

Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen durch pränormative Arbeit – Teilantrag 4: Holzbau

BBSR-Forschungsvorhaben

Az.: II 3-F20-10-1-085_PG4 / SWD-10.08.18.7-15.05

Zuwendungsbescheid vom 01.12.2016

ABSCHLUSSBERICHT

zum Teilprojekt

„Vereinfachte Ansätze zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und zum Schwingungsnachweis nach EC 5“

Zuwendungs-Nr. PRB-4.7 (2016)

Teil B: Schwingungsnachweise

Berichtszeitraum:

September 2016 bis September 2017

Forschende Stelle:

Ingenieurbüro Patricia Hamm. Saliterstraße 90. 87616 Marktoberdorf

Aufgestellt: 29.09.2017

Projektleiter(-in): Prof. Dr. Patricia Hamm

Bearbeiter(-in): Prof. Dr. François Colling (Teil A Durchbiegungsnachweise),
Prof. Dr. Patricia Hamm (Teil B Schwingungsnachweise)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Dieser Zwischenbericht (Teil B Schwingungsnachweise) umfasst 42 Seiten (inkl. Anhang).

0. Inhaltsverzeichnis

0.	Inhaltsverzeichnis	2
1.	Einleitung, Motivation	3
2.	Bestandsanalyse	3
2.1.	Chronologische Entwicklung	3
2.2.	Eurocode 5 und NAD	4
2.3.	Konstruktions- und Bemessungsregeln – Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben.....	6
3.	Diskussion des Bemessungsvorschlages	7
3.1.	Erfahrungen und Rückmeldung aus der Praxis.....	7
3.2.	Diskussion, ob der Nachweis zu streng ist bzw. welcher Nachweis maßgebend ist	9
3.3.	Vorschlag Kreuzinger /Mohr	13
3.4.	Diskussion, welche mittragende Breite angesetzt werden kann	14
3.5.	Diskussion, welche mitschwingende Masse angesetzt werden kann	17
3.6.	Diskussion, ob andere Nachweismethoden günstiger sind.....	18
3.7.	Diskussion, ob eine weitere Anforderungsklasse eingeführt werden sollte	23
4.	Bemessungsvorschlag für den Schwingungsnachweis bei Holzdecken.....	25
4.1.	Allgemein bei starr (auf Wänden) gelagerten Decken.....	25
4.2.	Ergänzung für nachgiebig (auf Unterzügen) gelagerte Decken	31
4.3.	Besondere Untersuchung falls die Eigenfrequenz kleiner ist als f_{grenz}	34
5.	Bemessungsprogramm	36
6.	Zusammenfassung	36
7.	Schrifttum.....	37
7.1.	Normen und Regelwerke.....	37
7.2.	Literatur.....	37
8.	Anhang	40

1. Einleitung, Motivation

Der aktuell vorliegende Schwingungsnachweis nach EC 5 ist sowohl inhaltlich als auch in den Anwendungsgrenzen unbefriedigend. Was die Nutzung betrifft, beschränkt er sich auf Wohnungsdecken und streng genommen gilt er nur für Holzbalkendecken ohne Berücksichtigung weiterer Steifigkeiten im Aufbau, ohne Berücksichtigung alternativer Deckenkonstruktionen (BS-Decke, BSP-Decke, HBV-Decke), deren oberer Aufbau (Estrich ...) und der flankierenden Steifigkeiten (Wände usw.). Die Grenzwerte sind sehr ungenau (schwanken zwischen 0,5mm und 4mm), der Nachweis der Einheitsimpuls geschwindigkeitsreaktion greift selbst bei schlechten Decken nicht, die Eignung des Aufbaus wird nicht überprüft.

Ziel sollte es sein, ausgehend von einer ein- oder zweiachsig tragenden Deckenstruktur und untergliedert in normale und erhöhte Anforderungen (Wohnungsdecke/Wohnungstrenndecke) und unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren wie Estrichaufbau, nichttragende Querwände usw. einen einfachen und gleichzeitig ausreichenden Schwingungsnachweis zu erhalten.

An der TU München wurde 2010 ein Forschungsvorhaben zu diesem Thema fertiggestellt. Darauf aufbauend sollen dem Anwender Regeln an die Hand gegeben werden, um das Schwingungsverhalten von Holzdecken zutreffend bemessen zu können.

2. Bestandsanalyse

2.1. Chronologische Entwicklung

Die „alte“ Holzbaunorm [DIN 1052: 1988] enthält zum Thema Gebrauchstauglichkeit nur einen Nachweis der Durchbiegungen/Verformungen unter statischer Einwirkung, keinen Nachweis für Schwingungen.

Im [Eurocode 5: 1993] ist ein Nachweis für „Schwingungen“ für „Wohnungsdecken“ enthalten. Diese Fassung des Eurocode 5 war aber nicht verbindlich für Deutschland.

1999 wurde der Forschungsbericht [Kreuzinger/Mohr, 1999] fertig gestellt. Er behandelt das Thema „Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken“ und ergänzt sowie verschärft die Nachweise aus [Eurocode 5: 1993]. Die Ergebnisse wurden immer wieder, z. B. in [Mohr, 2001] veröffentlicht.

2004 erschien eine überarbeitete Fassung des [Eurocode 5: 2004]. Der darin enthaltene Schwingungsnachweis hat sich gegenüber der Fassung von 1993 nicht geändert.

Ebenfalls 2004 wurde mit [DIN 1052: 2004] eine völlig neu überarbeitete Holzbaunorm herausgegeben. Sie enthält einen Schwingungsnachweis für Wohnungsdecken, „um Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden“. Der Schwingungsnachweis ist in der Form einer Durchbiegungsbegrenzung. Die zugehörigen [Erläuterungen], ebenfalls von 2004, geben ergänzende Hinweise und weitere Nachweisverfahren zum Thema Schwingungen von Decken.

Mit [Hamm, 2006] wird ein populär-wissenschaftlicher Aufsatz veröffentlicht, der die Notwendigkeit des Schwingungsnachweises erklärt und die wichtigsten Nachweise aus den [Erläuterungen] herausgreift.

Trotzdem waren noch Wissenslücken in der Nachweisführung vorhanden, vor allem was den Frequenzbereich bei Eigenfrequenzen kleiner als 8 Hz betrifft. Zwischen 2007 und 2009 wurde unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter, TU München durch Dipl.-Ing. Antje Richter und der Autorin ein Forschungsvorhaben zum Thema „Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken“ bearbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse wurden bereits 2009, z. B. in [Hamm/Richter, 2009] veröffentlicht. Der Schlussbericht [Winter/Hamm/Richter, 2010] erschien 2010. Eine neue und wichtige Erkenntnis ist, dass der Aufbau der Decken eine wesentliche Rolle für das Empfinden der Schwingungen spielt.

In der neuen Auflage des [Eurocode 5: 2010] bleibt der Nachweis „7.3 Schwingungen“ bei „7.3.3 Wohnungsdecken“ gegenüber der Vorgänger- Ausgaben unverändert.

Im Nationalen Anhang [Eurocode 5: 2010 / NA - D] wird ergänzt:

„ANMERKUNG: Das Schwingungsverhalten von Decken sollte, ebenso wie die Begrenzung von Durchbiegungen, immer im Hinblick auf die vorgesehene Nutzung beurteilt werden und die Anforderungen, gegebenenfalls in Abstimmung mit dem Bauherrn, entsprechend festgelegt werden.“

Der überarbeitete Nationale Anhang [Eurocode 5: 2010 / NA:2013-08] enthält folgenden Hinweis auf die [Erläuterungen] und das Forschungsvorhaben:

„NCI Zu 7.3.3 „Wohnungsdecken“

(NA.6) Für Bauteile ohne nennenswerte Querbiegesteifigkeit kann die Schwinggeschwindigkeit auch nach [NA.3], Tabelle 9/4 und 9/5, mit zugehöriger Erläuterung, ermittelt werden.

ANMERKUNG Genauere Angaben zu sinnvollen Grenzwerten für unterschiedliche Deckensysteme sind [NA.7] zu entnehmen. "

„[NA.7]“ ist die Literaturstelle [Winter/Hamm/Richter, 2010].

2.2. Eurocode 5 und NAD

Der Schwingungsnachweis im [Eurocode 5: 2010] besteht aus drei Teilen:
Eigenfrequenz, Durchbiegung unter Einzellast und Schwinggeschwindigkeit.

Der Wert für die Mindestfrequenz liegt hier bei 8 Hz, allerdings nur bei ständiger Einwirkung (ohne quasi-ständigen Verkehrslastanteil).

Es heißt (Auszug aus [Eurocode 5: 2010]):

„7.3 Schwingungen

7.3.1 Allgemeines

(1)P Es ist sicher zu stellen, dass häufig zu erwartende Einwirkungen auf Bauteile oder Tragwerke keine Schwingungen verursachen, die die Funktion des Bauwerks beeinträchtigen oder den Nutzern unannehmbares Unbehagen verursachen.

(2) Das Schwingungsverhalten sollte durch Messungen oder Berechnungen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Steifigkeit des Bauteils oder des Tragwerks und des Dämpfungsgrades abgeschätzt werden.“ ...

„7.3.3 Wohnungsdecken

(1) Für Wohnungsdecken mit einer Eigenfrequenz von höchstens 8 Hz ($f_1 < 8\text{ Hz}$) sollte eine besondere Untersuchung durchgeführt werden. (Anmerkung der Autorin: Die „besondere Untersuchung“ ist nicht weiter beschrieben.)

(2) Für Wohnungsdecken mit einer Eigenfrequenz über 8 Hz ($f_1 \geq 8\text{ Hz}$) sollten die folgenden Anforderungen erfüllt sein:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \text{mm/kN} \quad \text{Gl. (1)}$$

(Anmerkung der Autorin: Die Durchbiegung w unter einer Einzellast F soll kleiner sein als der Grenzwert a nach Abbildung 1.)

$$v \leq b^{(f_1 \zeta - 1)} \quad \text{Gl. (2)}$$

(Anmerkung der Autorin: Die Einheitsimpuls geschwindigkeitsreaktion v soll kleiner sein als der rechts stehende Ausdruck, abhängig von der Basis b nach Abbildung 1 und der Eigenfrequenz sowie der Dämpfung im Exponent.)“

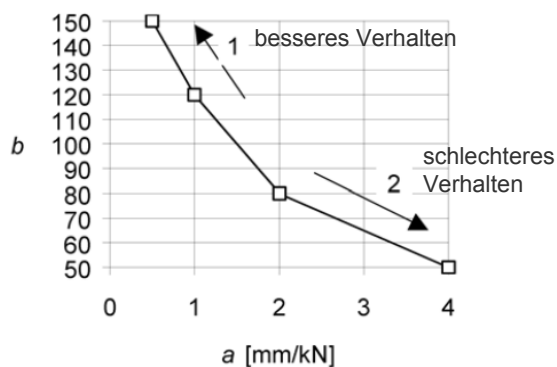


Abb. 1: Empfohlener Bereich und Beziehung zwischen a und b. Aus [Eurocode 5: 2010]

Folgendes Diagramm zeigt den dreiteiligen Schwingungsnachweis nach [Eurocode 5: 2010].

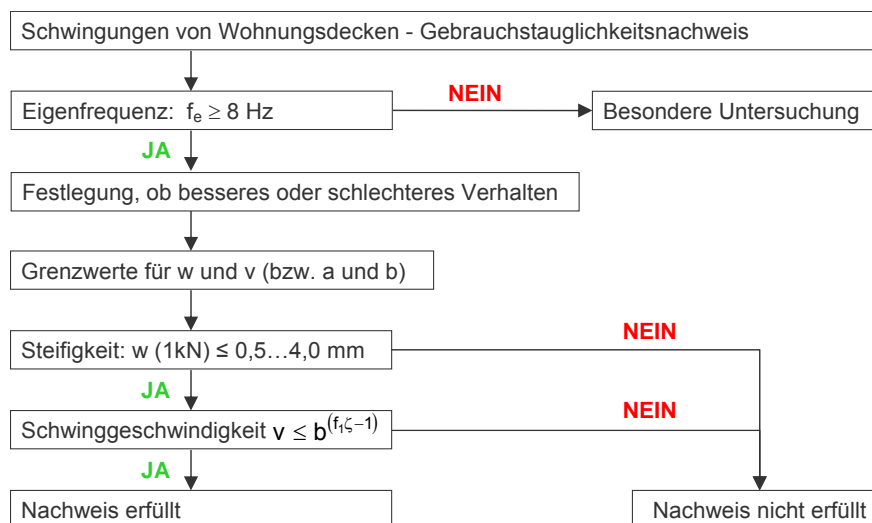


Abb. 2: Nachweis nach [Eurocode 5: 2010]

2.3. Konstruktions- und Bemessungsregeln – Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben

Das Schwingungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der TU München [Winter/Hamm/Richter, 2010] untersucht. Dabei wurden die Nachweise aus dem Eurocode auf Relevanz überprüft und ergänzt. Ergebnis sind Konstruktions- und Bemessungsregeln für den Schwingungsnachweis von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken.

Der Schwingungsnachweis nach dem Forschungsbericht besteht aus drei Kriterien:

1. die Eigenfrequenz der Decke
2. die Durchbiegung unter einer Einzellast
3. die Konstruktion inkl. Aufbau der Decke

Weil die Nachweise nach dem Forschungsbericht auch Teil des Lösungsvorschlags sind, werden die Gleichungen in Kapitel 4 erläutert.

In Kapitel 3 werden Rückmeldungen aus der Praxis, Hintergründe und Erfahrungen zu den Konstruktions- und Bemessungsregeln diskutiert.

3. Diskussion des Bemessungsvorschlages

Im Folgenden werden Rückmeldungen aus der Praxis, Hintergründe, Vergleiche und Erfahrungen zu den Konstruktions- und Bemessungsregeln diskutiert.

3.1. Erfahrungen und Rückmeldung aus der Praxis

Die Ergebnisse des Forschungsberichtes [Winter/Hamm/Richter, 2010] wurden und werden seit Fertigstellung des Forschungsvorhabens immer wieder veröffentlicht. Viele Tragwerksplaner wenden die Regeln an, manche Bemessungsprogramme wie z. B. Dlubal, mbAEC Software und Dietrichs's haben die Ergebnisse ganz oder teilweise in ihre Software aufgenommen.

Der Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V. hat ein Technisches Merkblatt über die „Gebrauchstauglichkeit von Holzdecken“ zusammengestellt [BDF-Merkblatt, 2015]. Auch hier sind Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben eingeflossen.

Dennoch ist klar, dass noch nicht alle Tragwerkplaner und v.a. Unternehmer erreicht worden sind.

Regelmäßig werden Anfragen an die Autorin herangetragen, wie der Schwingungsnachweis genau zu führen ist. Die Antworten auf „technische Fragen“ werden hier in den Bericht eingepflegt.

Weitere „allgemeine“ Fragen sind:

„Warum ist ein Schwingungsnachweis überhaupt notwendig?“

Weil die Spannweiten durch technische Möglichkeiten immer größer werden und die Massen durch neue Materialien immer kleiner. Die großen Spannweiten führen zu kleinen Frequenzen, die zu Resonanzschwingungen angeregt werden können. Die geringen Massen durch schlanke Querschnitte führen zu größeren Amplituden, die evtl. störend wirken können.

