



1991-1996
Studium Bauingenieurwesen, TU München

1996-1998
Tragwerksplanerin,
Häußler-Planung GmbH,
Kempten

1998-2005
Wissenschaftlich Assistentin TU München,
Fachgebiet Holzbau

2003
Promotion

seit 2005
Beratende Ingenieurin im Ing.-Büro, Marktoberdorf

2007-2009
Wissenschaftliche Angestellte, TU München,
Holzbau und Baukonstruktion

Seit 2009
Professorin, Hochschule Biberach

Patricia Hamm
Prof. Dr.-Ing.
Bauingenieurin

1989-1994
Studium Bauingenieurwesen, TH Leipzig

1994-1996
Tragwerksplanerin,
CDC, Chemnitz

1997-2000
Projektingenieurin, RWI,
Leipzig

200-2006
Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Uni Leipzig

2007-2008
Geschäftsbereichsleiterin
MFPA Leipzig

seit 2007
Wissenschaftliche Angestellte, TU München,
Holzbau und Baukonstruktion

seit 2009
Projektleiterin, bse engineering Leipzig GmbH

Antje Richter
Dipl.-Ing.
Bauingenieurin

2_Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken

1 Notwendigkeit von Schwingungsnachweisen

1.1 Theoretische Grundlagen und Historische Entwicklung

In der amerikanischen Literatur werden die personen-induzierten Schwingungen von Decken bereits 1828 erwähnt, vgl. [Tredgold, 1828]. Sinngemäß übersetzt heißt es: „Träger mit großen Spannweiten sollten hoch (Querschnittshöhe) ausgeführt werden, um die Unannehmlichkeit zu vermeiden, dass man nicht umhergehen kann, ohne alles im Raum zu erschüttern.“ Diese Forderung mündete in einer Durchbiegungsbegrenzung für Stahlträger unter Verkehrslast.

Trotz dieser Regelung wurden vor ca. 30 Jahren Probleme und Beschwerden durch personen-induzierte Schwingungen bei Decken auf Stahl-Fachwerkträgern bekannt. Seit ungefähr dieser Zeit wird an dem Phänomen der personen-induzierten Schwingungen an Decken und Brücken geforscht, vgl. [Murray, 2003].

1.2 Empfindlichkeit des Menschen gegenüber Schwingungen

Wesentliche Einflussfaktoren auf das menschliche Empfinden sind:

- die Amplitude einer Schwingung,
- die Frequenz sowie
- die Dauer der Schwingung (Anzahl der Auf- und Abbewegungen), die durch die Dämpfung beeinflusst wird.

In Abhängigkeit von der Eigenfrequenz der Decke wird deren Schwingungsverhalten unterschiedlich wahrgenommen. Bei kleineren Frequenzen (bis ca. 8 Hz) ist das (Un-) Wohl-Empfinden von der Beschleunigung, bei größeren Frequenzen (ab ca. 8 Hz) von der Geschwindigkeit abhängig [Ohlsson, 1982] und [Hu et al, 2001]. Abb. 1, die sog. „Basiskurve“ aus [ISO 2631-2] verdeutlicht den

Zusammenhang. Die eingezeichnete Linie (Abb1) gilt als die Wahrnehmbarkeitsgrenze.

Die Wahrnehmung und das menschliche Empfinden von Schwingungen nehmen mit:

- zunehmender Schwingdauer zu,
- der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingursache ab,
- zunehmender Körpertätigkeit ab,
- zunehmender Gewöhnung ab.

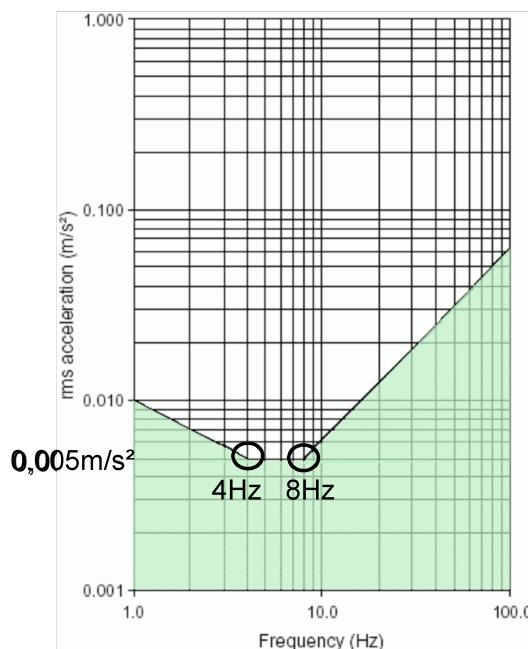


Abbildung 1
„Basiskurve“ aus [ISO 2631-2]

Dementsprechend werden die personen-induzierten Anregungen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens in drei Kategorien unterteilt, vgl. Tab 1 und [Kreuzinger / Mohr, 1999]:

Tabelle 1

Unterteilung personeninduzierter Anregungen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens in drei Kategorien, vgl. [Kreuzinger / Mohr, 1999]

1) Einmalige Auslenkung durch Fußauftritt → Steifigkeitskriterium (Durchbiegung unter einer Einzellast in Feldmitte)	Damit ist eine einmalige Anregung durch einen länger andauernden Impuls mit anschließendem Abklingen der Schwingung gemeint, hervorgerufen durch z. B. einen einmaligen Fußauftritt.
2) Oft wiederholte Anregung durch Schritte → Schwingbeschleunigung	Personen geben beim Gehen, Laufen, Hüpfen, Tanzen etc. periodische Kräfte auf den Untergrund ab. Bei oft wiederholten Anregungen mit einer Anregungsfrequenz (= Schrittfrequenz) gleich der Hälfte oder einem Drittel der Eigenfrequenz, kann Resonanz entstehen. Die Decke kann sich aufschaukeln, da die Schwingungsamplitude durch Resonanz stark erhöht wird. Einflussfaktoren für die Erhöhung sind die Masse und die Dämpfung der Decke.
3) Kurzer Impuls durch Heeldrop → Schwinggeschwindigkeit	Gemeint ist eine einmalige Anregung durch einen Impuls mit kurzer Einwirkungsdauer, wie z. B. beim Heeldrop (= Fersenauftritt). Beim Fersenauftritt, in der Literatur und im Folgenden mit Heeldrop bezeichnet, stellt sich die Versuchsperson auf die Zehenspitzen und lässt sich auf die Fersen fallen. Vorteil des Heeldrops ist, dass er innerhalb einer Messreihe relativ gut reproduzierbar ist. Allerdings kann die Größe des erzeugten Impulses schwanken je nach Untergrund, Schuhwerk, Masse der Versuchsperson etc.

