebiet Ingenieur-Holzbau

Dipl.-Ing. (TU) Dipl.-Ing. (FH)
Oliver Bletz
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
im Fachgebiet Ingenieur-Holzbau

Kategorie	Definition	ψ_2
A	Wohn- und Aufenthaltsräume, Spitzböden	0,3
B	Büroflächen, Arbeitsflächen, Flure	0,3
C	Flächen, die der Ansammlung von Personen dienen können (mit Ausnahme von unter A,B, D und E festgelegten Kategorien)	0,6
D	Verkaufsräume	0,6
E	Fabriken und Werkstätten, Ställe, Lagerräume, Flächen und Zugänge mit erheblichen Menschenansammlungen	0,8

Tabelle 1: Kombinationsbeiwerte ψ_2 für Einwirkungen nach DIN 1052:2004.

Mit diesen beiden Nachweisen – im Allgemeinen als Frequenzkriterium bezeichnet – wird sichergestellt, dass Decken bei oft wiederholt auftretenden Einwirkungen nicht durch Resonanz zu unzulässigen Schwingungsausschlägen angeregt werden. Die Einwirkungen entstehen dabei z. B. durch die Bewegung einer Person. Tabelle 2 gibt für verschiedene Bewegungsarten zugehörige Schrittfrequenzen und Fourierkoeffizienten an.

Neben der dargestellten Näherungsformel existiert noch eine weitere Möglichkeit, die Eigenfrequenz einer Decke zu berechnen. Die 1. Eigenfrequenz $f_{1,1}$ erhält man, wenn in Gleichung 2 für m (Zahl der Wellen in x-Richtung) und n (Zahl der Wellen in y-Richtung) jeweils die Anzahl 1 angesetzt wird.

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{l\ddot{a}ngs}}{m_{Decke}}} \cdot \sqrt{m^4 + n^4 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{EI_{quer}}{EI_{l\ddot{a}ngs}}}$$

[Gleichung 2]

- Aus Gleichung 2 wird ersichtlich:
- Die 1. Eigenfrequenz sinkt mit wachsender Spannweite.
 - Die 1. Eigenfrequenz sinkt mit steigender Masse.
 - Eine Erhöhung der Steifigkeit in Tragrichtung bewirkt eine Erhöhung der 1. Eigenfrequenz. Meist wird eine solche Erhöhung der Steifigkeit jedoch mit einer Vergrößerung oder Verstärkung des Querschnitts erreicht. Diese verursacht in der Regel eine Erhöhung der Masse und beschränkt so die Zunahme der 1. Eigenfrequenz.
 - Bei der Ermittlung der 1. Eigenfrequenz werden die Steifigkeitsverhältnisse der Decke in Tragrichtung und quer zur

Bewegungsart	Frequenz [Hz]	Fourierkoeffizient		
		α_1	α_2	α_3
Gehen (vertikal)	bis 2,5	0,4	0,2	0,1
Gehen (horizontal)	bis 2,5	0,1	0,1	0,1
Laufen	2,0 bis 3,5	1,3	0,4	0,1
Hüpfen	2,0 bis 3,0	1,8	1,3	0,8
Tanzen	2,0 bis 3,0	0,5	0,15	0,15

Tabelle 2: Bewegungsarten, Schrittfrequenz, Fourierkoeffizient.

Tragrichtung berücksichtigt. Die Querbiegesteifigkeit einer Holzbalkendecke wird dabei z. B. durch eine oberseitig angeordnete Estrichschicht herbeigeführt. Sie bewirkt eine Erhöhung der berechneten 1. Eigenfrequenz. Das Frequenzkriterium ist unabhängig von der Spannweite. Decken mit kurzer Spannweite müssen das Frequenzkriterium ebenso erfüllen wie Decken mit großer Spannweite.

Deckenspannweite [cm]	Durchbiegungsanforderung 6 mm unter quasi-ständiger Lastkombination
180	I / 300
300	I / 500
400	I / 667
500	I / 833
600	I / 1000
700	I / 1167
800	I / 1333
900	I / 1500
1000	I / 1667
1100	I / 1833
1200	I / 2000

Tabelle 3: Durchbiegungskriterium in Abhängigkeit der Spannweite nach DIN 1052:2004.