„Warum nur für Holzbauten?“

Die einfache Antwort ist, dass Stahlbetondecken (mit üblichen Spannweiten und Nutzung als Wohn- oder Büroräume) aufgrund ihrer hohen Masse nicht zu störenden Amplituden angeregt werden. Bei Stahlkonstruktionen gibt es diese Schwingungsproblematik auch, es gibt auch umfangreiche Forschungsarbeiten zur Vermeidung von Schwingungen [HIVOSS, 2008], allerdings werden die Stahlkonstruktionen kaum im üblichen Wohnhausbau eingesetzt.

„Schaden die strengen Nachweise dem Holzbau nicht mehr als sie ihm nutzen?“

Wenn der Holzbau mit den anderen Materialien, v.a. dem Stahlbetonbau mithalten und sich mit ihm vergleichen will, müssen auch gleiche Komfortkriterien eingehalten werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Holzkonstruktion überhaupt nicht mehr sichtbar ist. Durch die restlose Bekleidung aller Tragglieder kann der Nutzer nicht erkennen, welches Material verbaut wurde und er erwartet ein gleich schwingungsunempfindliches Verhalten wie bei Stahlbetondecken. Anders verhält es sich, wenn die Holzbalken sichtbar sind, entweder auf Wunsch des Bauherrn oder im Altbau: Dann kann sich der Nutzer auf ein weicheres Verhalten einstellen und wird es akzeptieren.

Rückmeldung von den Anwendern:

[Colling, 2014] schreibt in seinem Buch, „ w_{grenz} kann nach Vereinbarung mit den Nutzern z. B. um einen Faktor 1,5 erhöht werden.“ und deutet damit an, dass der Gebrauchstauglichkeitsnachweis in Absprache mit dem Bauherrn von den Normen abweichen darf.

Auch andere Unternehmen und Büros berichten, dass der Bemessungsvorschlag gut ist, sie aber v.a. beim Steifigkeitskriterium um 1,5- bis 2-fach höhere Grenzwerte verwenden.

Wieder andere Büros verwenden den Bemessungsvorschlag „im Original“ und berichten von sehr zufriedenen Kunden.

Eigene Erfahrungen aus Gutachten oder bei Messungen zeigen, dass manche Kunden selbst dann unzufrieden sind, obwohl alle Nachweise eingehalten sind. Immer wieder finden Gutachtertermine statt, bei denen die Messung eine Frequenz höher als 8 Hz ergibt und die Nachrechnung der Durchbiegung unter Einzellast das Steifigkeitskriterium erfüllt. Dennoch fühlen sich manche Nutzer durch das Schwingungsverhalten der Decke gestört.

Die Kunst liegt darin, einen Nachweis aufzustellen, der wirtschaftlich ist und möglichst viele Nutzer zufrieden stellt. Über mögliche „Stellschrauben“ wird im Folgenden diskutiert.

3.2. Diskussion, ob der Nachweis zu streng ist bzw. welcher Nachweis maßgebend ist

Von den Anwendern gab es positives Feedback zu den Konstruktions- und Bemessungsregeln. Teilweise war zu hören, dass v.a. das Steifigkeitskriterium bemessungsrelevant und z.T. zu streng sei.

Um dies zu untersuchen, wurden unterschiedliche Diagramme erstellt, siehe auch [Bender, 2016]. Nachfolgend sind die Nachweisdiagramme für Holzbalkendecken als Einfeldträger für vier Fälle dargestellt.

1. Decke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten mit Nassestrich
2. Decke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten mit Trockenestrich
3. Decke innerhalb einer Nutzungseinheit mit Nassestrich
4. Decke innerhalb einer Nutzungseinheit mit Trockenestrich

1. Holzbalkendecke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten als Einfeldträger mit unterschiedlichem Eigengewicht, mit einem **Nassestrich-Aufbau** von 65 mm. Das Diagramm (Abb. 3) zeigt welcher Nachweise bemessungsrelevant wird, je nach Spannweite und Eigengewicht.

Bei kleinen Spannweiten sind die Durchbiegungsnachweise maßgebend, bei Spannweiten zwischen 2,3 m und ca. 4 – 6 m das Steifigkeitskriterium und bei größeren Spannweiten das Frequenzkriterium.

Je schwerer die Decke ist, desto größer ist der Bereich, in dem das Frequenzkriterium maßgebend ist und desto kleiner ist zugleich der Bereich des Steifigkeitskriteriums. Dies bedeutet, dass bei schwereren Holzbalkendecken die Eigenfrequenz schon bei geringeren Spannweiten bemessungsrelevant wird.

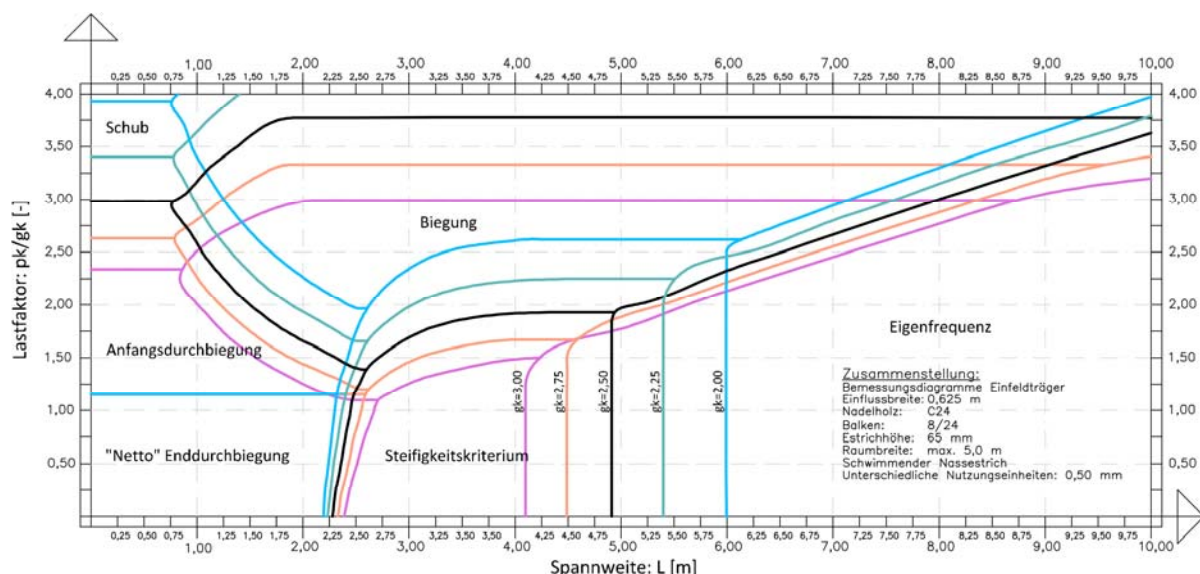


Abb. 3: Nachweisdiagramm Einfeldträger - Variables Eigengewicht für Nassestrich 65 mm / unterschiedliche Nutzungseinheiten

Abbildung 4 zeigt das Nachweisdiagramm nochmal einzeln für ein Eigengewicht von 2,5 kN/m²:

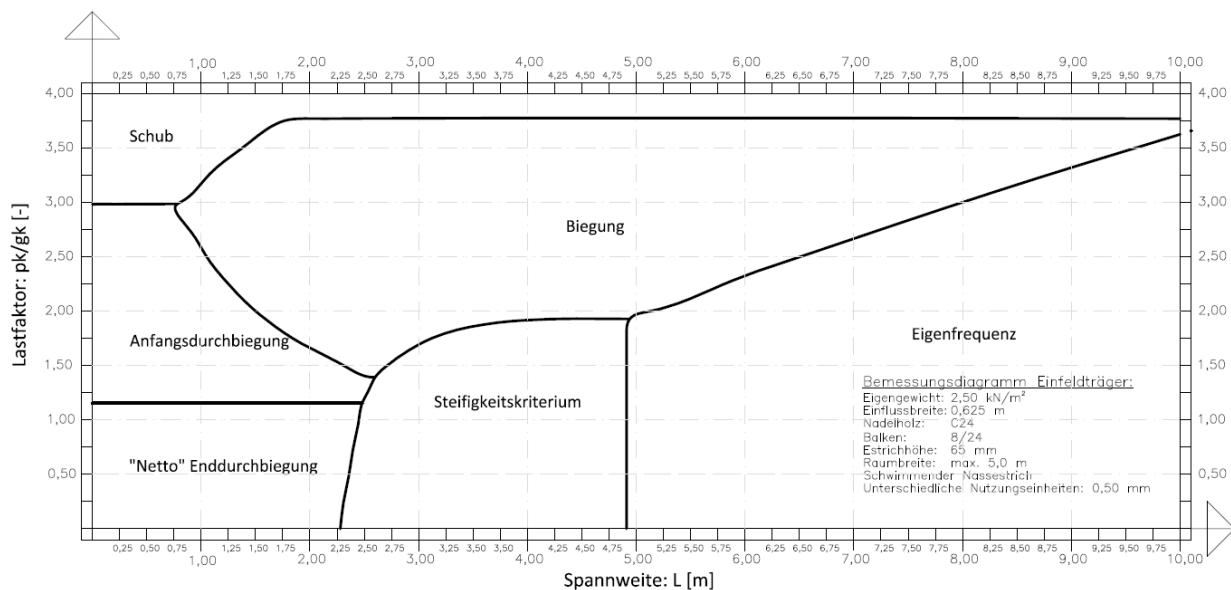


Abb. 4: Nachweisdiagramm Einfeldträger zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten mit Nassestrich und einem Eigengewicht von 2,5 kN/m²

2. Holzbalkendecke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten als Einfeldträger mit einem Trockenestrich-Aufbau.

Dieser Aufbau „Trockenestrich auf einer Holzbalkendecke“ „zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten“, also höhere Anforderungen an die Decke, ist in dem Forschungsbericht als nicht geeignet eingestuft worden. Die Schwingungen werden als unangenehm empfunden, weil die Decke ist zu leicht ist und zu wenig Querverteilung der Last hat.

3. Holzbalkendecke innerhalb einer Nutzungseinheit als Einfeldträger mit einem Nassestrich-Aufbau von 65 mm.

Folgende Abbildung zeigt die maßgebenden Nachweise bei einer Holzbalkendecke mit Nassestrich innerhalb einer Nutzungseinheit. Es stellt deutlich dar, dass **das Steifigkeitskriterium in diesem Fall nicht maßgebend wird**.

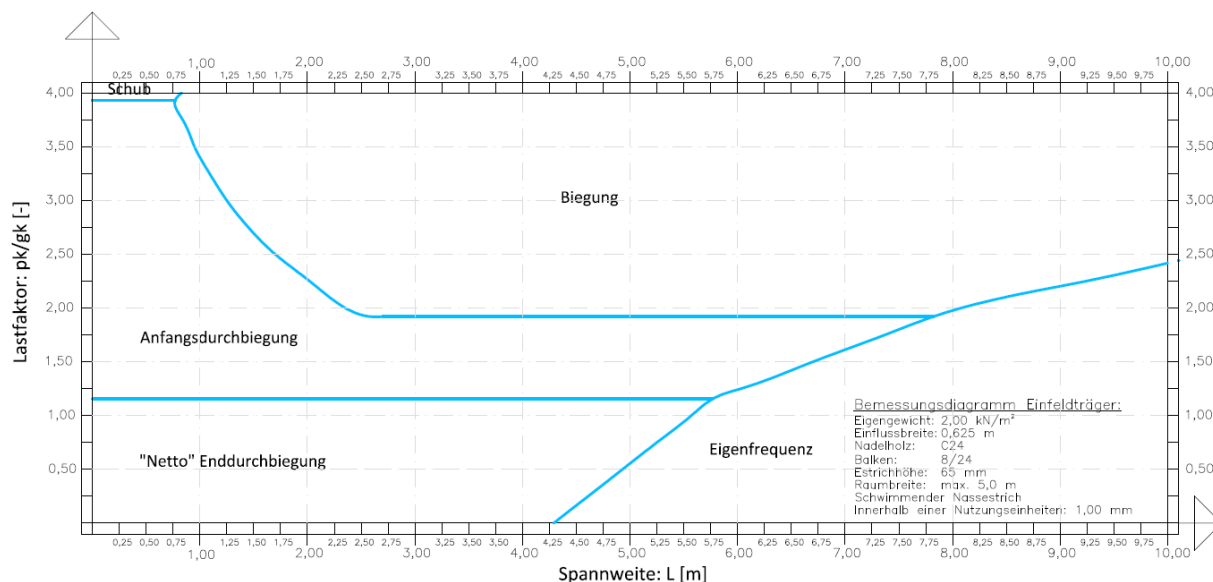
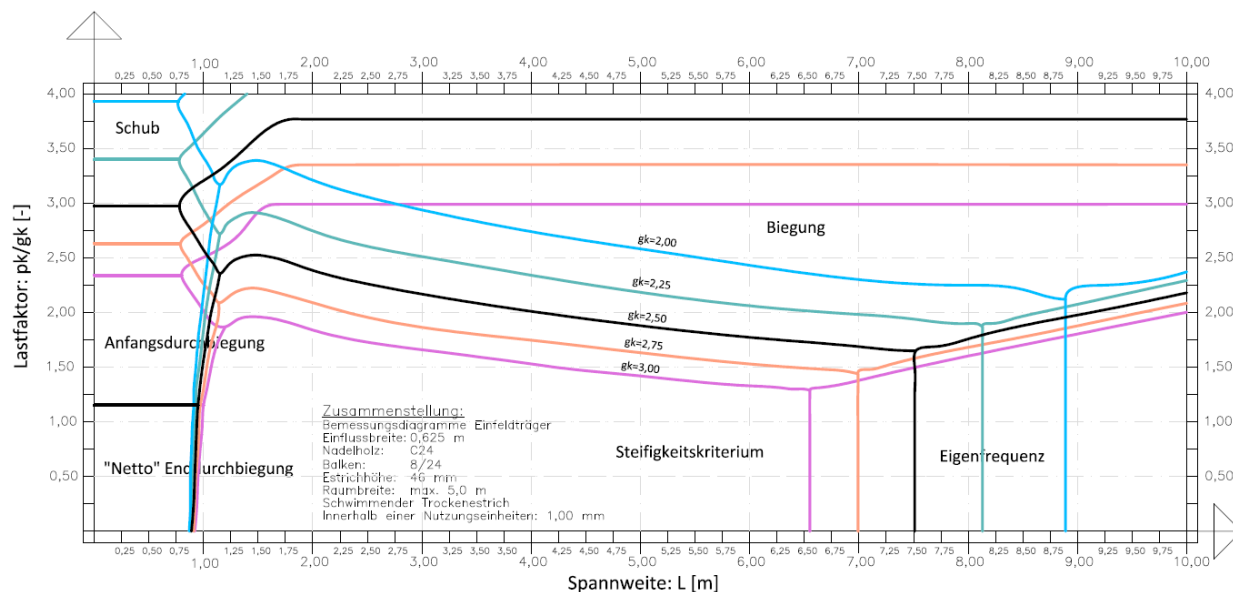


Abb. 5: Nachweisdiagramm Einfeldträger – Nassestrich innerhalb einer Nutzungseinheit, $g = 2,0 \text{ kN/m}^2$

4. Holzbalkendecke innerhalb einer Nutzungseinheit als Einfeldträger mit Trockenestrich.

Abbildung 6 zeigt den maßgebenden Nachweis beim Einfeldträger innerhalb einer Nutzungseinheit mit einem Trockenestrich-Aufbau. Den Berechnungen für dieses Diagramm ist eine doppelte Lage mit insgesamt 4,6 mm Trockenestrich zugrunde gelegt. In allen üblicherweise vorkommenden Spannweiten (1 m bis ca. 6,5 m) wird das Steifigkeitskriterium mit einer Durchbiegungsbegrenzung von 1mm unter einer Einzellast von 2 kN maßgebend.