1.3 Einfluss der Entwicklung der Spannweiten auf das Schwingungsverhalten

Bis zur [DIN 1052] in der Fassung von 1988 wurde die Gebrauchstauglichkeit durch eine Durchbiegungsbegrenzung nachgewiesen. Bei Holzdecken sind das die bekannten $\ell/300$ unter Volllast. Bei den früher üblichen Spannweiten von ca. 4 m war damit eine Durchbiegung unter Volllast von max. 13 mm erlaubt.

Die modernen Bauherren wünschen sich immer größere, stützenfreie Räume. Mit den neu entwickelten Holzwerkstoffen, wie z.B. Brettsperrholz, Brettschichtholz, Brettstapel und Rippenträgern sind fast beliebige Querschnittsabmessungen möglich und große Spannweiten können realisiert werden. Die „absolute“ Durchbiegung unter Volllast bei Einhaltung von $\ell/300$ wird dadurch

aber immer größer. Bei einer Spannweite von 6,5 m wären schon 22 mm zugelassen.

Mit einer Zunahme der „absoluten“ Durchbiegung nimmt die Eigenfrequenz der Decke ab. Einen direkten Zusammenhang zwischen der Durchbiegung unter Eigenlast $w(G_k)$ und der Eigenfrequenz f_e beim Einfeldträger zeigt Gl. 1, die man durch Einsetzen in die Frequenzgleichung Gl. 2 erhält. Abb. 2 zeigt die Systemgrößen am Beispiel eines gedämpften Einmassenschwingers. Als Durchbiegung unter der statischen Einwirkung w_{stat} wird die Durchbiegung unter ständiger Last (Eigenlast G_k) $w(G_k)$ eingesetzt. f_e ist die zugehörige erste Eigenfrequenz unter Berücksichtigung genau dieser Einwirkung.

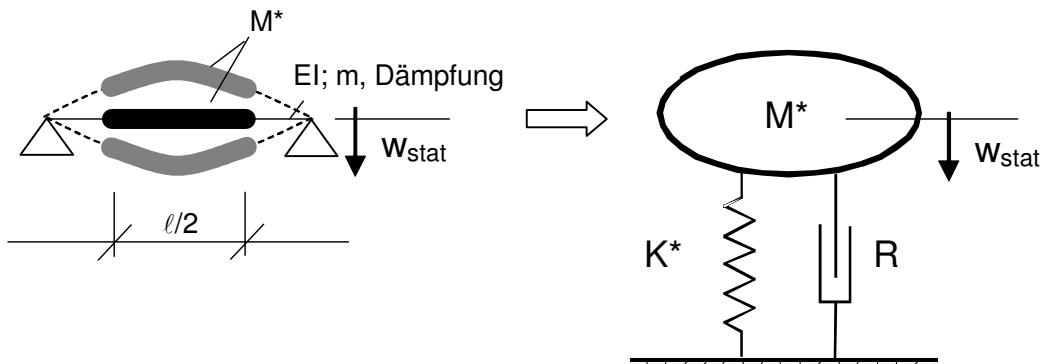


Abbildung 2
Einfeldträger und Einmassenschwinger

$$f_e = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K^*}{M^*}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K^* \cdot G}{w_{stat} \cdot K^*}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{G}{w_{stat}}} \cong \frac{5}{\sqrt{w_{stat} [cm]}} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f_e = \sqrt{\frac{K^*}{M^*}} \quad [1/s] \quad (2)$$

Ersatz- Federsteifigkeit

K^* [N/m]

generalisierte (mitschwing.) Masse

M^* [kg]

Die charakteristische Verkehrslast für Holzdecken unter Wohnräumen nach [DIN 1055-100] beträgt 2,0 kN/m². Unterstellt man, dass die Eigenlast bei Holzdecken in Wohnungen etwa gleich groß ist wie die Verkehrslast (Gl.3), ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Durchbiegung unter Eigenlast und der Eigenfrequenz beim gelenkig gelagerten Einfeldträger nach Gl. 4.

Volllast: $E_k = G_k + Q_k$

unter Annahme: Verhältnis $G_k : Q_k \approx 1:1$

$$w(G_k) \approx w(Q_k) \approx 0,5 \cdot w(E_k) \quad (3)$$

(ohne Kriechanteil)

$$f_e = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot 0,5 \cdot w(E_k) [cm]}} \quad (4)$$

Näherungsweise gilt also für den 4,00 m langen Einfeldträger:

$$\ell/300 = w(E_k) = 13 \text{ mm}$$

$$w(G_k) \approx 0,5 \cdot 13 = 6,5 \text{ mm} \text{ und damit}$$

$$f_e = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot 0,65 [cm]}} = 6,9 \text{ Hz}$$

Der 6,50 m lange Einfeldträger mit $\ell/300 = w(E_k) = 22 \text{ mm}$ und $w(G_k) \approx 11 \text{ mm}$ hat eine Eigenfrequenz von

$$f_e = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot 1,1 [cm]}} = 5,4 \text{ Hz}$$

Trotz Einhaltung des gewohnten Gebrauchstauglichkeitskriteriums von $\ell/300$ verschlechtert sich die dynamische Eigenschaft der Decke bei Erhöhung der Spannweite, da die Eigenfrequenz der Decke abnimmt, vgl. Tabelle 2. Daraus folgt, dass in der Praxis der Schwingungsnachweis für Decken bemessungsrelevant wird, zumal nach [DIN 1052] der Nachweis noch strenger zu sehen ist, weil hiernach eine Durchbiegung von 6 mm unter ständigem Lastanteil und quasi-ständigem Verkehrslastanteil eingehalten werden soll.

Tabelle 2

Zusammenhang zwischen Durchbiegung unter Eigenlast und der zugehörigen Eigenfrequenz beim gelenkig gelagerten Einfeldträger

$w(G_k)$ [mm]	f_e [Hz]	Zugehörige Spannweite ℓ [m] für $w(E_k) = \ell/300$ unter der Annahme, dass $g:p \approx 1:1$ und $w(G_k) \approx w(O_k) \approx 0,5 \cdot w(E_k)$
5 mm	8,0 Hz	3,0 m
6 mm	7,2 Hz	3,6 m
9 mm	6,0 Hz	5,4 m

2 Vorschlag von Bemessungsregeln für den Schwingungsnachweis

2.1 Ausgangslage

Dem modernen Holzbau stehen Holzwerkstoffe und Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen zur Verfügung, mit denen fast beliebige Grundrisse im Büro-, Verwaltungs-, Bildungs- und Wohnungsbau wirtschaftlich realisiert werden können. Die in diesen Bereichen erforderlichen großen Spannweiten beeinflussen jedoch meist negativ das Schwingungsverhalten der Decken. Gleichzeitig sind die Komfortansprüche der Nutzer und damit die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit gestiegen – schon ein leichtes Schwingen der Decke wird als Mangel empfunden.