Die nicht zu unterschätzenden Auswirkungen auf den Holzbau zeigt Tabelle 3. Während nach DIN 1052:1988 für Decken der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit als spannenweitenabhängiger Durchbiegungsnachweis unter Vollast mit I/300 geführt werden konnte, erhöhen sich die Anforderungen nach DIN 1052:2004 durch den Schwingungsnachweis erheblich. Für eine Decke mit einer Spannweite von z. B. 4,0 m bedeutet der erfüllte Schwingungsnachweis eine Durchbiegungsbeschränkung – allerdings unter der geringeren quasi-ständigen Last – von I/667, für eine Decke mit 8 m Spannweite bereits eine Durchbiegungsbegrenzung von I/1333.

Anzeige



Limbachmuttern® für den Holz- und Fertigbau



Schwere Ausführung:

„L“-Einschlagmuttern für tragende Holzkonstruktionen, sowie im Holzhaus- und Fertighausbau.



Hoch belastbar:

„L“-Flanschemuttern für die Zwischenwandbefestigung

Karl Limbach & Cie.
GmbH & Co.KG
Metallwarenfabrik
gegründet 1898

Postfach 190365
42719 Solingen
Telefon 02 12 / 39 80
Telefax 02 12 / 317299
www.limbach-cie.de
info@limbach-cie.de

 TÜV CERT
DIN EN ISO 9001
Zertifiziert seit 1999/2000



Nachweisverfahren und besondere Untersuchungen

Die Anforderungen in DIN 1052:2004 sind mit „sollen“ und nicht mit „müssen“ formuliert. Ist der Durchbiegungsnachweis unter quasi-ständiger Last nicht erfüllt, ist die Konstruktion zu ändern oder es kann ein genauerer Schwingungsnachweis geführt werden. DIN 1052:2004 gibt allerdings nicht an, wie dieser auszusehen hat. Ebenso wenig wird aufgezeigt, welche „besonderen Untersuchungen“ bei Decken unter Turn-, Sport- oder Tanzräumen auszuführen sind.

Forschungsergebnisse der Technischen Universität München helfen dem Ingenieur an dieser Stelle weiter. Dabei handelt es sich um Ergebnisse eines von der DGFH geförderten Forschungsvorhabens über die Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz [6]. Nach Auswertung bestehender Nachweisverfahren und eigener Untersuchungsergebnisse geben KREUZINGER / MOHR und HAMM darin und in weiteren Veröffentlichungen [3], [5], [6], [7] Kriterien an, die eine Nachweisführung hinsichtlich des Schwingungsverhaltens ermöglichen. Die Nachweise sind zusammenfassend auch in [2] dargestellt. Dabei handelt es sich um Nachweise zur Frequenzanforderung, zur Steifigkeitsanforderung sowie zur Massenanforderung. Die der Frequenzanforderung zugrunde liegende Intention wurde oben beschrieben – sie erfasst die Problematik der Schwingungsamplituden und der Resonanzanregung. Dagegen soll mit der Steifigkeitsanforderung und der Massenanforderung gewährleistet werden, dass die Deckenkonstruktion Impulsen mit längeren und

kürzeren Einwirkungsauern widersteht.

Erfüllt eine Deckenkonstruktion den Durchbiegungsnachweis nach DIN 1052:2004 unter quasi-ständiger Bemessungssituation nicht, schlagen KREUZINGER / MOHR eine weiterführende besondere Resonanzuntersuchung vor. Dabei wird die Schwingbeschleunigung der Decke berechnet und mit Beschleunigungsgrenzwerten verglichen. Zwei Beschleunigungsgrenzwerte werden vorgeschlagen: Grenzwert $a_1 = 0,1 \text{ m/s}^2$ für höhere Anforderungen an die Behaglichkeit und das Wohlbefinden sowie Grenzwert $a_2 = 0,4 \text{ m/s}^2$ für Impulse, die im gleichen Raum wahrnehmbar sind, jedoch als nicht störend empfunden werden. Zudem wird vorgeschlagen, eine besondere Untersuchung zur Schwinggeschwindigkeit der Decke (infolge Fersenauftritts) durchzuführen. Auf diesen Nachweis wird später eingegangen.

