RFS2-CT-2007-00033

Research Fund for Coal & Steel

Hivoss

Human induced Vibrations of Steel Structures

Schwingungsbemessung von Decken

Leitfaden

RWTH AACHEN UNIVERSITY

ArcelorMittal

TNO

SCI

cticm

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Schlaich Bergermann und Partner
Structural Consulting Engineers

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Moderne weit gespannte Decken und leichte Decken können unter normalen Nutzungsbedingungen leicht zu Schwingungen angeregt werden. Dieser Leitfaden enthält ein Verfahren, mit dem solche Deckenschwingungen leicht berechnet werden können.

Der Gegenstand dieses Leitfadens sind Decken in Büro- und/oder Wohngebäuden, die durch normales Gehen in Schwingung geraten können, wodurch der Komfort anderer Gebäudenutzer beeinträchtigt wird. Das Ziel des Leitfadens besteht darin, die Komfortanforderungen festzulegen und ein Bemessungsverfahren vorzustellen, mit dem der Komfort nachgewiesen wird.

Zu diesem Leitfaden gibt es Erläuterungen, die auch alternative und allgemeiner Verfahren zur Berechnung mencheninduzierter Schwingungen enthalten.

Die Theorie der Verfahren, die hier und in den Erläuterungen vorgestellt werden, wurde im Rahmen des RFSC-Projektes „Vibration of Floors“ erarbeitet und untersucht. Der Leitfaden und die Erläuterungen werden hier dank Unterstützung des „Research fund for Coal and Steel – RFCS“ im Rahmen des Projektes „HIVOSS“ verbreitet.

Anleitungen zur Bestimmung der maßgeblichen dynamischen Deckeneigenschaften und Anwendungsbeispiele werden im Anhang vorgestellt.

1. Einleitung

1.1. Allgemeines

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 also 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 und
- die Prognose von durch Menschen verursachten Deckenschwingungen unter Berücksichtigung der Gebäudenutzung.

Für die Prognose der Schwingungen müssen einige dynamische Deckeneigenschaften bestimmt werden. Diese Eigenschaften und vereinfachte Verfahren werden kurz beschrieben. Bemessungsbeispiele werden im Anhang B dieses Leitfadens gegeben.

1.2. Anwendungsbereich

In diesem Leitfaden wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem Deckenschwingungen infolge gehender Menschen berechnet und bewertet werden können. Dabei konzentriert sich der Leitfaden auf einfache Verfahren, Bemessungshilfen und Empfehlungen für die Akzeptanz von Schwingungen. Die vorgestellten Verfahren sind für Deckenschwingungen, die durch Menschen während der normalen Nutzung verursacht werden. Schwingungen infolge von Maschinen- oder Verkehrseinwirkung werden hier nicht behandelt.

Ebenfalls sollten die Verfahren des Leitfadens nicht auf Fußgängerbrücken oder andere Tragwerke angewendet werden, deren Tragwerkscharakteristik oder die Nutzungscharakteristik nicht mit der von Geschossdecken vergleichbar ist.

Gegenstand des Leitfadens ist die Ermittlung von Schwingungen vor allem zum Zeitpunkt der Bemessung.

1.3. Literatur

[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 Machines*" IABSE-AIPC-IVBH, Zürich 1987, ISBN 3-85748-052-X

[3] Waarts, P. *Trillingen van vloeren door lopen: Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*. SBR, September 2005.

[4] Smith, A.L., Hicks, S.J., Devine, P.J. *Design of Floors for Vibrations: A New Approach.* SCI Publication P354, Ascot, 2007.

[5] ISO 2631. *Mechanical Vibration and Shock, Evaluation of human exposure to whole-body vibration*. International Organization for Standardization.

[6] ISO 10371. *Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. International Organization for Standardization.

1.4. Definitions

The definitions given here are oriented on the application of this guideline.

Dämpfung *D*	Dämpfung ist die Energiedissipation eines schwingenden Systems. Die Gesamtdämpfung besteht aus • Material- und Strukturdämpfung • Dämpfung durch Möbel und Ausbau (z.B. Zwischenboden) • Ausbreitung von Energie über das gesamte Gebäude.
Modale Masse M_{mod} = generalisierte Masse	Ein System mit mehreren Freiheitsgraden kann in vielen Fällen auf ein System mit nur einem Freiheitsgrad mit folgender Eigenfrequenz reduziert werden: $$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{\text{mod}}}{M_{\text{mod}}}}$$ Dabei ist f die Eigenfrequenz 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 im Anhang beschrieben.

Eigenfrequenz *f*	Jedes System hat in Hinblick auf Form und Dauer T 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
OS-RMS$_{90}$	Effektivwert der Beschleunigung eines maßgebenden Schrittes, der die Intensität von 90% der normal gehenden Menschen abdeckt OS: Ein Schritt (One-step) RMS: Effektivwert der Beschleunigung (Root mean square) *a*: $$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a(t)^2\, dt} \approx \frac{a_{Peak}}{\sqrt{2}}$$ Dabei ist: T die betrachtete Zeitdauer

1.5. Variablen, Einheiten und Symbole

a	*Beschleunigung*	*[m/s²]*
B	*Breite*	*[m]*
f, f_i	*Aktuelle Eigenfrequenz*	*[Hz]*
$\delta(x,y)$	*Verformung and der Stelle x,y*	*[m]*
D	*Dämpfung (% der kritischen Dämpfung)*	*[-]*
D_1	*Strukturdämpfung*	*[-]*
D_2	*Dämpfung der Einrichtung*	*[-]*
D_3	*Dämpfung durch Ausbauten*	*[-]*
l	*Länge*	*[m]*
K, k	*Steifigkeit*	*[N/m]*
M_{mod}	*Modale Masse*	*[kg]*
M_{total}	*Gesamtmasse*	*[kg]*
OS-RMS	*Effektivwert eines Schrittes*	*[-]*
$OS\text{-}RMS_{90}$	*90% Fraktile der OS-RMS Werte*	*[-]*
T	*Periode (einer Schwingung)*	*[s]*
t	*Zeit*	*[s]*
p	*Verteilte Last (bezogen auf Länge oder Fläche)*	*[kN/m] or [kN/m²]*
δ	*Durchbiegung*	*[m]*
μ	*Masseverteilung bezogen auf die Länge oder Fläche*	*[kg/m] or [kg/m²]*

