ArcelorMittal Europe - Long Products
Sections and Merchant Bars

ArcelorMittal

Bemessungshilfe zum Nachweis von Deckenschwingungen

In dieser Bemessungshilfe wird auf Grundlage aktueller Forschungsergebnisse (RFCS-Projekt „Vibration of Floors") [1] ein Verfahren vorgestellt, mit dem Komforteigenschaften für Gebäudenutzer nachgewiesen werden können.

Die Hilfen für die Bestimmung von Bauwerkseigenschaften basieren auf üblichen Annahmen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Definitionen	7
3.	Bestimmung der Deckeneigenschaften	11
4.	Klassifizierung von Schwingungen	15
5.	Vorgehensweise bei der Bemessung und Diagramme	19

Anhang A	Formeln für die Handrechnung	31
Anhang B	Beispiele	43
Technische Beratung und Anarbeitung		52
Literaturverzeichnis		52
Ihre Partner		53

1. EINLEITUNG

1. Einleitung

Deckenkonstruktionen werden für Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit bemessen:

- Grenzzustände der Tragfähigkeit sind die, die Tragfähigkeit und Stabilität betreffen;
- Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit betreffen im Wesentlichen das Schwingungsverhalten. Hier sind Steifigkeit, Masse, Dämpfung und Schwingungsursache von wesentlicher Bedeutung.

Bei schlanken Deckenkonstruktionen, wie sie in Stahl- und Stahl-Beton-Verbundbauweise hergestellt werden, ist die Gebrauchstauglichkeit bemessungsrelevant.

Diese Bemessungshilfe gibt Anleitung für:

- die Festlegung von akzeptierbaren Schwingungen für den Komfort des Nutzers durch die Einführung von Akzeptanzklassen (Abschnitt 4) und
- die Prognose von durch Menschen verursachten Deckenschwingungen unter Berücksichtigung der Gebäudenutzung (Abschnitt 5).

Die in Abschnitt 5 vorgestellte Vorgehensweise für die Bemessung ist in Bild 1 dargestellt.

Für die Prognose der Schwingungen müssen einige dynamische Deckeneigenschaften bestimmt werden. Diese Eigenschaften und vereinfachte Verfahren werden in Anhang A kurz beschrieben. Bemessungsbeispiele werden im Anhang B gegeben. Die Vorgehensweise zum Nachweis von Deckenschwingungen aus Abschnitt 5 ist graphisch in Bild 1 dargestellt.

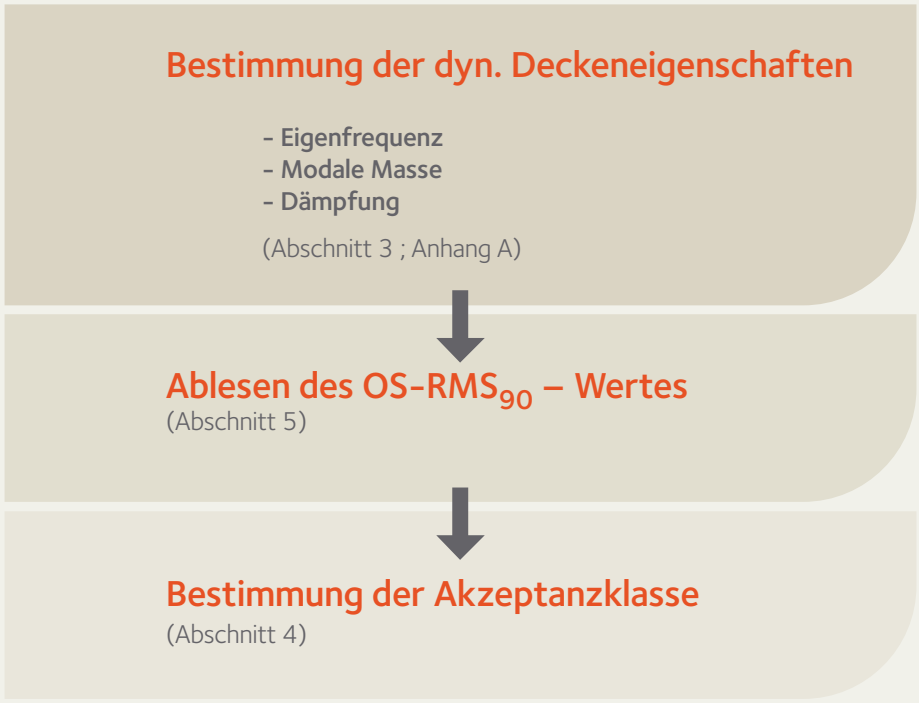
In dieser Bemessungshilfe werden vor allem einfache Verfahren, Hilfsmittel und Empfehlungen für die Akzeptierbarkeit von Schwingungen angegeben, die durch Menschen im Rahmen der normalen Nutzung des Gebäudes verursacht werden. Die angegebenen Bemessungsverfahren dienen der Prognose von Schwingungen. Wenn Messungen an fertig gestellten Gebäuden durchgeführt werden, können Differenzen zu den Prognoseergebnissen auftreten. Es besteht also kein Anspruch auf die Einhaltung der mit dieser Bemessungshilfe berechneten Werte.

Die vorgestellten Berechnungs- und Bewertungsverfahren für Deckenschwingungen beziehen sich auf durch Menschen hervorgerufene, niederfrequente Schwingungen, die durch normales Gehen verursacht werden.

Durch Maschinen oder durch Verkehr (z.B. Straßen- oder Eisenbahnverkehr etc.) verursachte Schwingungen werden durch die Verfahren in dieser Bemessungshilfe nicht erfasst.

Die Bemessungshilfe ist nicht auf Fußgängerbrücken oder Konstruktionen übertragbar, die nicht mit Geschossdecken vergleichbare Eigenschaften oder Nutzungen aufweisen.

Bild 1: Vorgehensweise bei der Bemessung (siehe Abschnitt 5)



© ArcelorMittal Photo Library

2. DEFINITIONEN

2. Definitionen

Die hier angegebenen Definitionen wurden in Hinblick auf die Anwendung dieser Bemessungshilfe formuliert.

Dämpfung D

Dämpfung ist die Energiedissipation eines schwingenden Systems. Die Gesamtdämpfung besteht aus

- Material- und Strukturdämpfung
- Dämpfung durch Möbel und Ausbau (z.B. Zwischen- boden)
- Ausbreitung von Energie über das gesamte Gebäude.

Modale Masse M_{mod} **= Generalisierte Masse**

Jede Schwingungsmode eines Systems mit mehreren Freiheitsgraden kann durch ein System mit nur einem Freiheitsgrad dargestellt werden

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{mod}}{M_{mod}}}$$

Dabei ist

f	die Eigenfrequenz der Schwingungsmode
K_{mod}	die modale Steifigkeit
M_{mod}	die modale Masse

Daher kann die modale Masse als die Masse verstanden werden, die bei einer bestimmten Schwingungsform aktiviert wird.
Die Bestimmung der modalen Masse wird in Abschnitt 3 beschrieben.

Eigenfrequenz f =

Jedes System hat in Hinblick auf Form und Dauer einer einzelnen Schwingung ein individuelles Verhalten. Die Frequenz f ist der Kehrwert der Schwingungsdauer $T (f = 1/T)$.

Die Eigenfrequenz ist die Frequenz eines frei schwingenden Systems ohne äußere Anregung.

Jedes Tragwerk hat so viele Eigenfrequenzen und zugehörige Schwingungsformen wie Freiheitsgrade. Diese werden üblicherweise nach der durch das Schwingen aktivierten Energie sortiert angegeben. Demnach ist die erste Eigenfrequenz die mit der geringsten Energie und ist daher die am wahrscheinlichsten auftretende.

Die Gleichung für die Eigenfrequenz eines Systems mit nur einem Freiheitsgrad ist

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

Dabei ist:
K die Steifigkeit und
M die Gesamtmasse des Schwingungssystems

Die Bestimmung von Frequenzen wird in Abschnitt 3 beschrieben.

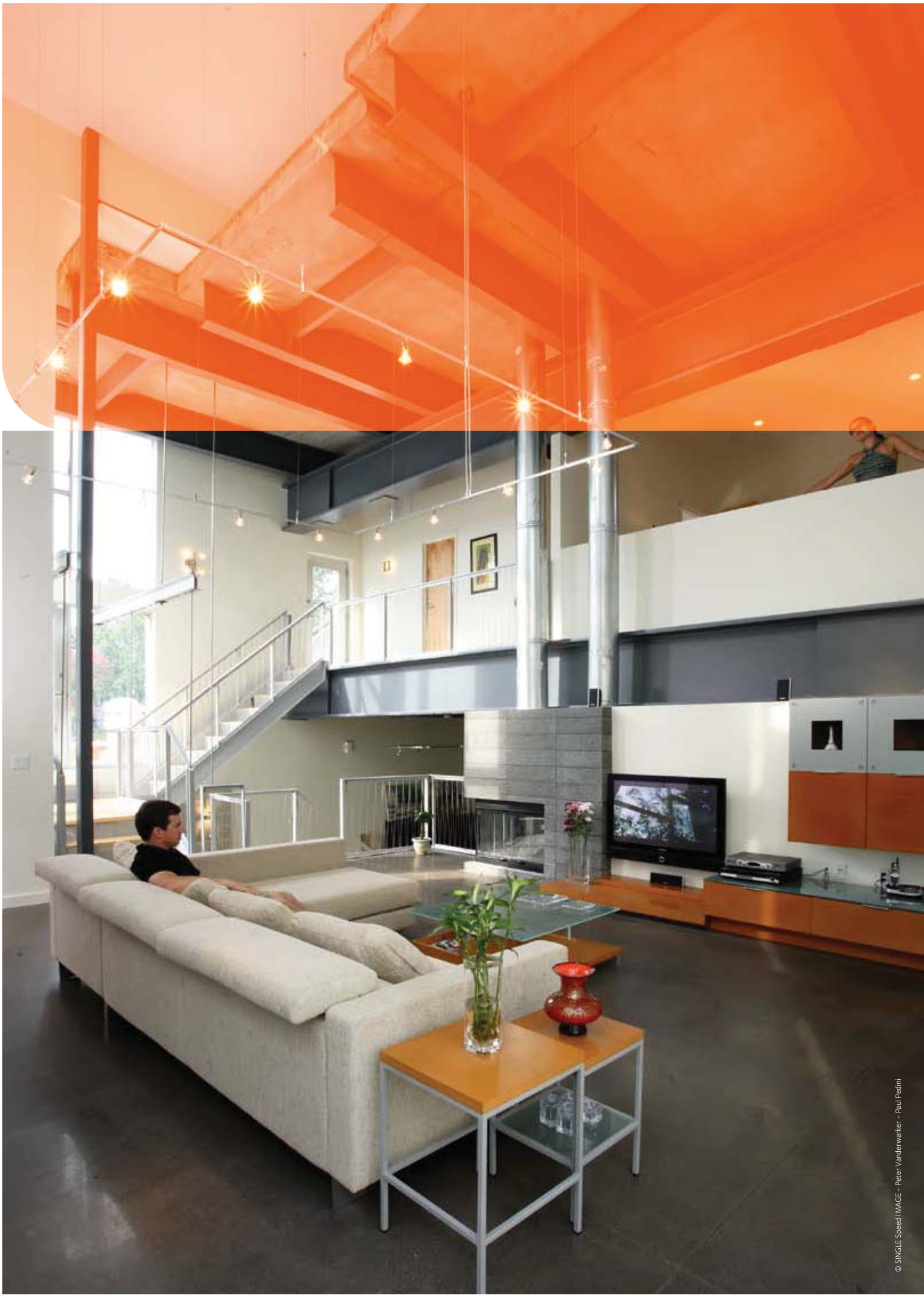
OS-RMS$_{90}$ =

RMS-Werte der Geschwindigkeit eines maßgebenden Schrittes, der die Intensität von 90% der normal gehenden Menschen abdeckt

OS: Ein Schritt (One-step)
v_{RMS}: Effektivwert der Geschwindigkeit v (Root Mean Square):

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2\, dt} = \frac{v_{Peak}}{\sqrt{2}}$$

Dabei ist:
T die betrachtete Zeitdauer


© SINGLE Speed IMAGE - Peter Vanderwarker - Paul Pedini

3. BESTIMMUNG DER DECKENEIGENSCHAFTEN

3. Bestimmung der Deckeneigenschaften

Die Bestimmung der Deckeneigenschaften kann durch einfache Rechenverfahren, Finite-Elemente Berechnungen oder durch Messungen erfolgen.

Weil diese Bemessungshilfe vor allem auf die Bemessung neuer Gebäude ausgerichtet ist, werden Messverfahren von den weiteren Erläuterungen ausgeschlossen wobei auf [1] verwiesen wird.

Finite-Elemente-Programme können dynamische Berechnungen ausführen und bieten die Möglichkeit der Eigenfrequenzberechnung. Einige Programme liefern ebenfalls die modale Masse als Berechnungsergebnis.

Es ist jedoch programmspezifisch, welche Elemente zur Verfügung stehen, wie die Dämpfung berücksichtigt wird und welche Ausgabegrößen eine Berechnung liefert. Daher können hier nur ein paar allgemeine Informationen zur Anwendung der Finite-Elemente-Berechnungen gegeben werden.

Bei Schwingungsberechnungen mit FE-Programmen sollte beachtet werden, dass das Rechenmodell für die dynamische Berechnung deutlich von dem für eine Tragfähigkeitsberechnung abweichen kann, weil bei den hier betrachteten Deckenschwingungen nur kleine Verformungen auftreten.

Ein typisches Beispiel hierfür sind die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen bei Schwingungsberechnungen im Vergleich zur Tragfähigkeitsberechnung: Während ein Anschluss bei der Tragfähigkeitsberechnung als gelenkig angenommen wird, ist dieser bei der Schwingungsberechnung eher als biegesteif anzunehmen, um das Tragverhalten bei kleinen Verformungen realistischer abzubilden.

Der dynamische E-Modul von Beton sollte 10% höher angenommen werden als der statische Tangentenmodul E_{cm}.