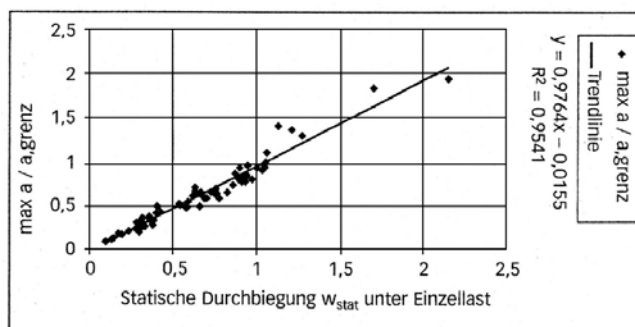
Steifigkeitsanforderung

In theoretischen Untersuchungen fanden KREUZINGER / MOHR heraus, dass zwischen dem Ausnutzungsgrad der Schwingbeschleunigung und der statischen Durchbiegung einer Deckenkonstruktion unter einer in Feldmitte angebrachten Einzellast von $F = 1 \text{ kN}$ eine gute Korrelation besteht.

Der Grenzwert a_2 der Schwingbeschleunigung wird eingehalten, wenn die statische Durchbiegung der Decke unter dieser Einzellast $F = 1 \text{ kN} \leq 1 \text{ mm}$ ist. Der sich daraus ergebende Nachweis für die Steifigkeitsanforderung ist sehr einfach.

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

[Gleichung 3]



Zusätzliche praktische Untersuchungen an mehreren Deckenkonstruktionen in Wohngebäuden führten gleichzeitig zu dem Ergebnis, dass Decken, die eine Durchbiegung von 1,0 mm unter der in Feldmitte aufgebrauchten Einzellast von 1 kN aufweisen, von den Benutzern in einer subjektiven Gesamtbeurteilung als eher schwingungsanfällig empfunden wurden. Bessere Gesamtbewertungen erhielten Decken, bei denen die statischen Durchbiegungen geringer ausfielen. Decken mit einer Durchbiegung von 0,5 mm / 1 kN wurden von den Testpersonen als leicht schwingungsanfällig bewertet, Deckentragwerke mit Durchbiegungen von 0,25 mm / 1 kN sogar als nicht schwingungsanfällig. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten strengerer Einstufungen zur Steifigkeitsanforderung. Es bleibt anzumerken, dass trotz der durchgeführten Untersuchungen in der Literatur weiterhin Grenzwerte von 0,5 mm / 1 kN bis 4,0 mm / 1 kN zu finden sind. Eine Festlegung auf einheitliche strenge Grenzwerte existiert derzeit nicht.

Massenanforderung

Mit der Massenanforderung an eine Deckenkonstruktion wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die subjektive Beurteilung einer Decke durch einen Nutzer hinsichtlich des Schwingungsverhaltens von der tatsächlichen Schwinggeschwindigkeit der Decke abhängig ist. Die Schwing-

Abb. 1: Theoretisch ermittelte Korrelation zwischen dem Ausnutzungsgrad der Schwingbeschleunigung und der statischen Durchbiegung unter einer Einzellast (aus [7]).

geschwindigkeit wird dabei über Impulse mit kurzer Einwirkungsduer ermittelt. In der Literatur werden zwei mögliche Nachweise für das Kriterium der Massenanforderung angegeben. Die Schwinggeschwindigkeit infolge eines Einheitsimpulses ($I = 1 \text{ Ns}$) sowie die Schwinggeschwindigkeit infolge eines Fersenauftritts ($I = 55 \text{ Ns}$). Die ermittelten Schwinggeschwindigkeiten werden dabei Grenzwertgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Bei der Berechnung dieser Grenzwertgeschwindigkeiten wird das Dämpfungsmaß der Decke berücksichtigt. Das Dämpfungsmaß ist abhängig vom Deckentyp und Deckenaufbau. Tabelle 5 zeigt Dämpfungsmaße für Holzdecken gemäß [2].