2. Bemessung von Deckenschwingungen

2.1. Bemessungsablauf

Der hier dargestellte Ablauf der Bemessung stellt ein vereinfachtes Verfahren dar, mit dem Decken auf die Schwingungen durch gehende Menschen bewertet werden können. Der Schritt der Bemessung besteht darin, die wesentlichen Deckeneigenschaften zu ermitteln. Anhand dieser Eigenschaften kann durch Anwendung von Diagrammen eine Größe, genannt OS-RMS_{90} bestimmt werden, die das Schwingungsverhalten einer Decke bei darauf gehenden Personen charakterisiert. Dieser Wert wird empfohlenen Werten entsprechend der Deckennutzung verglichen. Diese drei Bemessungsschritte stellt Bild 1 dar. Diese Vorgehensweise nimmt Bezug auf das einfache Verfahren oder Handrechenverfahren, das in Abschnitt 4 behandelt wird.

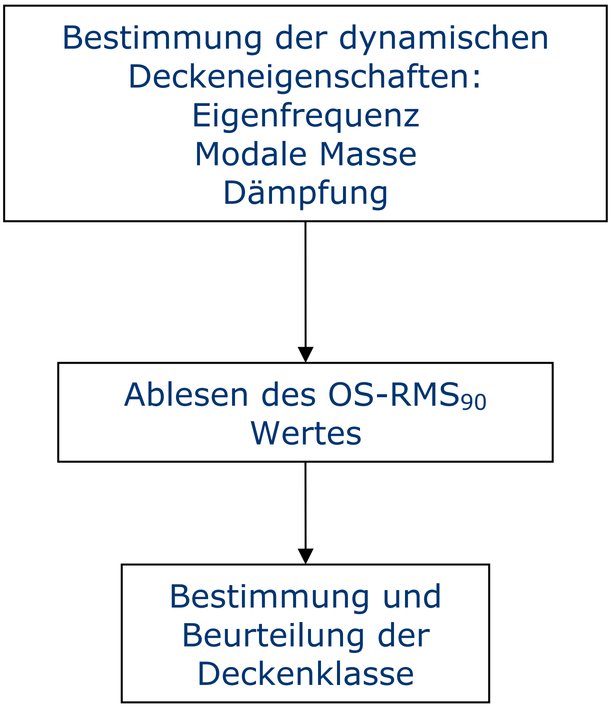


Bild 1: Bemessungsablauf.

2.2. Verwandte Bemessungsverfahren

2.2.1. Handrechnung auf der Grundlage von Messungen

Das Handrechenverfahren kann auch angewendet werden, wenn die Deckeneigenschaften durch Messungen ermittelt wurden. Erläuterungen, wie die dynamischen Eigenschaften durch Messungen ermittelt werden, sind in [1] und [3] enthalten.

2.2.2. Bemessung mit Übertragungsfunktionen

Bei der Bemessung mit Übertragungsfunktionen wird Deckencharakteristik anstelle der modalen Parameter wie modale Masse, Steifigkeit und Dämpfung mit Frequenz-Antwort-Funktionen oder Übertragungsfunktionen beschrieben. Auf der Grundlage der statistischen Beschreibung von Last beim Gehen wird in einer probabilistischen Berechnung der OS-RMS_{90}–Wert der Decke bestimmt. Das Verfahren wird in [1] und [3] genauer beschrieben.

Bei dem Handrechenverfahren, das ein vereinfachtes Verfahren der Übertragungsfunktion ist, wurden die klassischen Übertragungsfunktionen eine Einmassenschwingers verwendet und die probalistische Berechnung der OS-RMS_{90}–Wertes wurde vorab durchgeführt.

Die Bemessung mit Übertragungsfunktionen kann auch angewendet werden, wenn das Schwingungsverhalten der Decke durch FEM- Berechnungen oder durch Messungen bestimmt wurde. Es die gleichen Akzeptanzkriterien wie in diesem Leitfaden angegeben verwendet werden.

2.2.3. Modale Überlagerung

Die Bemessungshilfe des Steel Construction Institutes [4] stellt zwei Verfahren auf der Grundlage der modalen Überlagerung vor. Im allgemeinen Verfahren werden die modalen Eigenschaften der Decke mit Hilfe von FEM-Programmen für eine bestimmte Anzahl von Eigenformen berechnet. Dann werden Bemessungswerte der durch Gehen induzierten Lasten auf die Decken angesetzt, um die Schwingungsantwort als Beschleunigung zu erhalten. Das vereinfachte Verfahren wurde auf der Grundlage einer Parameterstudie unter Verwendung des allgemeinen Verfahrens entwickelt und stellt sich als analytische Formel dar.

Im Gegensatz zum Handrechenverfahren in Abschnitt 4 handelt es sich bei der modalen Überlagerung um ein deterministisches Verfahren und die Ergebniswerte können direkt mit Grenzwerten aus internationalen Normen [5] und [6]verglichen werden. Mit diesem Verfahren ist es außerdem möglich, eine örtliche Trennung von Erregerquelle und Empfänger zu berücksichtigen. Dadurch kann die Abtrennung von kritischen Bereichen wie Operationssälen berechnet werden. Weitere Informationen enthält die Erläuterung zum Leitfaden.

3. Klassifizierung von Schwingungen

3.1. Beurteilungsgröße

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-RMS$_{90}$-Wert empfohlen, wobei der Index „90“ bedeutet, dass 90% aller möglichen Variationen von Gewicht und Gehgeschwindigkeit durch diesen Wert erfasst sind.