Die Dämpfung hat einen großen Einfluss auf das Schwingungsverhalten von Decken. Unabhängig vom verwendeten Verfahren zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und modalen Masse kann die Dämpfung mit den in Tabelle 1 angegebenen Werten unter Berücksichtigung der strukturellen Dämpfung, der Dämpfung durch Möbel und durch Ausbaukonstruktionen ermittelt werden. Die Gesamtdämpfung erhält man durch Aufsummieren der entsprechenden Dämpfungsanteile D_1 bis D_3.

Bei der Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaften sollte auch ein realistischer Anteil der Verkehrslast bei der Festlegung der Deckenmasse (m, M) berücksichtigt werden. Erfahrungswerte für Wohn- und Geschäftsgebäude liegen bei 10% bis 20% der Verkehrslast.

Tabelle 1: Bestimmung der Dämpfung

Art	Dämpfung (% der kritischen Dämpfung)
Strukturelle Dämfpung D_1 je nach Baustoff	
Holz	6%
Beton	2%
Stahl	1%
Stahl-Beton-Verbund	1%
Dämpfung D_2	
Klassisches Büro für 1 bis 3 Personen mit Trennwänden	2%
Büro mit EDV-Arbeitsplätzen und wenig Regalen, Schränken	0%
Großraumbüro	1%
Bibliothek	1%
Wohnhaus	1%
Schule	0%
Gymnastikraum	0%
Dämpfung durch Ausbau D_3	
Abgehängte Decke unter der untersuchten Geschossdecke	1%
"Schwimmende" Bodenbeläge, z.B. Laminat	0%
Schwimmender Estrich	1%
Gesamtdämpfung $D = D_1 + D_2 + D_3$	

4. KLASSIFIZIERUNG VON SCHWINGUNGEN

4. Klassifizierung von Schwingungen

Die Wahrnehmbarkeit von Schwingungen durch den Menschen und das persönliche Gefühl der Belästigung ist von einer Reihe von Einzelaspekten abhängig. Die wichtigsten sind:

- Die Schwingungsrichtung, wobei in dieser Bemessungshilfe vertikale Schwingungen behandelt werden;
- Die Körperhaltung eines Menschen: Sitzen, Stehen, Liegen;
- Die momentane Tätigkeit der betroffenen Person - in der Fertigung einer Fabrik werden Schwingungen anders bewertet als in einem Büro oder Operationsraum;
- Das Alter und der Gesundheitszustand der betroffenen Person beeinflusst ebenfalls die Empfindlichkeit der Schwingungswahrnehmung.

Die Wahrnehmung von Schwingungen ist daher ein sehr individuelles Phänomen, das nur durch die Komforterwartungen einer Mehrheit an Personen beschrieben werden kann.

Die hier behandelten Schwingungen sind lediglich für den Komfort der Gebäudenutzer relevant. Für die Tragfähigkeit sind diese Schwingungen ohne Bedeutung.

Mit dem Ziel, ein allgemeines Bewertungsverfahren für durch Menschen verursachte Schwingungen zu verwenden, wird die Anwendung des so genannten OS-RMS-Wertes empfohlen. Der OS-RMS-Wert bezieht sich auf die harmonische Deckenschwingung, die durch einen maßgebenden Schritt auf die Decke verursacht wird.

Die dynamische Auswirkung von gehenden Personen ist von einigen Randbedingungen, wie z.B. das Personengewicht, Schrittgeschwindigkeit, den Schuhen, dem Bodenbelag, etc. abhängig. Daher wird der $OS\text{-}RMS_{90}$-Wert empfohlen, wobei der Index „90" bedeutet, dass 90% der Schritte durch diesen Wert erfasst sind.

Die nachstehende Tabelle 2 enthält eine Zuordnung von Schwingungswerten zu verschiedenen Akzeptanzklassen. Zusätzlich gibt sie Empfehlungen für die Zuordnung der Klasse zu den Nutzungen der betrachteten Decke.

Tabelle 2: Klassifizierung der Deckenschwingungen und Empfehlungen für die Anwendung der Akzeptanzklassen

Klasse	OS-RMS$_{90}$		Nutzung der Decke									
	Untergrenze	Obergrenze	Empfindlicher Bereich	Medizinischer Bereich	Bildungsstätten	Wohngebäude	Bürogebäude	Besprechungsräume	Seniorenaufenthalt	Hotels	Industrienutzung	Sportstätten
A	0.0	0.1										
B	0.1	0.2										
C	0.2	0.8										
D	0.8	3.2										
E	3.2	12.8										
F	12.8	51.2										

TARBUCKS COFFEE
rosso ca
3

5. VORGEHENSWEISE BEI DER BEMESSUNG UND DIAGRAMME

5. Vorgehensweise bei der Bemessung und Diagramme

Einen Überblick über die allgemeine Vorgehensweise zeigt Bild 2. Die Bemessung wird in drei Schritten durchgeführt, wobei die Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaft der umfangreichste ist. Daher ist in Anhang A detaillierte Hilfe durch vereinfachte Verfahren enthalten; allgemeine Erklärungen enthält Abschnitt 3.

Ist die modale Masse und die Frequenz bekannt, kann der OS-RMS_{90}-Wert sowie die Klassenzuordnung durch die nachfolgenden Diagramme bestimmt werden, die im Rahmen des Forschungsprojektes [1] von TNO Bouw (Niederlande) entwickelt wurden. Das entsprechende Diagramm wird nach der vorliegenden Dämpfung gewählt (siehe Abschnitt 3) wobei die Nutzungsbedingungen mit Ausbau und Möblierung berücksichtigt werden.

Bild 2: Vorgehensweise bei der Bemessung

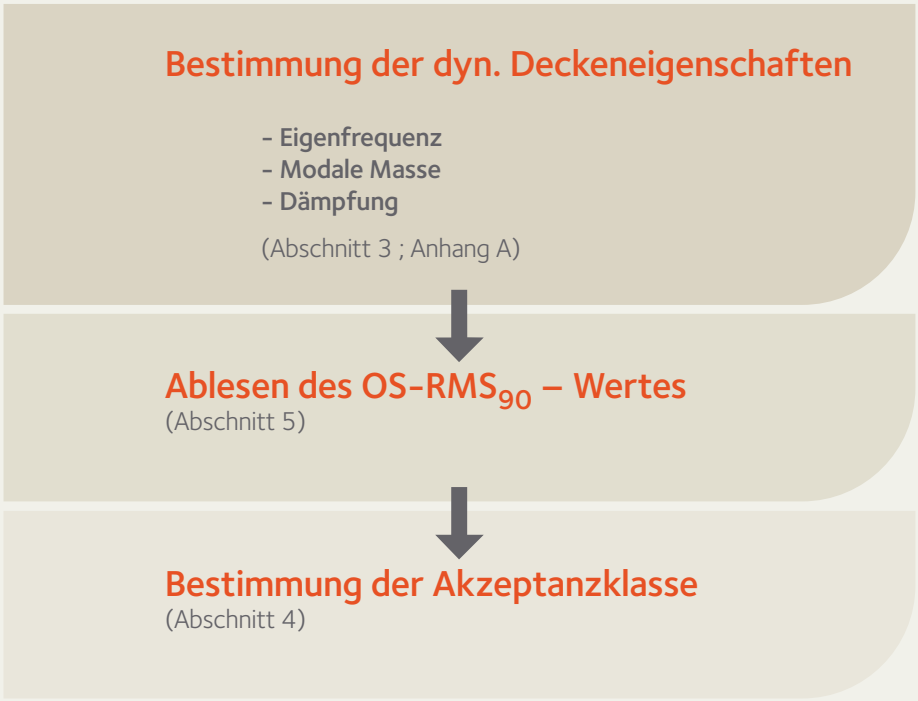
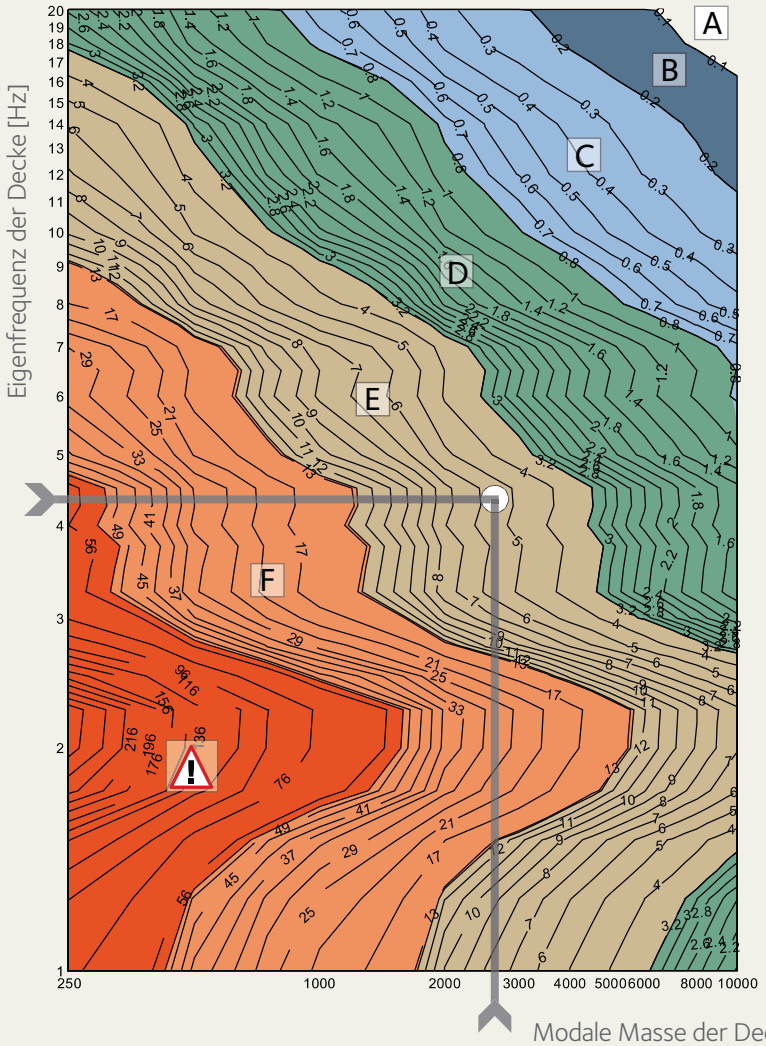


Bild 3: Anwendung der Diagramme



Die Diagramme werden angewendet, indem auf x-Achse mit der modalen Masse und auf der y-Achse mit der Frequenz eingestiegen wird. Der OS-RMS$_{90}$ sowie die Akzeptanzklasse kann dann, wie in Bild 3 dargestellt, abgelesen werden.