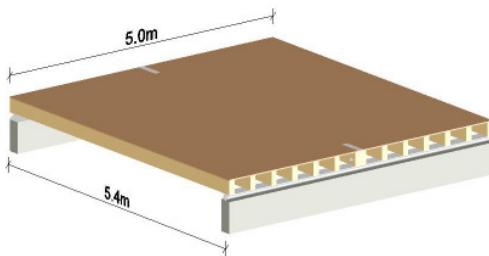
Damit rückt das Vermeiden unangenehmer Schwingungen, ausgelöst z.B. durch das Begehen oder das Herumtoben von Kindern, bei der Bemessung im Neubau wie auch bei der Sanierung von Altbauten in den Vordergrund. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in der aktuellen Normung wider: In [DIN 1052] in der Fassung von Dezember 2008 wird ein Schwingungsnachweis empfohlen, „um Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden“. Die zugehörigen [Erläuterungen] enthalten zwar ein umfangreiches Kapitel zu diesem Thema. Die in der Praxis vorkommenden Systeme und Aufbauten sind jedoch so vielfältig, dass die für Planer benötigten

Konstruktions- und Bemessungsregeln nicht vollständig enthalten sind. Obwohl der Schwingungsnachweis oft bemessungsrelevant ist, gibt es dennoch immer wieder Klagen seitens der Bauherren bzw. der Nutzer über unangenehm empfundene, die Gebrauchstauglichkeit einschränkende Schwingungen der Decken. Bei eigenen Vergleichsmessungen an ausgeführten Decken wurde festgestellt, dass die tatsächlichen dynamischen Eigenschaften oft deutlich von den vereinfachten rechnerischen Annahmen abweichen. Dabei wurden Abweichungen in beide Richtungen vorgefunden. Deren Ursachen wurden im Rahmen des durch die TU München durchgeföhrten AiF-Forschungsvorhabens „Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbund-Decken“ nachgegangen [Winter / Hamm / Richter, 2008].

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Verifizierung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln zur Erfassung personen-induzierter Schwingungen in Abhängigkeit von Nutzungsanforderungen, die die Gebrauchstauglichkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gewährleisten.

Untersucht wurden z.B. Decken mit Wohn- und Büronutzung sowie Decken in Schulen und Kindergärten. Decken unter Räumen, die für rhythmische Bewegungen genutzt werden, wie z. B. Tanz- oder Gymnastikräume oder Turnhallen waren nicht Gegenstand der Untersuchungen, hier sollten genauere Untersuchungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse konnten auf der Grundlage von Literaturrecherchen, Finite-Element-Berechnungen, in situ Messergebnissen mit Nutzerbefragungen und Labormessungen mit Bewertung des Schwingungsverhaltens gewonnen werden. Zusätzlich wurde die Dämpfung unterschiedlicher Deckenaufbauten gemessen, um das vorhandene Dissipations-Potential bereits in der Planungsphase der Decke berücksichtigen zu können. Zur Verifizierung der Ergebnisse der Fini-

te-Elemente-Methode dienten Schwingungsmessungen im Labor der MFPA Leipzig GmbH unter definierten Randbedingungen. Mit den im Labor bestimmten Materialeigenschaften als Eingangsgrößen konnten die Messergebnisse mit den Berechnungswerten verglichen werden.



Messungen in situ waren erforderlich, um die Ergebnisse aus Labormessungen auf reale Bauwerke übertragen zu können. Durchgeführt wurden bisher ca. 130 in-situ-Messungen in geeigneten Objekten. Eine Übersicht über die gemessenen Deckentypen gibt Abb. 4. Im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Graz [Fitz, 2008] wurde das Schwingungsverhalten von Brettsperrholz (BSP)-Decken ebenfalls experimentell, numerisch und theoretisch untersucht. Die Anregung der Decken erfolgte durch regelloses Gehen, wenn möglich Gehen oder Laufen in Resonanz mit der zweiten

oder dritten Harmonischen, Heeldrop und im Labor auch von unten durch Klopfen und Auslenkung in Feldmitte. Zur Messung der Schwingungsantworten dienten zwei unterschiedliche Erschütterungs-Messsysteme, welche die Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit aufzeichnen.

Zur Systemkontrolle des FEM-Modells wurden die Messergebnisse aus den Labormessungen eingearbeitet. Die FEM-Analysen ermöglichen eine ausführlichere Parameterstudie mit unterschiedlichen Verhältnissen von Längs- und Querbiegesteifigkeit sowie Länge und Breite des Deckenfeldes. Die Berechnungsergebnisse wurden wiederum mit den Messergebnissen aus der Labormessung und teilweise mit den Messergebnissen aus den in-situ-Messungen verglichen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens, die Bemessungs- und Konstruktionsregeln wurden erstmals im Oktober 2009 in [Hamm / Richter, 2009] vorgestellt.

Abbildung 3

Messtechnische Untersuchungen im Versuchsstand der MFPA Leipzig

2.2 Bemessungsregeln

Deckenschwingungen werden vom Nutzer auch aufgrund seines persönlichen Verhältnisses zum Bauwerk und zur Aktivität unterschiedlich bewer-