Statische Durchbiegung w_F unter Einzellast $F = 1 \text{ kN}$ in Feldmitte	Subjektive Einstufung durch Nutzer
1,00 mm	schwingungsanfällig
0,50 mm	leicht schwingungsanfällig
0,25 mm	nicht schwingungsanfällig

Tabelle 4: Kriterien zur Steifigkeitsanforderung nach [7].

Deckenaufbau	Dämpfungsmaß ξ
Decken ohne schwimmenden Estrich	0,01
Decken aus geklebten Brettstapelementen mit schwimmendem Estrich	0,02
Holzbalkendecken und mechanisch verbundene Brettstapeldecken mit schwimmendem Estrich	0,03

Tabelle 5: Dämpfungsmaß für verschiedene Deckentypen (aus [2]).

Holz-Beton-Verbunddecken

Die dargestellten Nachweise sind auf Holz-Beton-Verbunddecken übertragbar. Für sie gilt zudem:

- Aufgrund des eingesetzten Betons verfügen HBV-Decken über eine höhere Masse als herkömmliche Holzdecken. Diese ständig wirkende Masse bewirkt zusätzliche Verformungen. Bei größeren Spannweiten kann das dazu führen, dass die Frequenzanforderung $< 7,22 \text{ Hz}$ nicht erfüllt wird und besondere Untersuchungen erforderlich werden.
- Die eingebrachte Masse der Betonschicht hilft bei der Resonanzuntersuchung, da die schwere HBV-Decke nicht so leicht zum Schwingen angeregt werden kann.
- Für flächige Holz-Beton-Verbundkonstruktionen wurden in einem vor kurzem abgeschlossenen Forschungsvorhaben Dämpfungsmaße experimentell ermittelt [9]. WINTER et al. ermitteln darin für geklebte Brettstapeldecken ($h = 18 \text{ cm}$) mit oberseitigem Aufbeton ($h = 8 \text{ cm}$) in Abhängigkeit der Verbundwirkung Dämpfungsmaße ξ zwischen 1,7% bis 2,9%. Für gena-

- gelte Brettstapeldecken ($h = 14 \text{ cm}$) mit integrierter Kiesschüttung ($h = 8,5 \text{ cm}$) und oberseitiger Aufbetonschicht ($h = 8 \text{ cm}$) ermittelten die Wissenschaftler sogar Dämpfungsmaße von 4,3% bis 5,5%. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse schlagen die Autoren für Holz-Beton-Verbunddecken ohne zusätzliche Kiesschüttungen oder Zwischenschichten, jedoch mit oberseitig schwimmend verlegten Estrichen ein konservatives Dämpfungsmaß ξ von 2% vor.
- In der Regel können HBV-Decken das Steifigkeitskriterium sowie das Massenkriterium leicht erfüllen. Aus diesem Grund stellen HBV-Decken äußerst geeignete Ausführungsvarianten für Tragwerke mit mittleren bis großen Spannweiten dar.

Berechungsbeispiele

Die oben aufgezeigten Erläuterungen werden anhand zweier Beispiele vertieft. Dabei handelt es sich um eine Holzbalkendecke ($b/h = 16/30 \text{ cm}$, BS 11, $E = 1100 \text{ kN/cm}^2$) mit einer Spannweite von 7,50 m, die nach DIN 1052:1988 bemessen wurde

(mit dem Gebrauchstauglichkeitsnachweis $I/300$ als maßgebendem Bemessungskriterium). Die Deckenbalken liegen in einem Abstand von 62,5 cm. Auf der 2 cm dicken verlorenen Schalung ist ein schwimmend verlegter Estrich ($d = 5 \text{ cm}$) vorgesehen.

In Tabelle 6 sind die erforderlichen Berechnungen zum Schwingungsverhalten der Holzbalkendecke dargestellt. Sie zeigen, dass die Deckenkonstruktion aufgrund des Frequenzkriteriums nicht ausreichend gegen Schwingungen bemessen ist. Die Durchbiegung unter quasi-ständiger Last liegt mit 15,3 mm deutlich über der Grenze von 6 mm. Die 1. Eigenfrequenz unterschreitet den Grenzwert von 7,22 Hz zudem erheblich. In der weiterführenden Resonanzuntersuchung wird eine Schwingbeschleunigung ermittelt, die die Grenzwerte für Wohlbefinden um das Doppelte überschreitet, obwohl das Dämpfungsmaß der Decke mit $\xi = 3\%$ angesetzt wurde. Von einer solchen Konstruktion raten die Autoren daher ab.