: bedeutet intolerierbarer Schwingungskomfort

Bild 4: OS-RMS$_{90}$ für 1% Dämpfung

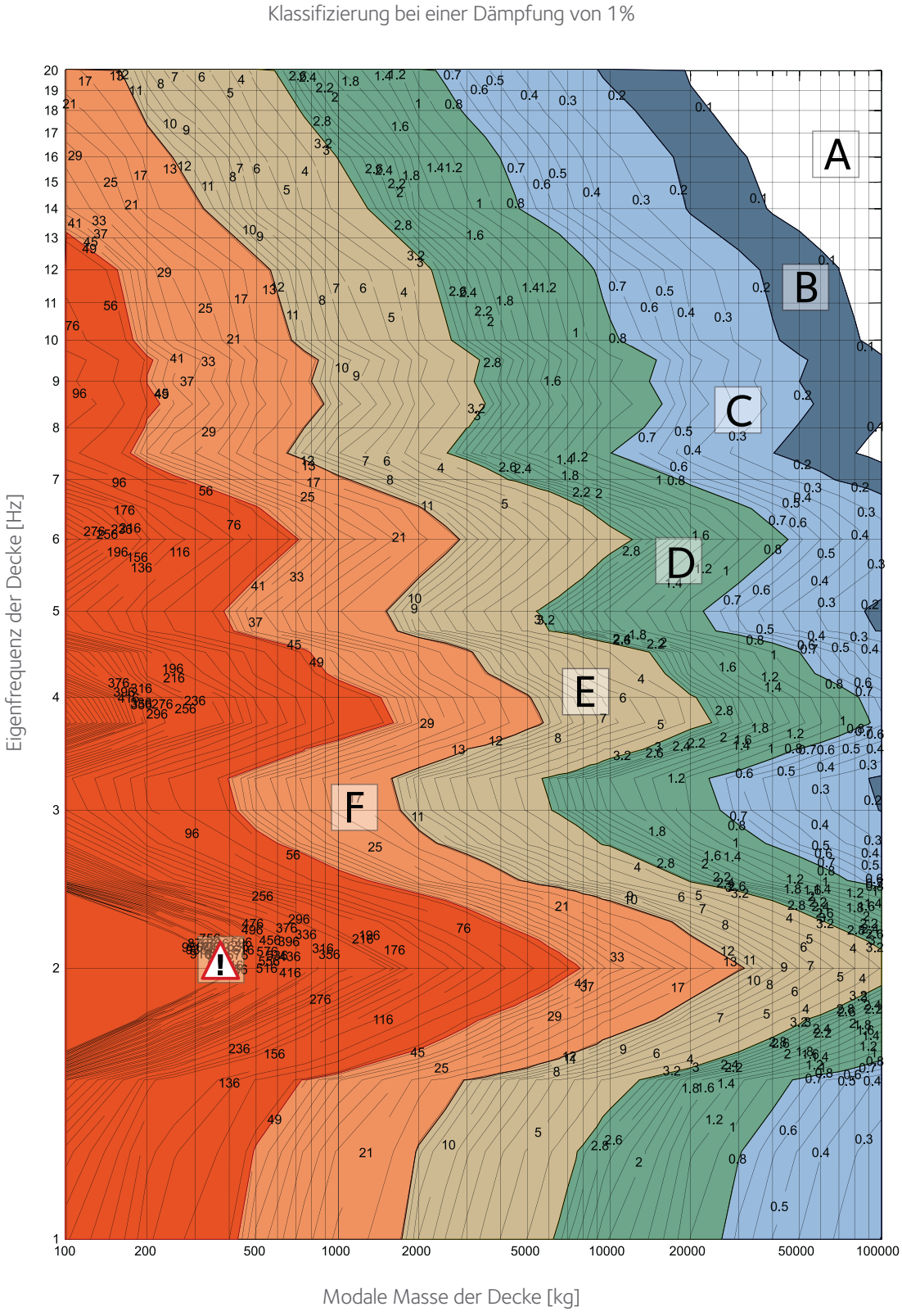


Bild 5: OS-RMS$_{90}$ für 2% Dämpfung

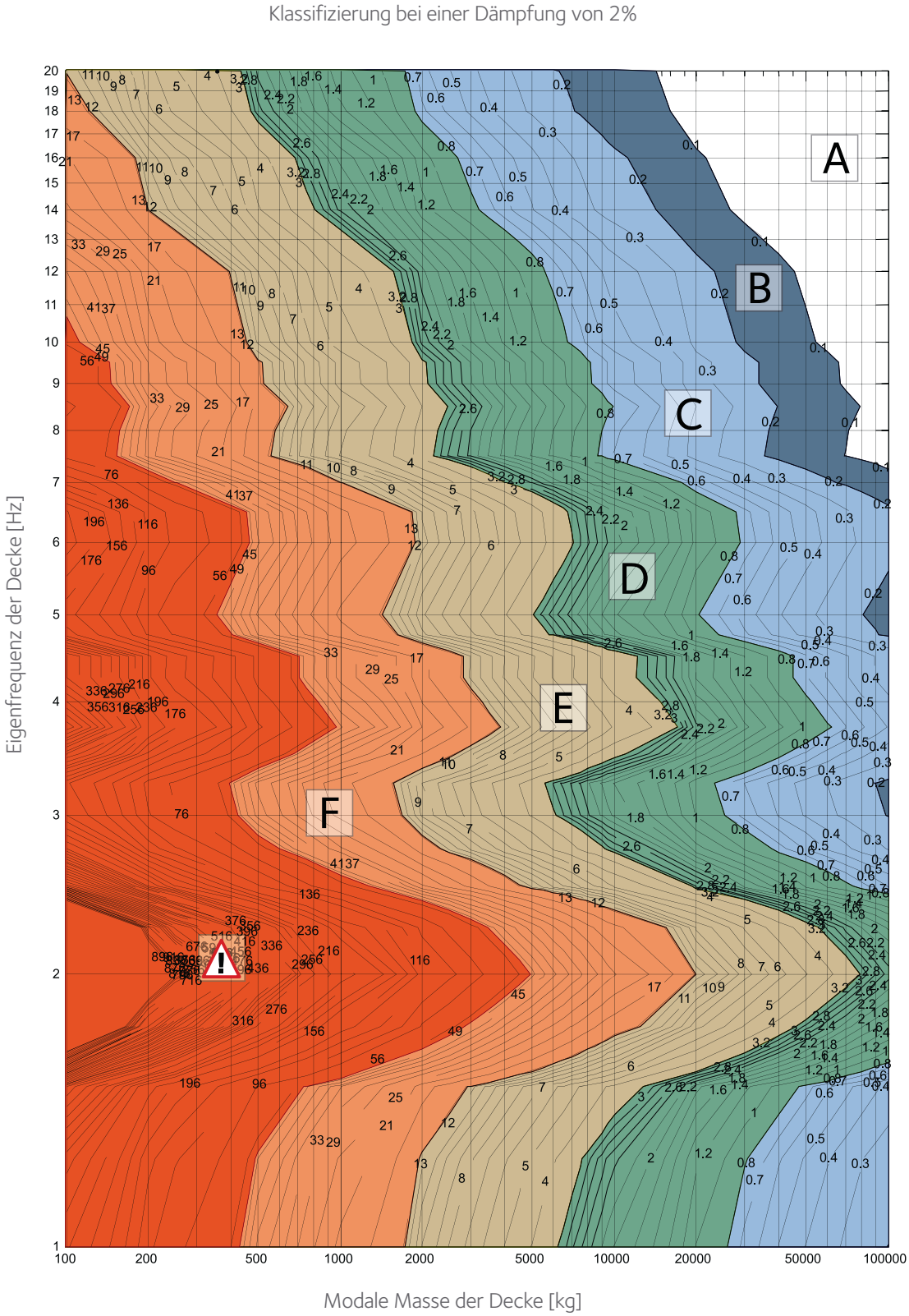


Bild 6: OS-RMS$_{90}$ für 3% Dämpfung

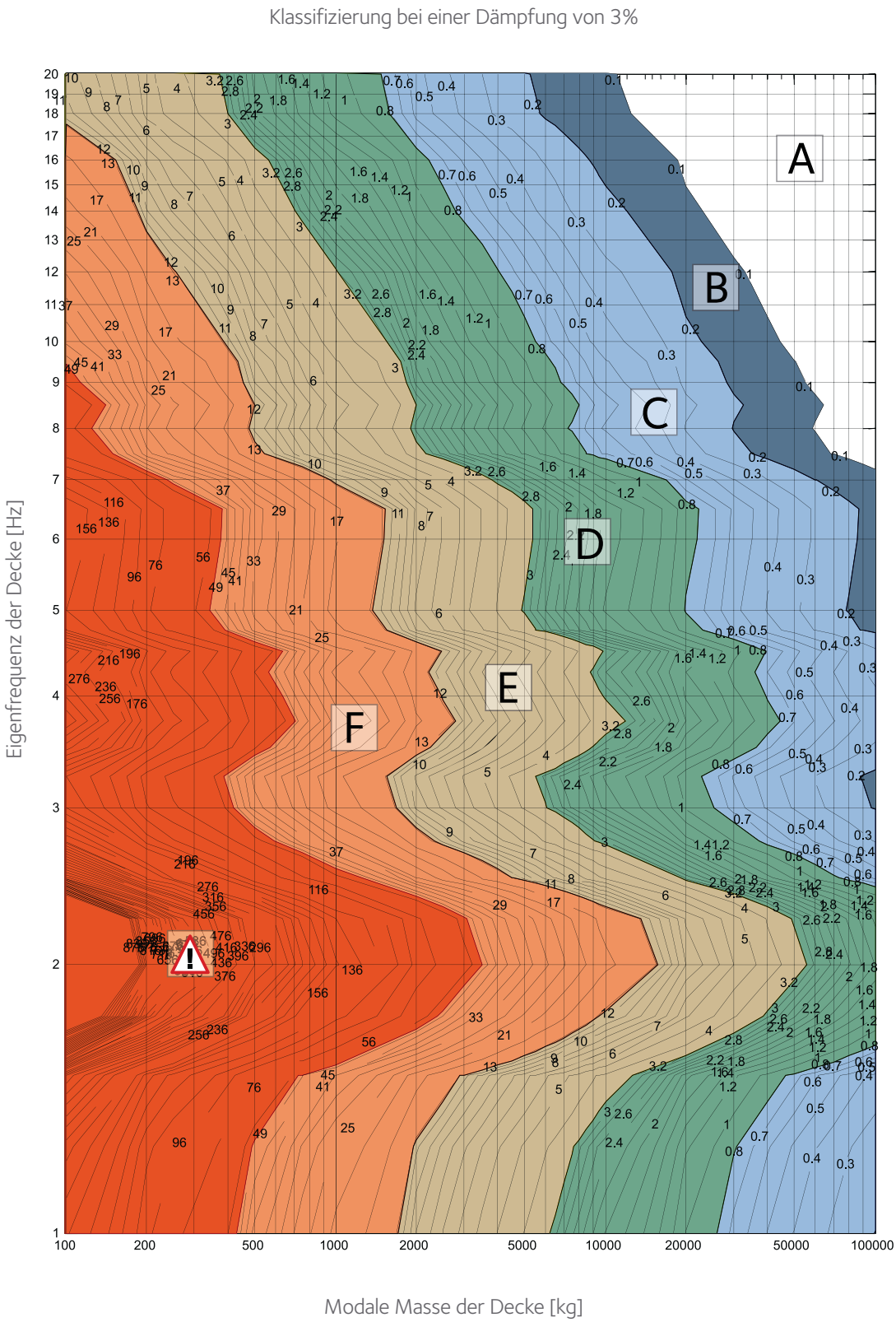


Bild 7: OS-RMS$_{90}$ für 4% Dämpfung

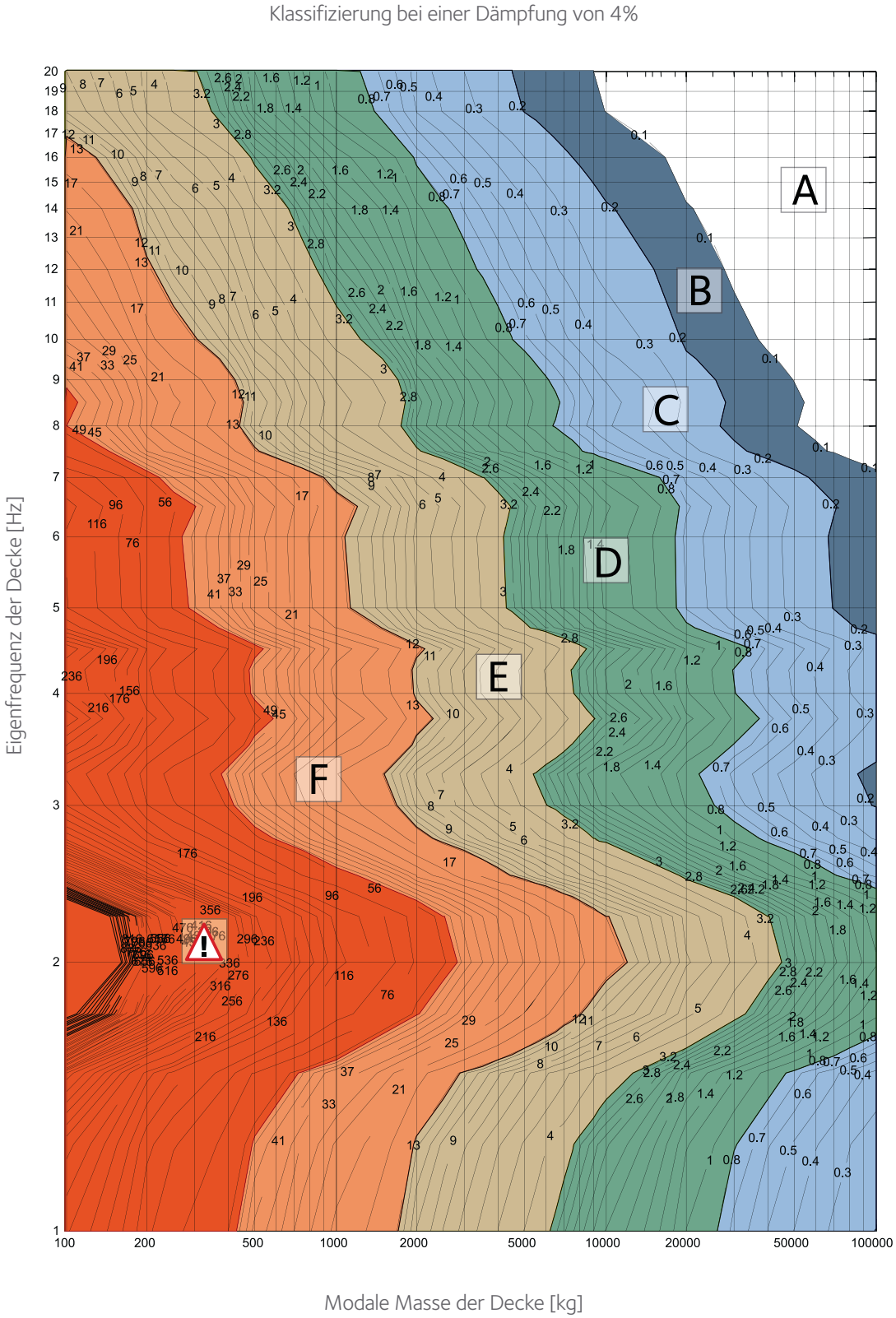