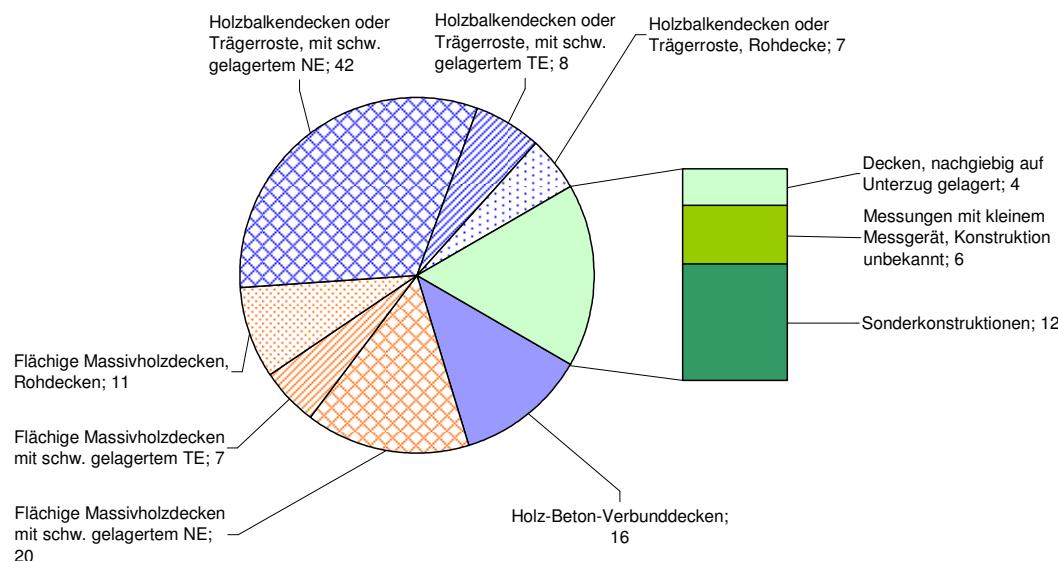


Abbildung 4

Übersicht über die Messobjekte aus dem Forschungsvorhaben

tet. Der Unterschied hängt davon ab, ob sich der Empfänger in einem engen Bezug zum Anreger (z.B. Zuschauer oder Aktiver mit sportlicher Betätigung) befindet oder sich durch den Anreger eher gestört fühlt (z.B. Nachbars Kinder) [Kreuzinger/Mohr, 1999].

Aus diesem Grund werden die Anforderungen an die dynamischen Eigenschaften einer Decke in Abhängigkeit von ihrer Nutzung festgelegt. In Tabelle 3 werden drei Kategorien vorgeschlagen und mit Kriterien aufgeführt. Die Nutzung und die Anforderungen an das Schwingungsverhalten sollten auf dieser Basis verbindlich vom Planer mit dem Bauherren vereinbart werden.

Aktuell findet auf Grund der Forschungsergebnisse in der Fachwelt eine Meinungsbildung über die Definition von Decken-Schwingverhaltensklassen statt, die klare, einfache Bauvertragsregelungen ermöglichen wollen bzw. sollen.

2.2.1 Vorschläge von Bemessungs- und Konstruktionsregeln mit Anwendungsgrenzen für Wohnungs- und Bürodecken

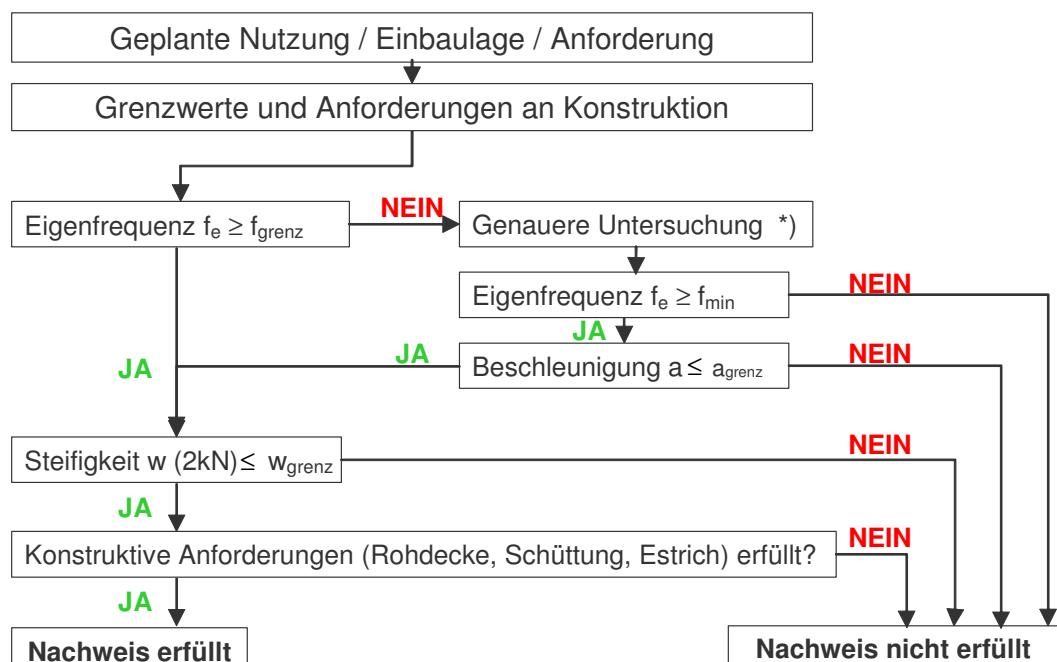
Abb. 5 und Tabelle 3 zeigen eine Zusammenfassung der vorgeschlagenen Bemessungs- und Konstruktionsregeln, die im Rahmen des Forschungsvorhabens [Winter / Hamm / Richter, 2008] erarbeitet wurden.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der Einzellast die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten. Ein ausführlicher Beitrag zur Berücksichtigung der Lagerung auf Unterzügen findet sich in [Hamm, 2008].

Abbildung 5

Übersicht über den Schwingungsnachweis von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken

*) Die genauere Untersuchung ist i. A. nur bei schweren Decken, z. B. Holz-Beton-Verbunddecken Erfolg versprechend



Einbaulage	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit	Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten
Bewertung	(Bewertung 1,0 bis 1,5)	(Bewertung 1,5 bis 2,5)	(Bewertung 2,5 bis 4,0)
Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Raumnutzung	z.B. Flure mit kurzen Spannweiten z.B. für Nutzungen als Wohnungstrenndecken in Mehrfamilienhäusern, Decken in Büros mit PC-Nutzung oder Besprechungsräumen	z.B. Decken in üblichen Einfamilienhäusern, Decken im Bestand, oder mit Zustimmung des Bauherren	z.B. Decken unter nicht genutzten Räumen oder nicht ausgebauten Dachräumen
Beschreibung der des Empfindungen 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 spürbar bis deutlich spürbar, unangenehm und auch teilweise störend empfunden.
Frequenzkriterium $f_e \geq f_{grenz}$	$f_{grenz} = 8 \text{ Hz}$	$f_{grenz} = 6 \text{ Hz}$	-
Steifigkeitskriterium $w(2kN) \leq w_{grenz}$	$w_{grenz} = 0,5 \text{ mm}$	$w_{grenz} = 1,0 \text{ mm}$	-
Genauere Untersuchung nur, wenn $f_e < f_{grenz}$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,10 \text{ m/s}^2$	-
Konstruktive Anforderungen	Anordnung von schwimmendem Nass- oder Trockenestrich auf Schüttung nach Tabelle 4 und Abschnitt 2.2.2		-

2.2.2 Konstruktive Anforderungen und Ermittlung der Querbiegsteifigkeit

Prinzipiell sind schwimmende Nassestriche aufgrund ihrer höheren Masse und Steifigkeit besser geeignet als Trockenestrache.