Abbildung 7 zeigt auch die Linien für eine einfache Trockenestrichlage mit 2,3 mm Stärke.

**Abb. 6: Nachweisdiagramm Einfeldträger – Trockenestrich innerhalb einer Nutzungseinheit**

5. Holzbalkendecke mit unterschiedlichen Estricharten und unterschiedlichen Einbaulagen / Anforderungen als Einfeldträger. Das Diagramm zeigt die erforderlichen Nachweise in Abhängigkeit des Aufbaus.

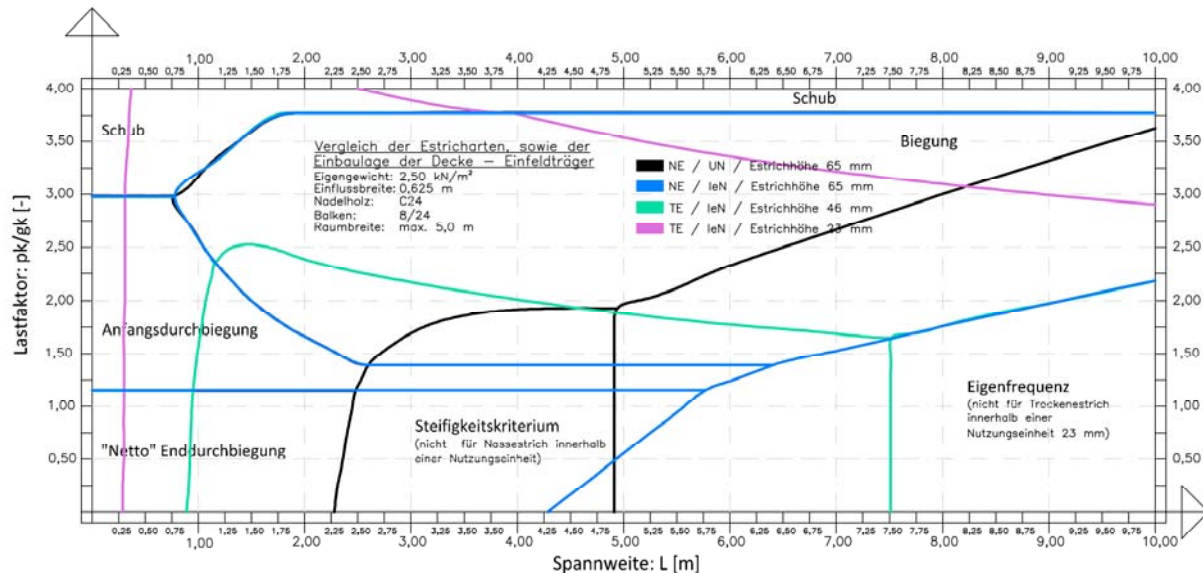


Abb. 7: Nachweisdiagramm Einfeldträger – Verschiedene Estricharten sowie Einbaulagen der Holzbalkendecke

Insgesamt fällt auf, dass das Steifigkeitskriterium beim Nassestrich eine untergeordnete Rolle spielt. Innerhalb einer Nutzungseinheit wird das Steifigkeitskriterium mit Nassestrichaufbau gar nicht maßgebend. Hier werden die Durchbiegungsnachweise bei geringeren Verkehrslasten in diesen Bereichen bemessungsrelevant. Weiter kann festgestellt werden, dass das Eigenfrequenzkriterium bei der Verwendung eines Nassestrichs bereits ab ca. 4,0 bis 5,0 m ausschlaggebend wird. Beim Trockenestrich wird diese entweder gar nicht oder erst bei untypisch großen Spannweiten ab ca. 6,50 m maßgebend.

Bei Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten gibt es einen Bereich (Spannweiten zwischen 2,3 m und ca. 5 m), bei dem das Steifigkeitskriterium maßgebend wird, vgl. Abbildung 3 und 4.

3.3. Vorschlag Kreuzinger /Mohr

Das Steifigkeitskriterium ist ein wichtiger Baustein zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens einer Decke. Es wird empfohlen, die Grenzen einzuhalten. Bei Decken mit hohem Dämpfungsmaß, wie es bei den Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten wegen Schallschutzaufbauten ohnehin vorhanden ist, kann eine Erhöhung der Grenzwerte angedacht werden.

Im Bericht [Kreuzinger/Mohr, 1999] wird vorgeschlagen, den Grenzwert mit Faktor 1,25 zu multiplizieren, wenn ausreichend Dämpfung vorhanden ist. Damit wäre der neue Grenzwert $1,25 \cdot 0,5 \text{ mm} = 0,625 \text{ mm}$.

Hintergrund:

Bei hohen Dämpfungswerten klingen die Schwingungen schneller ab und werden deshalb als weniger störend empfunden.

3.4. Diskussion, welche mittragende Breite angesetzt werden kann

Im Rahmen einer Masterarbeit, vgl. [Glück, 2017] wurden die Randbedingungen für die Anwendung der Gleichung für die mittragende Breite beim Steifigkeitskriterium (=Begrenzung der Durchbiegung unter einer Einzellast) überprüft.

Wie im Bemessungsvorschlag, vgl. Kap. 4.1 genauer erläutert, wird beim Steifigkeitskriterium die Durchbiegung des Deckenbalkens unter einer Einzellast von 2 kN berechnet. Um die Querbiegesteifigkeit zu berücksichtigen, geht die mitwirkende Breite b_{ef} in die Gleichung ein. Im Rahmen der Masterthesis [Glück, 2017] wurde die mitwirkende Breite genauer betrachtet.

Die Nachrechnungen haben gezeigt, dass die Gleichung für die Berechnung der mitwirkenden Breite bei üblichen Deckenabmessungen (Spannweiten und Raumbreiten) beispielsweise im Ein- oder Zweifamilienwohnbau sehr genau ist.

Weichen die Deckenabmessungen von den üblichen Längen und Breiten ab, wie z. B. bei Fluren oder im mehrgeschossigen Wohnungsbau, wo oft mit vielen nichttragenden Wänden gearbeitet wird und Deckenabmessungen mit teilweise sehr großen Spannweiten oder sehr großen Raumbreiten entstehen, kann die Gleichung für die mittragende Breite von den genauen Werten abweichen. Hier erhält man je nach Deckenspannrichtung entweder Deckensysteme mit sehr geringen Spannweiten und sehr großen Raumbreiten oder Deckensysteme mit sehr großen Spannweiten und sehr geringen Raumbreiten.

Zur Überprüfung der mitwirkenden Breite wurde deshalb folgende Gleichung untersucht.

$$b_{ef} = \frac{L}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_b}{EI_L}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha} \quad \text{Gl. (3)}$$

Um die oben genannten Extremfälle darzustellen, wurden fünf verschiedene Deckensysteme untersucht:

- Fall 1: „Standarddecke“
- Fall 2: Geringe Spannweite und geringe Raumbreite
- Fall 3: Geringe Spannweite und große Raumbreite
- Fall 4: Große Spannweite und geringe Raumbreite
- Fall 5: Große Spannweite und große Raumbreite

Alle fünf Fälle werden mit jeweils drei unterschiedlichen Estricharten untersucht:

- Zementestrich (E-Modul: 25.000 N/mm²)
- Anhydritestrich (E-Modul 14.000 N/mm²)
- Trockenestrich (E-Modul 3000 N/mm²)

Die 15 Deckensysteme wurden dabei mit Hilfe des Programms RSTAB als Trägerrost mit Längs- und Querstäben modelliert, vgl. Abb. 8.

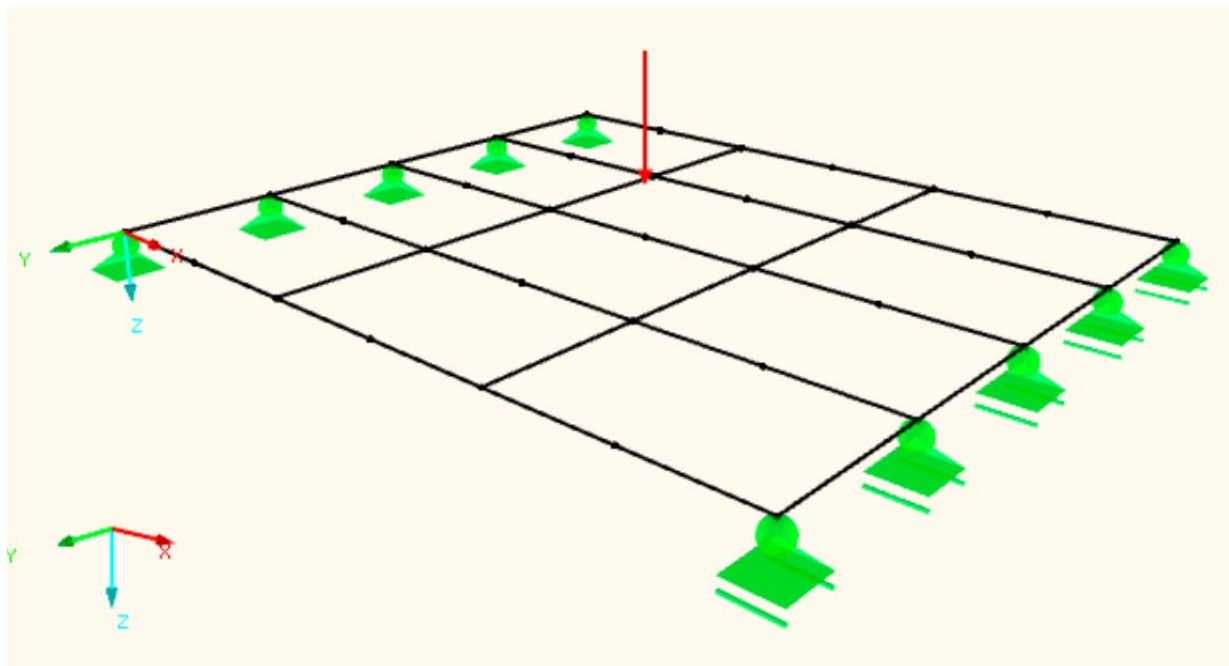


Abb. 8: Trägerrostmodell einer Holzbalkendecke mit RSTAB, aus [Glück, 2017]

Die Berechnungen zeigen, dass die Ergebnisse aus RSTAB sehr gut mit den nach Gl. 3 berechneten Werten übereinstimmen. Fast alle Abweichungen betragen weniger als 10%. Betrachtet man die Abweichungen, welche größer als 10 % sind, fällt auf, dass diese vor allem bei Deckensystemen mit geringen Holzquerschnitt (C24 6/22) und einem Estrich mit einem hohen E-Modul (Zementestrich 25.000 N/mm²) auftreten, d.h. geringe Biegesteifigkeit in Längsrichtung im Verhältnis zur Querbiegesteifigkeit.

Die Abweichungen werden kleiner, wenn bei Deckensystemen mit Zementestrich die Abmessungen des Holzbalkens vergrößert werden. Die Abweichungen hängen somit vom Verhältnis der Längs- zur Querbiegesteifigkeit ab.

Vergleicht man die Werte der mitwirkenden Breiten stellt die größte absolute Abweichung 25cm dar (RSTAB bef = 2m, Handrechnung bef = 1,75m). Die größte mitwirkende Breite wurde bei großer Spannweite, großer Raumbreite und System mit Zementestrich berechnet (RSTAB bef = 2,19m, Handrechnung bef = 2,26m). Die kleinste mitwirkende Breite wurde bei geringer Spannweite, geringer Raumbreite und System mit Trockenestrich berechnet (RSTAB bef = 1,03m, Handrechnung bef = 1,07m), vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Ergebnisse aus den Vergleichsberechnungen zur mittragenden Breite, aus [Glück, 2017]

System	6 m Spannweite 5 m Raumbreite			3 m Spannweite 2,5 m Raumbreite			3 m Spannweite 8 m Raumbreite			8 m Spannweite 2,5 m Raumbreite			8 m Spannweite 8 m Raumbreite			
	ZE	AE	TE	ZE	AE	TE	ZE	AE	TE	ZE	AE	TE	ZE	AE	TE	
Estrichart																
Balkenbreite	0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	[m]
Balkenhöhe	0,32	0,32	0,32	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	[m]
Balkenabstand	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	[m]
$E_{0,mean}$	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000	[N/mm ²]
E_I	8,651	8,651	8,651	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	0,937	20,123	20,123	20,123	20,123	20,123	20,123	[MNm ² /m]
$E_{I,Estrich}$	8,841	8,757	8,674	1,127	1,043	0,960	1,127	1,043	0,960	20,313	20,229	20,145	20,313	20,229	20,145	[MNm ² /m]
Estrichbreite	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	[m]
Estrichhöhe	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	[m]
$E_{Estrich}$	25000	14000	3000	25000	14000	3000	25000	14000	3000	25000	14000	3000	25000	14000	3000	[N/mm ²]
E_{I_b}	0,190	0,106	0,023	0,190	0,106	0,023	0,190	0,106	0,023	0,190	0,106	0,023	0,190	0,106	0,023	[MNm ² /m]
Deckenfeldbreite b	5,00	5,00	5,00	2,50	2,50	2,50	8,125	8,125	8,125	2,50	2,50	2,50	8,125	8,125	8,125	[m]
Deckenlänge l	6,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	[m]
$b_{w(1kN)}$	2,09	1,81	1,23	1,75	1,54	1,07	1,75	1,54	1,07	2,26	1,96	1,33	2,26	1,96	1,33	[m]
$f_{1,Platte}$	8,39	8,27	8,15	13,61	12,41	11,08	11,74	11,29	10,82	9,84	8,70	7,37	7,03	7,00	6,97	[Hz]
w_{1kN}	0,24	0,28	0,42	0,29	0,35	0,55	0,29	0,35	0,55	0,23	0,27	0,40	0,23	0,27	0,40	[mm]

RSTAB

$w_{1kN,RSTAB}$	0,26	0,30	0,43	0,33	0,39	0,57	0,25	0,36	0,56	0,26	0,30	0,44	0,24	0,28	0,41	[mm]
b_{ef} rückgerechnet	1,96	1,71	1,21	1,51	1,38	1,03	2,00	1,50	1,05	2,02	1,76	1,20	2,19	1,88	1,29	[m]
b_{ef} vgl. von Hand	2,09	1,81	1,23	1,75	1,54	1,07	1,75	1,54	1,07	2,26	1,96	1,33	2,26	1,96	1,33	[m]
Abweichung in %	6,2%	5,4%	2,3%	13,4%	10,3%	4,0%	14,3%	2,8%	2,2%	10,7%	10,2%	9,8%	3,2%	3,8%	3,2%	[%]

In allen Fällen ist die mittragende Breite größer als 1 m. Im Fall der ungünstigsten Abmessungen (3 m Spannweite) liegt der Wert für die mittragende Breite bei 1,03 m, für größere Spannweiten und Breiten bei 1,30 m.