Bild 8: OS-RMS$_{90}$ für 5% Dämpfung

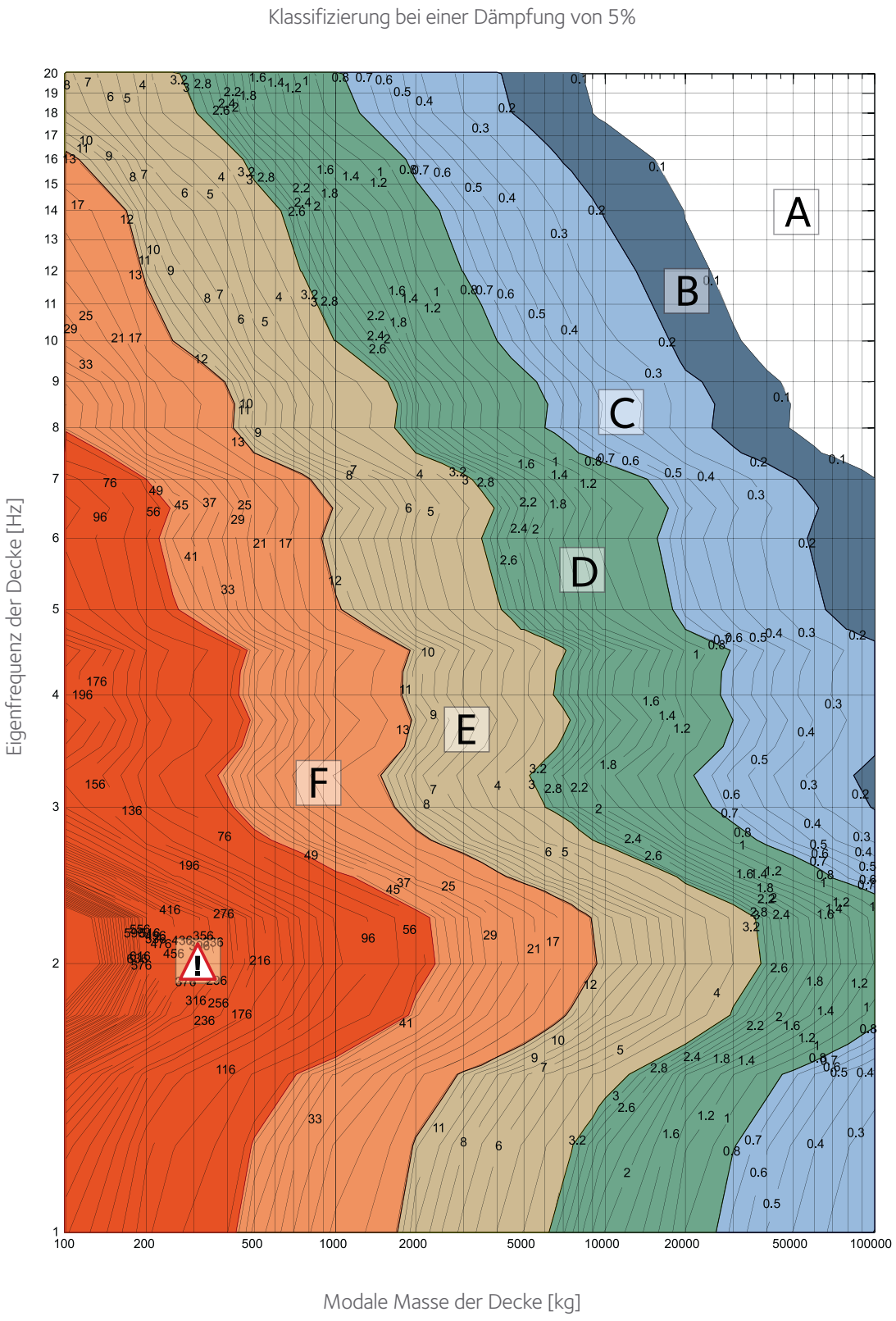


Bild 9: OS-RMS$_{90}$ für 6% Dämpfung

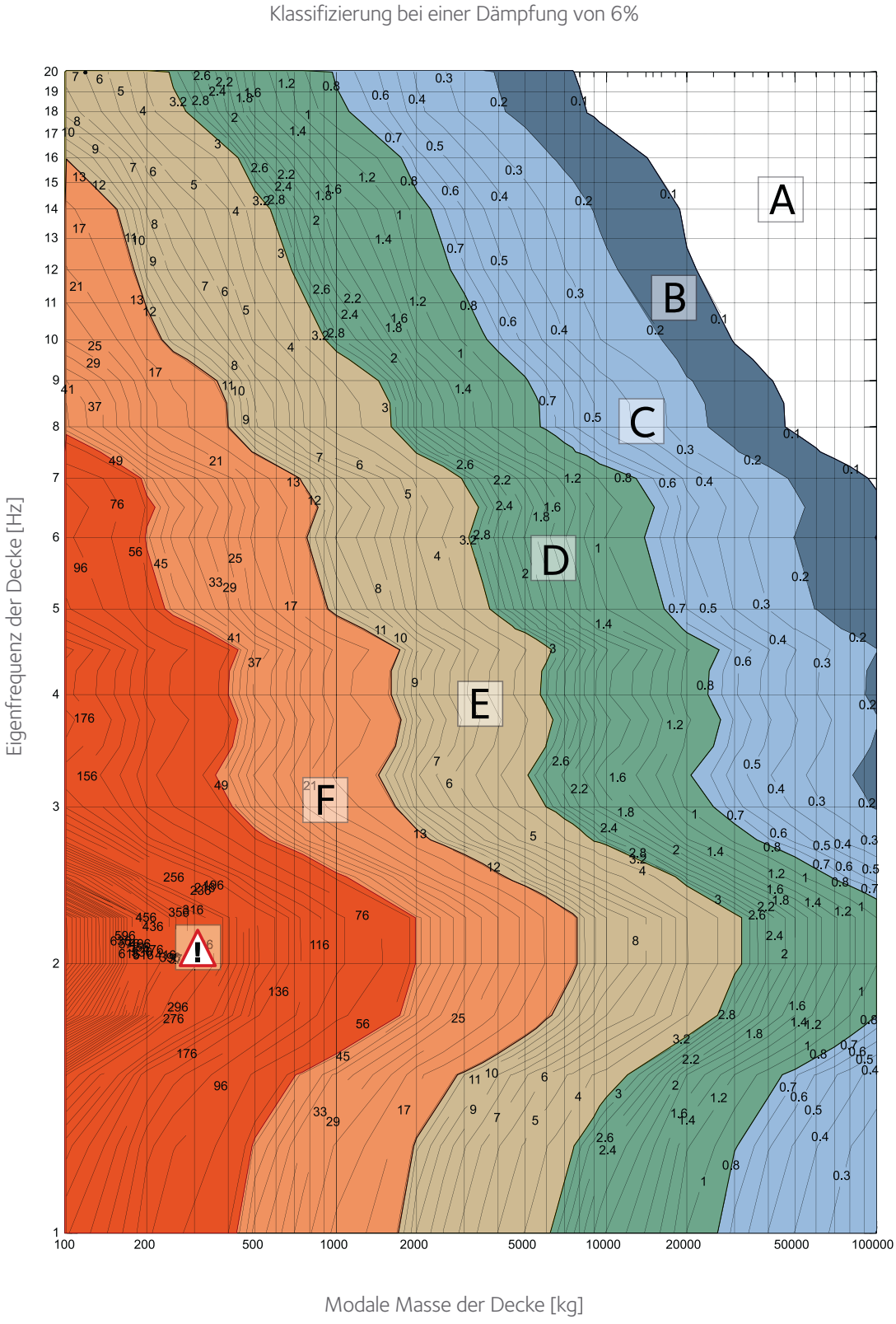


Bild 10: OS-RMS$_{90}$ für 7% Dämpfung

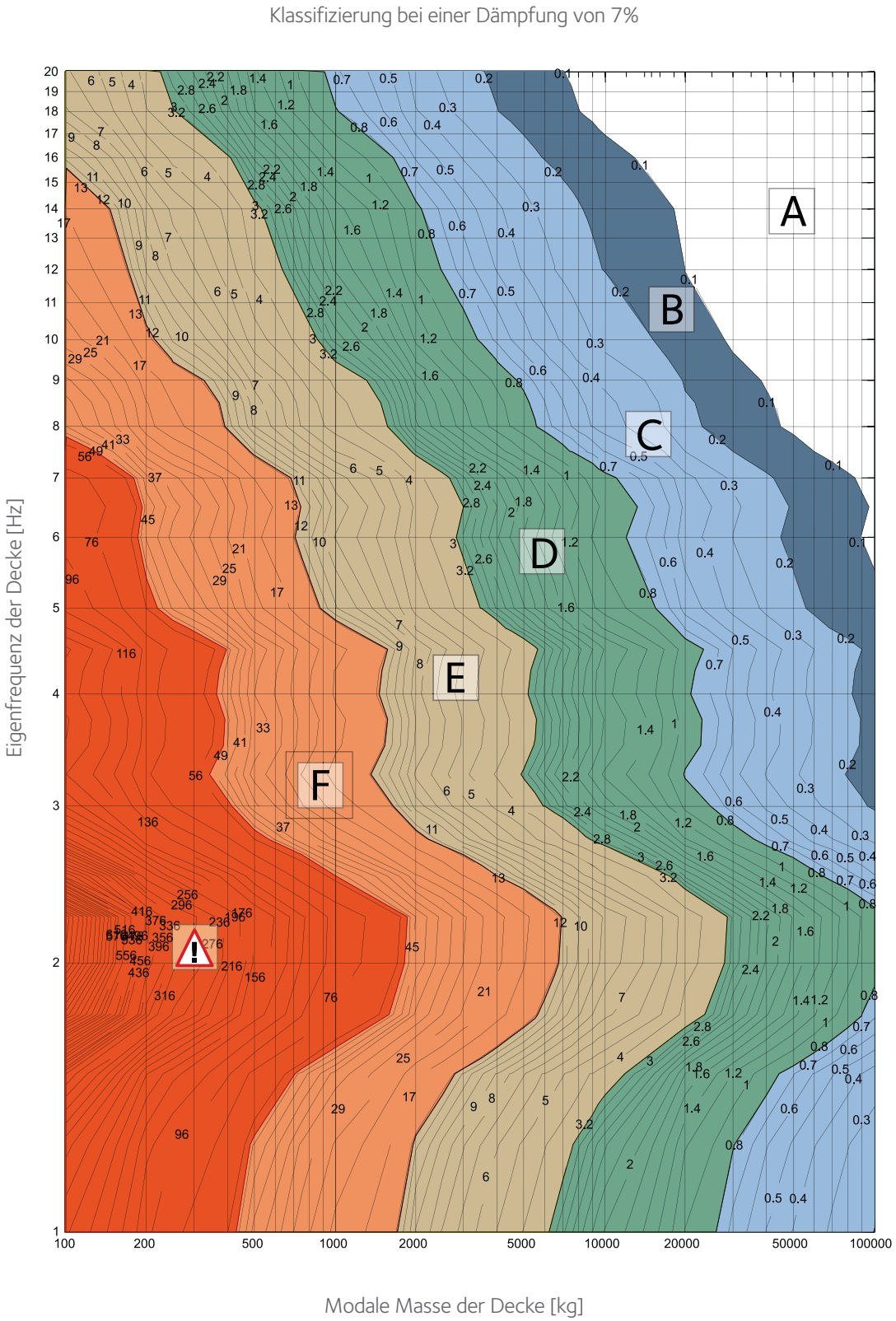


Bild 11: OS-RMS$_{90}$ für 8% Dämpfung

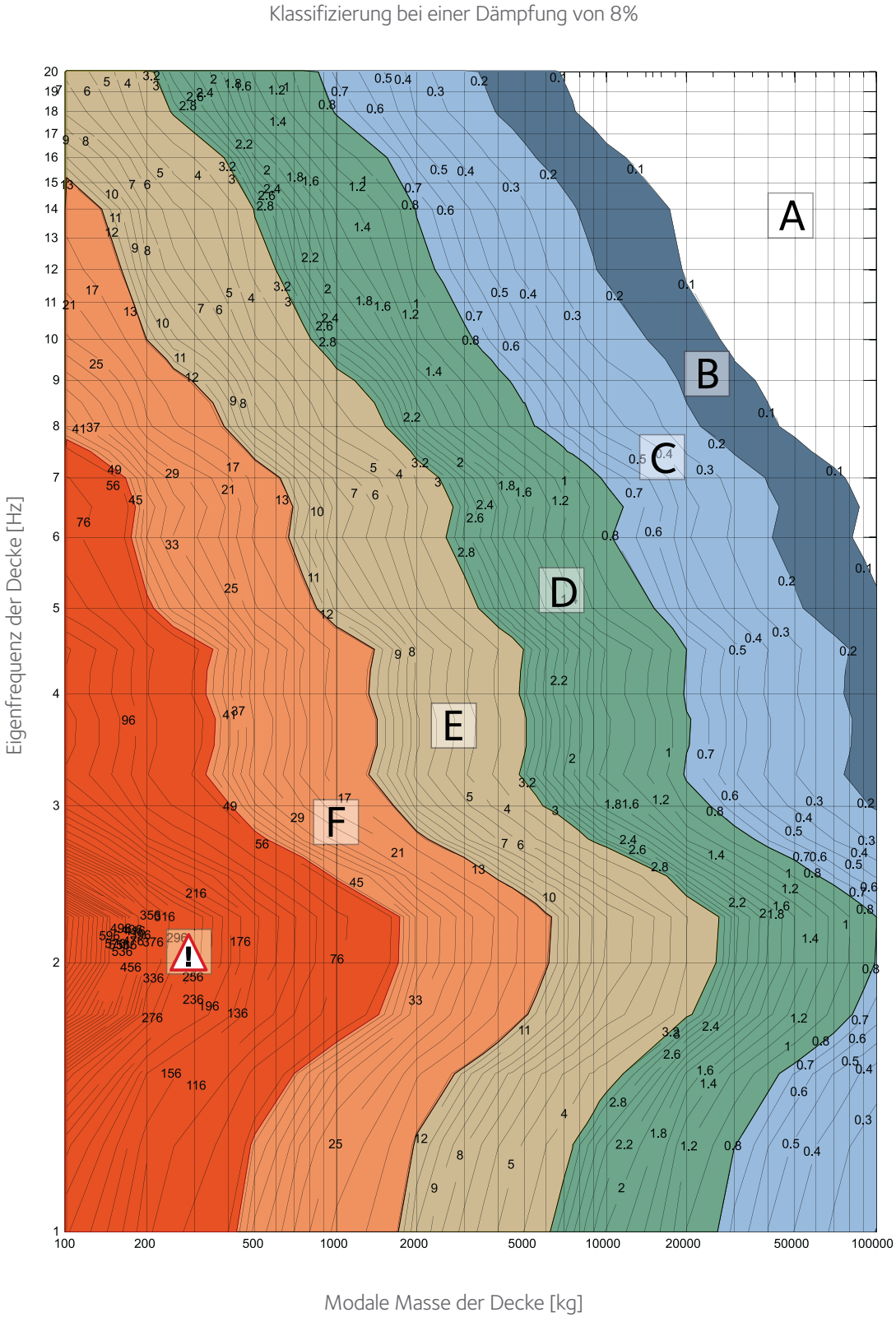
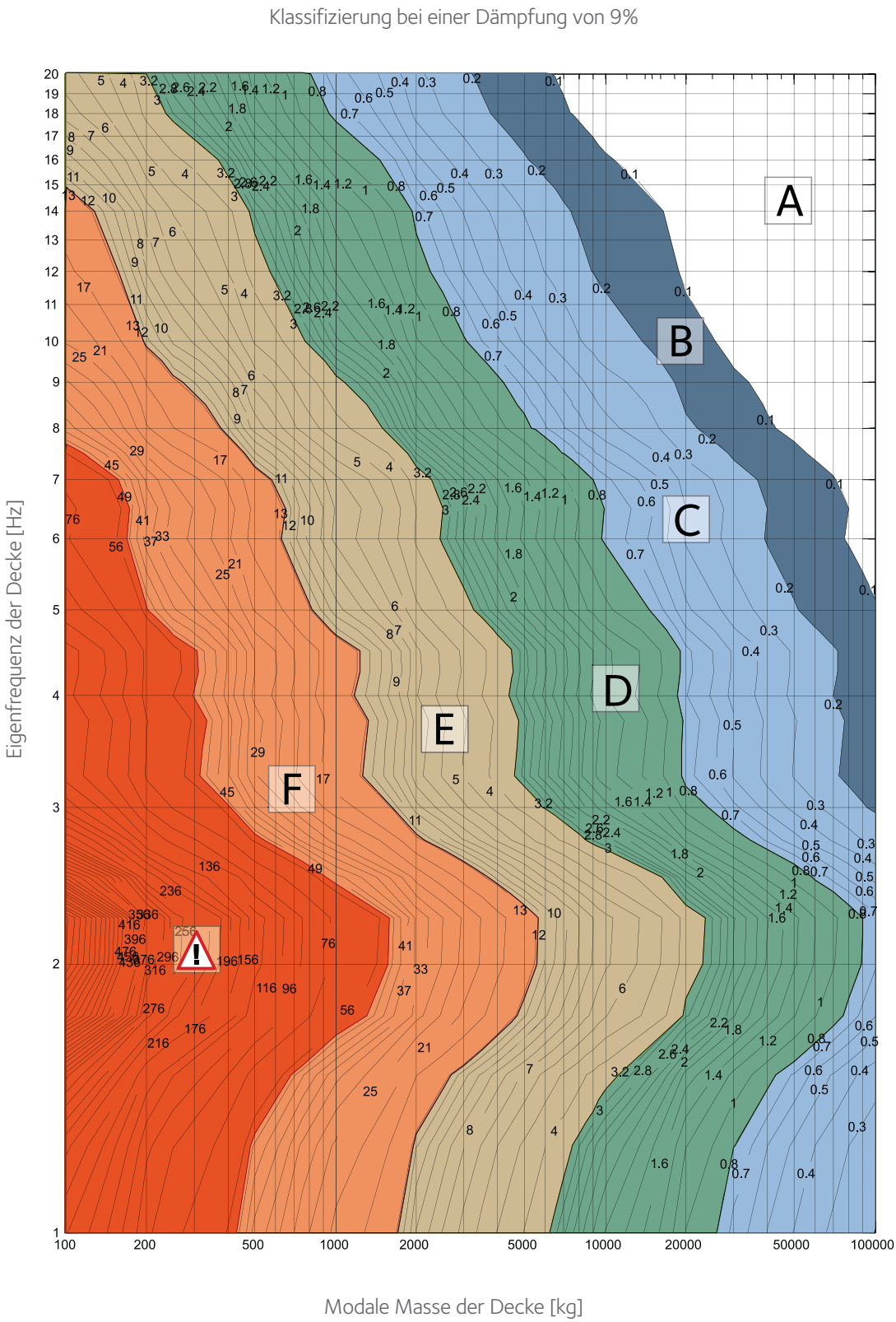