Aufgrund der Schwingungsanfälligkeit der Holzbalkendecke wird die Deckenkonstruktion zu einer Holz-Beton-Verbunddecke ertüchtigt. Dafür

wird auf die verlorene Schalung oberseitig eine Betonschicht aufgebracht, die über einreihig eingeklebte HBV-Schubverbinder schubfest mit der Holzkonstruktion verbunden ist. Ein schwimmend verlegter Estrich ($d = 5 \text{ cm}$) stellt den nötigen Trittschallschutz der Deckenkonstruktion her und sorgt gleichzeitig für ein ausreichendes Dämpfungsmaß der Decke. Im Vergleich zur Holzbalkendecke wird infolge der Verbundlösung die Steifigkeit der Deckenkonstruktion in Tragrichtung um das 4,5fache ($179.214.247 / 39.600.000$) erhöht, quer zur Tragrichtung um das 4fache ($7.052.083 / 1.692.708$).

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit. Es wird deutlich, dass die Holz-Beton-Verbunddecke den in DIN 1052:2004, Abschnitt 9.3 (2) genannten Schwingungsnachweis knapp erfüllt. Die Durchbiegung liegt bei ca. 5,9 mm, die Eigenfrequenz bei 7,43 Hz. Zurückzuführen sind die Ergebnisse auf die Vergrößerung der statischen Höhe und die Aufwertung der Decke zu einer Holz-Beton-Verbundkonstruktion. Im Beispiel weist die Holz-Beton-Verbunddecke eine rechnerische Schwingbeschleunigung $a = 0,09 \text{ m/s}^2$ auf und erfüllt damit die Anforderung für Wohlbefinden ($a_1 = 0,1 \text{ m/s}^2$). Die HBV-Decke hält auch sonst alle geforderten Kriterien zur Schwingungsuntersuchung ein.

Fazit

DIN 1052:2004 greift die Thematik der Schwingungsanfälligkeit von Holzdecken auf. Dabei wird im Rahmen einer Empfehlung für Decken unter Wohnräumen ein Frequenzkriterium angegeben. Ist das Frequenzkriterium nicht erfüllt

