Beispiele Schwingungsnachweis - Anwendungen auf das Beispiel „Einfamilienhaus Jeitler“

Angaben zu den geometrischen Abmessungen sind dem Kapitel Beispiel eines zweigeschossigen Wohnbaus Abb. 5 entnommen.

DIN 1052

Zur Berechnung wurden folgende Werte verwendet:

L = 4,60 m
b = 3,50 m
$(EI)_L$ = 2,588 MNm²/m
$(EI)_Q$ = 0,421 MNm²/m
α = 1,20
f_{e1} = 8,3 Hz (aus FE - Berechnung am vorhandenen System)
$m_{quasi-ständig}$ = 274 kg/m²

Die Durchbiegung unter ständiger und quasi-ständiger Einwirkung w_{perm} beträgt bei einachsiger Betrachtung 3,7 mm. vgl. Abb. 1. Die Durchbiegung ist kleiner als 6 mm, der Schwingungsnachweis nach DIN 1052 [1] ist erbracht. Es sind keine weiteren Untersuchungen erforderlich.

Anmerkung: Die Umrechnung von der Durchbiegung auf die Eigenfrequenz nach Glg. (43) kann hier nicht angewandt werden, da kein Einfeldträger vorliegt. Die Eigenfrequenz wurde für den einachsig gespannten Dreifeldträger mithilfe eines FE-Programms berechnet, vgl. Abb. 2. Sie beträgt 9,4 Hz unter ständiger Einwirkung und 8,3 Hz unter ständiger und quasi-ständiger Einwirkung. Anregung in Resonanz ist selbst mit dem dritten harmonischen Anteil nicht mehr möglich.

Abb. 1: Durchbiegung unter ständiger und quasi-ständiger Einwirkung (274 kg/m^2)

EN 1995-1-1

Zur Berechnung wurden folgende Werte verwendet:

L = 4,60 m
b = 3,50 m
$(EI)_L$ = 2,588 MNm²/m
$(EI)_Q$ = 0,421 MNm²/m

α = 1,22 Fix Me!
f_{e1} = 9,4 Hz (aus FE - Berechnung am vorhandenen System)
$m_{ständig}$ = 214 kg/m²
ζ = 4,0% = 0,04 nach Tab. 1
b als Grenzwert: 150

Eigenfrequenz

Anmerkung: Die Umrechnung von der Durchbiegung auf die Eigenfrequenz nach Glg. (43) kann hier nicht angewandt werden, weil hier kein Einfeldträger vorliegt. Die Eigenfrequenz wurde hier für den einachsig gespannten Dreifeldträger mithilfe eines FE Programms berechnet. Die zugehörige Eigenform zeigt Abb. 2. Die Eigenfrequenz unter ständiger Einwirkung ist mit 9,4 Hz größer als 8 Hz.

Anregung in Resonanz ist hier selbst mit dem dritten harmonischen Anteil nicht mehr möglich.

Abb. 2: Eigenform, zugehörige Eigenfrequenz f_e = 9,4 Hz (Masse: 214 kg/m²)

Steifigkeit

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 1 kN an ungünstigster Stelle wurde vereinfachend für einen 1 m breiten, einachsig gespannten Plattenstreifen berechnet. Sie beträgt 0,52 mm. Nach Abb. 1.19 ist damit der strengste Wert nach EN 1995-1-1 [3] eingehalten.

Anmerkung: Für eine genauere Betrachtung kann die mitwirkende Plattenbreite b_{ef} nach Glg. (41) berechnet werden. Sie beträgt 2,65 m und ist damit kleiner als die Raumbreite von 3,50 m und gleich der Elementbreite von 2,65 m. Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 1 kN an ungünstigster Stelle ergibt sich dann zu 0,20 mm.