Bild 12: OS-RMS$_{90}$ für 9% Dämpfung



ANHANG A FORMELN FÜR DIE HANDRECHNUNG

A.1 Eigenfrequenz und modale Masse isotroper Platten 32
A.2 Eigenfrequenz und modale Masse von Balken 34
A.3 Eigenfrequenz und modale Masse orthotroper Platten 35
A.4 Eigengewichtsansatz für die Eigenfrequenz 36
A.5 Näherung von Dunkerley zur Bestimmung der Eigenfrequenz 37
A.6 Näherung für die modale Masse 38

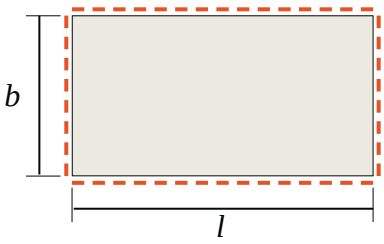
A.1 Eigenfrequenz und modale Masse isotroper Platten

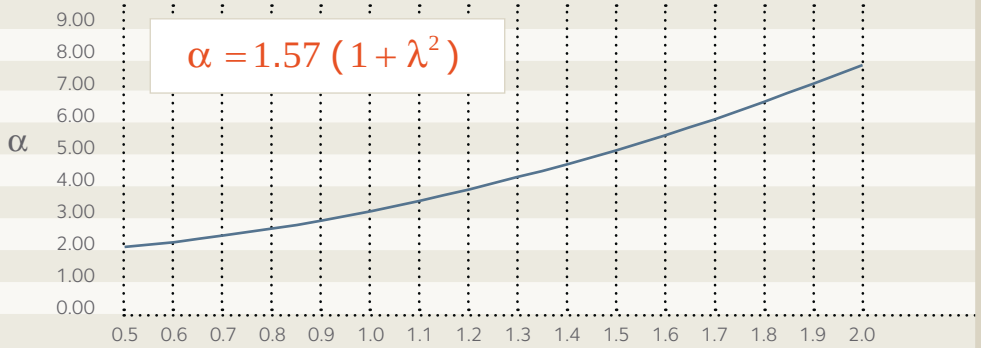
Die nachstehende Tabelle gibt Formeln für die Bestimmung der ersten Eigenfrequenz (nach [2]) und der modalen Masse für Platten mit verschiedenen Auflagerbedingungen. Bei der Anwendung der Formeln wird unterstellt, dass keine seitlichen Verschiebungen an den Plattenrändern auftreten.

Lagerungsbedingungen: **Frequenz; Modale Masse**

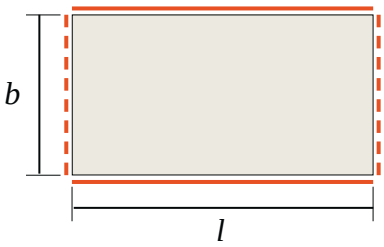
eingespannt gelenkig

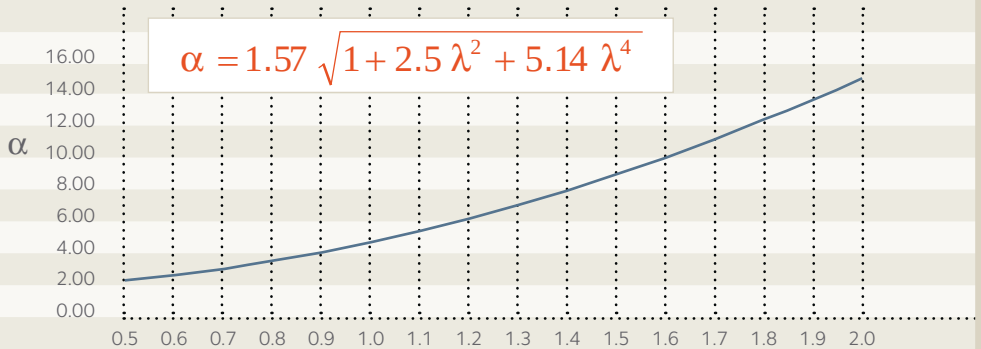
$$f = \frac{\alpha}{l^2}\sqrt{\frac{E\,t^3}{12m\,(1-\upsilon^2)}} \quad ; M_{mod} = \beta\, M$$



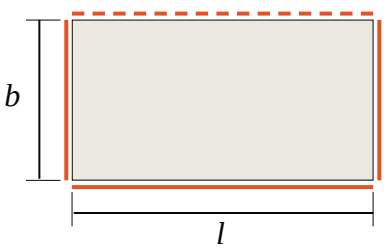


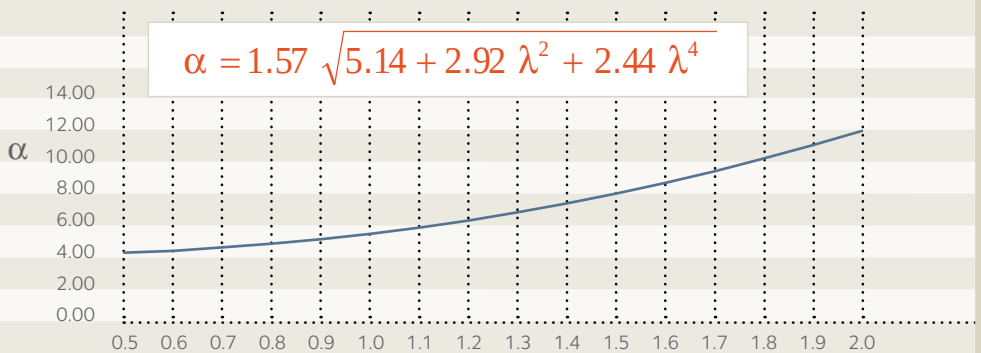
β ≈ 0.25 für alle λ





β ≈ 0.20 für alle λ





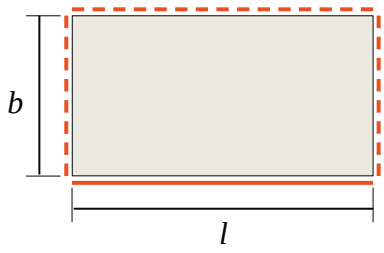
β ≈ 0.18 für alle λ

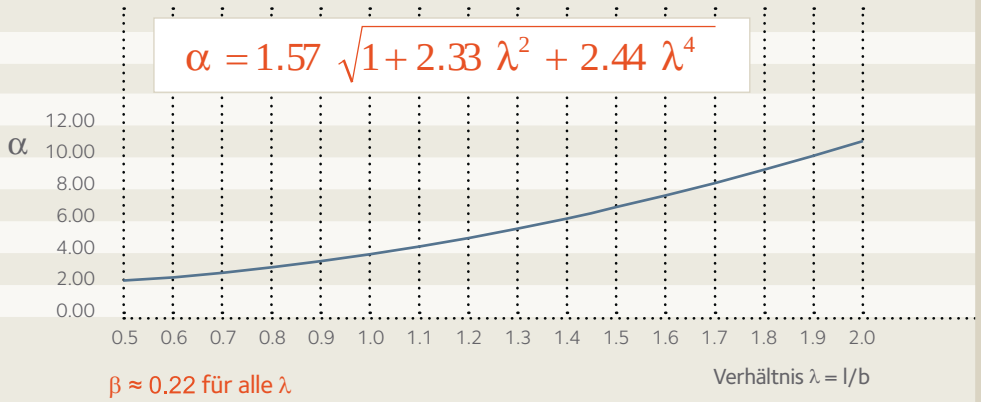
E Elastizitätsmodul in N/m²
t Plattendicke in m
m Masse der Decke einschließlich repräsentativer Verkehrslast in kg/m²
υ Querkontraktionszahl
M Gesamtmasse der Decke einschließlich repräsentativer Verkehrslast in kg

Lagerungsbedingungen: **Frequency; Modal Mass**

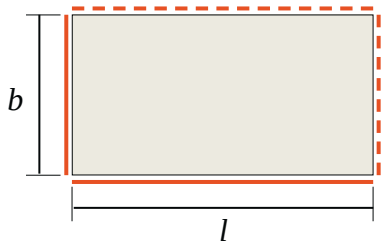
eingespannt gelenkig

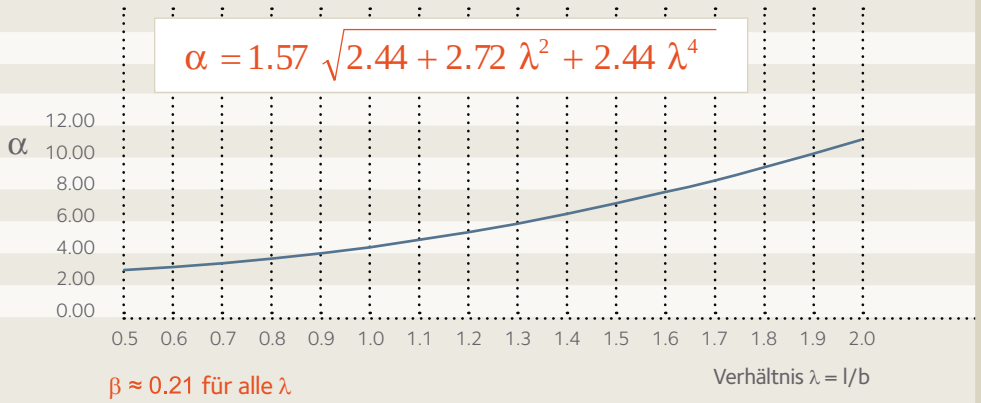
$$f = \frac{\alpha}{l^2}\sqrt{\frac{E\,t^3}{12m\,(1-\upsilon^2)}} \quad ; M_{mod} = \beta\, M$$