Parameter	Formel / Abkürzung	Holzbalkendecke
Deckenspannweite	l	7,50 m
Deckenbreite	b	10,00 m
Ständige Einwirkung	g	1,75 kN/m ²
Veränderliche Einwirkung	q	2,00 kN/m ²
Kombinationsbeiwert	ψ_2	0,3 für Wohnungsdecken
quasi-ständige Einwirkungskombination	q_{perm}	$1,75 + 0,3 \cdot 2,0 = 2,35 \text{ kN/m}^2$
Deckenmasse	m	235 kg/m ²
Balkenabstand	e	62,5 cm
Längsbiegesteifigkeit	$EI_{längs}$	$1100 \cdot 16 \cdot 30^3 / 12 = 39.600.000 \text{ kNcm}^2/\text{m}$
Querbiegesteifigkeit	EI_{quer}	$2600 \cdot 62,5 \cdot 5^3 / 12 = 1.692.708 \text{ kNcm}^2/\text{m}$
Durchbiegenachweis nach DIN 1052:1988 (Zeitpunkt $t=0$)	$\text{vorh } f = \frac{5 \cdot (g + p) \cdot l^4}{384 \cdot EI_{längs}} \leq \frac{1}{300}$	$\frac{5 \cdot 3,75 \cdot 0,625 \cdot 750^4}{384 \cdot 39.600.000 \cdot 100} = 2,44 \text{ cm} \leq \frac{1}{300} = 2,50 \text{ cm}$
Frequenzkriterium nach DIN 1052:2004	$w = \frac{5 \cdot q_{perm} \cdot l^4}{384 \cdot EI_{längs}} \leq 6 \text{ mm}$	$\frac{5 \cdot 2,35 \cdot 0,625 \cdot 750^4}{384 \cdot 39.600.000 \cdot 10} = 15,3 \text{ mm} \geq 6 \text{ mm}$ <i>Frequenzkriterium nicht eingehalten!</i> <i>Resonanzuntersuchung und Nachweis der Schwinggeschwindigkeit infolge Fersenauftritt notwendig!</i>
Ermittlung der Grundfrequenz	$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{längs}}{m}}$	$\frac{\pi}{2 \cdot 7,50^2} \cdot \sqrt{\frac{39.600.000}{235 \cdot 0,625 \cdot 10}} = 4,58 \text{ Hz}$
Ermittlung der 1. Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Quertragwirkung	$f_{1,1} = f_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{EI_{quer}}{EI_{längs}}} \geq 7,22 \text{ Hz}$	$4,58 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{7,50}{10,00}\right)^4 \cdot \frac{1.692.708}{39.600.000}} = 4,61 \text{ Hz} \leq 7,22 \text{ Hz}$ <i>Frequenzkriterium nicht eingehalten!</i> <i>Resonanzuntersuchung und Nachweis der Schwinggeschwindigkeit infolge Fersenauftritt notwendig!</i>
Resonanzuntersuchung	$a \approx \frac{560 \cdot \alpha}{m \cdot b \cdot l \cdot \xi} \leq \begin{cases} a_1 = 0,10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ (Wohlbefinden)} \\ a_2 = 0,40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ (spürbar)} \end{cases}$	$\frac{560 \cdot 0,2}{235 \cdot 7,50 \cdot 10,00 \cdot 0,03} = 0,21 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left\{ \begin{array}{l} \geq a_1 \\ \leq a_2 \end{array} \right\}$ <i>Resonanzuntersuchung (Gehen, 2. Harmonische) für Wohlbefinden nicht erfüllt!</i>
Steifigkeitskriterium unter Berücksichtigung der Quertragwirkung	$w_F = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI_{längs}} \cdot \frac{1,1}{1,4 \cdot \sqrt{\frac{EI_{quer}}{EI_{längs}}}} \leq 0,5 \text{ mm} - 4,0 \text{ mm}$	$w_F = \frac{1 \cdot 750^3 \cdot 10}{48 \cdot 39.600.000} \cdot \frac{1,1}{7,5 \cdot \sqrt{\frac{1.692.708}{39.600.000}}} = 0,72 \text{ mm}$ <i>Steifigkeitskriterium erfüllt!</i>
Massenkriterium Schwinggeschwindigkeit infolge Einheitsimpuls $I = 1 \text{ Ns}$	$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \leq b \cdot (\xi \cdot f_{1,1} - 1)$ mit $b = 50 \text{ (leicht)} \dots 100 \text{ (mittel)} \dots 150 \text{ (streng)}$	$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 8)}{235 \cdot 10,00 \cdot 7,50 + 200} = 0,0012 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq 0,0133 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ <i>Massenkriterium für $b = 150$ erfüllt!</i>
Massenkriterium Schwinggeschwindigkeit infolge Fersenauftritt $I = 55 \text{ Ns}$	$v = \frac{0,6}{m^{0,5} \cdot EI_{längs}^{0,25} \cdot EI_{quer}^{0,25}} \leq 6 \cdot b \cdot (\xi \cdot f_{1,1} - 1)$ mit $b = 50 \text{ (leicht)} \dots 100 \text{ (mittel)} \dots 150 \text{ (streng)}$	$v = \frac{0,6}{235^{0,5} \cdot \left(\frac{39.600.000}{10000000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{1.692.708}{10000000}\right)^{0,25}} = 0,0433 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq 0,0796 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ <i>Massenkriterium für $b = 150$ erfüllt!</i>

Tabelle 6: Zusammenstellung der Schwingungsnachweise für die Holzbalkendecke.