Eine (möglichst schwere) Schüttung verbessert das Schwingungsverhalten ebenfalls. Gleichzeitig bietet sie die Möglichkeit der Installationsführung. Je schwerer die Schüttung, desto größer die Verbesserung der subjektiven Bewertung. In Tabelle 4 sind die Mindestanforderungen an den Deckenaufbau in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten zusammengestellt. Die rechnerischen Anforderungen aus Tabelle 3 sind selbstverständlich zusätzlich einzuhalten.

Als „schwere“ Schüttung werden Schüttungen mit einem Flächengewicht von mindestens 60 kg/m^2 bezeichnet. Dies entspricht z.B. einer 4 cm dicken Kalksplittschicht.

Querbiegsteifigkeit von Brettstapeldecken:

Das Tragverhalten der Decke in Querrichtung resultiert bei den flächigen Holzplatten aus den Steifigkeitseigenschaften der Verbindung zwischen den Lamellen. [Kreuzinger / Mestek, 2008] geben die folgenden Beziehungen zwischen den Biegesteifigkeiten in Querrichtung und Längsrichtung an:

Brettstapel, genagelt oder gedübelt:

$$\text{Näherungsweise } EI_{quer} = 0,0005 EI_{längs} \quad (5)$$

$$\text{Brettstapel geklebt } EI_{quer} = 0,03 EI_{längs} \quad (6)$$

Tabelle 3

Zusammenhang zwischen subjektiven Bewertungen und Nutzung bzw. Einbaulage

Tabelle 4

Konstruktive Maßnahmen in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten

*) Als Beispiel für Trockenestrichaufbau, der die Bewertung 1,5 erfüllt, wurde nur eine BSP- Decke im Labor gemessen. Die Übertragbarkeit auf in situ- Decken ist noch nicht geklärt.

	Art des Estrichs	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten (Bewertung 1,0 bis 1,5)	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit (Bewertung 1,5 bis 2,5)
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 mind. 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. Brettspernholz- und Brettschichndecken)	schwimmender Nassetrich	schwimmend auf schwerer oder leichter Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung *)	schwimmend auf schwerer Schüttung *)
Holzbalkendecken oder Trägerroste	schwimmender Nassetrich	schwimmend auf schwerer Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	Alle untersuchten Ausführungsbeispiele wurden mit 2,0 und schlechter bewertet.	schwimmend auf schwerer Schüttung

2.2.3 Frequenzkriterium

Die Eigenfrequenz der Decke unter ständigen Einwirkungen soll so hoch gewählt werden, dass Resonanz aus Gehen vermieden wird, Gl. 7. Die Grenzwerte sind abhängig von der Einbaulage bzw. den Anforderungen an die Decke, vgl. Gl. 8 und Gl. 9.

$$f_e \geq f_{grenz} \quad (7)$$

$$f_{grenz} = 8 \text{ Hz} \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad (8)$$

$$f_{grenz} = 6 \text{ Hz} \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad (9)$$

Die Eigenfrequenz kann durch Messung oder Berechnung ermittelt werden. Dabei darf berücksichtigt werden:

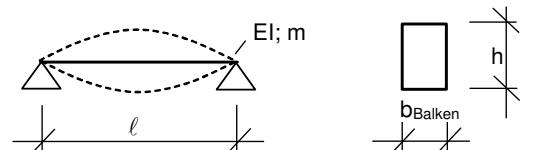
- die Biegesteifigkeit des Estrichs (Achtung bei Installationsführungen oder Fertigteilen oder Fugen im Estrich sind Reduzierungen der Estrich-Biegesteifigkeit zu berücksichtigen),
- Vierseitige Lagerung und ggf. die Drillsteifigkeit EI_D sowie die
- Durchlaufwirkung.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist dies bei der Berechnung der Eigenfrequenz zu berücksichtigen, indem der Nachweis für das gesamte Deckensystem einschließlich Unterzügen geführt wird [Hamm, 2008]. Die Durchlaufwir-

kung darf berücksichtigt werden (z.B. mit Hilfe von Tabelle 9/3 aus den [Erläuterungen] oder mit geeigneter Software). Eine Berechnung am Ersatzsystem eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite gleich der größten Feldlänge (unter Vernachlässigung der Durchlaufwirkung) liegt auf der sicheren Seite.

Für die Masse m wird nur vom Eigengewicht der Decke und anderen ständigen Einwirkungen ausgegangen. Der Trennwandzuschlag und die Verkehrslast werden nicht mit angesetzt.

Für Einfeldträger, z.B. für eine Holzbalkendecke, kann die Ermittlung der Eigenfrequenz nach Gl 10 und Abb. 6 erfolgen.



$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = f_{Balken} \quad (10)$$

$$\text{mit } I = \frac{b_{Balken} \cdot h^3}{12} \quad (11)$$

Für die drillweiche orthotrope Platte mit gelenkiger vierseitiger Lagerung, z.B. BSP-Platten oder Brettstapel mit zweiachsiger Spannrichtung gilt folgende Gleichung für die Eigenfrequenz. Dabei wird eine ausreichende Verbindung der einzelnen Plattenelemente vorausgesetzt.

$$f_{\text{Platte}} = f_{\text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} \quad (12)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{b}{\ell} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_\ell}{EI_b}} \quad (13)$$

b ist die Spannweite in Querrichtung oder Deckenbreite

EI_ℓ ist die effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung je Meter Breite

EI_b ist die effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung je Meter mit $(EI)_\ell > (EI)_b$

2.2.4 Genauere Untersuchung

Vor allem bei Decken mit großen Spannweiten wird die Forderung nach einer Grenzfrequenz bemessungsrelevant. Es können auch Decken mit Eigenfrequenzen kleiner als die Grenzfrequenz ausgeführt werden, wenn die Schwingbeschleunigung nach Gl. 16 begrenzt wird und eine Mindestfrequenz nach Gl. 15 eingehalten wird.