Geschwindigkeit/Einheitsimpuls

Die Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion wird wie folgt berechnet.

$${n_{40}} = {\left[{\left({{{\left({{{40} \over {{f_{e1}}}}} \right)}^2} - 1} \right) \cdot {{\left({{b \over L}} \right)}^4} \cdot {{{{\left({EJ} \right)}_L}} \over {{{\left({EJ} \right)}_Q}}}} \right]^{0,25}} = 2,5$$

$$v = {{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot {n_{40}})} \over {m \cdot b \cdot L + 200}} = 2,1 \cdot {10^{ - 3}}\text{ m/s} = 2,1\text{ mm/s}$$

$v \le {b^{({f_1} \cdot \zeta - 1)}} = 4,4 \cdot {10^{ - 2}}\text{ m/s} = 44\text{ mm/s}$ je Ns

Mit v = 2,1 mm/s ≤ 44 mm/s ist der Nachweis nach EN 1995-1-1 [2] eingehalten, mit v = 2,1 mm/s ≤ 1/3 · 44 = 15 mm/s auch der strengere Grenzwert nach KREUZINGER/MOHR [3].

Heeldrop

Die Geschwindigkeit nach einem Heeldrop wird nach Glg. (50) berechnet.

$v = {{0,6} \over {{{214}^{0,5}} \cdot {{2,588}^{0,25}} \cdot {{0,421}^{0,25}}}} = 40 \cdot {10^{ - 3}}\text{ m/s} = 40\text{ mm/s}$

$v = {{950 \cdot \alpha } \over {{f_e} \cdot m \cdot b \cdot L}} = {{950 \cdot 1,22} \over {9,4 \cdot 214 \cdot 3,5 \cdot 4,6}} = 37 \cdot {10^{ - 3}}\text{ m/s} = 37\text{ mm/s}$

Der Grenzwert für die Geschwindigkeit nach einem Heeldrop, der 6-fache Wert der Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion ist mit 40 mm/s ≤ 6 · 44 = 264 mm/s eingehalten.

HAMM/RICHTER (2009)

Zur Berechnung wurden folgende Werte verwendet:

L = 4,60 m
b = 3,50 m

ohne Berücksichtigung der Estrichsteifigkeit:

$(EI)_L$ =2,588 MNm²/m
$(EI)_Q$ = 0,421MNm²/m
α = 1,22 Fix Me!
f_{e1} = 9,4 Hz
$m_{ständig}$ = 214 kg/m²

mit Berücksichtigung der Estrichsteifigkeit:

$(EI)_L$ = 2,588 + 0,45 = 3,038 MNm²/m
$(EI)_Q$ = 0,421 + 0,45 = 0,871 MNm²/m
α = 1,03

Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz unter ständiger Einwirkung ist mit 9,4 Hz größer als 8,0 Hz. Nach Tab. 4 ist damit die strengste Anforderung eingehalten. Die zugehörige Eigenform zeigt Abb. 2.

Steifigkeit

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN in Feldmitte wurde am Ersatzsystem eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes L = 4,60 m berechnet.

Für den einachsig gespannten Plattenstreifen wurde die mitwirkende Plattenbreite b_{ef} nach Glg. (41) ermittelt. Sie beträgt b_{ef} = 2,65 m und ist damit kleiner als die Raumbreite von 3,50 m und gleich der Elementbreite von 2,65 m. Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN in Feldmitte des Ersatzsystems ergibt sich dann zu 0,6 mm und entspricht damit der Klasse, die mit 1,5 bis 2,5 bewertet wird, d. h. „Schwingungen werden als spürbar und nicht störend empfunden."

Wird die Steifigkeit des Estrichs bei der Durchbiegungsberechnung berücksichtigt, beträgt die mitwirkende Plattenbreite b_{ef} = 3,03 m und ist damit kleiner als die Raumbreite von 3,50 m und größer als die Elementbreite von 2,65 m. Wenn die benachbarten Elemente biegesteif miteinander verbunden sind, kann die Breite b_{ef} = 3,03 m für die Ermittlung der Durchbiegung zugrunde gelegt werden. Ist die Fugenausführung nicht biegesteif bzw. unbekannt, wird b_{ef} begrenzt auf die Elementbreite.