3.2. Deckenklassen

Die nachstehende Tabelle unterteilt Decken in sechs Klassen und gibt zusätzlich gibt Empfehlungen für die Zuordnung der Klasse zu den Nutzungen der betrachteten Decke.

Tabelle 1: Klassifizierung der Deckenschwingungen und Empfehlungen für die Anwendung der Klassen

Klasse	OS-RMS$_{90}$ Untergrenze	OS-RMS$_{90}$ Obergrenze	Deckenfunktion: Kritischer Bereich	Medizinischer Bereich	Schulungsstätten	Wohngebäude	Bürogebäude	Besprechungsräume	Seniorenaufenthalt	Hotels	Industrienutzung	Sportstätten
A	0.0	0.1	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen
B	0.1	0.2	Kritisch	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen
C	0.2	0.8	Nicht empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen
D	0.8	3.2	Nicht empfohlen	Kritisch	Kritisch	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen	Empfohlen
E	3.2	12.8	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Kritisch	Kritisch	Kritisch	Kritisch	Kritisch	Empfohlen	Empfohlen
F	12.8	51.2	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Nicht empfohlen	Kritisch	Kritisch

Empfohlen
Kritisch
Nicht empfohlen

Ebenfalls werden im internationalen Standard ISO 10137[6], der auch von Eurocodes zitiert wird, Grenzwerte gegeben. Diese Werte werden in Tabelle 2 mit den OS-RMS$_{90}$ Grenzen in Verbindung bgebracht.

Tabelle 2: Grenzwerte für Schwingungen nach ISO 10137 für anhaltende Schwingungen

Ort	Zeit	Multiplikations-faktor	OS-RMS$_{90}$ Äquivalent
Kritische Bereiche (z.B. Operationssäle in Krankenhäusern, Präzisionslabors, etc.)	Tag	1	0.1
	Nacht	1	0.1
Wohnbereiche (z.B. Wohnungen, Wohnhäuser, Krankenhäuser)	Tag	2 to 4	0.2 to 0.4
	Nacht	1.4	0.14
Ruhige Großraumbüros	Tag	2	0.2
	Nacht	2	0.2
Allgemeine Büros (z.B. Schulen, Büros)	Tag	4	0.4
	Nacht	4	0.4
Werkstätten	Tag	8	0.8
	Nacht	8	0.8

Es ist bekannt, dass diese Grenzwerte unnötig streng sind. Versuche an einer Reihe von Bauwerken haben gezeigt, dass die in Tabelle 1 angegebenen Grenzen angemessener sind (siehe [1]).

4. Handrechenverfahren

Bei der Verwendung des Handrechenverfahrens wird unterstellt, dass sich das Schwingungsverhalten der Decke durch einen Einmassenschwinger abbilden lässt. Die Eigenfrequenz, die modale Masse und die Dämpfung kann mit den Verfahren, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden, berechnet werden. Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, können diese Größen auch durch Messungen gewonnen werden. Weil unterstellt wird, dass dieser Leitfaden für die Bemessung neuer Gebäude verwendet wird, werden Messverfahren nicht weiter behandelt.

4.1. Bestimmung von Eigenfrequenz und modaler Masse

Diese Größen können durch einfache Rechenverfahren (Formeln) oder mit Finite Element Berechnungen ermittelt werden.

Bei der Berechnung sollte ein realistischer Anteil der Verkehrslasten als Deckenmasse mit berücksichtigt werden. Erfahrungswerte sind 10% bis 20% der in der Statik angesetzten Verkehrslast. Bei sehr leichten Decken sollte auch die Personenmasse mit einbezogen werden. Hier wird ein repräsentative Körpermasse von 30kg empfohlen.

4.1.1. Finite Elemente Berechnung

Viele Finite Elemente Programm können dynamische Berechnungen ausführen und bieten die Möglichkeit der Bestimmung der Eigenfrequenz. Einige berechnen dabei ebenfalls die modale Masse.

Die Elementtypen, die Modellierung der Dämpfung und die Programmausgaben sind jedoch sehr programmabhängig, so dass hier nur allgemeine Informationen zur Verwendung von FE-Programmen gegeben werden können.

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 die hier betrachteten Deckenschwingung 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, kann es bei der Schwingungsberechnung erforderlich sein, ihn biegesteif anzunehmen, um das Tragverhalten bei kleinen Verformungen realistischer abzubilden.

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

4.1.2. Analytische Formeln

Für die Handrechnung werden in Anhang A Formeln für die Bestimmung der Eigenfrequenzen und modalen Masse von Platten, orthotropen Platten und Balken gegeben.

4.2. Bestimmung der Dämpfung

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 3 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.

Tabelle 3: Bestimmung der Dämpfung

Art	**Dämpfung (% der kritischen Dämpfung)**
Strukturelle Dämpfung 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 $D = D_1 + D_2 + D_3$	

4.3. Bestimmung der Deckenklasse

Ist die modale Masse und die Frequenz bekannt, kann der OS-RMS_{90}-Wert sowie die Klassenzuordnung durch die nachfolgenden Diagramme in Abschnitt 4.4 bestimmt werden. Das entsprechende Diagramm wird nach der vorliegenden Dämpfung gewählt wobei die Nutzungsbedingungen mit Ausbau und Möblierung berücksichtigt werden.