Im Bemessungsvorschlag (Kapitel 4.1) wird vorgeschlagen, mindestens zwei tragende Balken anzusetzen. Hier liegt auch die Annahme zugrunde, dass die Last (Fußauftritt) mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen zwei Balken angreift und somit automatisch 2 Balken an der Lastabtragung beteiligt sind. Für einen Balkenabstand von 0,625 m liegt der zweifache Wert (1,25 m) sehr nahe an den rechnerisch ermittelten Werten.

3.5. Diskussion, welche mitschwingende Masse angesetzt werden kann

Im Rahmen einer Bachelorarbeit, vgl. [Pfauth, 2014] wurden Holzdecken an zehn Gebäuden, sowohl rechnerisch als auch anhand von Schwingungsmessungen untersucht.

Ein Themenschwerpunkt ist die mitschwingende Breite beim Beschleunigungsnachweis oder „genauere Untersuchung“:

Bei der Auswertung der Messungen wurde festgestellt, dass der Faktor von $1,5 \cdot L$ zur Begrenzung der mitschwingenden Breite zu groß ist. Pfauth schlägt noch genauere Untersuchungen vor.

Die Untersuchungen in [Pfauth, 2014] beschränken sich auf Deckentypen der Lignotrend Produktions GmbH. Das sind vorgefertigte Deckenelemente mit optimierten tragenden Querschnitten für einachsige Spannrichtung.

Für andere Bauweisen gilt:

Bei Holzbalkendecken gelingt der Beschleunigungsnachweis aufgrund zu geringer Massen ohnehin nicht. Bei Holz-Beton-Verbunddecken und bei Brettsperrholzdecken ist die Querbiegesteifigkeit höher als bei den beschriebenen Deckenelementen, so dass vorgeschlagen wird, dort die Begrenzung von $1,5 \cdot L$ anzusetzen.

3.6. Diskussion, ob andere Nachweismethoden günstiger sind

In anderen Ländern gelten andere Vorschriften für den Schwingungsnachweis. In diesem Kapitel wird gegenübergestellt, wie gut die Nachweismethoden aus Österreich, Kanada und Finnland zur subjektiven Wahrnehmung passen.

Schütz [Schütz, 2017] hat in seiner Bachelorarbeit die Messdaten der im Rahmen des Forschungsvorhabens gemessenen Decken nach den unterschiedlichen Methoden ausgewertet.

Österreich

Mit nur kleinen Abweichungen wurden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in den Nationalen Anhang in Österreich aufgenommen, vgl. [ÖNORM B 1995-1-1/NA 2013]. Auch die drei Deckenklassen der ÖNORM entsprechen den Einstufungen nach dem Forschungsvorhaben. Unten stehende Abbildung zeigt die Auswertung und die gute Übereinstimmung.

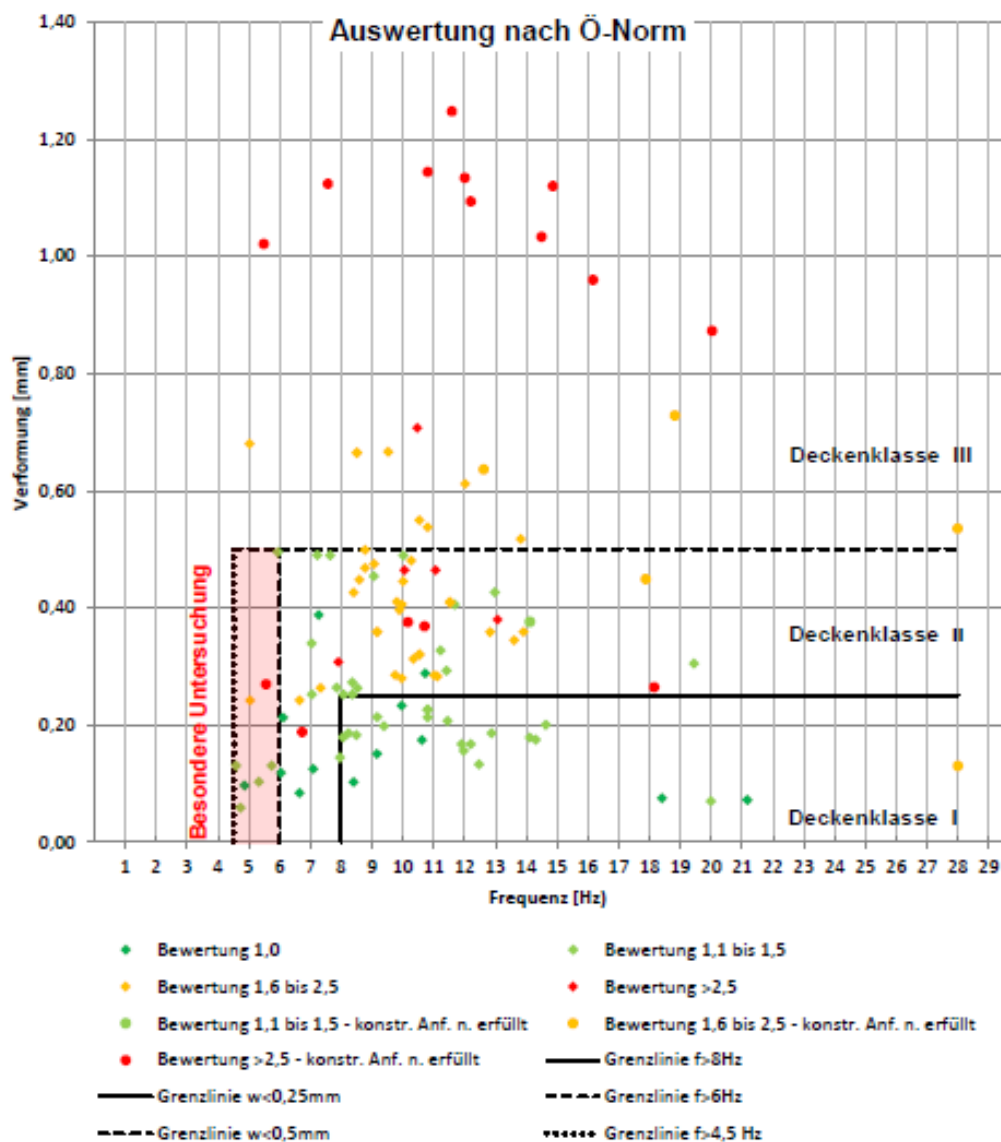


Abb. 9: Auswertung der Messdaten nach [ÖNORM B 1995-1-1/NA 2013], aus [Schütz, 2017]

Kanada

Lin Hu versuchte in ihren Forschungen die Akzeptanz von Decken hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens mit analytischen Parametern, wie z.B. der Eigenfrequenz, Durchbiegung, Beschleunigung oder Geschwindigkeit der Decke in Zusammenhang zu bringen. Aus Feld- und Labormessungen erarbeitet Hu gleich fünf mögliche Gleichungen, mit denen die Gebrauchstauglichkeit von Holzdecken im Hinblick auf ihr Schwingungsverhalten beurteilt werden kann. Alle fünf Kriterien führen zu einem adäquaten Ergebnis für die Beurteilung, ob die vorliegende Decke für Personen in Sachen Schwingungen akzeptabel ist oder nicht. Aufgrund der einfachen Ermittlung der Parameter in Gleichung (Gl. (4)) wurde dieses als Hauptbemessungskriterium festgelegt, vgl. [Hu, 2002].

$$f_1 \cdot \frac{1}{w_{1kN}^{0,39}} \geq 15,3 \quad \text{Gl. (4)}$$

f_1 Eigenfrequenz

w_{1kN} Verformung unter einer 1kN Punktlast

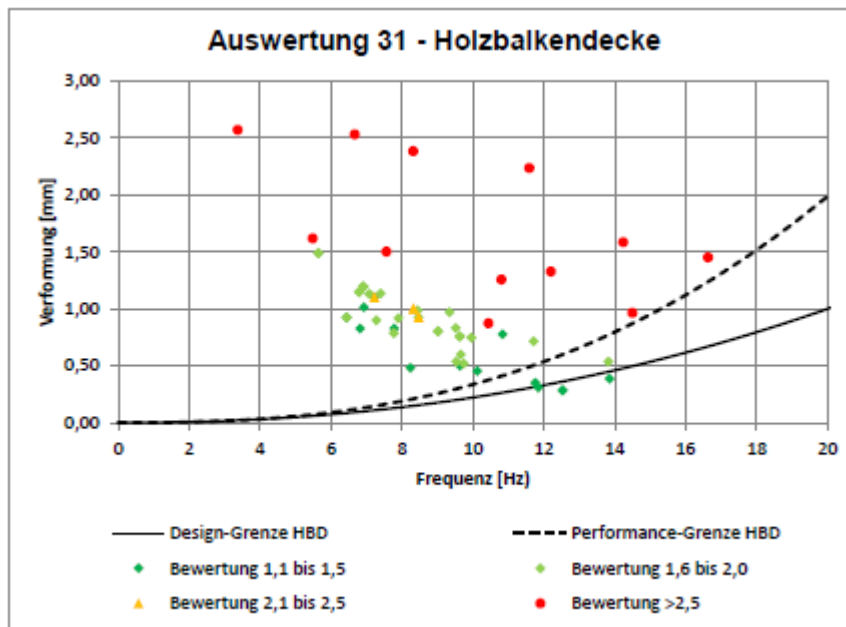
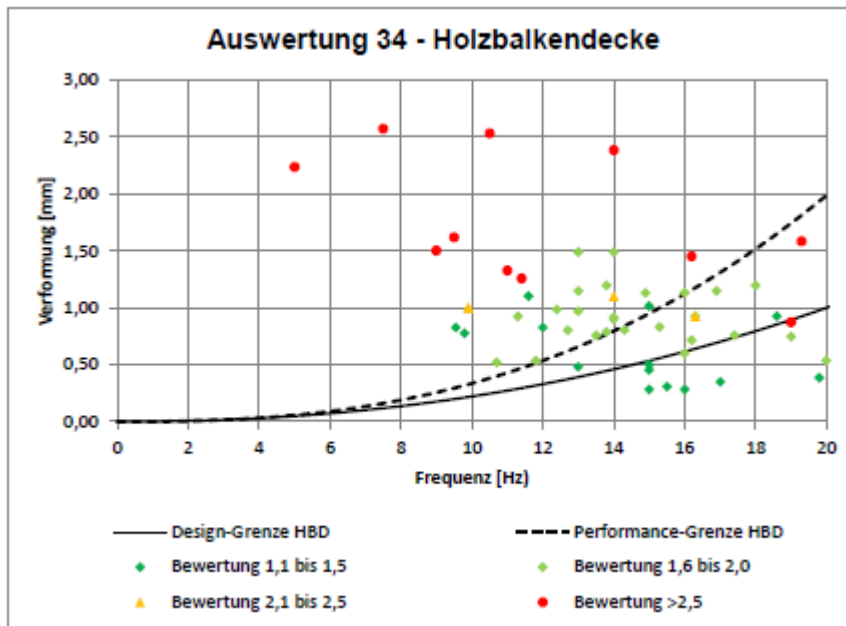


Abb. 10: Auswertung der Messdaten nach [Hu, 2002], aus [Schütz, 2017]

Abbildung 10 zeigt die Daten des Forschungsvorhabens wie Eigenfrequenz, Durchbiegung unter 1 kN und die Bewertung, sowie die Kurve nach Gl. (4).

Es zeigt sich sehr deutlich, dass Gleichung (Gl. (4)) keine vernünftigen Ergebnisse zur Bewertung der „deutschen“ Decken hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens liefert. Fast alle Decken werden nach dieser Gleichung als nicht Akzeptabel eingestuft, egal ob diese eine subjektive Bewertung von 1,0 oder >2,5 besitzen (s. Abb. 10).

Wird nicht die berechnete sondern die gemessene Frequenz aufgetragen, lässt sich eine leichte Tendenz erkennen, dass das Verfahren nach Hu eine brauchbare Einteilung der Decken ermöglicht, vgl. Abb. 11. Jedoch beide vorgestellten Grenzen, die Performance- als auch die Design-Grenze, liefern hier sehr konservative Ergebnisse. Viele der Decken bleiben trotz guter Bewertung weiterhin im nicht Akzeptablen Bereich.

**Abb. 11: Auswertung der Messdaten nach [Hu, 2002], aus [Schütz, 2017]**

Weitere Untersuchungen zeigen deutlich, dass das Kriterium nach Hu vor allem bei der Verwendung von gemessenen Frequenzen und genauerer Berechnung der Verformung sehr gut funktioniert. Hingegen bei der rechnerischen Bewertung mit Ansatz der Querbiegesteifigkeit werden gerade im unteren Frequenzbereich von 6 Hz bis 10 Hz viele Decken trotz guter Einschätzung von Nutzern als nicht Akzeptabel hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens eingeteilt. Ein Grund dafür ist vor allem die große Diskrepanz zwischen berechneter und gemessener Frequenz. Im Durchschnitt besitzen die 57 linienförmigen Decken eine um 5,1 Hz größere gemessene Eigenfrequenz als die berechnete.

Allgemein stellt sich jedoch die Frage, ob das Kriterium nach Hu für Frequenzen unter 10 Hz geeignet ist. Ihren Forschungen liegen überwiegend Decken mit Eigenfrequenzen über 10 Hz zugrunde. Zudem ist keine einzige Decke mit einer Eigenfrequenz kleiner 10 Hz, die ein gutes Schwingungsverhalten aufweist, in den Messdaten vorhanden, siehe [Hu, 2002] und [Hu u. a., 2015].

In einem Abstract für die WCTE 2018 [Hu u. a., 2018] werden die Schwingungsnachweise und Einschätzungen der Länder Kanada, Finnland und Deutschland verglichen. Es wurde festgestellt, dass die Kanadier toleranter mit den Schwingungen umgehen als die Deutschen. „Regardless of the all potential variations, it still can be clearly observed that Canadians were more tolerant to floor vibration than the Germans.“

Finnland

Toratti und Talja eröffneten mit ihrem Beitrag „*Classification of human induced floor vibrations*“ [Toratti u. Talja, 2006] eine Möglichkeit, Decken nicht nur mithilfe von rechnerischen Methoden einzuteilen, sondern auch über Messungen beurteilen zu können, ob die vorliegende Decke schwingungsanfällig ist oder nicht. Hierbei können die Decken in verschiedene Klassen von A bis E eingeteilt werden, wobei A die höchsten und E gar keine Anforderungen gegen Schwingungen stellt. Tabelle 2 zeigt, welche Klasse für welche Anwendung geeignet ist.