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN in Feldmitte des Ersatzsystems mit b_{ef} = 2,65 m ergibt sich dann zu 0,5 mm und entspricht damit der Klasse, die mit 1,0 bis 1,5 bewertet wird, d. h. „Schwingungen werden gar nicht oder nur gering empfunden, wenn man sich darauf konzentriert." Diese Einschätzung entspricht auch der subjektiven Bewertung, die während der Schwingungsmessung am Objekt vorgenommen wurde (vgl. Kapitel Konstruktive Anforderungen).

Konstruktive Anforderungen

Der Deckenaufbau mit einem schwimmenden Nassestrich auf Schüttung erfüllt die konstruktiven Empfehlungen aus Tab. 4 für die Klasse, die mit 1,0 bis 1,5 („Schwingungen werden gar nicht oder nur gering empfunden, wenn man sich darauf konzentriert") bewertet wird.

Schwingungsmessungen am Beispiel „Einfamilienhaus Jeitler"

Zusammenstellung der Messungen

Die Berechnungsergebnisse sollten mit den tatsächlichen Werten verglichen werden. Deshalb wurden in dem Einfamilienhaus Schwingungsmessungen durchgeführt. Hierzu wurde ein Erschütterungsmessgerät Typ MR2002 CE Standard-Plus der SYSCOM Instruments SA, Zürich mit einem Beschleunigungsaufnehmer Typ MS2004+ als Ein-Kanal-System verwendet. In Tab. 1 sind die durchgeführten Messungen zusammengestellt. Die Mess- und Anregungspunkte können Abb. 3 entnommen werden.

Tab. 1: Zusammenstellung der Messung, Anregungen und Eigenfrequenzen

Messung	Messpunkt	Anregungsart	Anregungspunkt	gemessene Eigenfrequenz [Hz]	gerundete Werte [Hz]

Messung	Messpunkt	Anregungsart	Anregungspunkt	gemessene Eigenfrequenz [Hz]	gerundete Werte [Hz]
2	1	Heeldrop	1	17,1	17
3	1	Gehen	1	17,2	17
4	2	Heeldrop	2	21,1 / 25,4	21 / 25
5	2	Gehen	2	21,9 / 26,3	22 / 26
6	3	Heeldrop	3	16,0	16
7	3	Gehen	3	15,7	16
8	3	Heeldrop	4	15,9	16
9	3	Heeldrop	1	16,2 / 17,6	16 / 18
10	4	Heeldrop	4	18,1 / 23,5	18 / 24
11	5	Heeldrop	5	17,3 / 23,6	17 / 24
12	5	Gehen	5	18,4 / 23,8	18 / 24

Abb. 3: Skizze des Gebäudes mit Mess- und Anregungspunkten sowie der jeweils vorherrschenden Eigenfrequenz

Eigenfrequenz

Der Vergleich Messung – Berechnung zeigt zunächst, dass die einachsig gerechnete Eigenfrequenz (9,4 Hz) deutlich kleiner ist als die kleinste gemessene Eigenfrequenz (16 Hz bei Punkt 3).

Wird die Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der (zweiachsigen) Plattentragwirkung (Glg. (37)) berechnet, erhöht sich die Frequenz auf 11,4 Hz.

${f_{Platte}} = {f_{Balken}} \cdot \sqrt {1 + {1 \over {{\alpha ^4}}}} = 9,4 \cdot \sqrt {1 + {1 \over {{{1,20}^4}}}} = 9,4 \cdot 1,217 = 11,4\text{ Hz}$

$\alpha = {b \over L} \cdot \root 4 \of {{{{{(EJ)}_L}} \over {{{(EJ)}_Q}}}} = {{3,5} \over {4,6}} \cdot \root 4 \of {{{2,588} \over {0,421}}} = 1,20$

Wird die Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Estrichsteifigkeit und der (zweiachsigen) Plattentragwirkung (Glg. (37)) berechnet, erhöht sich die Frequenz auf 14,0 Hz und stimmt nun wesentlich besser mit der gemessenen Eigenfrequenz überein.