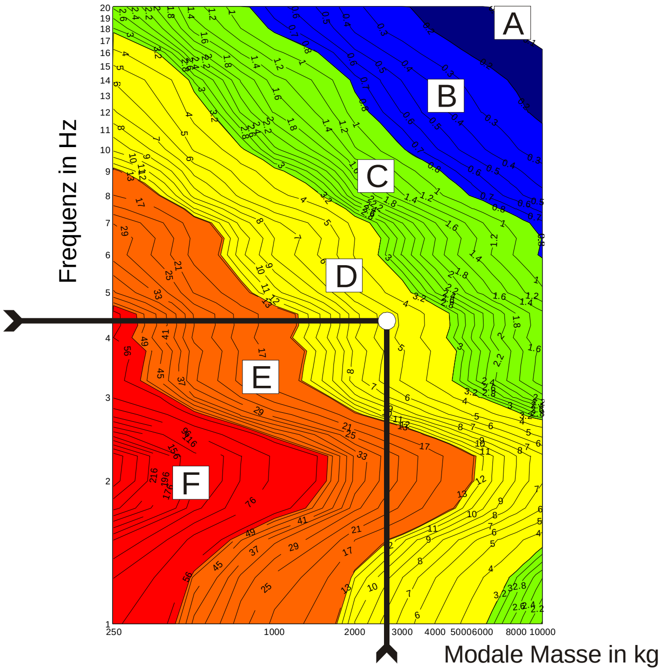


Bild 2: Anwendung der Diagramme

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 2 dargestellt, abgelesen werden.

4.3.1. Systeme mit mehr als einer Eigenfrequenz

In manchen Fällen kann das Schwingungsverhalten einer Decke durch mehr al seine Eigenfrequenz charakterisiert sein. In diesen Fällen sollte der maßgebende OS-RMS$_{90}$–Wert als Kombination mehrerer OS-RMS$_{90}$–Werte ermittelt werden. Dann wird wie folgt vorgegangen:

a) Bestimmung der Eigenfrequenz.

b) Bestimmung der zugehörigen modalen Masse und der Dämpfung .

c) Bestimmung des OS-RMS$_{90}$ –Wertes für jede Eigenfreqeunz.

d) Näherung des gesamten (oder kombinierten) OS-RMS$_{90}$ –Wertes mit:

$$\mathrm{OS-RMS}_{90} = \sqrt{\sum_i \mathrm{OS-RMS}_{90;i}{}^2}$$

e) Ablesen der zugehörigen Klasse aus Tabelle 1.