Insgesamt gibt es fünf Schwingungsklassen.

Tabelle 2: Schwingungsklassen nach Toratti und Talja, aus [Schütz, 2017]

A	Spezielle Anforderungen für Schwingungen innerhalb einer Wohnung Normale Anforderungen für Schwingungen bei Decken zwischen zwei Wohneinheiten Die Schwingungen sind normalerweise nicht wahrnehmbar
B	Erhöhte Anforderungen für Schwingungen innerhalb einer Wohnung Niedrige Anforderungen für Schwingungen bei Decken zwischen zwei Wohneinheiten
C (standard Klasse)	Die Schwingungen können wahrgenommen werden, sind aber nicht störend (innerhalb einer Wohneinheit) Normale Anforderungen für Schwingungen innerhalb einer Wohnung Die Schwingungen werden oft wahrgenommen und manche empfinden diese als störend (innerhalb einer Wohneinheit)
D	Niedrige Anforderungen für Schwingungen innerhalb einer Wohnung
	Die Schwingungen sind spürbar und die meisten empfinden diese als störend (innerhalb einer Wohneinheit)
E	Ohne Anforderungen

Bei der Einteilung der Böden wird nach [Toratti u. Talja, 2006] zuerst untersucht, ob es sich bei der vorliegenden Decke um eine hoch- oder niederfrequente Konstruktion handelt. Alle Decken mit Frequenzen > 10 Hz sind nach Toratti und Talja hochfrequent. Die Ermittlung der Frequenz kann durch Berechnung oder durch Messung erfolgen.

Tabelle 3 zeigt die Grenzwerte der Parameter je Deckenklasse, wobei die Grenzwerte für Deckenabmessungen kleiner als 6 m variiert werden dürfen.

Tabelle 3: Grenzwerte nach Toratti und Talja, aus [Schütz, 2017]

	Dynamische Parameter				Statische Parameter	
	$f_0 < 10\text{Hz}$	$f_0 \geq 10\text{Hz}$			$f_0 \geq 10\text{Hz}$	Bodenplatte oder Aufbau
	a_{rms} [m/s ²]	v_{max} [mm/s]	v_{rms} [mm/s]	$ u_{max} $ [mm]	δ_0 [mm/kN]	δ_1 [mm/kN]
A	$\leq 0,03$	≤ 4	$\leq 0,3$	$\leq 0,05$	$\leq 0,12$	$\leq 0,12$
B	$\leq 0,05$	≤ 6	$\leq 0,6$	$\leq 0,1$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$
C	$\leq 0,075$	≤ 8	$\leq 1,0$	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$	$\leq 0,50$
D	$\leq 0,12$	≤ 10	$\leq 1,5$	$\leq 0,4$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$
E	$> 0,12$	> 10	$> 1,5$	$> 0,4$	$> 1,0$	$> 1,0$

Die Werte nach Tabelle 3 sind überwiegend für eine Messung ausgelegt. Bei der Beurteilung einer Decke durch Messungen muss die Decke schon fertiggestellt sein. Die Messungen können an einer Standarddecke (Prototyp) durchgeführt werden, oder es handelt sich um einen Schadensfall.

Folgende Punkte lassen sich dennoch für eine Bemessungsvorschrift für die Tragwerksplaner ablesen und mit denen aus dem Forschungsvorhaben vergleichen:

Im Frequenzbereich unterhalb von 10 Hz wird Resonanz unterstellt. Der Grenzwert der Beschleunigung ist im gleichen Bereich wie die Grenzwerte, die im Forschungsvorhaben [Winter/Hamm/Richter, 2010] vorgeschlagen werden, nämlich 0,05 m/s² für höhere Anforderungen und 0,1 m/s² für geringere Anforderungen.

Die Grenzwerte für die Durchbiegung unter Einzellast sind auch im gleichen Bereich:

In Tabelle 3 wird mit einer Last von 1 kN gerechnet und ein Grenzwert von 0,12 mm für die höchste Klasse empfohlen, sowie ein Grenzwert von 0,25 mm für die zweitbeste Kategorie.

Wird der Grenzwert aus dem Forschungsvorhaben [Winter/Hamm/Richter, 2010] für eine Last von 2 kN auf 1 kN umgerechnet, ergibt sich ein Grenzwert von $0,5\text{mm} \cdot \frac{1}{2} = 0,25\text{ mm}$ für „Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten“.

Auch der Grenzwert für „Decken innerhalb einer Nutzungseinheit“ [Winter/Hamm/Richter, 2010] findet sich wieder: $1,0\text{ mm} \cdot \frac{1}{2} = 0,5\text{ mm}$ im Bereich „normale Anforderungen“ innerhalb einer Wohnung.

Sowohl beim Frequenzkriterium (10 Hz anstatt 8 Hz) als auch beim Steifigkeitskriterium (0,12 mm anstatt 0,25 mm) ist der Vorschlag nach [Toratti u. Talja, 2006] strenger.

In Finnland gibt es fünf Schwingungsklassen. Auch in Deutschland wird über eine weitere Aufteilung diskutiert.

3.7. Diskussion, ob eine weitere Anforderungsklasse eingeführt werden sollte

Walter Bauer von Holzbau Deutschland brachte den Vorschlag, eine weitere Qualitätsklasse einzuführen, vgl. [Holzbau Deutschland, 2017]. Dazu folgende Begründung von einer Mail vom 10.5.2017 von Walter Bauer:

„Im Prinzip hat sich Holzbau Deutschland seit Mitte 2009 Gedanken zu der Thematik gemacht, was der richtige Weg ist. Dabei ist man auf folgendes Ergebnis gekommen:

Nachdem sich **Klassensysteme** beim Trockenbau im Form von 4 Qualitätsstufen Q1 bis Q4 sehr gut bewährt haben und ebenso im Schallschutz das DEGA Klassensystem eingeführt wurde und sich bewährt hat ist der Gedanke entstanden, ebenfalls ein **Klassensystem** in Form von **Qualitätsklassen** einzuführen. Letztlich ist es eine Beratungshilfe für Planer um Bauherren die Auswahl zu erläutern.“

Anmerkung:

Hierfür ist Tabelle 4 ausgearbeitet worden. Sie beschreibt die zu erwartenden Verformungen und Schwingungen verständlich auf für Baulaien.

„Die technischen Werte in Tabelle 3 sind dagegen, durch Berechnung, **klare nachvollziehbare technische Werte** und geben deswegen mehr Rechtssicherheit und reduzieren Streitfälle.

Auch in Verbindung mit Tabelle 1 in der die Qualitätsklassen **verbal beschrieben** sind, kann ein **Baulaie die Unterschiede** erkennen und sich somit entscheiden. Der Architekt und Ingenieur hat dadurch den Vorteil, dass er sich nicht mehr in der Vereinbarungshaftung sondern allenfalls in der Beratungshaftung befindet. Was juristisch ein viel geringeres Risiko darstellt.

Entscheidendes Ziel bei der Definition von Qualitätsklassen war auch, dass das Bauen im eigenen Bereich für die Bauherren bezahlbar bleibt! Deutschland hat in Europa mit Abstand die geringste Wohneigentumsquote, dies darf nicht noch weniger werden, in dem man „im eigenen Bereich“ die Latte ungefragt immer höher legt.

Wichtig ist uns deswegen dabei die **Klasse C** (nicht höchste aber sehr wohl ausreichende Qualität). Bei der Frequenz sind die 5,6 Hz nicht so weit von den 6,0 Hz entfernt. Die Durchbiegung $L/220$ mag auf den ersten Blick etwas höher sein. Dies relativiert sich jedoch sehr schnell, da bei kleinen Spannweiten der absolute Wert nicht groß ist und mit zunehmender Spannweite sowieso das Schwingen maßgebend wird, was automatisch höhere Trägheitsmomente zur Folge hat, denn **statische Durchbiegung und Schwingen sind gemeinsam in einer Qualitätsklasse abgebildet**.

Gebrauchstauglichkeit dient nicht der öffentlichen Sicherheit und ist im Widerspruch zur freien Qualitätswahl der Bürger (Kundenwillen). Das EuGH Urteil vom Oktober 2014 zielt genau in diese Richtung! Aus diesem Grund ist der Gedanke der Qualitätsklassen mit der **Wahlmöglichkeit der Bauherren** entstanden.“

Die Einteilung in die Qualitätsklassen nach Tabelle 4 wird aktuell noch in Fachkreisen diskutiert. Sie ist also noch im Entwurfsstadium, dennoch wird sie im Bemessungsvorschlag Kapitel 4 berücksichtigt.

Vereinfachte Ansätze zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und zum Schwingungsnachweis**Tabelle 4: Beschreibung der Qualitätsklassen und Zuordnung der Grenzfrequenzen aus [Holzbau Deutschland, 2017] – ENTWURF –**

		Beschreibung
Qualitätsklasse	A	Überdurchschnittliche Anforderungen gegenüber üblichen Anforderungen
	B	Anforderungen innerhalb einer Nutzungseinheit (z.B. Ein-/ Zweifamilienhaus oder übliche Büronutzung). Die Verformungen und Schwingungen des Tragwerks sind nur mit besonderer Aufmerksamkeit wahrnehmbar
	C	Anforderungen an Bauteile, deren Verformungen ohne besondere Aufmerksamkeit wahrnehmbar sind, jedoch nicht das Gesamterscheinungsbild prägen, z.B. Decken bei Einfamilienhäusern und Büros jeweils mit geringen Anforderungen an das Schwingungsverhalten
	D	Anforderungen an Bauteile, bei denen wahrnehmbare Verformungen das Gesamtbild prägen dürfen. Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten.

4. Bemessungsvorschlag für den Schwingungsnachweis bei Holzdecken

4.1. Allgemein bei starr (auf Wänden) gelagerten Decken

In Anlehnung an den Forschungsbericht [Winter/Hamm/Richter, 2010] wird folgendes Vorgehen beim Schwingungsnachweis von Holzdecken, vgl. Abb. 12 empfohlen. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erklärt. Falls die Decke nachgiebig auf Unterzügen gelagert ist, ist zusätzlich Kapitel 4.2 zu beachten.

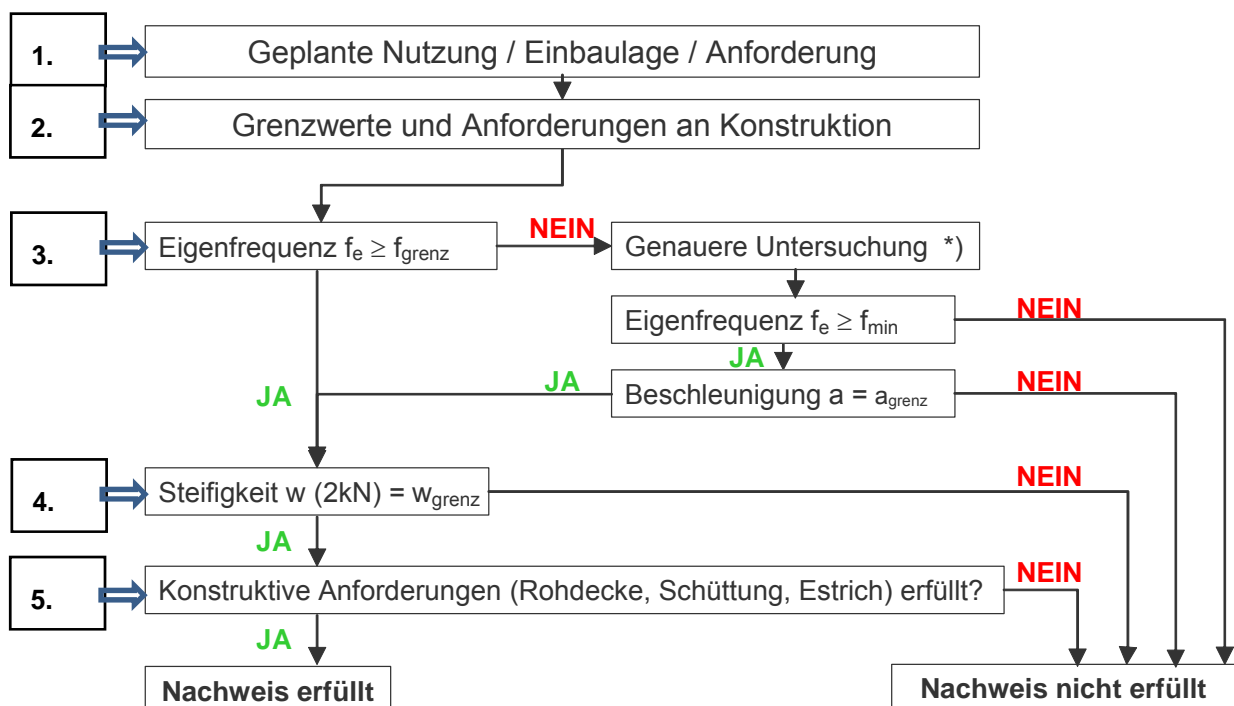
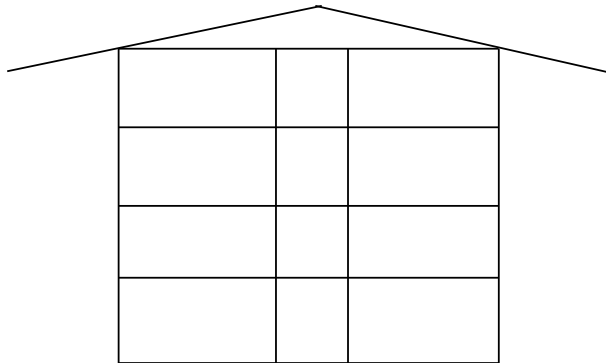


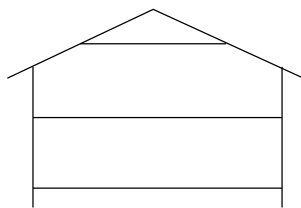
Abb. 12: Nachweis nach den Konstruktions- und Bemessungsregeln aus dem Forschungsvorhaben [Winter/Hamm/Richter, 2010]. *) Die genauere Untersuchung ist i. A. nur bei schweren Decken, z. B. bei Holz-Beton-Verbunddecken Erfolg versprechend.