${f_{Balken}} = 9,4 \cdot \sqrt {{{3,038} \over {2,588}}} = 10,2\text{ Hz}$

${f_{Platte}} = {f_{Balken}} \cdot \sqrt {1 + {1 \over {{\alpha ^4}}}} = 10,2 \cdot \sqrt {1 + {1 \over {{{1,03}^4}}}} = 10,2 \cdot 1,37 = 14,0\text{ Hz}$

$\alpha = {b \over L} \cdot \root 4 \of {{{{{(EJ)}_L}} \over {{{(EJ)}_Q}}}} = {{3,5} \over {4,6}} \cdot \root 4 \of {{{(2,588 + 0,45)} \over {(0,421 + 0,45)}}} = 1,03$

Obwohl es sich bei dem System um einen Durchlaufträger handelt und beide betrachteten Deckenelemente jeweils gleiche Spannweiten haben, sind die gemessenen Eigenfrequenzen an den unterschiedlichen Messpunkten unterschiedlich, vgl. Tab. 4. Im Folgenden werden die Gründe für die unterschiedlichen Frequenzen erklärt:

- Die Wandscheibe bei Punkt 1 dient der Decke über EG als Überzug. Vermutlich ist durch die Hochhängung ein Einspanneffekt vorhanden, der die tatsächliche Eigenfrequenz nach oben

abweichen lässt.
- Bei Punkt 2 ist der Einfluss der nicht tragenden Wand parallel zur Spannrichtung deutlich. Sie erhöht die Steifigkeit der Decke örtlich und führt dadurch – bei sonst gleichen Bedingungen – zu einer höheren Eigenfrequenz.
- Bei Punkt 3 findet man die Bedingungen mit den wenigsten Störungen (keine Trennwände, geringste Einspanneffekte). Das Frequenzspektrum zur Messung 6 zeigt die klarsten Messschriebe (siehe Abb. 4).
- Bei den Punkten 4 und 5 sind Einflüsse aus der zurückgesetzten Außenwand im EG und der nicht tragenden, aber steifigkeitserhöhenden Trennwand im DG sichtbar.

Abb. 4: Amplitudenspektrum der Messung in Punkt 3 bei Anregung durch Heeldrop im Punkt 3

Amplituden – Geschwindigkeit nach Heeldrop

Aus der Anregung nach einem Heeldrop werden mehrere Größen abgeleitet:

Die Eigenfrequenz und die Dämpfung beim Ausschwingen nach dem Heeldrop sowie die maximale Geschwindigkeit beim Heeldrop. Für die Geschwindigkeit lässt sich kein fester Wert angeben, sondern ein Bereich, innerhalb dessen sich die Geschwindigkeit bewegt, vgl. Tab. 2.

Tab. 2: Gemessene Geschwindigkeiten nach Heeldrop

Messung	Messpunkt	Anregungsart	Anregungspunkt	gemessene Geschwindigkeit [mm/s]
2	1	Heeldrop	1	12 - 18
4	2	Heeldrop	2	10 - 18
6	3	Heeldrop	3	8 - 16
8	3	Heeldrop	4	2 - 3
9	3	Heeldrop	1	0,5 - 0,7
10	4	Heeldrop	4	8 - 20
11	5	Heeldrop	5	10 -14

Abb. 4 zeigt einen Zeitschrieb der Beschleunigung nach einem Heeldrop. Die Anfangsgeschwindigkeit kann aus dem max. Beschleunigungswert (ca. 1300 mm/s²) und der Frequenz (16 Hz) integriert werden:

$v = {a \over {2 \cdot \pi \cdot {f_e}}} = {{1300} \over {2 \cdot \pi \cdot 16}} = 13\text{ mm/s}$

Die gemessenen Geschwindigkeiten sind um den Faktor 3 kleiner als die berechneten (37-40 mm/s). Das liegt an der Summe mehrerer Faktoren wie z. B. geringe Masse und Größe (Fallhöhe) der Versuchsperson, Schuhwerk und – ganz wesentlich – Dämpfung durch die Dämmung im Fußbodenaufbau etc.