4.4. OS-RMS$_{90}$ –Diagramme für den Einmassenschwinger

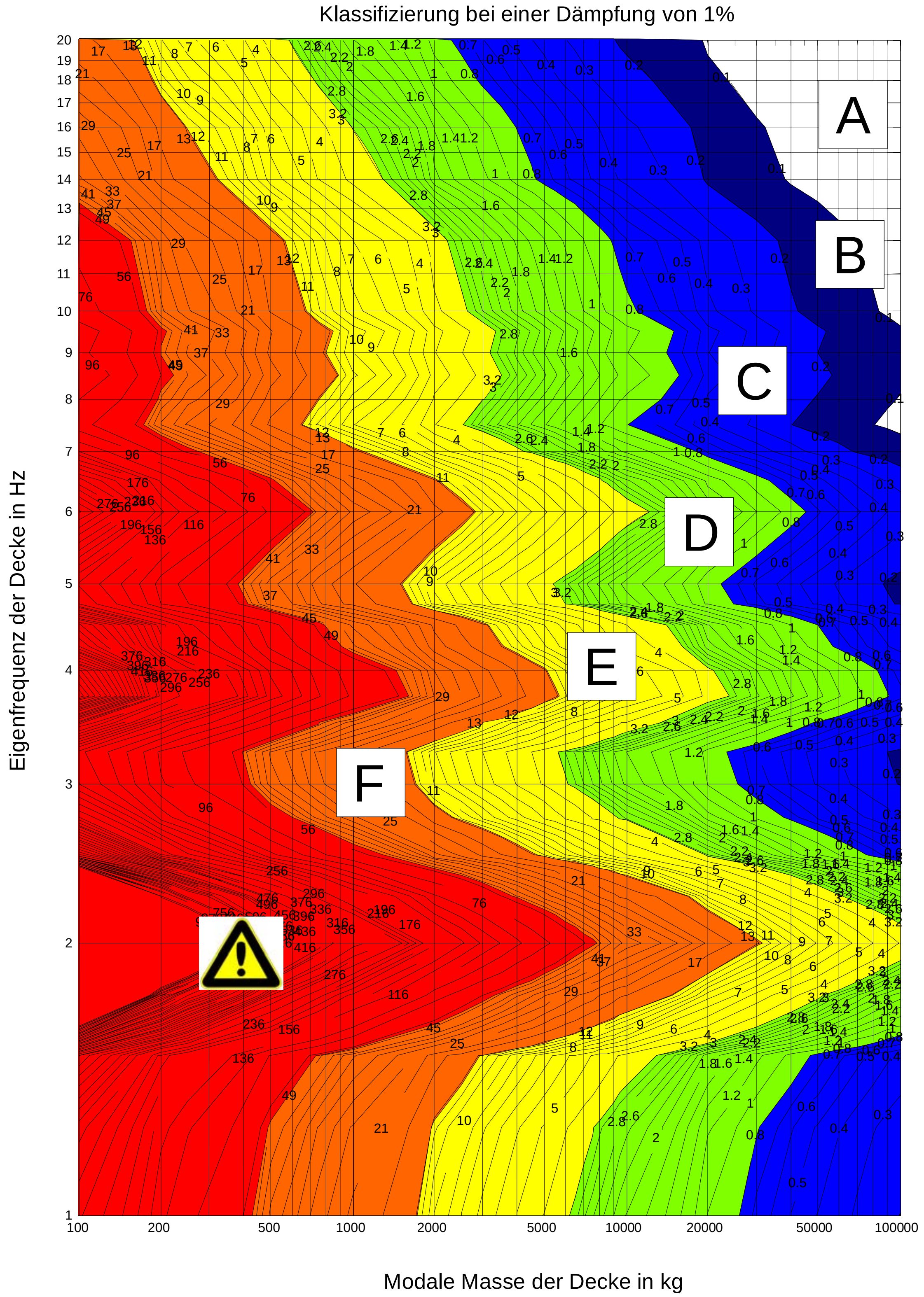


Bild 3: OS-RMS$_{90}$ für 1% Dämpfung