Zu 1.: Geplante Nutzung / Einbaulage / Anforderung

Höhere Anforderungen für Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten, z.B. Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude, Schulen, Kindergärten, auch kostspielige Einfamilienhäuser etc. im Forschungsbericht „Bewertung 1,0 bis 1,5“, Holzbau Deutschland „Qualitätsklasse A“

**Abb. 13: Beispiel für Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten**

Geringere Anforderungen für Decken innerhalb einer Nutzungseinheit, z. B. „normale“ Einfamilienhäuser im Forschungsbericht „Bewertung 1,5 bis 2,5“, Holzbau Deutschland „Qualitätsklassen B und C“

**Abb. 14: Beispiel für Decken innerhalb einer Nutzungseinheit (EFH)**

Vorschlag von Holzbau Deutschland zur Unterteilung der Anforderungen bei EFH, noch im Entwurfsstadium, siehe oben:

Qualitätsklasse B: Anforderungen innerhalb einer Nutzungseinheit (z.B. Ein-/ Zweifamilienhaus oder übliche Büronutzung). Die Verformungen und Schwingungen des Tragwerks sind nur mit besonderer Aufmerksamkeit wahrnehmbar

Qualitätsklasse C: Anforderungen an Bauteile, deren Verformungen ohne besondere Aufmerksamkeit wahrnehmbar sind, jedoch nicht das Gesamterscheinungsbild prägen, z.B. Decken bei Einfamilienhäusern und Büros jeweils mit geringen Anforderungen an das Schwingungsverhalten

Keine Anforderungen für Decken unter untergeordneten Räumen, z. B. nicht ausgebaute Dachräume oder im Bestand. Immer mit Bauherrn- Zustimmung im Forschungsbericht „Bewertung 2,5 bis 4,0“, Holzbau Deutschland „Qualitätsklasse D“

Zu 2.: Grenzwerte und Anforderungen an Konstruktion

Die empfohlenen Grenzwerte (Tab. 5) für die Eigenfrequenz und Durchbiegung unter Einzellast sind dem Forschungsbericht [Winter/Hamm/Richter, 2010] entnommen und um die Qualitätsklassen aus [Holzbau Deutschland, 2017] ergänzt.

Tabelle 5: Grenzwerte für die Eigenfrequenz und Durchbiegung unter Einzellast – noch im Entwurfsstadium –

Bewertung		1,0 bis 1,5	1,5 bis 2,5			2,5 bis 4,0
Beschreibung nach Forschungsbericht Winter/Hamm/Richter		MFH, auch Büros, Klassenräume in Schulen, Kindergärten		EFH		
Qualitätsklasse nach Holzbau Deutschland *)	A+	A	B		C	D
f_{Grenz}		8 Hz	6,3 Hz *)	6 Hz	5,6 Hz *)	Keine Anforderung
w_{Grenz}		0,5 mm	0,75 mm *)	1,0 mm	1,5 mm *)	Keine Anforderung

*) diese Werte sind derzeit noch in Diskussion

Zu 3. Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz der Decke soll größer sein als der Grenzwert f_{grenz} nach Tabelle 5. Die Eigenfrequenz kann durch Messung oder Berechnung ermittelt werden.

Eine Messung kann z.B. bei Standarddecken im Vorfeld im Betrieb sinnvoll sein. Bei der Berechnung darf das tatsächliche statische System angesetzt werden, z. B. eine Durchlaufträgerwirkung. Die Biegesteifigkeit des Estrichs darf rechnerisch angesetzt werden. Für die Masse darf allein die Eigenmasse angesetzt werden. Verkehrslast und Trennwandzuschlag müssen nicht eingerechnet werden. Lagerungen auf nachgiebigen Unterzügen müssen berücksichtigt werden, vgl. Kapitel 4.2.

$$f_{e,\text{Einfeld-Balken}} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{m}} \quad \text{Eigenfrequenz eines Einfeldträgers mit } I = \frac{h^3 \cdot b_{\text{Balken}}}{12} \quad \text{Gl. (5), (6)}$$

$$f_{e,\text{Zweifeld-Balken}} = k_f \cdot f_{e,\text{Einfeld-Balken}} \quad \text{Eigenfrequenz eines Zweifeldträgers mit } k_f \text{ nach Tabelle 6} \quad \text{Gl. (7)}$$

$$f_{e,\text{Platte}} = f_{e,\text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} \quad \text{Eigenfrequenz einer Platte mit vierseitiger gelenkiger Lagerung} \quad \text{Gl. (8)}$$

$$\alpha = \frac{b}{L} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_L}{EI_b}} \quad \text{Beiwert zur Berechnung der zweiachsigen Tragwirkung} \quad \text{Gl. (9)}$$

- L:** Spannweite beim Einfeldträger.
Beim Mehrfeldträger: Spannweite des größten Feldes.
- L_1 :** Beim Zweifeldträger: Spannweite des kleineren Feldes
- m:** Masse infolge Eigengewicht der Decke in [kg/m²]
ohne Verkehrslast und Trennwandzuschlag
- b:** Spannweite der Decke in Querrichtung oder Deckenfeldbreite
- EI_L :** effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung je Meter Breite in [Nm²/m]:
Biegesteifigkeit der Decke + Biegesteifigkeit des Estrichs **)
- EI_b :** effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung in [Nm²/m] mit $(EI)_L > (EI)_b$:
Biegesteifigkeit der Decke + Biegesteifigkeit des Estrichs **)
- E_{Estrich} :** Falls kein genauere Wert bekannt ist, wird empfohlen mit einem E-Modul für den Nassestrich von $E = 15\,000 \text{ N/mm}^2$ zu rechnen.
- $EI_{\text{quer BST}}$:** Brettstapel, genagelt oder gedübelt: $EI_{\text{quer}} = 0,0005 EI_{\text{längs}}$
Brettstapel geklebt: $EI_{\text{quer}} = 0,03 EI_{\text{längs}}$
- **)** 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 müssen bei der Ermittlung der Querbiegesteifigkeit berücksichtigt werden.

Tabelle 6: Faktor zur Umrechnung der Eigenfrequenz von Einfeldträgern auf Zweifeldträger

L_1 / L	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
k_f	1,0	1,09	1,15	1,20	1,24	1,27	1,30	1,33	1,38	1,42	1,56

Zu 4.: Steifigkeit bzw. Nachweis der Durchbiegung unter Einzellast

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN soll kleiner sein als der Grenzwert w_{grenz} nach Tab. 5.

$$w(2\text{kN}) = \frac{2 \cdot L^3}{48 \cdot E I_L \cdot b_{w(2\text{kN})}} \quad \text{Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$b_{w(2\text{ kN})} = \min \left\{ \begin{matrix} b_{\text{ef}} \\ b \end{matrix} \right\} \quad \text{mittragende Breite mit}$$

$$b_{\text{ef}} = \frac{L}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{E I_b}{E I_L}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha} \quad \text{Gl. (11), (12)}$$

$$\text{Bei Trockenestrich: } b_{w(2\text{ kN})} = \begin{cases} 2\text{-facher Balkenabst. tan d} \\ 2\text{-fache Elementbreite} \end{cases} \quad \text{Gl. (13)}$$

Anmerkungen und Hintergründe:

- Wird eine Einzellast von 1 kN angesetzt, halbieren sich die Grenzwerte nach Tabelle 5.
- Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung nicht berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem eines beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträgers, L ist gleich die Spannweite des größten Feldes.
- Hintergrund ist die Tatsache, dass das Schwingungsempfinden bei Durchlaufträgern ungünstiger ist als bei Einfeldträgern (vgl. Abb. 15). Das liegt zum einen daran, dass sich ein Feld nach unten und das andere (unerwartet) nach oben bewegt und zum anderen der Schwingungserreger wegen evtl. vorhandenen Wänden nicht gesehen wird. Dieses ungünstige Verhalten von Durchlaufträgern wird rechnerisch nicht berücksichtigt, dafür wird die günstig wirkende Einspannung bei der Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast ebenfalls nicht angesetzt.

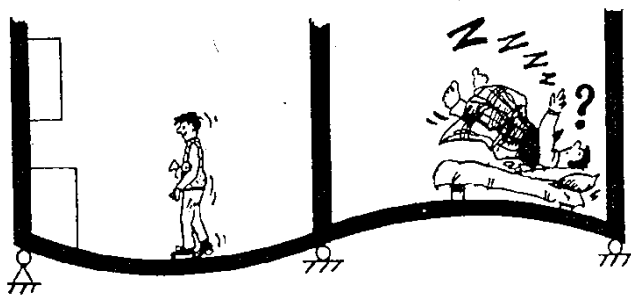


Abb. 15: Schwingungen bei Durchlaufträgern. Aus [Ohlsson, 1982]

- Bei Decken ohne nennenswerte Querbiegesteifigkeit, z. B. bei Trockenestrichaufbau kann für die mittragende Breite der zweifache Balkenabstand angesetzt werden. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die Last zwischen zwei Balken aufgebracht wird und sich beide Balken an der Lastabtragung beteiligen.
- Bei Elementdecken, z. B. Leimstapeldecken, dürfen zwei Elemente angesetzt werden, wenn diese miteinander verbunden sind.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der Einzellast $w(2\text{kN})$ die Nachgiebigkeit der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen, vgl. Kapitel 4.2.

Zu 5.: Konstruktive Anforderungen an den Aufbau der Decke

Entscheidend für das Schwingungsempfinden ist neben der Eigenfrequenz und der Steifigkeit auch der Aufbau der Decke.

- Eine schwimmende Lagerung des Estrichs ist in jedem Fall erforderlich.
- Nassestriche sind aufgrund ihrer höheren Masse und höheren Steifigkeit gegenüber Trockenestrichen günstiger zu bewerten.
- Eine (möglichst schwere) Schüttung verbessert das Schwingungsverhalten. Gleichzeitig bietet sie die Möglichkeit der Installationsführung. 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 Kalksplittschicht. Ob und welche Art der Schüttung erforderlich ist, kann Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Konstruktive Anforderung je nach Art der Rohdecke, Einbaulage und Bewertung

Art der Rohdecke	Art des Estrichs	Bewertung 1,0 bis 1,5 Qualitätsklasse A	Bewertung 1,5 bis 2,5 Qualitätsklasse B und C
Flächige Massivholzdecken (Brettsperholz- 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	nicht möglich	schwimmend auf schwerer Schüttung

- ***) ... bis jetzt nur im Labor getestet.

4.2. Ergänzung für nachgiebig (auf Unterzügen) gelagerte Decken

Die unter 4.1 beschriebenen Berechnungen für die Eigenfrequenz und die Durchbiegung unter Einzellast gehen von festen Auflagern auf Wänden auf. Oft treten Probleme auf, weil die Decke nachgiebig auf Unterzügen aufliegt und die Nachgiebigkeit in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde. Haupt- und Nebenträger sind dann nicht mehr getrennt zu betrachten, sondern als ein kombiniertes System, wie Abbildung 16 verdeutlicht. Wie die gemeinsame Wirkung Holzdecke und Unterzug als gesamtes System rechnerisch erfasst werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

Holzträger als Durchlaufträger:

Vor allem bei Decken mit durchlaufenden Holzbalken und Unterzügen als Mittelaufleger spielt das Verhältnis der Steifigkeiten Holzbalken zu Unterzug eine große Rolle.

Holzbalken, die als Durchlaufträger über ein Mittelaufleger geführt werden, werden je nach Verhältnis der Steifigkeiten überwiegend Schwingungen mit einem „großem“ Sinusbogen (Abbildung 16 oben) oder Schwingungen mit einer Doppelwelle (Abbildung 16 unten) ausführen. Zwischen den Eigenfrequenzen der beiden Extremfälle liegt Faktor 4.

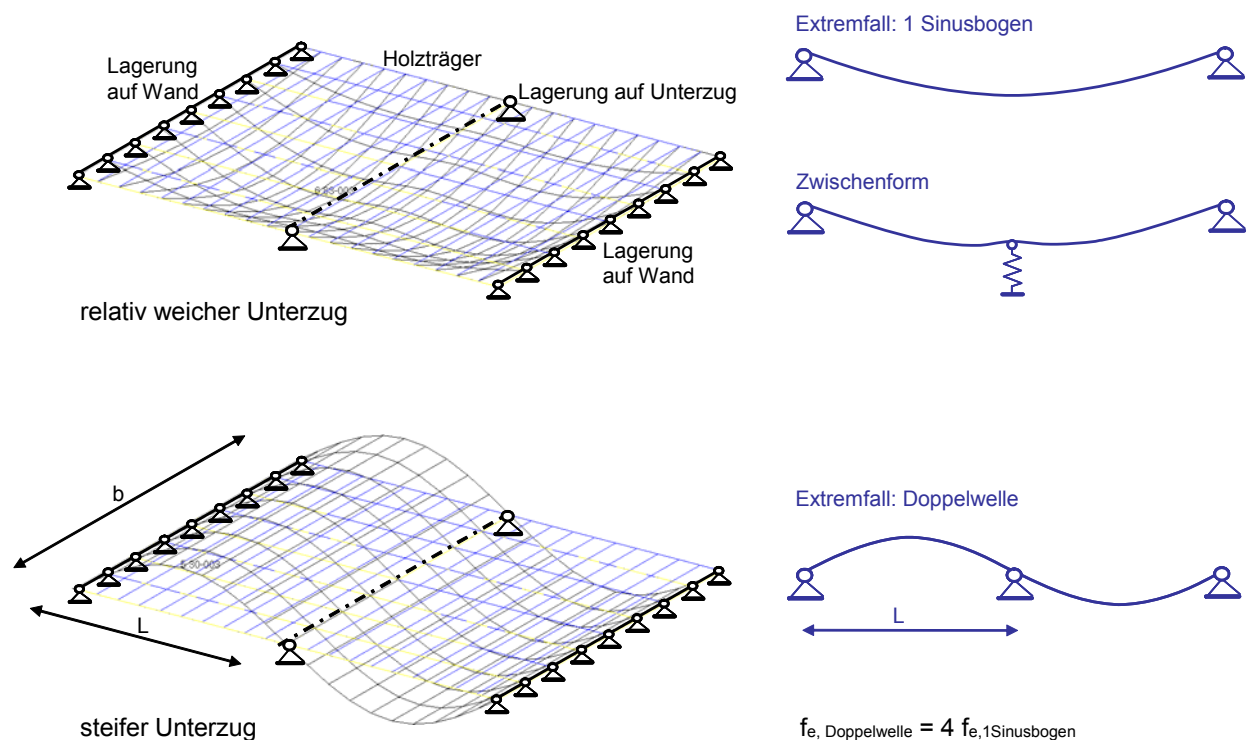


Abb. 16: Erste Eigenform der Decke gesamt sowie eines einzelnen Holzträgers je nach Steifigkeit des Unterzugs, aus [Hamm, 2008]

Im Rahmen mehrerer Abschlussarbeiten an der Hochschule Biberach, z.B. [Stumpf, 2015] wurden Korrekturfaktoren e_f zur Ermittlung der resultierenden Eigenfrequenz berechnet.

Die Korrekturfaktoren e_f werden wie folgt verwendet:

$$f_{e,nachgiebig} = f_{e,ges} = e_f \cdot f_{e,starr} \quad \text{Gl. (14)}$$

Darin sind: e_f der Korrekturfaktor nach den Tabellen im Anhang und $f_{e,starr}$ die Eigenfrequenz der Decke, wenn sie starr (z.B. auf Wänden) gelagert wäre. Unter bestimmten Bedingungen ergeben sich rechnerisch Korrekturfaktoren $e_f > 1$. In diesen Fällen sollte mit $e_f = 1$ gerechnet werden.