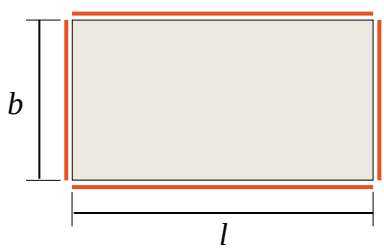


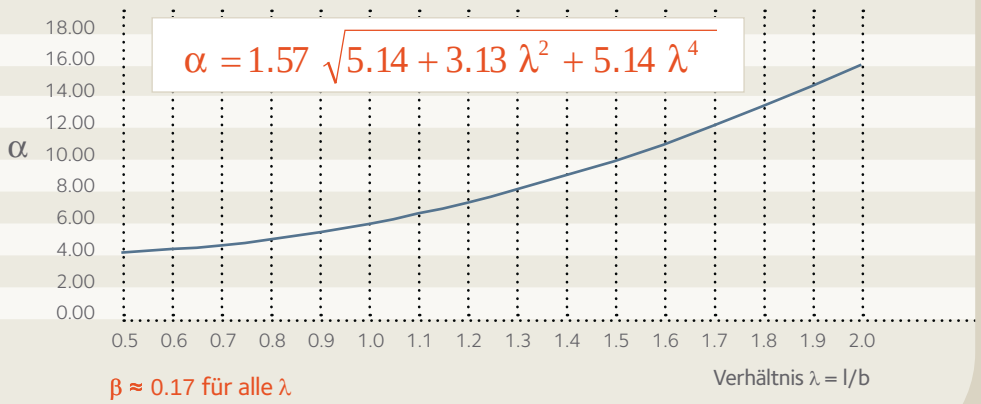
β ≈ 0.22 für alle λ





β ≈ 0.21 für alle λ





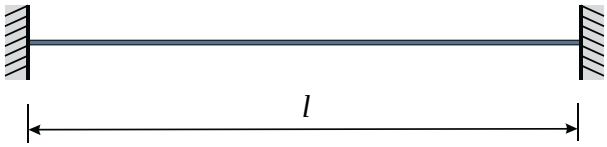
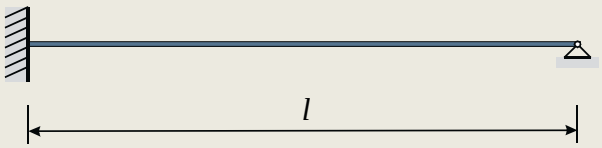
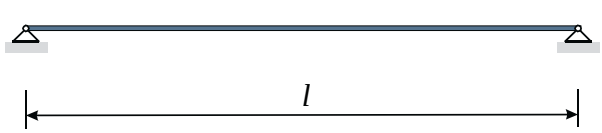
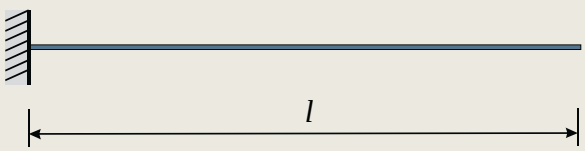
β ≈ 0.17 für alle λ

A.2 Eigenfrequenz und modale Masse von Balken

Die erste Eigenfrequenz eines Balkens kann unter Berücksichtigung der Auflagerbedingungen mit den Gleichungen in Tabelle 3 ermittelt werden Dabei ist:

- E Der Elastizitätsmodul [N/m²]
- I das Trägheitsmoment 2. Grades [m⁴]
- μ die längenbezogene Masse einschließlich repräsentativer Verkehrslast (siehe Kapitel 3) [kg/m]
- l die Länge des Balkens [m]

Tabelle 3: Bestimmung der ersten Eigenfrequenz von Balken

Auflagerbestimmungen	Eigenfrequenz	Modale Masse
	$f = \frac{4}{\pi}\sqrt{\frac{3\,EI}{0.37\,\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.41\,\mu\,l$
	$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3\,EI}{0.2\,\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.45\,\mu\,l$
	$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3\,EI}{0.49\,\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.5\,\mu\,l$
	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3\,EI}{0.24\,\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0.64\,\mu\,l$

A.3 Eigenfrequenz und modale Masse orthotroper Platten

Orthotrope Decken, wie z.B. Verbunddecken mit Stahlträgern in Längsrichtung und einer Betonplatte in Querrichtung besitzen unterschiedliche Steifigkeiten in Quer- und Längsrichtung ($EI_y > EI_x$). Ein Beispiel zeigt Bild 13.

Die erste Eigenfrequenz einer orthotropen Platte, die an allen Rändern gelenkig gelagert ist, kann berechnet werden mit:

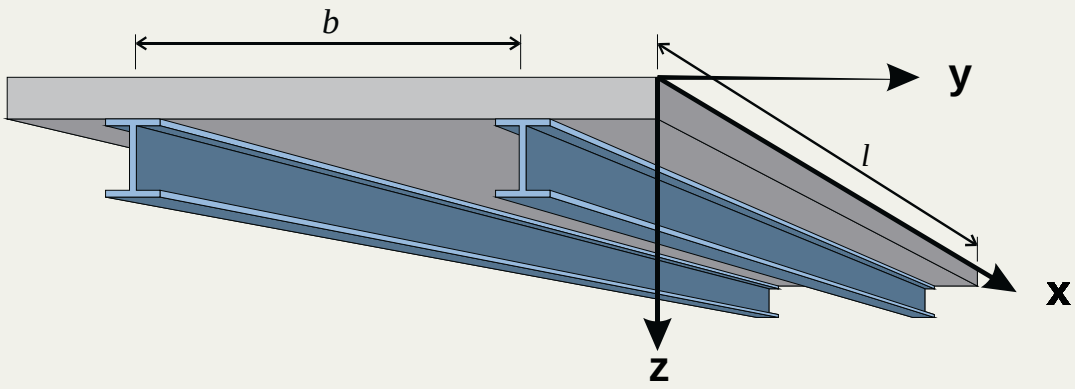
$$f_1 = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{EI_y}{m\,l^4}}\sqrt{1+\left[2\left(\frac{b}{l}\right)^2+\left(\frac{b}{l}\right)^4\right]\frac{EI_x}{EI_y}}$$

Dabei ist:

- m die Masse einschließlich repräsentativer Verkehrslast pro m² (siehe Kapitel 3) [kg/m²],
- l die Länge der Decke [m] (in x-Richtung),
- b die Breite der Platte [m] (in y-Richtung),
- E das Elastizitätsmodul [N/m²],
- I_x das Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die x-Achse [m⁴],
- I_y das Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die y-Achse [m⁴].

Hilfen zur Abschätzung der modalen Masse orthotroper Platten können Anhang A.6 entnommen werden.

Bild 13: Angaben zu Abmessungen und Achsen für eine orthotrope Platte



A.4 Eigengewichtsansatz für die Eigenfrequenz

Der Eigengewichtsansatz ist eine sehr pragmatische Annäherung für die Berechnung der Eigenfrequenz in Fällen, bei denen die Durchbiegung δ_{max} infolge der Masse M, wie z.B. bei FE-Berechnungen, bekannt ist.

Der Ursprung dieses Ansatzes liegt in der allgemeinen Frequenzgleichung:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}$$

Die Steifigkeit K kann durch folgende Annahmen angenähert werden:

$$K = \frac{M\,g}{\frac{3}{4}\delta}$$

Dabei ist

M die Gesamtmasse des Schwingungssystems [kg],

$g = 9.81$ die Erdbeschleunigung [m/s^2] und

$\frac{3}{4}\delta$ die mittlere Durchbiegung [mm].

Die Näherung für die Eigenfrequenz lautet:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4g}{3\delta_{max}}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_{max}\,[mm]}}$$

Dabei ist

δ_{max} die maximale Durchbiegung infolge der Masse M.

A.5 Näherung von Dunkerley zur Bestimmung der Eigenfrequenz

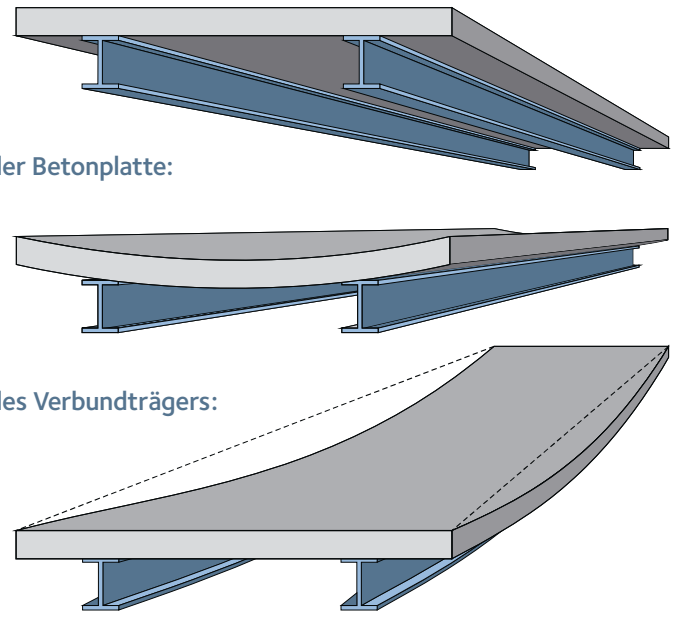
Das Näherungsverfahren von Dunkerley ist ein Handrechenverfahren zur Bestimmung der Eigenfrequenz. Es kann angewendet werden, wenn die erwartete Schwingungsform sehr komplex ist, jedoch durch Überlagerung von zwei oder mehreren Schwingungsformen vereinfacht dargestellt werden kann.
Die Eigenfrequenzen dieser einfachen Schwingungsformen können mit den Verfahren in den Abschnitten A.1 bis A.3 ermittelt werden.

Bild 14 zeigt als Beispiel eine Verbunddecke zwischen zwei gelenkig gelagerten Balken und ohne Auflager an den Plattenrändern.
Die erwarteten Schwingungsform wird in zwei unabhängige Schwingungsformen eingeteilt; eine der Betonplatte und eine des Verbundträgers.
Beide Schwingungsformen haben ihre eigene Eigenfrequenz (f_1 für die Schwingung der Betonplatte und f_2 für den Verbundträger).

Nach Dunkerley ergibt sich die Eigenfrequenz des Gesamtsystems f zu:

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} + \dots$$

Bild 14: Beispiel für die Aufteilung der Schwingungsform



A.6 Näherung für die modale Masse

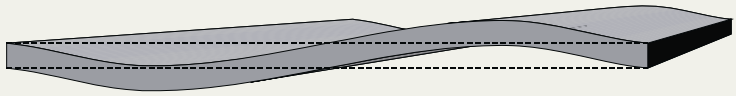
Die modale Masse kann als der Anteil der Gesamtmasse einer Decke verstanden werden, der beim Schwingen in einer bestimmten Schwingungsform aktiviert wird. Jede Schwingungsform hat ihre eigene Eigenfrequenz und modale Masse.

Zur Bestimmung der modalen Masse muss die Schwingungsform ermittelt und auf die maximale Durchbiegung normiert werden. Weil die Schwingungsform mit Handrechenverfahren nicht ermittelt werden kann, werden üblicherweise Näherungen verwendet.

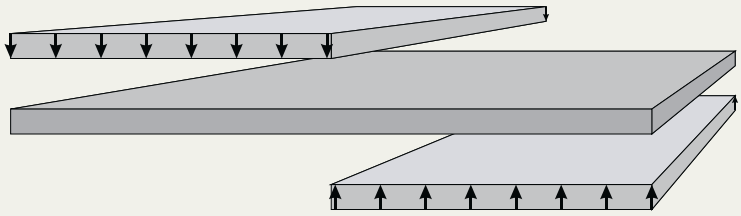
Häufig werden alternativ zum Handrechenverfahren auch FE-Berechnungen verwendet. Für den Fall, dass das FE-Programm die modale Masse nicht berechnet, kann die erwartete Schwingungsform durch einen entsprechenden Lastansatz erzwungen werden, siehe Bild 15.

Bild 15: Lastansatz zur Bestimmung einer Näherung für die Schwingungsform (Beispiel)

Erwartete Schwingungsform:



Lastansatz:



Wenn die Schwingungsform durch eine normalisierte Funktion $f(x,y)$ angenähert wird (d.h. $|f(x,y)|_{max.} = 1.0$), dann kann die modale Masse mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$M_{mod} = \mu \int_F f^2(x,y)\, dF$$

Dabei ist

μ die Massenverteilung

$f(x,y)$ die vertikale Verschiebung am Ort x,y

Wenn die Schwingungsform mit FE berechnet wurde, lautet die Gleichung:

$$M_{mod} = \sum_{Nodes\ i} f_i^2\, dM_i$$

Dabei ist

f_i die vertikale Verschiebung am Knoten i (auf die maximale Verschiebung normalisiert)

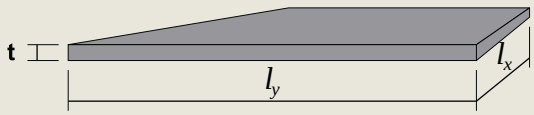
dM_i der Massenanteil, der am Knoten i abgebildet wird.

Wenn die Funktion $f(x,y)$ die Schwingungsform exakt beschreibt, dann liefert die oben gegebene Gleichung auch den genauen Wert der modalen Masse.