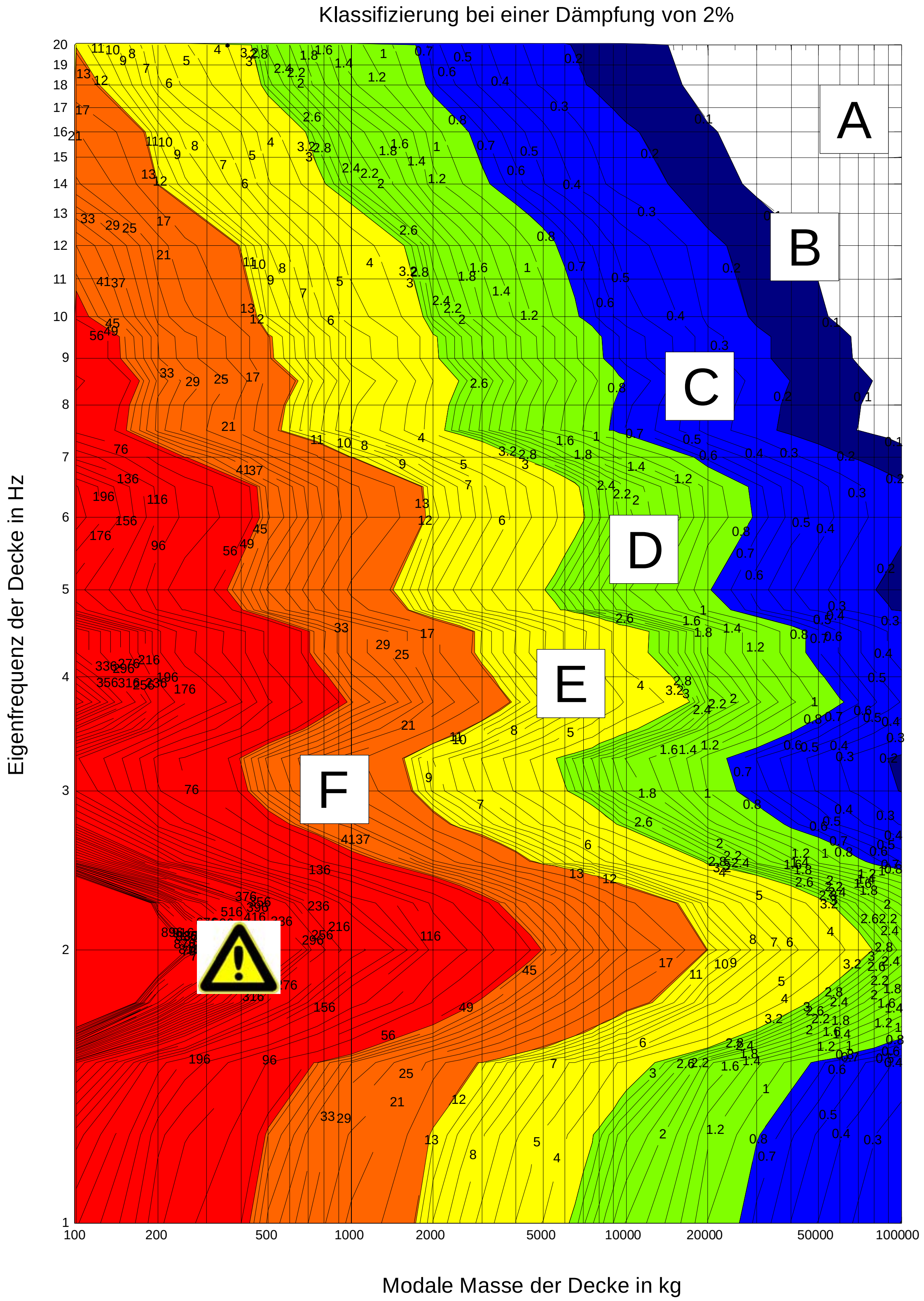


Bild 4: OS-RMS$_{90}$ für 2 % Dämpfung

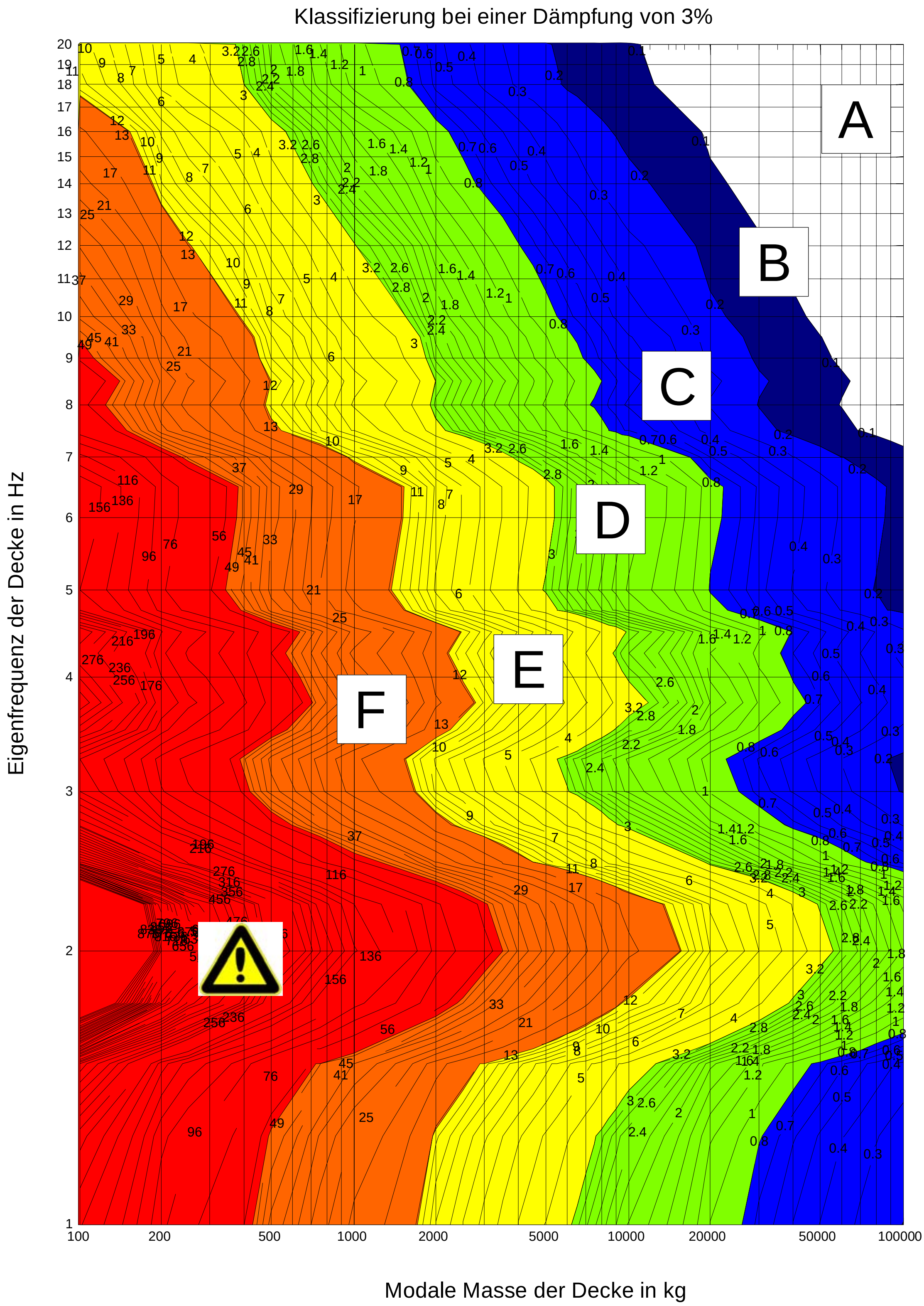


Bild 5: OS-RMS$_{90}$ für 3 % Dämpfung