Die Korrekturfaktoren e_f sind abhängig

- von den Steifigkeitsverhältnissen Decke zu Unterzug
- von den Spannweitenverhältnissen Deckenfeld (mit L oder L_{Decke} bezeichnet) zu Unterzug (mit b oder $L_{Unterzug}$ bezeichnet)
- und von den absoluten Spannweiten der Decke.

Deshalb werden die Diagramme und Tabellen (vgl. Anhang) für unterschiedliche absolute Spannweiten angegeben. Erstmals wurden sie in [Hamm, 2016] veröffentlicht.

Rechnerische Erfassung der resultierenden Eigenfrequenz

Rechnerisch kann die resultierende Eigenfrequenz entweder mit Hilfe von FE Programmen erfasst werden, oder mit Hilfe der Näherungsformel (Gl. (15)).

$$f_{e,ges} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{e,starr}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{e,Unterzug}^2}}} \quad \text{Gl. (15)}$$

$f_{e,starr}$ ist die Eigenfrequenz der Decke, wenn sie starr gelagert wäre, $f_{e,Unterzug}$ die Eigenfrequenz des Unterzugs unter Berücksichtigung der Masse, die auf ihm lagert.

Mit dieser Näherungsformel (Gl. (15)) können die Systeme nach Abb. 17 erfasst werden.

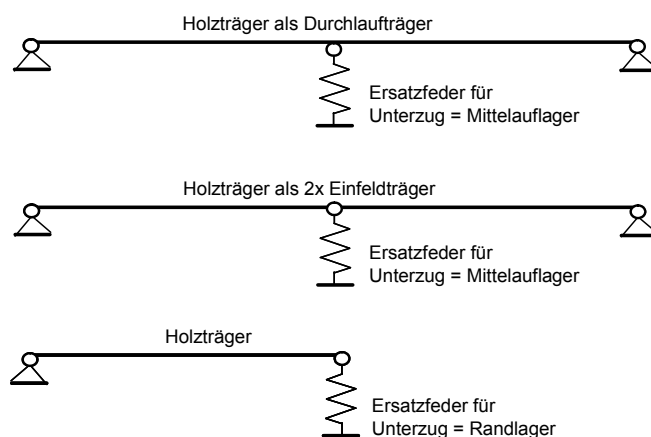


Abb. 17: Schematische Darstellung der Lagerung von Holzträgern auf Unterzügen, aus [Hamm, 2008]

Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast (Steifigkeitskriterium)

Auch bei der Berechnung der Durchbiegung unter der Einzellast $w(2\text{kN})$ muss die Nachgiebigkeit des Unterzugs berücksichtigt werden. Wenn die Last von 2kN mittig angreift, sind die Auflagerkräfte beim Lager und beim Unterzug jeweils 1kN . Der Unterzug erfährt eine Durchbiegung $w_{\text{UZ}}(1\text{kN})$ unter 1kN , die linear vom (starken) Lager zum UZ zunimmt. Die Durchbiegungen können dann entsprechend (Gl. (16)) addiert werden.

$$w_{\text{res}} = 0,5 \cdot w_{\text{Unterzug}} + w_{\text{Balken}} = 0,5 \cdot w_{\text{UZ}}(1\text{kN}) + w(2\text{kN}) \quad \text{Gl. (16)}$$

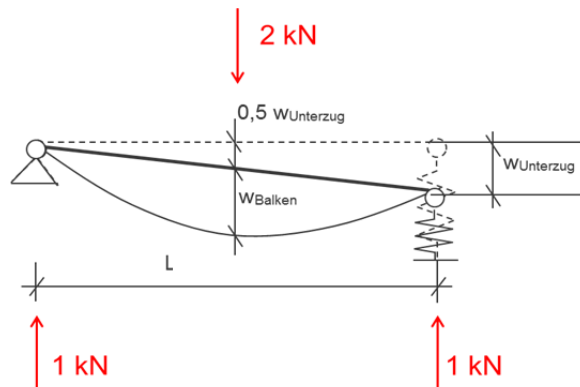


Abb. 18: Rechenmodell für nachgiebig gelagerte Decken

Durch die Addition der Durchbiegungen erhält man die größt-mögliche Durchbiegung, d.h. die Methode ist vermutlich auf der sicheren Seite. Deshalb wird angestrebt, auch für die Durchbiegung unter Einzellast Hilfsdiagramme zu erstellen. Aktuell wird eine Abschlussarbeit mit dieser Thematik an der Hochschule Biberach betreut.

Nachweise

Die einfachste Regel für die Mindeststeifigkeit eines Unterzugs findet sich im Forschungsbericht [Kreuzinger / Mohr, 1999]. Nach Ansicht der Autorin ist sie nach wie vor gültig und wichtig für eine erste Einschätzung, sollte aber um die genannten Nachweise ergänzt werden, s.u.

„Unterzüge als Zwischenaufleger sollten möglichst steif ausgeführt werden. Die Übertragung der Schwingungen zwischen zwei Einfeldträgern ist durch einen gemeinsamen „weichen“ Unterzug möglich. Der Unterzug sollte für erhöhte Anforderungen bemessen werden.“

Für den Einfeldträger heißt das:

$$w_{\text{Unterzug}} = \frac{1\text{kN} \cdot L_{\text{Unterzug}}^3}{48 \cdot EI_{\text{Unterzug}}} \leq 0,25\text{mm} \quad \text{Gl. (17)}$$

Weiterhin gilt:

$$f_{\text{e,ges}} \geq f_{\text{grenz}} \quad \text{Gl. (18)}$$

$$w_{\text{res}} \leq w_{\text{grenz}} \quad \text{Gl. (19)}$$

4.3. Besondere Untersuchung falls die Eigenfrequenz kleiner ist als f_{grenz}

Vor allem bei Decken mit großen Spannweiten wird das Frequenzkriterium bemessungsrelevant. Es können auch Decken mit Eigenfrequenzen kleiner als die Grenzfrequenz ausgeführt werden, wenn die Schwingbeschleunigung nach Gleichung 22 begrenzt wird und eine Mindestfrequenz nach Gleichung 20 eingehalten wird.

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

$$f_{\min} \leq f_e < f_{\text{grenz}} \quad \text{Gl. (20)}$$

$$f_{\min} = 4,5 \text{ Hz} \quad \text{Gl. (21)}$$

$$a \leq a_{\text{grenz}} \quad \text{Gl. (22)}$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5, Qualitätsklasse A} \quad \text{Gl. (23)}$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5, Qualitätsklasse B und C} \quad \text{Gl. (24)}$$

Die Beschleunigung für ein einachsig oder zweiachsig gespanntes Deckenfeld als Einfeldträger mit der (Raum-) Breite b infolge einer gehenden Person kann wie folgt berechnet werden: Die anzusetzende dynamische Kraft ist abhängig von der Eigenfrequenz der Decke und kann aus Abbildung 19 abgelesen werden.

$$a \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{0,4 \cdot F(t) [\text{N}]}{m [\text{kg/m}^2] \cdot 0,5 \cdot L [\text{m}] \cdot 0,5 \cdot b [\text{m}] \cdot 2D} \quad \text{Gl. (25)}$$

Die Dämpfung D , auch bezeichnet als Lehr'sches Dämpfungsmaß, kann Tabelle 8 entnommen werden.

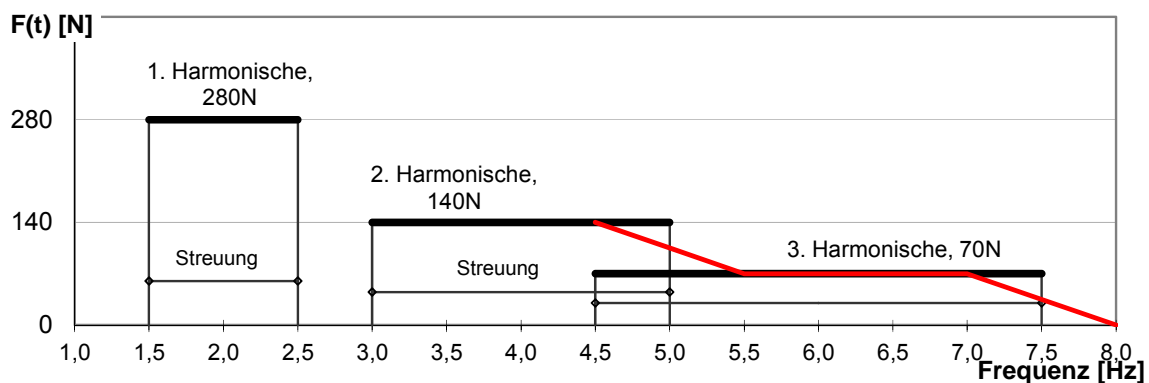
Als mitschwingende Masse wurde in der Gleichung die halbe Spannweite L und die halbe Breite b angesetzt. Das ist für vierseitig gelagerte Einfeldträger mit einer ausreichenden Querbiegesteifigkeit eine gute Näherung. Eine ausreichende Querbiegesteifigkeit ist z. B. vorhanden bei Holz-Beton-Verbunddecken, flächigen Massivholzdecken oder Aufbauten mit Nassestrich.

Für die Raumbreite b sollte der kleinere Wert aus der tatsächlichen Breite und das 1,5-fache der Spannweite eingesetzt werden (bei HBV und BSP- Decken). Bei linienförmigen Elementen gilt der kleinere Wert aus der tatsächlichen Breite und der Spannweite, vgl. Kap. 3.4.

Tabelle 8: Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Tragkonstruktion und dem Aufbau der Decke

Material und Aufbau	Lehr'sches Dämpfungsmaß D	Quelle
(Holz-) Decken ohne schwimmenden Estrich	1,0 %	[Erläuterungen]
Decken aus verleimten Brettstapelelementen mit schwimmendem Estrich	2,0 %	
Holzbalkendecken und mechanisch verbundene Brettstapeldecken mit schwimmendem Estrich	3,0 %	
Brettsperrholzdecken ohne bzw. mit leichtem Aufbau, zweiseitig gelagert	2,5 %	[Fitz, 2008] und [Hamm/Richter -BSP, 2009]
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich (schwerer Aufbau) auf Stahl oder punktförmig oder zweiseitig gelagert	2,5 %	
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich, vierseitig gelagert	3,5 %	
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich, vierseitig auf Holzwänden gelagert	4,0 %	
Holz-Beton-Verbunddecke als Rohdecke	2,5 %	Aus Messungen
Holz-Beton-Verbunddecke mit schwimmendem Estrich	3,5 %	

Die einwirkende Kraft auf die Decke $F(t)$ ist zeit- und ortveränderlich. Sie wird in Gleichung 25 mit dem Faktor 0,4 reduziert, weil die Einwirkungsstelle wechselt und die Einwirkungsdauer begrenzt ist, vgl. [Kreuzinger/ Mohr, 1999].

**Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen**

5. Bemessungsprogramm

2005 wurde im Auftrag der Bauer Holzbau GmbH ein Excel-basiertes Bemessungsprogramm für den Schwingungsnachweis erstellt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens [Winter/Hamm/Richter, 2010] wurden nach dessen Fertigstellung 2010 in das Programm eingearbeitet.

Herr Bauer hat vorgeschlagen, auch die Ergebnisse dieses Berichts einzupflegen. Dem Vorschlag wird gerne nachgegangen.

Es wird einfließen:

Beim Steifigkeitskriterium wird die mittragende Breite für Decken mit Trockenestrichaufbau angepasst, so dass immer mindestens zwei Balken als tragend berücksichtigt werden.

Die Qualitätsklassen nach dem Vorschlag von Holzbau Deutschland werden eingearbeitet.

Eine Erhöhung des Grenzwertes für die Durchbiegung unter der Einzellast von 2 kN bei einem Aufbau mit ausreichender Dämpfung nach dem Vorschlag von Kreuzinger / Mohr wird auswählbar sein.

Die Hinweise zur Berechnung von nachgiebig gelagerten Decken werden konkretisiert.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde zunächst zusammengestellt, wie der Schwingungsnachweis für Holzdecken bis jetzt geführt wurde.

Im weiteren Verlauf wurde auf die Ergebnisse des 2010 abgeschlossenen Forschungsvorhabens eingegangen, ebenso wurden die Rückmeldungen aus der Praxis aufgezeigt und diskutiert.

Häufig gestellte Fragen wurden im Bericht aufgegriffen und beantwortet. Die Hintergründe dazu wurden erläutert.

In den Bemessungsvorschlag sind nun eingearbeitet worden:

- die Ergebnisse einiger Abschlussarbeiten, die folgende Teilbereiche des Nachweises beleuchtet haben:

die mittragende Breite

die mitschwingende Breite

die Korrekturfaktoren bei nachgiebig gelagerten Decken

den jeweils maßgebenden Nachweis (so dass nur noch ein Nachweis geführt werden muss)

- die Einteilung in die Qualitätsklassen von Holzbau Deutschland

Der erarbeitete Vorschlag wird in ein Bemessungsprogramm aufgenommen, das kostenfrei zur Verfügung gestellt wird.

7. Schrifttum

7.1. Normen und Regelwerke

[DIN 1052: 1988]:

DIN 1052: 1988-04: *Holzbauwerke*. Berlin. April 1988.

[DIN 1052: 2004]:

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

[DIN 1052: 2008]:

DIN 1052: 2008-12: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin. Dezember 2008.

[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.

[Eurocode 5: 1993]:

Eurocode 5: ENV 1995-1-1: 1993: *Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holztragwerken - Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau*. Deutsche Fassung. Oktober 1993.

[Eurocode 5: 2004]:

Eurocode 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.

[Eurocode 5: 2010]:

Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Dezember 2010.

[Eurocode 5: 2010 / NA - D]:

Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Dezember 2010.

[Eurocode 5: 2010 / NA:2013-08]:

Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. August 2013.

[ÖNORM B 1993-1-1/NA 2013]:

Normvorschlag B 1995-1-1/NA Mai 2013. *Nationaler Anhang - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Mai 2013.

7.2. Literatur

[BDF-Merkblatt, 2015]:

BDF-Merkblatt 02-04: *Gebrauchstauglichkeit von Holzbalkendecken*. Verfasser: bauart Konstruktions GmbH & Co. KG. Stand 30.04.2015

[Bender, 2016]:

Bender, Michael: *Bemessungsdiagramme für Holzbalkendecken bei unterschiedlichen Anforderungen an den Schwingungsnachweis*. Masterthesis. Hochschule Biberach. 2016.

[Colling, 2014]

Colling, Francois: *Holzbau. Grundlagen und Bemessung nach EC 5. 4. Auflage*. Springer Vieweg Verlag. Wiesbaden. 2014.

[Fitz, 2008]:

Fitz, Mario: *Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Deckensystemen aus Brettspertholz (BSP)*. Diplomarbeit an der TU Graz. 2008.

[Glück, 2017]:

Glück, Michael: *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung im mehrgeschossigen Holzbau für unterschiedliche Deckensysteme*. Masterarbeit an der Hochschule Biberach. 2017

[Hamm, 2006]:

Hamm, Patricia: *Warum Decken zu schwingen beginnen*. In: *bauen mit holz*. 3/2006. S. 24-29.