Nachfolgend werden Beispiele für die Bestimmung der modalen Masse mit Handrechenverfahren gegeben:

Beispiel 1:

An allen vier Rändern gelenkig gelagerte Platte, $l_y \sim l_x$



- Näherung für die erste Schwingungsform:

$$f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi\, x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi\, y}{l_y}\right)$$

$$\left| f(x,y) \right|_{max} = 1.0$$

- Massenverteilung

$$\mu = \frac{M}{l_x\, l_y}$$

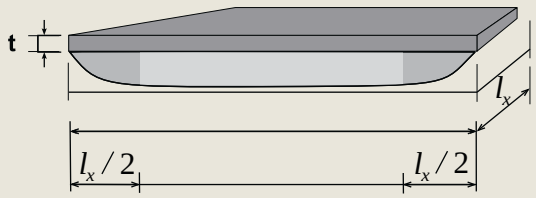
- Modale Masse

$$M_{mod} = \mu \int_F f^2(x,y)\, dF = \frac{M}{l_x\, l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \sin^2\left(\frac{\pi\, x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi\, y}{l_y}\right) dx\, dy$$

$$= \frac{M}{4}$$

Beispiel 2:

An allen vier Rändern gelenkig gelagerte Platte, $l_x << l_y$



- Näherung für die erste Schwingungsform:

1. $0 \le y \le \frac{l_x}{2}$ und $l_y - \frac{l_x}{2} \le y \le l_y$: $f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$

   $\left| f(x,y) \right|_{max} = 1.0$

2. $\frac{l_x}{2} \le y \le l_y - \frac{l_x}{2}$: $f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) 1.0$

   $\left| f(x,y) \right|_{max} = 1.0$

- Massenverteilung

$$\mu = \frac{M}{l_x \, l_y}$$

- Modale Masse

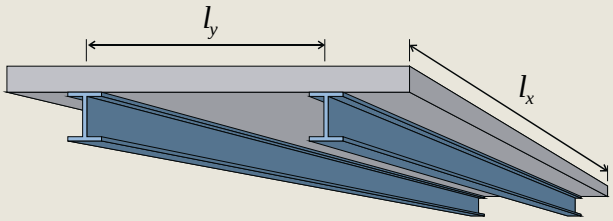
$$M_{mod} = \mu \int_F f^2(x,y) \, dF$$

$$= \frac{M}{l_x \, l_y} \left[2 \int_0^{l_x} \int_0^{y=\frac{l_x}{2}} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) dx \, dy + \int_0^{l_x} \int_0^{y=l_y - 2\frac{l_x}{2}} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) dx \, dy \right]$$

$$= \frac{M}{4} \left(2 - \frac{l_x}{l_y}\right)$$

Beispiel 3:

Platte spannt in eine Richtung zwischen den Trägern, Platte und Träger sind gelenkig gelagert



- Näherung für die erste Schwingungsform:

$$f(x,y) = \frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$\left| f(x,y) \right|_{max} = 1.0$$

Dabei ist:

δ_x = Durchbiegung des Trägers

δ_y = Durchbiegung der Betonplatte unter der Annahme, dass sich die Auflager (d.h. der Träger) nicht durchbiegen

δ = $\delta_x + \delta_y$

- Massenverteilung

$$\mu = \frac{M}{l_x\, l_y}$$

- Modale Masse

$$M_{mod} = \mu \int_F f^2(x,y)\, dF = \frac{M}{l_x\, l_y} \int_0^{l_x}\int_0^{l_y} \left[\frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi\, x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi\, y}{l_y}\right) \right]^2 dx\, dy$$

$$= M \left[\frac{\delta_x{}^2 + \delta_y{}^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x\, \delta_y}{\delta^2} \right]$$

ANHANG B BEISPIELE

B.1 Filigrandecke mit Lochstegträger (Bürogebäude) 44
B.1.1 Beschreibung der Decke 44
B.1.2 Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaften 47
B.1.3 Bewertung 47
B.2 Dreigeschossiges Bürogebäude 48
B.2.1 Einleitung 48
B.2.2 Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaften 50
B.2.3 Bewertung 51

B.1 Filigrandecke mit Lochstegträger (Bürogebäude)

B.1.1 Beschreibung der Decke

Im ersten Anwendungsbeispiel wird eine Filigrandecke mit aufgeständertem Boden auf ihr Schwingungsverhalten infolge "Gehen" auf der Decke überprüft.

Die Decke spannt über 4.2 m zwischen den Trägern. Ihre Gesamtdicke beträgt 160 mm. Die Hauptträger sind Lochstegträger (ACB, ArcelorMittal Cellular Beams), die als Verbundträger ausgeführt werden. Sie sind in die Stützen voll momententragfähig eingespannt. Der Grundriss ist in Bild 18 dargestellt. Für die Schwingungundersuchung ist es ausreichend, nur einen für die Decke repräsentativen Teil zu betrachten. Der Teil der Decke, der für die Schwingungsberechnung angesetzt ist, ist schraffiert gekennzeichnet.

Bild 16: Tragwerk des Gebäudes

Bild 17: Träger-Stützen-Verbindung

Bild 18: Grundriss

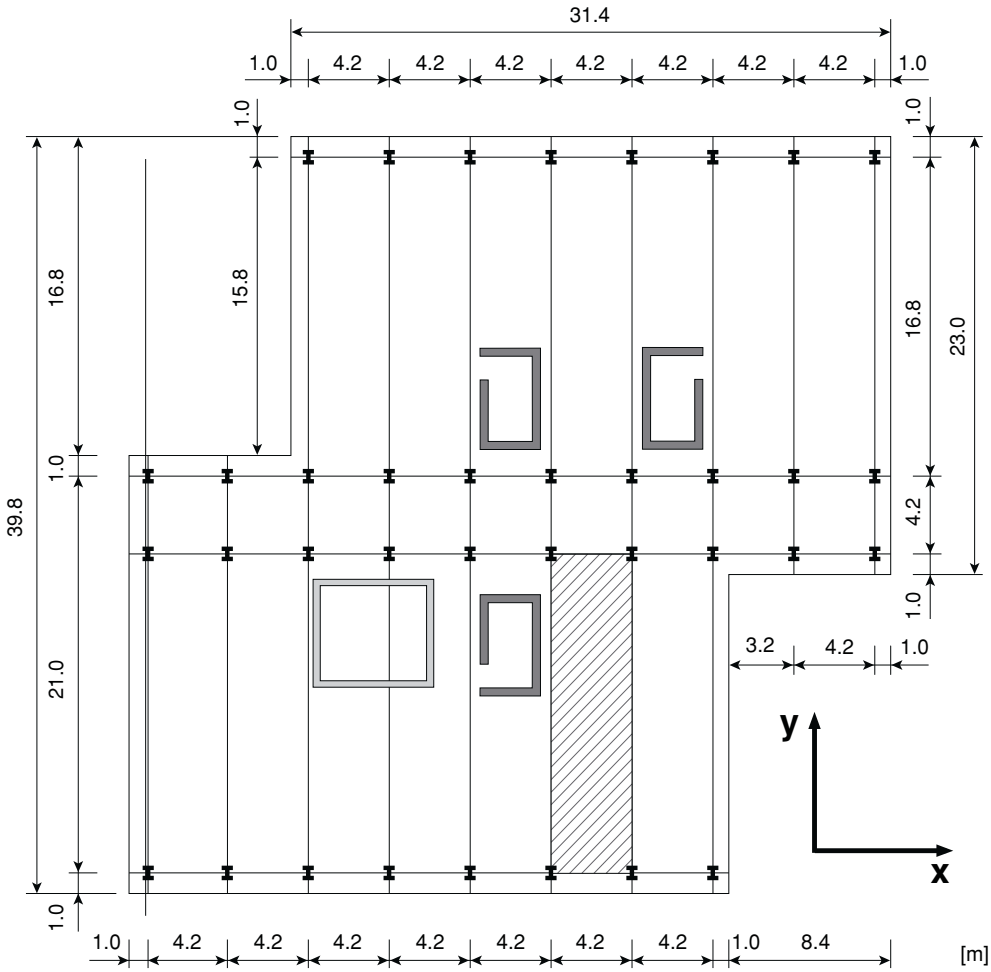
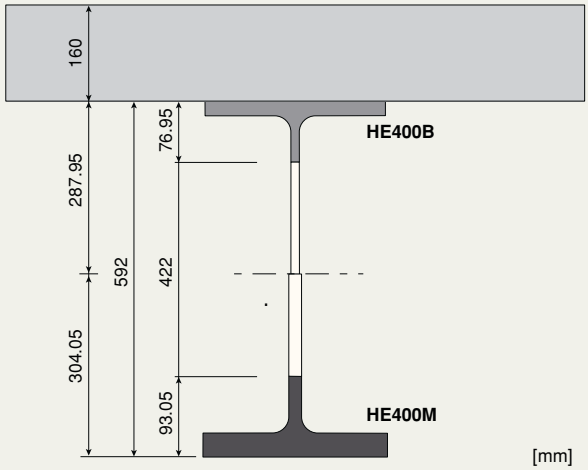


Bild 19: Querschnitt



Die Hauptträger besitzen eine Spannweite von 16.8 m und wurden als ACB/HEM400/HEB400 in S460 ausgeführt. Die Hauptträger mit der kurzen Spannweite von 4.2 m haben einen Querschnitt ACB/HEM360 ebenfalls in S460.

Die Querträger, die in globaler x-Richtung verlaufen, können vernachlässigt werden, weil sie an der Lastabtragung nicht beteiligt sind.

Die nominellen Werkstoffeigenschaften sind:

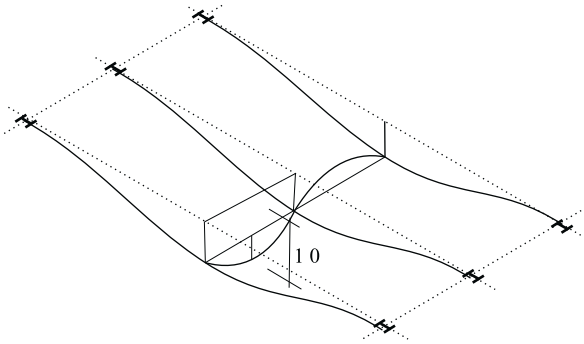
- Stahl S460: E_s = 210000 N/mm², f_y = 460 N/mm²
- Beton C25/30: E_{cm} = 31000 N/mm², f_{ck} = 25 N/mm²

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, wird der Nominalwert des E-Moduls von Beton für die dynamische Berechnung erhöht:

$$E_{c,dyn} = 1.1 \quad E_{cm} = 34100 \ N/mm^2$$

Die erwartete erste Schwingungsform des untersuchten Deckenbereichs ist in Bild 20. abgebildet. Aus dieser Schwingungsform geht hervor, dass jedes Feld der Betonplatte in der weiteren dynamischen Berechnung als gelenkig gelagert betrachtet werden kann. Die Auflagerungsbedingungen des Hauptträgers (siehe Träger-Stützenverbindung in Bild 17) werden für die kleinen Schwingungsamplituden, wie sie in Deckenschwingungen auftreten bestimmt und als ausreichend drehbehindert angesehen. Das heißt sie werden als voll eingespannt angenommen.

Bild 20: Erwartete erste Schwingungsform des betrachteten Deckenteils



Querschnittswerte

Decke:
Die maßgebenden Querschnittseigenschaften der Decke in globale x-Richtung sind:

$$A_{c,x} = 160\ mm^2/mm$$

$$I_{c,x} = 3.41 \times 10^5\ mm^4/mm$$

Hauptträger:
Unter der oben getroffenen Annahme für die ersten Schwingungsform kann die effektive Breite des Verbundträgers mit nachstehender Gleichung ermittelt werden:

$$b_{eff} = b_{eff,1} + b_{eff,2} = \frac{l_0}{8} + \frac{l_0}{8}$$

$$= 2 \times \frac{0.7 \times 16.8}{8} = 2.94\,m$$

Die maßgebenden Querschnittseigenschaften des Hauptträgers im Gebrauchszustand (keine Rissbildung im Beton) sind:

$A_{a,netto}$ = 21936 mm^2
$A_{a,total}$ = 29214 mm^2
A_i = 98320 mm^2
I_i = 5.149 x 10^9 mm^4

Lastannahmen

Decke:

- Eigengewicht (beinhaltet 1.0 kN/m² für den Bodenaufbau):

$$g_{Decke} = 160 \times 10^{-3} \times 25 + 1.0 = 5\ kN/m^2$$

- Verkehrslast: Gewöhnlich wird eine Verkehrslast von 3 kN/m² für Geschossdecken in Bürogebäuden empfohlen. Der bei dynamischen Berechnungen berücksichtigte Anteil der Verkehrslast wird mit 10% abgeschätzt. Für den Schwingungsnachweis bedeutet das:

$$q_{Decke} = 0.1 \times 3.0 = 0.3\ kN/m^2$$

Hauptträger:

- Eigengewicht (beinhaltet 2.00 kN/m für ACB-Träger):

$$g_{Träger} = 5.0 \times \frac{4.2}{2} \times 2 + 2.0 = 23.00\,kN/m$$

- Verkehrslast:

$$q_{Decke} = 0.3 \times \frac{4.2}{2} \times 2 = 1.26\ kN/m$$

B.1.2 Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaften

Eigenfrequenz

Die erste Eigenfrequenz wird mit dem Eigengewichtsansatz berechnet. Die Gesamtdurchbiegung kann durch Überlagerung der Durchbiegung der Bodenplatte mit der Durchbiegung des Hauptträgers ermittelt werden:

$$\delta_{max} = \delta_{Decke} + \delta_{Träger}$$

Dabei ist:

$$\delta_{Decke} = \frac{5 \times (5.0 + 0.3) \times 10^{-3} \times 4200^4}{384 \times 34100 \times 3.41 \times 10^5} = 1.9\,mm$$

$$\delta_{Träger} = \frac{1 \times (23.0 + 1.26) \times 16800^4}{384 \times 210000 \times 5.149 \times 10^9} = 4.7\,mm$$

Die Gesamtdurchbiegung ergibt sich zu:

$$\delta_{max} = 1.9 + 4.7 = 6.6\,mm$$

Die erste Eigenfrequenz berechnet sich somit (nach Anhang A.4) zu:

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{6.6}} = 7.0\,Hz$$

Modale Masse

Die Gesamtmasse des betrachteten Teils der Decke ist:

$$M = (5 + 0.3) \times 10^2 \times 16.8 \times 4.2 = 37397\,kg$$

Nach Abschnitt A.6, Beispiel 3 kann die modale Masse des betrachteten Teils der Decke bestimmt werden mit:

$$M_{mod} = 37397 \times \left[\frac{1.9^2 + 4.5^2}{2 \times 6.4^2} + \frac{8}{\pi^2} \times \frac{1.9 \times 4.5}{6.4^2} \right] = 17220kg$$

Dämpfung

Der Dämpfungswert von Stahl-Verbund-Decken mit ausgeständerten Boden wird nach Tabelle 1 ermittelt:

$D = D_1 + D_2 + D_2 = 1 + 1 + 1 = 3\%$

Dabei ist

D_1 = 1.0 (Stahl-Beton-Verbunddecke)
D_2 = 1.0 (Großraumbüro)
D_3 = 1.0 (aufgeständerter Boden)

B.1.3 Bewertung

Mit den oben bestimmten Schwingungseigenschaften wird die Decke in Klasse C (Bild 6). eingestuft. Der erwartete OS-RMS-Wert ist näherungsweise 0.5 mm/s.

Nach Tabelle 2 wird Klasse C als für Büronutzung geeignet eingestuft. Die Schwingungsanforderungen an die Decke sind also erfüllt.