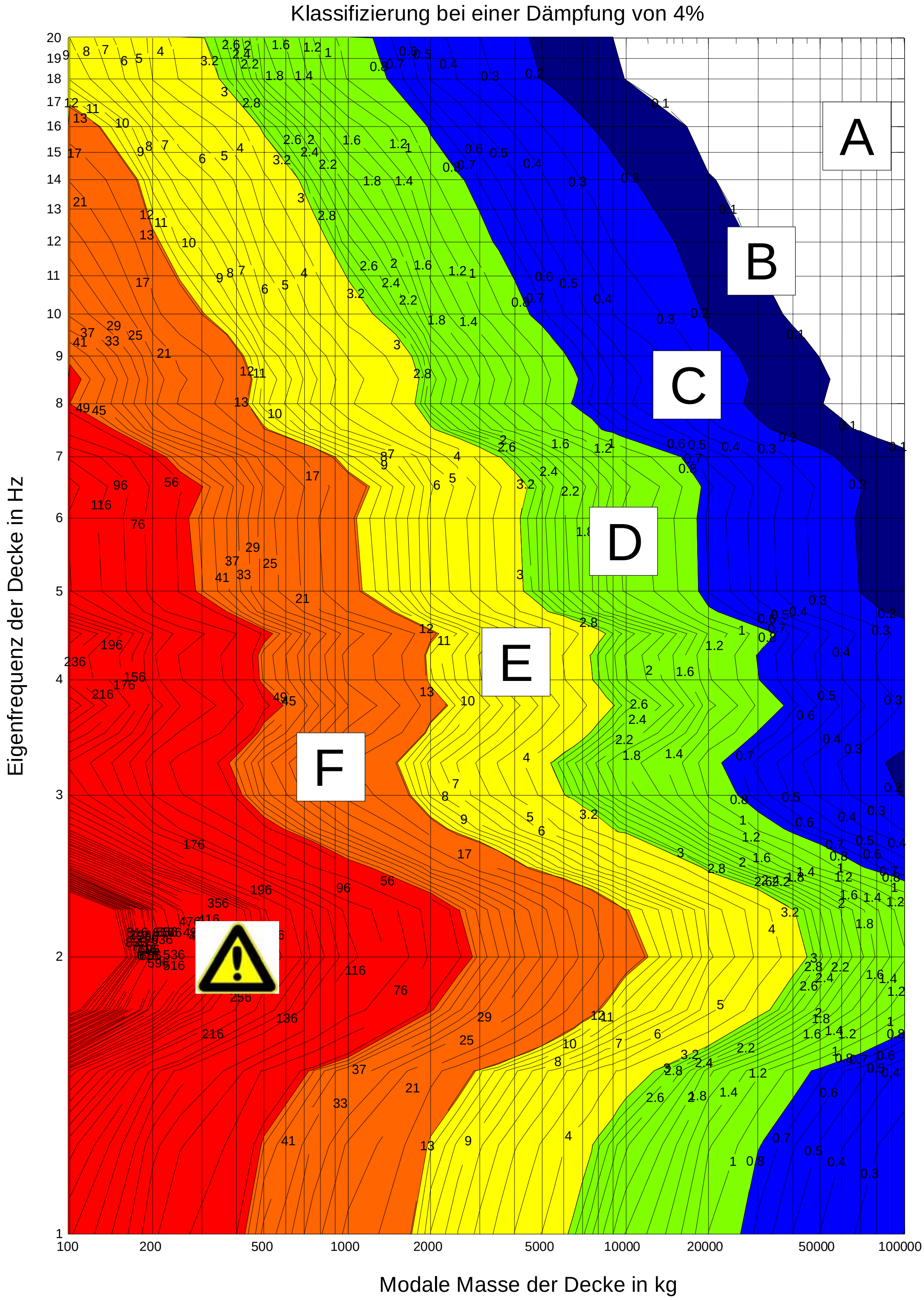


Bild 6: OS-RMS$_{90}$ für 4% Dämpfung

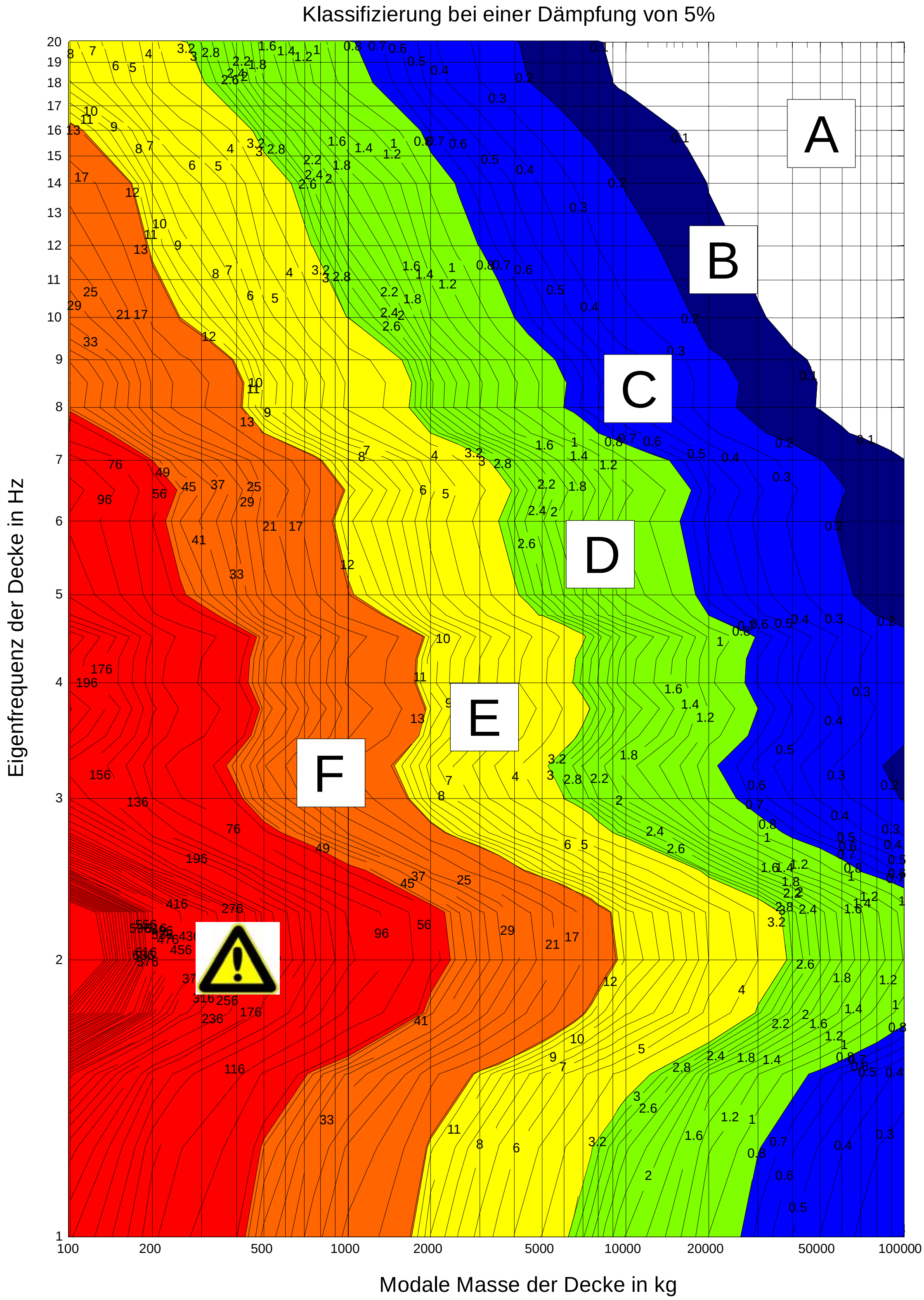


Bild 7: OS-RMS$_{90}$ für 5 % Dämpfung