[Hamm, 2008]:

Hamm, Patricia: *Schwingungsverhalten von Decken bei Auflagerung auf Unterzügen*. In: *holzbau, die neue quadriga*. 1/2008. S. 41-46.

[Hamm/Richter, 2009]:

Hamm, Patricia, Richter, Antje: *Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken*. In: *Fachtagungen Holzbau 2009*. Leinfelden-Echterdingen, 26. November 2009. Hrsg.: Landesbeirat Holz Baden-Württemberg e.V., Stuttgart. S. 15-29.

[Hamm/Richter -BSP, 2009]:

Hamm, Patricia, Richter, Antje: *Schwingung von Brettspertholzplatten*. In: *BSPhandbuch – Holz-Massivbauweise in Brettspertholz*. Hrsg.: G. Schickhofer, T. Bogensperger, T. Moosbrugger, TU Graz. 2009. S. D-57 – D-112.

[HIVOSS, 2008]:

Schwingungsbemessung von Decken – Leitfaden. 2008.

<http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/download.php>

[Holzbau Deutschland, 2017]:

Holzbau Deutschland: *Entwurf: Information – Qualitätsklassen für zulässige Verformungen im Holzbau*. Ostfildern. 24. Februar 2017. Nicht veröffentlicht.

[Hu 2002]:

Hu, Lin: *Development of a performance criterion for controlling vibrations in wood-based floors*. In: *Proceedings of 7th World Conference on Timber Engineering*, Shah Alam, Malaysia, August 12-15. 2002.

[Hu u. a. 2015]:

Hu, Lin ; Chui, Ying H. ; Mohammed, M. ; Gagnon, S.: *Summary of a proposed vibration controlled design method for wood joisted floors*. In: *FPIInnovations*. 2015.

[Hu u. a. 2018]:

Hu, Lin; Chui, Ying-Hei; Hamm, Patricia; Toratti, Tomi; Orskaug, Thomas: *Development of ISO Baseline vibrations design method for timber floors*. Abstract für WCTE 2018. Noch nicht veröffentlicht.

[Kreuzinger/Mohr, 1999]:

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

[Mohr, 2001]:

Mohr, Bernhard: *Deckenschwingungen*. In: *Bauen mit Holz*. 11/2001. S. 29-38.

[Ohlsson, 1982]:

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

[Pfauth, 2014]:

Pfauth, Peter: *Rechnerische und messtechnische Schwingungsuntersuchungen an weit gespannten Holzdecken der Lignotrend Produktions GmbH*. Bachelorarbeit an der Hochschule Biberach. 2015

[Schütz, 2017]:

Schütz, Julian: *Analyse von Berechnungsmethoden zur Bewertung von Schwingungen von Holzdecken anhand bestehender Messdaten*. Bachelorthesis. Hochschule Biberach. Fertigstellung voraussichtlich 2017.

[Stumpf, 2015]

Stumpf, Darja: *Parameterstudie zum Einfluss der nachgiebigen Lagerung auf das Schwingungsverhalten von Holzdecken*. Bachelorthesis. Hochschule Biberach. 2015.

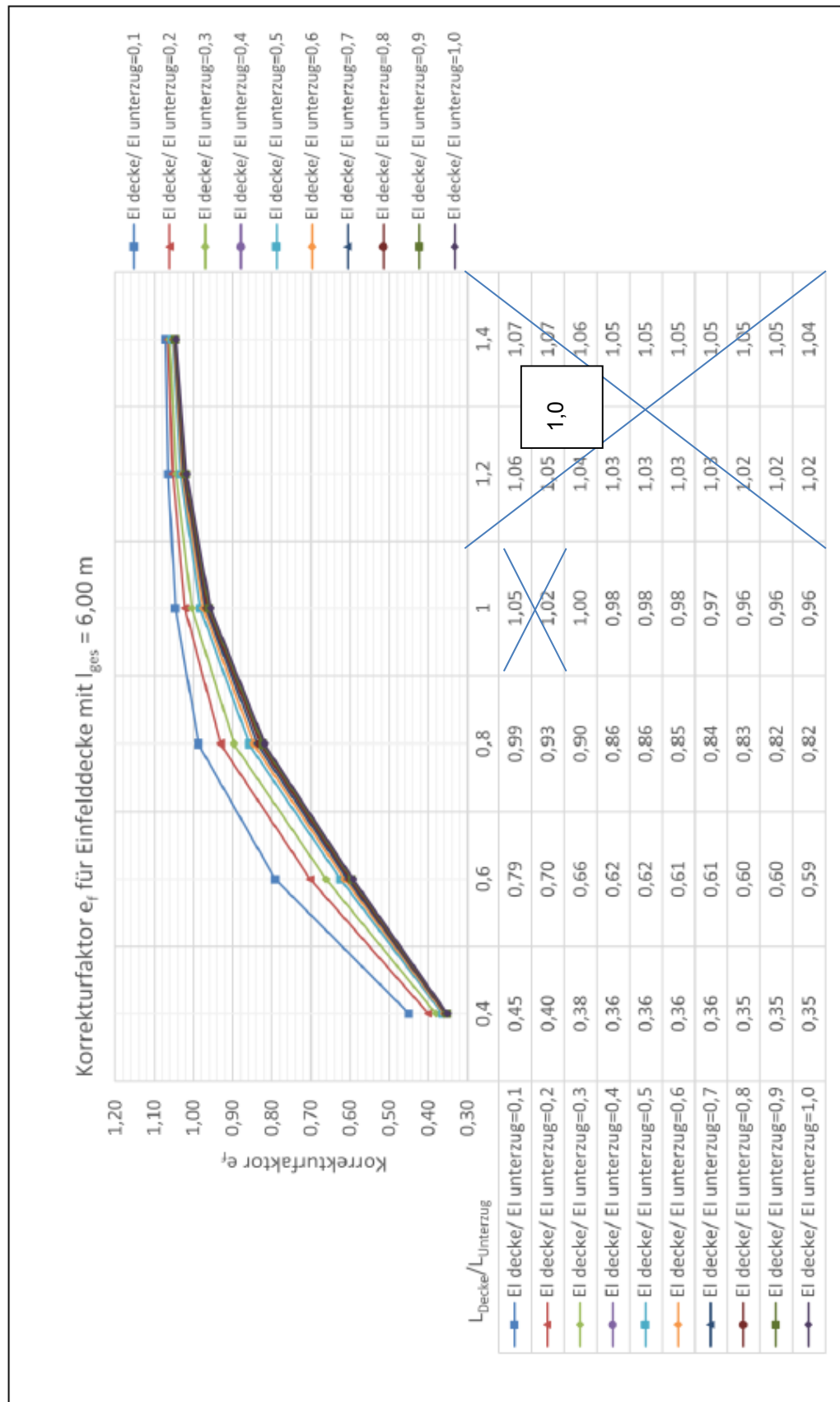
[Toratti u. Talja 2006]:

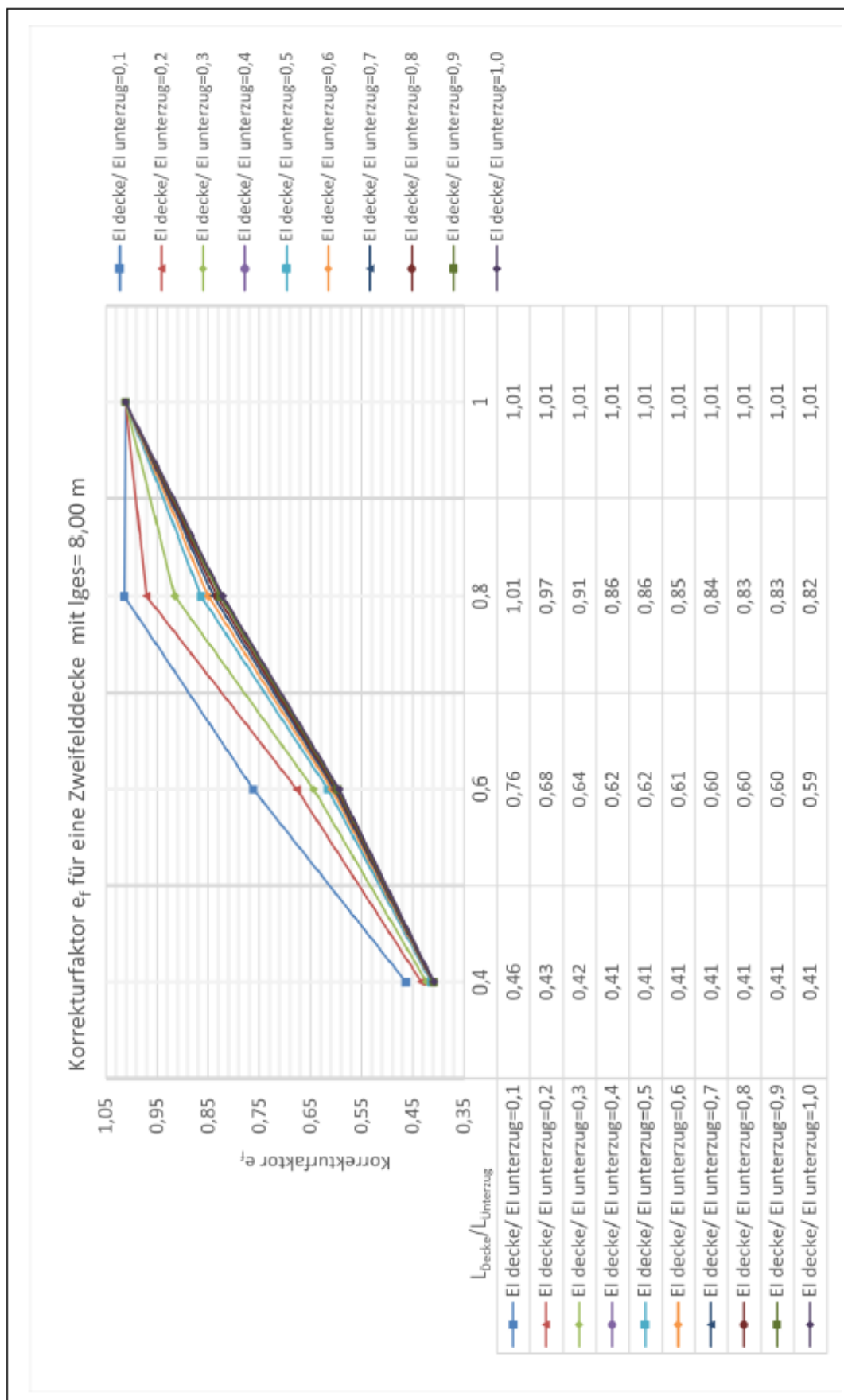
Toratti, Tomi ; Talja, Asko: *Classification of human induced floor vibrations*. In: *Building Acoustics*. Volume 13. Number 3. P. 211-221. 2006.

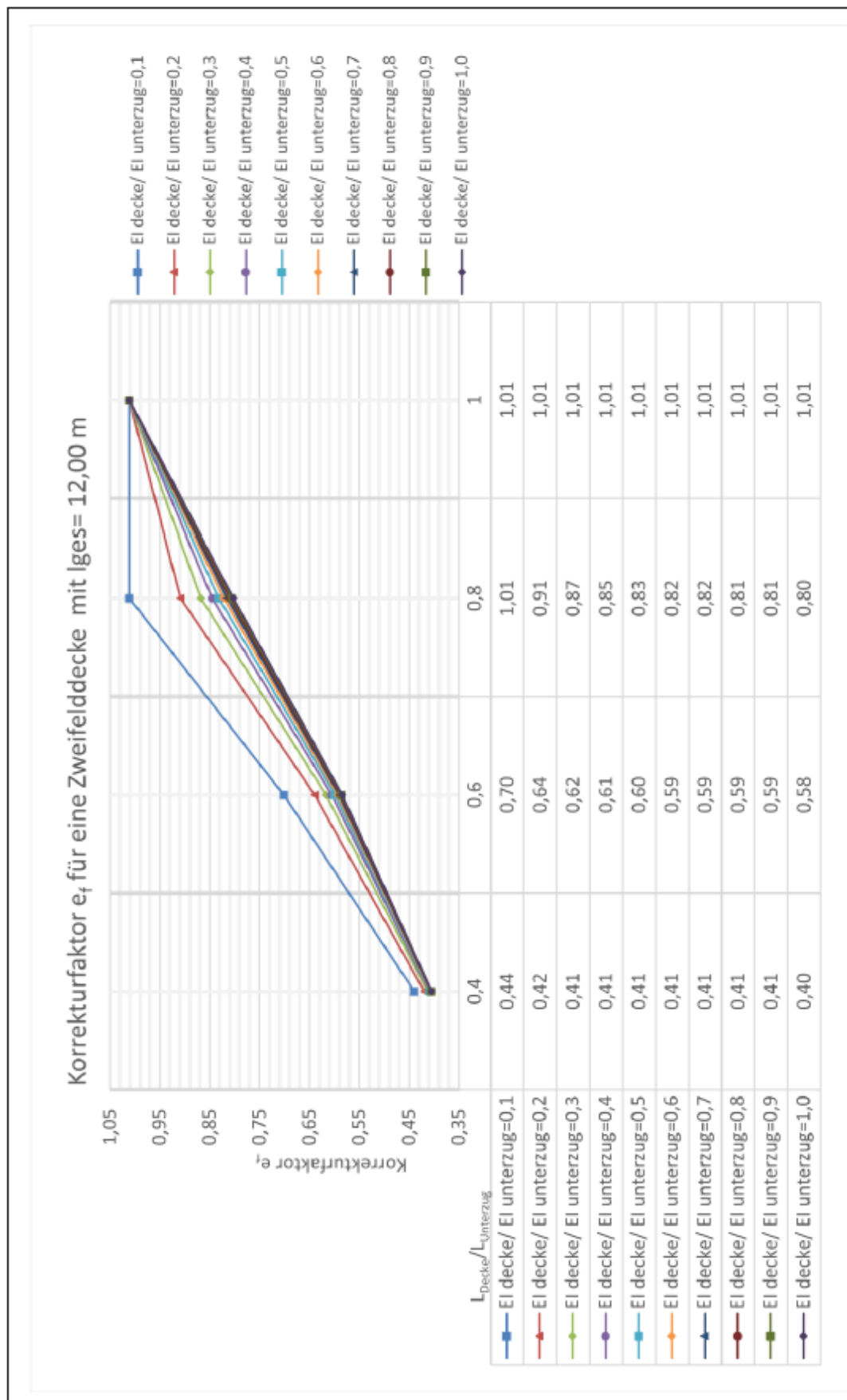
[Winter/Hamm/Richter, 2010]:

Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.: *Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht Juli 2010*. TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Forschungsvorhaben gefördert aus den Haushaltsmitteln des BMWA über die AiF.

8. Anhang

Abbildung Anhang 1: Korrekturfaktor e_f für eine Einfelddecke mit $l_{ges} = 6,00$ m

Abbildung Anhang 2: Korrekturfaktor e_f für eine Zweifelddecke mit $l_{ges} = 8,00$ m

Abbildung Anhang 3: Korrekturfaktor e_f für eine Zweifelddecke mit $l_{ges} = 12,00$ m