Der Nachweis der Schwingbeschleunigung führt in der Regel nur bei ausreichend schweren Decken (hauptsächlich großflächigen Holz-Beton-Verbunddecken) zum Erfolg.

$$f_{\min} \leq f_e < f_{\text{grenz}} \quad (14)$$

$$f_{\min} = 4,5 \text{ Hz} \quad (15)$$

$$a \leq a_{\text{grenz}} \quad (16)$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad (17)$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad (18)$$

Die Messwerte der Beschleunigung streuen stark und sollten dem Nachweis nicht zugrunde gelegt werden, da noch keine definierte Einwirkung gefunden wurde, die für alle Deckentypen zu reproduzierbaren Messergebnissen führt. Die Beschleunigung infolge einer gehenden Person kann nach Gl. 19 berechnet werden. Die anzusetzende dynamische Kraft ist abhängig von der Eigenfrequenz der Decke (vgl. Abb. 6). Die Kräfte der harmonischen Anteile in Abb. 6 sind vereinfachend für eine Schritt Frequenz von $2\text{Hz}\pm0,5\text{Hz}$ aufgetragen. Falls die Eigenfrequenz im Bereich der Streuung der zweiten oder dritten Harmonischen liegt, kann die Beschleunigung für ein einachsig oder zweiachsig gespanntes Deckenfeld als Einfeldträger mit der (Raum-) Breite infolge einer gehenden Person wie folgt berechnet werden:

$$a \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{F_{\text{dyn}}}{M \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t)[\text{N}]}{m[\text{kg/m}^2] \cdot 0,5 \ell [\text{m}] \cdot 0,5b[\text{m}] \cdot 2D} \quad (19)$$

Die Dämpfung, auch bezeichnet als Lehr'sches Dämpfungsmaß, kann den [Erläuterungen] bzw. [Winter / Hamm / Richter, 2009] entnommen werden. Für die Ermittlung der Dämpfungswerte in [Winter / Hamm / Richter, 2009] war jeweils eine Versuchsperson auf der Decke, deren Dämpfungsanteil in die Ergebnisse einfließt.

Die mitschwingende Masse für Durchlaufträger darf z.B. nach Tabelle 9/4 aus den [Erläuterungen] berechnet werden. Bei flächigen Massivholzplatten üblichen Querbiegesteifigkeiten und Raumabmessungen mit $b \leq 1,5 \cdot \ell$ kann für b die Raumbreite eingesetzt werden. $0,5b$ ist dann die mitschwingende Breite des Deckenfeldes.

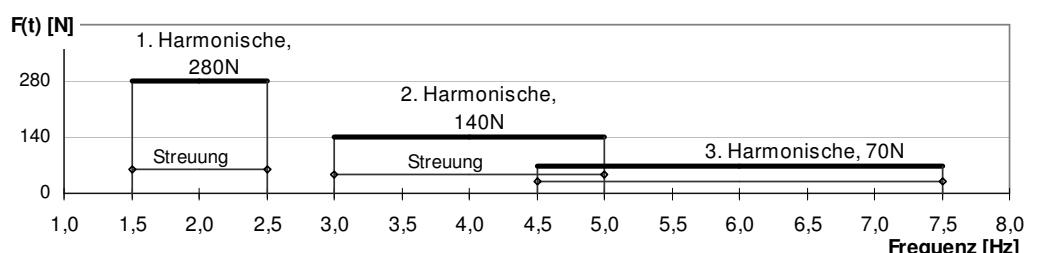
$$F_{\text{dyn}} = 0,4 \cdot F(t) \quad (20)$$

Die einwirkende zeit- und ortveränderliche Kraft F_{dyn} wird mit 40 % der Kraft $F(t)$ (nach Gl 20 und Abb. 7) angesetzt. Der Faktor 0,4 berücksichtigt die wechselnde Einwirkungsstelle und die

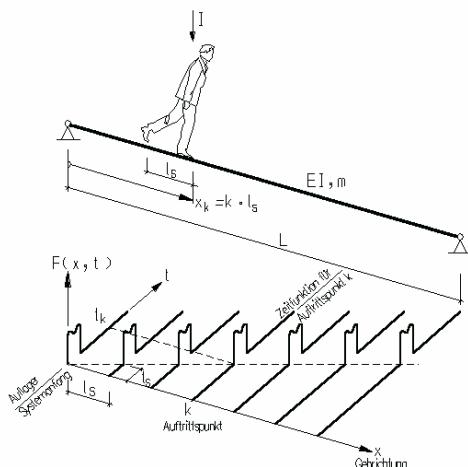
Tatsache, dass die Einwirkungsdauer begrenzt ist (Abb.8) und der eingeschwungene Zustand meist nicht ganz erreicht wird, vgl. [Kreuzinger / Mohr, 1999].

Abbildung 7

Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen

**Abbildung 8**

Verdeutlichung der Zeit- und Ortsabhängigkeit der Kraft auf den Untergrund beim Gehen, aus [Kreuzinger, 1995]



2.2.5 Steifigkeitskriterium

Im Rahmen der Untersuchungen in [Kreuzinger / Mohr, 1999] und [Winter / Hamm / Richter, 2008] wurde festgestellt, dass das Steifigkeitskriterium mindestens ebenso wichtig einzustufen ist wie das Frequenzkriterium. Dabei sollte die Steifigkeit der Decke so hoch sein, dass die Durchbiegung unter einer Kraft von 2 kN in Feldmitte einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Welcher Grenzwert in Gl. 21 verwendet wird, hängt von den Anforderungen des Bauherrn ab.

Die gute Korrelation des Kriteriums mit der Bewertung – in Abhängigkeit vom Konstruktionstyp zeigt Abb. 8.

$$w(2 \text{ kN}) \leq w_{\text{grenz}} \quad (21)$$

$$w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm} \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad (22)$$

$$w_{\text{grenz}} = 1,0 \text{ mm} \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad (23)$$

Die Durchbiegung infolge der Kraft = 2 kN wird für einachsig gespannte Platten bezogen auf einen Deckenstreifen mit der Breite nach $b_{W(2kN)}$ am Einfeldträger ermittelt. Die Angemessenheit der Breite für die Mannlast ist durch den Planer mit Blick auf die tatsächliche Konstruktion zu überprüfen.

Zweiachsig gespannte Platten können als Trägerrost berechnet werden. Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung nicht berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem eines beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes.