B.2 Dreigeschossiges Bürogebäude

B.2.1 Einleitung

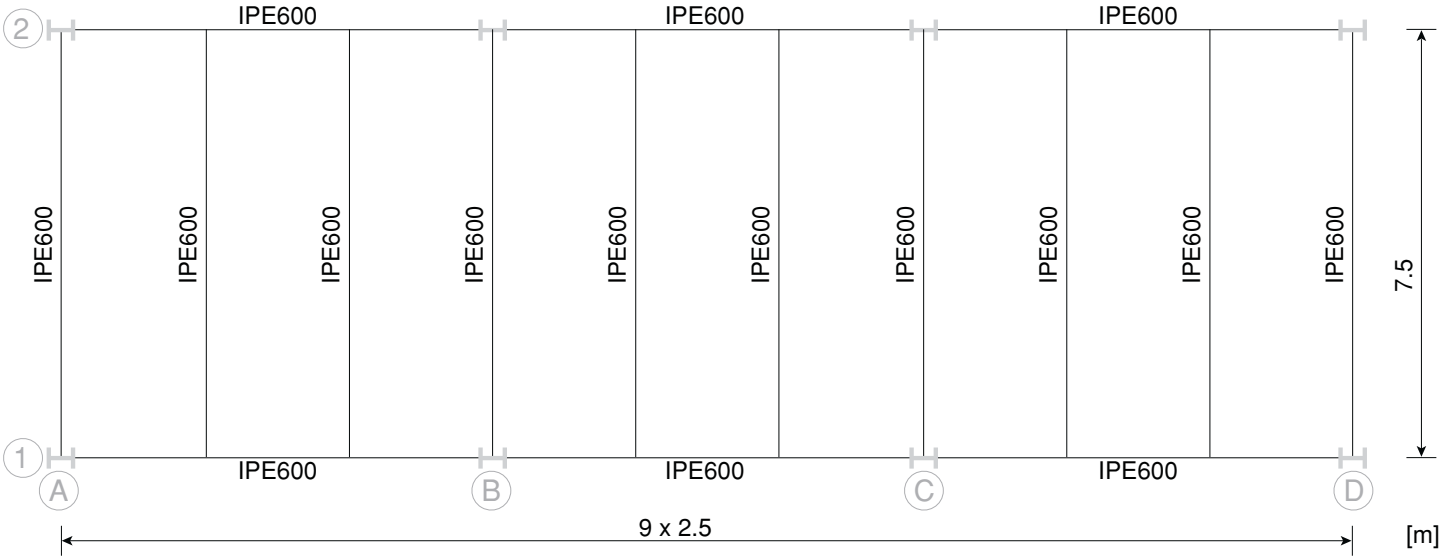
Bei der Betrachtung dynamisch isolierter Deckenfelder, ist der Beitrag der Hauptträger in der Frequenz und der Modalen Masse bei der Bewertung zusälzlich zu prüfen (Grundschwingung). Dies ist bei der Beurteilung gekoppelter Deckenfelder durch die Vergrößerung der Modalen Masse durch die zusätzliche Masse der mit angeregten Deckenfelder in der Regel nicht nötig.

Bild 21: Gebäudeübersicht

B.2.2 Beschreibung der Decke

Die Spannweite der Decke zwischen den Trägern dieses Bürogebäudes, Bild 21, beträgt 15 m von einem Randträger zum nächsten. Im Nutzungsbereich sind diese Deckenträger als IPE600 im Abstand von 2.5 m ausgeführt. Die Randträger spannen über 7.5 m von Stütze zu Stütze und für diese wurde ebenfalls ein IPE600 gewählt, siehe Bild 22.

Bild 22: Grundriss der Decke mit Querschnittswahl



Die Deckenplatte ist eine Verbunddecke mit einer Gesamtdicke von 15 cm. Bei den Stahlblechen handelt es sich um COFRASTRA 70, Bild 23.
Für weitere Informationen zum COFRASTRA wird auf www.arval-construction.fr verwiesen.
Die nominellen Werkstoffeigenschaften sind:

- Stahl S235: $E_s = 210000\ N/mm^2$, $f_y = 235\ N/mm^2$
- Beton C25/30: $E_{cm} = 31000\ N/mm^2$, $f_{ck} = 25\ N/mm^2$

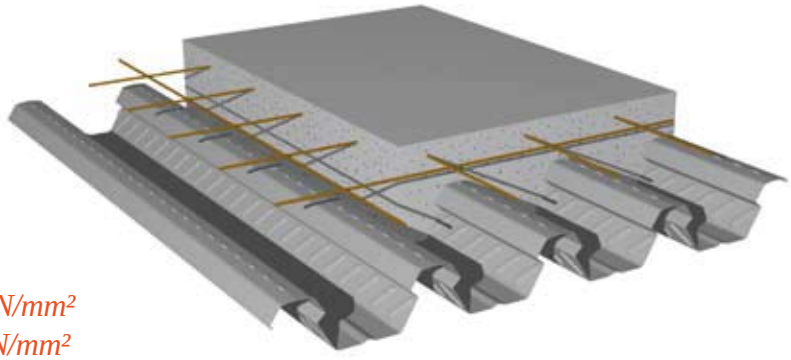


Bild 23: Deckenaufbau mit COFRASTRA 70

Für eine dynamische Berechnung (Schwingungsanalyse) ist der E-Modul gemäß Abschnitt 3 wie folgt zu erhöhen:

$$E_{c,\,dyn} = 1.1\ E_{cm} = 34100\ N/mm^2$$

Querschnittswerte

Decke
(quer zum Träger; E = 210000 N/mm²):
A = 1170 cm²/m
I = 20355 cm⁴/m

Verbundträger
(b_{eff} = 2.5 m; E = 210000 N/mm²)
A = 468 cm²
I = 270089 cm⁴

Lastannahmen

Decke (quer zum Träger):
Eigengewicht
g = 3.5 kN/m²
Δg = 0.5 kN/m²
$g + \Delta g$ = 4.0 kN/m² (ständige Last)
Verkehrslast
q = 3.0 x 0.1 = 0.3 kN/m²
(10% der Verkehrslast)

Verbundträger
(b_{eff} = 2,5m; E=210000 N/mm²):
Eigengewicht
g = (3.5+0.5) x 2.5 + 1.22 = 11.22 kN/m
Verkehrslast
q = 0.3 x 2.5 = 0.75 kN/m

B.2.2 Bestimmung der dynamischen Deckeneigenschaften

Auflagerungsbedingungen

Die Deckenträger werden an den Randträgern angeschlossen. Als offene Querschnitte besitzen die Randträger jedoch nur eine sehr geringe Torsionssteifigkeit. Daher sind die Deckenträger als gelenkig gelagerte Träger zu betrachten.

Eigenfrequenz

In diesem Beispiel wird die Eigenfrequenz der Decke nach drei Verfahren ermittelt: der Balkenformel bei Vernachlässigung der Quersteifigkeit, der Gleichung für die orthotrope Platte und dem Eigengewichtsansatz unter Berücksichtigung der Quersteifigkeit.

- Anwendung der Balkenformel (Abschnitt A.2):

$$p = 11.97 \ \ kN/m \ \Rightarrow \mu = 11.97 \times 1000 \ / 9.81 = 1220 \ \ kg/m$$

$$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3 \ EI}{0.49 \ \mu l^4}} = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3 \times 210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{0.49 \times 1220 \times 15^4}} = 4.8 \, Hz$$

- Anwendung der Gleichung für die orthotrope Platte (Abschnitt A.3):

$$f_1 = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{EI_y}{m \, l^4}}\sqrt{1 + \left[2\left(\frac{b}{l}\right)^2 + \left(\frac{b}{l}\right)^4\right]\frac{EI_x}{EI_y}}$$

$$= \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{1220 \times 15^4}} \times \sqrt{1 + \left[2\left(\frac{2.5}{15}\right)^2 + \left(\frac{2.5}{15}\right)^4\right]\frac{3410 \times 20355}{21000 \times 270089}}$$

$$= 4.8 \times 1.00 = 4.8 \, Hz$$

- Anwendung des Eigengewichtsansatzes (Abschnitt A.4):
  Die maximale Durchbiegung ist im Zentrum des Deckenfeldes zu erwarten. Hier wird die Durchbiegung durch die Steifigkeiten von Verbundplatte und Verbundträger dominiert. Auswirkungen aus der Durchbiegung des Randträgers können im Zentrum des Deckenfeldes näherungsweise vernachlässigt werden.

$$\delta_{max} = \delta_{Decke} + \delta_{Träger}$$

$$\delta_{Decke} = \frac{5 \times 4.3 \times 10^{-3} \times 2500^4}{384 \times 34100 \times 2.0355 \times 10^5} = 0.3\,mm$$

$$\delta_{Träger} = \frac{5 \times 11.97 \times 15000^4}{384 \times 210000 \times 270089 \times 10^4} = 13.9\,mm$$

$$\delta_{max} = 0.3 + 13.9 = 14.2\,mm$$

$$\Rightarrow \quad f_1 = \frac{18}{\sqrt{14.2}} = 4.8\,Hz$$

Modale Masse

Die oben durchgeführte Berechnung der Eigenfrequenzen zeigt, dass das dynamische Verhalten der Decke auf einen Balken vereinfacht werden kann. Daher wird das Balkenmodell für die Bestimmung der modalen Masse verwendet:

$$M_{mod} = 0.5\,\mu\,l = 0.5 \times 1220 \times 15 = 9150\,kg$$

Dämpfung

Die Dämpfung der Verbunddecke mit abgehängter Decke wird nach Tabelle 1 berechnet:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 1 + 1 + 1 = 3\%$$

Dabei ist

D_1 = 1.0 (Stahl-Beton-Verbunddecke)
D_2 = 1.0 (Großraumbüro)
D_3 = 1.0 (abgehängte Decke)

B.2.3 Bewertung

Auf Grundlage der oben beschriebenen Eigenschaften wird die Decke in Klasse D (Bild 6). Der erwartete OS-RMS$_{90}$ ist etwa 3.2 mm/s.

Nach Tabelle 2 ist Klasse D für Bürogebäude empfohlen. Das heißt, die Anforderungen sind erfüllt.

Technische Beratung & Anarbeitung der Träger

Technische Beratung

Um die Verwendung unserer Produkte und Lösungen in Ihren Projekten zu optimieren und sämtliche Fragen rund um den Einsatz von Profil- und Stabstahl zu beantworten, stellen wir Ihnen eine kostenlose technische Beratung zur Verfügung. Diese reicht vom Tragwerksentwurf und der Vordimensionierung über Oberflächenund Brandschutz, Metallurgie bis hin zu Konstruktionsdetails und zur Schweißtechnik.

Unsere Spezialisten stehen Ihnen jederzeit zur Verfügung, um Sie bei Ihren Aktivitäten weltweit zu unterstützen.

Zur Erleichterung der Planung Ihrer Projekte bieten wir außerdem umfangreiche Software und technische Dokumentationen an, die Sie auf unserer Website aufrufen oder herunterladen können.

sections.arcelormittal.com

Anarbeitung der Träger

Wir halten verschiedene technische Einrichtungen für die Anarbeitung vor, um das Angebot zu optimieren.

Unsere Möglichkeiten zur Anarbeitung umfassen folgende Bereiche:

- Bohren
- Brennschneiden
- Zuschneiden auf T-Querschnitt
- Ausklinken
- Überhöhen
- Biegen
- Richten
- Kaltsägen auf exakte Längen
- Aufschweißen von Kopfbolzendübeln
- Strahlen
- Oberflächenbehandlung

Baubereich

ArcelorMittal verfügt über ein professionelles Team, das sich quer über alle Stahlprodukte von ArcelorMittal ganz dem Baubereich widmet.

Die Erzeugnisse sowie die Anwendungsmöglichkeiten in der Baubranche: Tragwerke, Fassaden, Dächer, etc. finden Sie auf der Website

www.constructalia.com

Literaturverzeichnis

[1] European Commission – Technical Steel Research: "Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls", RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, http://europa.eu.int

[2] Hugo Bachmann, Walter Ammann: "Vibration of Structures induced by Man and Ma-chines" IABSE-AIPC-IVBH, Zürich 1987, ISBN 3-85748-052-X

Ihre Partner

DEUTSCHLAND

ArcelorMittal
Commercial Sections
Subbelrather Straße 13
D-50672 Köln
Tel.: +49 221 572 90
Fax.: +49 221 572 92 65
sections.arcelormittal.com

ArcelorMittal
Commercial Sections
Augustenstraße 14
D-70178 Stuttgart
Tel.: +49 711 667 40
Fax.: +49 711 667 42 40
sections.arcelormittal.com

Bauen mit Stahl
Sohnstraße 65
D-40237 Düsseldorf
Tel.: +49 211 670 78 28
Fax.: +49 211 670 78 29
www.bauen-mit-stahl.de

ÖSTERREICH

ArcelorMittal
Commercial Sections
Vogelweiderstraße 66
A-5020 Salzburg
Tel.: +43 662 886 74 4
Fax.: +43 662 886 74 41 0
sections.arcelormittal.com

SCHWEIZ

ArcelorMittal
Commercial Sections
Innere Margarethenstrasse 7
CH-4051 Basel
Tel.: +41 612 277 77 7
Fax: +41 612 277 76 6
sections.arcelormittal.com

SZS
Stahlbau Zentrum Schweiz
Seefeldstrasse 25
CH-8034 Zürich
Tel.: +41 442 618 98 0
Fax.: +41 442 620 96 2
www.szs.ch

Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Dr.-Ing. Ch. Heinemeyer
Dr.-Ing. B. Völling
RWTH Aachen University
Institut und Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

Obschon diese Broschüre mit der größtmöglichen Sorgfalt erstellt wurde, weisen wir darauf hin, dass wir keinerlei Haftung übernehmen in Bezug auf eventuell enthaltene Fehlinformationen oder für Schäden, die durch eine fehlerhafte Interpretation des Inhaltes entstehen können.

ArcelorMittal
Commercial Sections

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
LUXEMBOURG
Tel.: + 352 5313 3010
Fax: + 352 5313 2799

sections.arcelormittal.com

Version 2014-1

FSC
Mix
Produktgruppe aus vorbildlich bewirtschafteten Wäldern und anderen kontrollierten Herkünften
www.fsc.org Zert.-Nr. EUR-COC-051203
© 1996 Forest Stewardship Council