oder werden Decken unter Turn-, Sport- oder Tanzräumen betrachtet, können nicht näher erläuterte „besondere Untersuchungen“ erforderlich werden. In der Literatur sind Nachweise zu den „besondere Untersuchungen“ zu finden. Die aufgeführten Nachweise zum Schwingungsverhalten sind auf diverse Deckensysteme anwendbar. Das Schwingungsverhalten von Holzbalkendecken, geklebten oder mechanisch verbunde-

nen Brettstapeldecken sowie Holz-Beton-Verbunddecken kann durch die Nachweise beurteilt werden. Lösungsansätze für Balken- und Plattenvarianten sind ebenso angegeben wie Nachweise für statische Einfeld- oder Zweifeldsysteme. Grundsätzlich sollten mit der Frequenzanforderung, der Steifigkeitsanforderung und der Massenanforderung stets alle drei Kriterien hinsichtlich des Schwingens erfüllt sein,

damit eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit der Decke gewährleistet ist. Es bleibt anzumerken, dass die Empfindlichkeit gegenüber Schwingungen von Decken stark von der subjektiven Wahrnehmung des Benutzers abhängig ist. Dies zeigt sich auch an den in der Literatur angegebenen Grenzwerten, die zum Teil stark untereinander variieren. Bei einer nachgewiesenen Schwingungsanfälligkeit einer Holzdeckenkon-

struktion kann die Holz-Beton-Verbundbauweise Abhilfe schaffen. Durch das Aufbringen einer Betonschicht und das Schubfeste Verbinden der Betonschicht mit der Holzkonstruktion zu einem Verbundtragwerk wird die Steifigkeit der Deckenkonstruktion maßgeblich erhöht. Eine auf diese Weise ertüchtigte Decke erfüllt auch bei größeren Spannweiten die geforderten Schwingungsnachweise. ■

Parameter	Formel / Abkürzung	Holz-Beton-Verbunddecke
Deckenspannweite	l	7,50 m
Deckenbreite	b	10,00 m
Ständige Einwirkung	g	3,50 kN/m ²
Veränderliche Einwirkung	q	2,00 kN/m ²
Kombinationsbeiwert	ψ_2	0,3 <i>für Wohnungsdecken</i>
quasi-ständige Einwirkungskombination	q_{perm}	$3,50 + 0,3 \cdot 2,0 = 4,10$ kN/m ²
Deckenmasse	m	410 kg/m ²
Balkenabstand	e	62,5 cm
Effektive Längsbiegesteifigkeit	$ef EI_{längs}$	179.214.247 kNcm ² /m
Querbiegesteifigkeit	EI_{quer}	7.052.083 kNcm ² /m
Durchbiegnachweis nach DIN 1052:1988 (Zeitpunkt $t=0$)	$vorh f = \frac{5 \cdot (g+p) \cdot l^4}{384 \cdot ef EI_{längs}} \leq \frac{l}{300}$	$\frac{5 \cdot 5,50 \cdot 0,625 \cdot 750^4}{384 \cdot 179.214.247 \cdot 100} = 0,79 \text{ cm} \leq \frac{l}{300} = 2,50 \text{ cm}$
Frequenzkriterium nach DIN 1052:2004	$w = \frac{5 \cdot q_{perm} \cdot l^4}{384 \cdot ef EI_{längs}} \leq 6 \text{ mm}$	$\frac{5 \cdot 4,10 \cdot 0,625 \cdot 750^4}{384 \cdot 179.214.247 \cdot 10} = 5,89 \text{ mm} \leq 6 \text{ mm}$ <i>Frequenzkriterium eingehalten!</i>
Ermittlung der Grundfrequenz	$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{ef EI_{längs}}{m}}$	$\frac{\pi}{2 \cdot 7,50^2} \cdot \sqrt{\frac{179.214.247}{410 \cdot 0,625 \cdot 10}} = 7,38 \text{ Hz}$
Ermittlung der 1. Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Quertragwirkung	$f_{1,1} = f_0 \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \frac{EI_{quer}}{ef EI_{längs}}} \geq 7,22 \text{ Hz}$	$4,58 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{7,50}{10,00}\right)^4 \cdot \frac{7.052.083}{179.214.247}} = 7,43 \text{ Hz} \geq 7,22 \text{ Hz}$ <i>Frequenzkriterium eingehalten!</i>
Resonanzuntersuchung	$a \approx \frac{560 \cdot \alpha}{m \cdot b \cdot l \cdot \xi} \leq \begin{cases} a_1 = 0,10 \frac{m}{s^2} \text{ (Wohlbefinden)} \\ a_2 = 0,40 \frac{m}{s^2} \text{ (spürbar)} \end{cases}$	$\frac{560 \cdot 0,1}{410 \cdot 7,50 \cdot 10,00 \cdot 0,02} = 0,091 \frac{m}{s^2} \left\{ \begin{array}{l} \leq a_1 \\ \leq a_2 \end{array} \right\}$ <i>Resonanzuntersuchung (Gehen, 3. Harmonische) für Wohlbefinden erfüllt!</i>
Steifigkeitskriterium unter Berücksichtigung der Quertragwirkung	$w_F = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot ef EI_{längs}} \cdot \frac{1,1}{1,4 \sqrt{\frac{EI_{quer}}{ef EI_{längs}}}} \leq 0,5 \text{ mm} - 4,0 \text{ mm}$	$w_F = \frac{1 \cdot 750^3 \cdot 10}{48 \cdot 179.214.247} \cdot \frac{1,1}{7,5 \cdot 4 \sqrt{\frac{7.052.083}{179.214.247}}} = 0,16 \text{ mm}$ <i>Steifigkeitskriterium erfüllt!</i>
Massenkriterium Schwinggeschwindigkeit infolge Einheitsimpuls $I = 1 \text{ Ns}$	$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \leq b \cdot (\xi \cdot f_{1,1} - 1)$ <i>mit $b = 50$ (leicht) ... 100 (mittel) ... 150 (streng)</i>	$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 6)}{410 \cdot 10,00 \cdot 7,50 + 200} = 0,0005 \frac{m}{s} \leq 0,0140 \frac{m}{s}$ <i>Massenkriterium für $b = 150$ erfüllt!</i>
Massenkriterium Schwinggeschwindigkeit infolge Fersenauftritt $I = 55 \text{ Ns}$	$v = \frac{0,6}{m^{0,5} \cdot EI_{längs}^{0,25} \cdot EI_{quer}^{0,25}} \leq 6 \cdot b \cdot (\xi \cdot f_{1,1} - 1)$ <i>mit $b = 50$ (leicht) ... 100 (mittel) ... 150 (streng)</i>	$v = \frac{0,6}{410^{0,5} \cdot \left(\frac{179.214.247}{10000000}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{7.052.083}{10000000}\right)^{0,25}} = 0,0157 \frac{m}{s} \leq 0,0842 \frac{m}{s}$ <i>Massenkriterium für $b = 150$ erfüllt!</i>