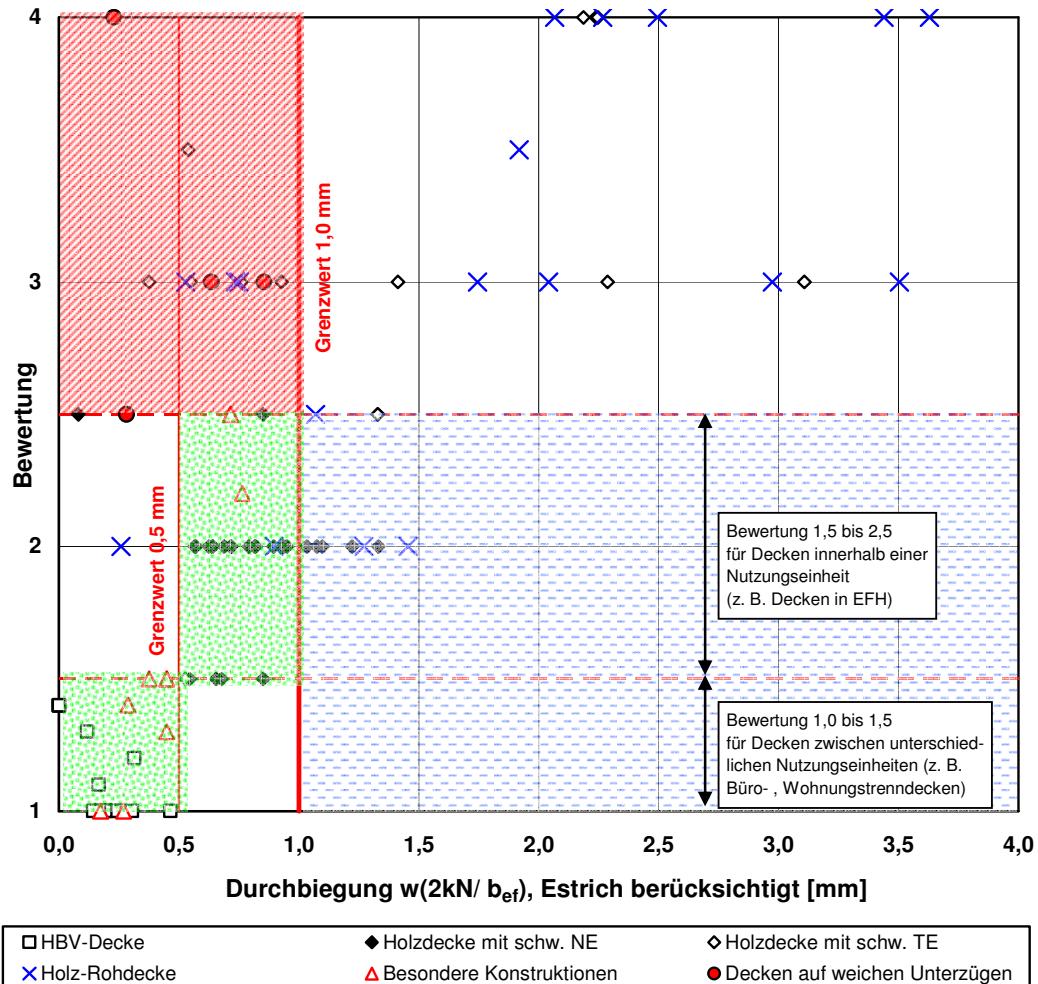


Abbildung 9

Zusammenhang zwischen der Durchbiegung $w(2 \text{ kN} / b_{\text{eff}})$ und der Bewertung bei den untersuchten Decken

$$b_{w(2 \text{ kN})} = \min \left\{ \frac{b_{\text{eff}}}{\text{Raumbreite}} \right\} \quad (24)$$

mit

$$b_{\text{eff}} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_b}{EI_\ell}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha} \quad \text{mit } \alpha \text{ nach Gl. 13} \quad (25)$$

Die effektive **Längsbiegesteifigkeit** darf aus der Summe der Biegesteifigkeit der Rohdecke und der Biegesteifigkeit des Estrichs, allerdings ohne Verbundwirkung (d.h. ohne Steinersche Anteile) ermittelt werden.

Die **Querbiegesteifigkeit** darf aus der Summe der Querbiegesteifigkeit der Rohdecke und der Biegesteifigkeit des Estrichs ohne Verbundwirkung (ohne Steinersche Anteile) ermittelt werden. Bei Installationsführungen oder Fugen im Estrich oder Ausführung als Fertigteil mit Fugen ist die Biegesteifigkeit des Estrichs entsprechend zu reduzieren. Nicht kraftschlüssig ausgeführte Stöße zwischen Elementen bzw. Fertigteilen müssen bei der Ermittlung der Querbiegesteifigkeit der Rohdecke oder der anzusetzenden Raumbreite berücksichtigt werden.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Durchbiegung unter der Einzellast F die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten.

3 Zusammenfassung

Ziel der hier vorgestellten Konstruktions- und Bemessungsregeln ist die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Sie sollen es Tragwerksplanern und ausführenden Firmen ermöglichen, den Nachweis des Schwingungsverhaltens von Holzdecken zu führen.

In Abhängigkeit von der Nutzung oder den ange strebten Anforderungen an das Schwingungsver halten wurden die erforderlichen Nachweise, Be grenzungen und Bewertungen für die Konstruktion in den Tabellen 3 und 4 zusammengestellt.

Zur Nachweisführung ist das **Frequenzkriterium** nach Gl. 7 entweder nach Gl. 8 oder nach Gl. 9 einzuhalten. Dabei darf nach Meinung der Autorinnen die Biegesteifigkeit des Estrichs (ohne Verbundwirkung) sowie bei zweiachsig gespannten Deckenplatten zusätzlich die Drillsteifigkeit bei der Berechnung der Eigenfrequenz berücksichtigt werden. Für die Masse werden nur die ständigen Einwirkungen angesetzt. Im Gegensatz zum vereinfachten Nachweis nach [DIN 1052] („ $w_{\text{quasi-ständig}} \leq 6\text{mm}$ “) wird eine Ermittlung der Eigenfrequenz nur unter ständigen Einwirkungen ohne quasi-ständige Verkehrslastanteile vorgeschlagen. Alternativ zur Berechnung können auch Messergebnisse für den Nachweis herangezogen werden. Bei kleineren Frequenzen kann eine genauere Untersuchung durchgeführt werden. Hierbei muss eine Mindestfrequenz nach Gl. 15 eingehalten und die Schwingbeschleunigung entsprechend Gl. 16 ff begrenzt werden.

Zusätzlich empfehlen die Autorinnen, das Steifigkeitskriterium nach Gl. 21 mit einem Grenzwert je nach Anforderung nach Gl. 22 oder Gl. 23 zwischen 0,5 mm und 1 mm. Die Durchbiegung $w(2\text{kN})$ infolge der Kraft $F_k = 2\text{kN}$ wird für einachsig gespannte Platten bezogen auf einen Deckenstreifen mit der Breite $b_w(2\text{kN})$ nach Gl. 24 am Einfeldträger ermittelt. Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung **nicht** berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem des gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes. Die Biegesteifigkeit des Estrichs darf ebenfalls berücksichtigt werden.

Der dritte nach [EC 5] empfohlene Nachweis untersucht die **Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion**. Bei allen 130, im Rahmen des erwähnten Forschungsvorhabens untersuchten Decken war der Nachweis der Geschwindigkeit nach dem Einheitsimpuls eingehalten, sogar bei Rohkonstruktionen und anderen als unangenehm eingestuften Decken. Der in [Kreuzinger / Mohr, 1999] vorgeschlagene 1/3 Grenzwert wurde nur bei manchen Rohkonstruktionen überschritten, bei Decken mit üblichen Aufbauten nicht. Aufgrund dieser Erfahrung kann gesagt werden, dass der Nachweis der Geschwindigkeit bei Decken mit „üblichem“ Schallschutzaufbau nicht maßgebend wird. Vereinfachend kann man sich deshalb auf die Nachweise Eigenfrequenz und Steifigkeit beschränken.