Amplituden – Beschleunigung infolge Gehen

Die Schwingbeschleunigungen konnten nur infolge regellosen Gehens gemessen werden, weil die Eigenfrequenzen für eine Resonanzanregung (auch mit der dritten Harmonischen) zu groß sind.

Exemplarisch wird die Berechnung der Beschleunigung in Resonanz nach Glg. (53) dennoch gezeigt. Erwartungsgemäß liegen die gemessenen Beschleunigungen (weil ohne Resonanz) deutlich darunter, vgl. Tab. 3.

$a = {{56} \over {m \cdot b \cdot L \cdot \zeta }} = {{56} \over {214 \cdot 3,5 \cdot 4,5 \cdot 0,04}} = 0,42\text{ m/s}^2 = 420\text{ mm/s}^2$

Tab. 3: Gemessene Beschleunigungen infolge regellosen Gehens

Messung	Messpunkt	Anregungsart	Anregungspunkt	gemessene Beschleunigung [mm/s²]
3	1	Gehen	1	100 - 200
5	2	Gehen	2	100 - 300
7	3	Gehen	3	100 - 200
12	5	Gehen	5	100 - 200

Abb. 5 zeigt einen Zeitschrieb der Beschleunigung beim regellosen Gehen mit 3 einzelnen Schritten, die wie Impulse auf die Decke wirken und wieder abklingen.

Anmerkung: 3 Schritte pro (21,4-19,6 =) 1,8 Sekunden entsprechen 1,7 Hz.

Abb. 5: Zeitschrieb der Beschleunigung infolge regellosen Gehens

Dämpfung

Für die Dämpfung wurde in Tab. 1 für auf Holzwänden gelagerte BSP-Decken mit schwimmendem Estrich ein Mittelwert von 4 % angegeben. Bei der hier untersuchten Decke wurden teilweise etwas höhere Werte gemessen, die wahrscheinlich aus dem Dissipationspotenzial der Trennwände sowie der Randeinspannung resultieren. Einen typischen Zeitschrieb für eine Ausschwingkurve nach einem Heeldrop mit einem Dämpfungswert von 6,1 % bei einer Eigenfrequenz von 16 Hz zeigt Abb. 6.

Abb. 6: Ausschwingkurve nach Anregung durch Heeldrop in Punkt 3

Einschätzung

Die Autoren/innen haben im Rahmen des Forschungsvorhabens zum Thema „Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken“ vgl. HAMM/RICHTER [4] und WINTER/HAMM/RICHTER [5] bereits ca. 130 Decken gemessen und für die Einstufung des Schwingungsverhaltens das Beurteilungsschema nach KREUZINGER/MOHR [3] übernommen. Demnach wird die vorliegende Decke wie folgt beurteilt: „Schwingungen kaum spürbar oder nur, wenn man sich darauf konzentriert, nicht störend“.

Parameter, die zu dieser sehr guten Bewertung geführt haben, sind u. a.:

- die planmäßig hohen Steifigkeiten, die sich durch das Steifigkeitskriterium und die Eigenfrequenz ausdrücken lassen,

- die unplanmäßigen Einflüsse durch nicht tragende Trennwände,
- die Einspannung in die als Überzug tragende Wandscheibe,
- die hohe Masse und Steifigkeit des Fußbodenaufbaus durch den Estrich und dessen Lagerung auf der Trittschallmatte sowie
- die hohe Dämpfung der gesamten Decke (Rohkonstruktion, Aufbau und Trennwände).

Referenzen

From:
https://wiki.ihbv.at/ - **IHBV Wiki**

Permanent link:
https://wiki.ihbv.at/doku.php?id=bsphandbuch:design:vibration:efh_jeitler&rev=1424683706

Last update: **2019/02/21 10:22**
Printed on 2026/11/09 21:36