Tabelle 7: Zusammenstellung der Schwingungsnachweise für die Holz-Beton-Verbunddecke.

Literatur & Quellen

[1] DIN 1052:2004: „Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau“, Berlin

[2] Blaß, H.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: „Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken“, 2. Auflage inklusive Originaltext der Norm, Hrsg.: DGFH Innovations- und Service GmbH, München, März 2005

[3] Hamm, P.: „Warum Decken

zu schwingen beginnen“, bauen mit holz 3/2006, Seite 24 – 29

[4] Köhnke, E.U.: „Es sollte kein ‚swing‘ sein. Das Schwingen von Holzbalkendecken“, *die neue quadriga* 1/2005, Seite 22 – 26

[5] Kreuzinger, H.: „Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit“, In: König, Holschemacher, Dehn: „Holz-Beton-Verbund. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft“, Seite 101 – 122

[6] Kreuzinger, H.; Mohr, B.: „Gebrauchstauglichkeit von

Wohnungsdecken aus Holz“, Forschungsbericht, DGFH, 1999

[7] Mohr, B.: „Deckenschwingungen. Vorschläge zur Bewertung“, bauen mit holz 11/2001, Seite 29 – 38

[8] Ohlsson, S.: „Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit – Schwingungen“, In: ARGE Holz e.V. (Hrsg.): „Holzbauwerke, STEP 1: Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5“, Fachverlag Holz, Düsseldorf, 1995

[9] Winter, S.; Tue, N.V.; Dehn, F.; Richter, A.; Wille, K.: „Optimierte Holz-Beton-Verbund-Bau-

teile aus Hochleistungsbetonen und flächigen Holzelementen aus Massivholz oder Hochleistungs-Holzwerkstoffen“, Forschungsbericht