Das Schwingungsverhalten von Decken wird neben den oben aufgeführten Systemgrößen wesentlich von der Art der **Konstruktion** und dem **Ausbau** beeinflusst.

Die untersuchten **Holz-Beton-Verbunddecken** wiesen größtenteils bereits als Rohdecken ein angenehmes Schwingungsverhalten auf.

Flächige Massivholzdecken (z.B. aus Brettstapel- oder Brettsplatten) haben bei Einhaltung der Anforderungen nach den Tabellen 3 und 4 das Schwingungsverhalten betreffend ebenfalls einige Vorteile: Sie besitzen durch die massive Bauweise eine relativ hohe Eigenmasse und Querbiegsteifigkeit (im Vergleich z. B. zu einer Holzbalkendecke). Bei zweiachsig gespannten Deckenfeldern führt die Drillsteifigkeit der massiven Platten zu höheren Eigenfrequenzen. Messungen an Decken ohne Aufbauten, d.h. noch während des Rohbauzustandes, zeigten, dass die Anordnung einer schwimmenden Estrichschicht (Trocken- oder Nassestrich, ggf. auf Schüttung) jedoch sehr wichtig ist – nicht nur für den Schallschutz sondern auch für das Schwingungsverhalten. Ein solcher (Tritt-) Schallschutz-Aufbau sollte gegeben sein.

Holzbalkendecken (oder Trägerroste) sollten immer mit einem schwimmenden Nassestrich, möglichst in Kombination mit einer Schüttung ausgeführt werden.

Eine detaillierte Darstellung der im Forschungsvorhaben [Winter / Hamm / Richter, 2008] eingesetzten Untersuchungsmethoden, die Ergebnisse und Bemessungsbeispiele werden in einem ausführlichen Abschlussbericht dokumentiert. Die Veröffentlichung des ausführlichen Abschlussberichtes [Winter / Hamm / Richter, 2009] ist für Ende 2009 geplant.

Aktuell findet auf Grund der Forschungsergebnisse in der Fachwelt eine Meinungsbildung über die Definition von Decken-Schwingverhaltensklassen statt, die klare, einfache Bauvertragsregelungen ermöglichen wollen bzw. sollen.

Speziell für die Durchführung des Schwingungsnachweises für BSP-Decken wird auf das Bemessungshandbuch [Schickhofer et al, 2009] verwiesen, an dessen Herausgabe aktuell gearbeitet

wird (geplante Fertigstellung: November diesen Jahres).

Werden Decken nachgiebig auf Unterzügen gelagert, ist dies bei der Nachweisführung zu berücksichtigen, indem die Eigenfrequenz und die Durchbiegung für das Gesamtsystem berechnet werden.

Für Decken unter Räumen, die für rhythmische Bewegungen genutzt werden, wie z. B. Tanz- oder Gymnastikräume oder Turnhallen, sollten genauere Untersuchungen durchgeführt werden, die nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung sind.

Literatur

[Fitz, 2008]

Fitz, Mario: Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Deckensystemen aus Brettsperrholz (BSP). Masterarbeit an der TU Graz.

[Hamm, 2005]

Hamm, Patricia: Schwingungen bei Decken und Brücken – Theoretische Prognose und praktische Analyse. In: Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage. Karlsruhe 6./7. Oktober 2005. Hrsg.: Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen und Bruderverlag, Karlsruhe. S. 27-36.

[Hamm, 2008]

Hamm, Patricia: Schwingungsverhalten von Decken bei Auflagerung auf Unterzügen. holzbau, die neue quadriga. 1/2008.

[Hamm / Richter, 2009]

Hamm, Patricia; Richter, Antje: Personeninduzierte Schwingungen bei Holzdecken – Neue Erkenntnisse führen zu neuen Bewertungsverfahren. In: Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage. Karlsruhe 8./9. Oktober 2009. Hrsg.: Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen und Bruderverlag, Köln. S. 9-18.

[Hu et al, 2001]

Hu, L. J.; Chui, Y. H.; Onysko, D. M.: Vibration serviceability of timber floors in residential construction. In: Prog. Struct. Engng Mater, 3:228-237. 2001.

[Kreuzinger, 1995]

Kreuzinger, Heinrich: Schwingungen von Fußgängerbrücken - Berechnung und Messung; In: Informationsdienst Holz, Holzbauwerke STEP 3, Fachverlag Holz, 1995; S. 17/1-17/16

[Kreuzinger / Mestek, 2008]

Winter, Stefan; Kreuzinger, Heinrich; Mestek, Peter: Flächen aus Brettstäppeln, Brettsperrholz 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.

[Kreuzinger / Mohr, 1999]

Kreuzinger, Heinrich; Mohr, Bernhard: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz; Abschlussbericht Januar 1999. TU München, Fachgebiet Holzbau. Forschungsvorhaben durchgeführt für die EGH in der DGfH.

[Murray, 2003]

Murray, Thomas M.; Allen, David E.; Ungar, Eric E. (2003): Floor vibrations due to human activity; Steel design guide series 11. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois. Oct. 2003

[Ohlsson, 1982]

Ohlsson, Sven: Floor vibrations and human discomfort. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 1982

[Schickhofer et al, 2009]

BSP-Handbuch. Herausgeber: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Gerhard Schickhofer, TU Graz. Noch in Bearbeitung.

[Tredgold, 1828]

Tredgold, T. (1828): Elementary Principles of Carpentry. 2nd Edition. Verlag unbekannt.

[Winter / Hamm / Richter, 2008]

Winter, Stefan; Hamm, Patricia; Richter, Antje: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben: Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. DGfH 2009.

[Winter / Hamm / Richter, 2009]

Winter, Stefan; Hamm, Patricia; Richter, Antje: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. DGfH 2009. Noch in Bearbeitung.

[DIN 1052, 1988]

DIN 1052: Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung. Berlin. April 1988.

[DIN 1052, 2008-12]

DIN 1052: 2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin. Dezember 2008.

[DIN 1055-100]

DIN 1055-100: 2001-03: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Berlin. März 2001.

[EC 5]

EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung. November 2004.

[Erläuterungen]

Blaß, H.J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. 1. Auflage; Hrsg.: DGfH Innovations- und Service GmbH, München, 2004.

[ISO 2631-2]

Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Genf, Schweiz International Organization for Standardization. 1989.