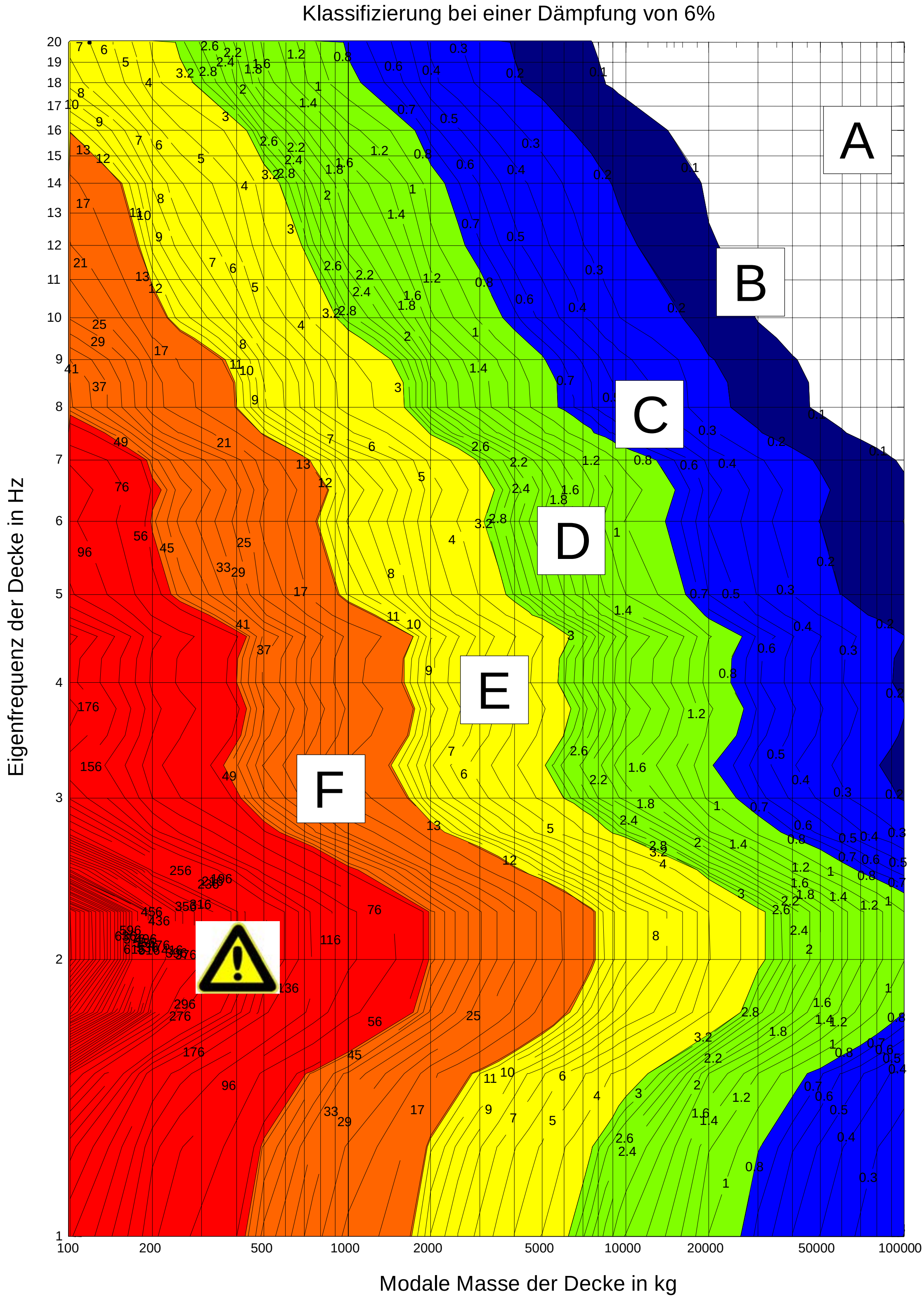


Bild 8:OS-RMS$_{90}$ für 6 % Dämpfung

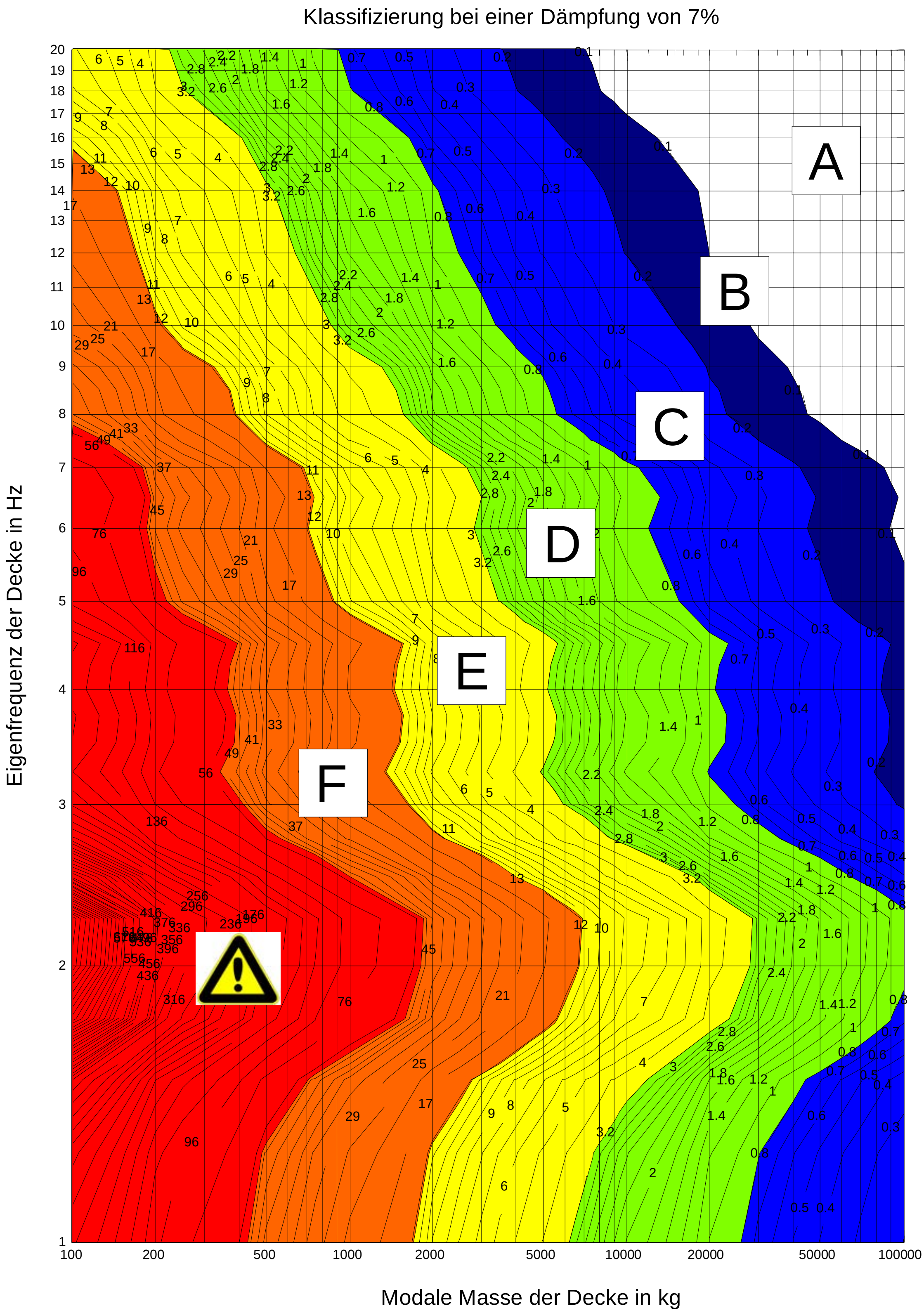


Bild 9: OS-RMS$_{90}$ für 7 % Dämpfung

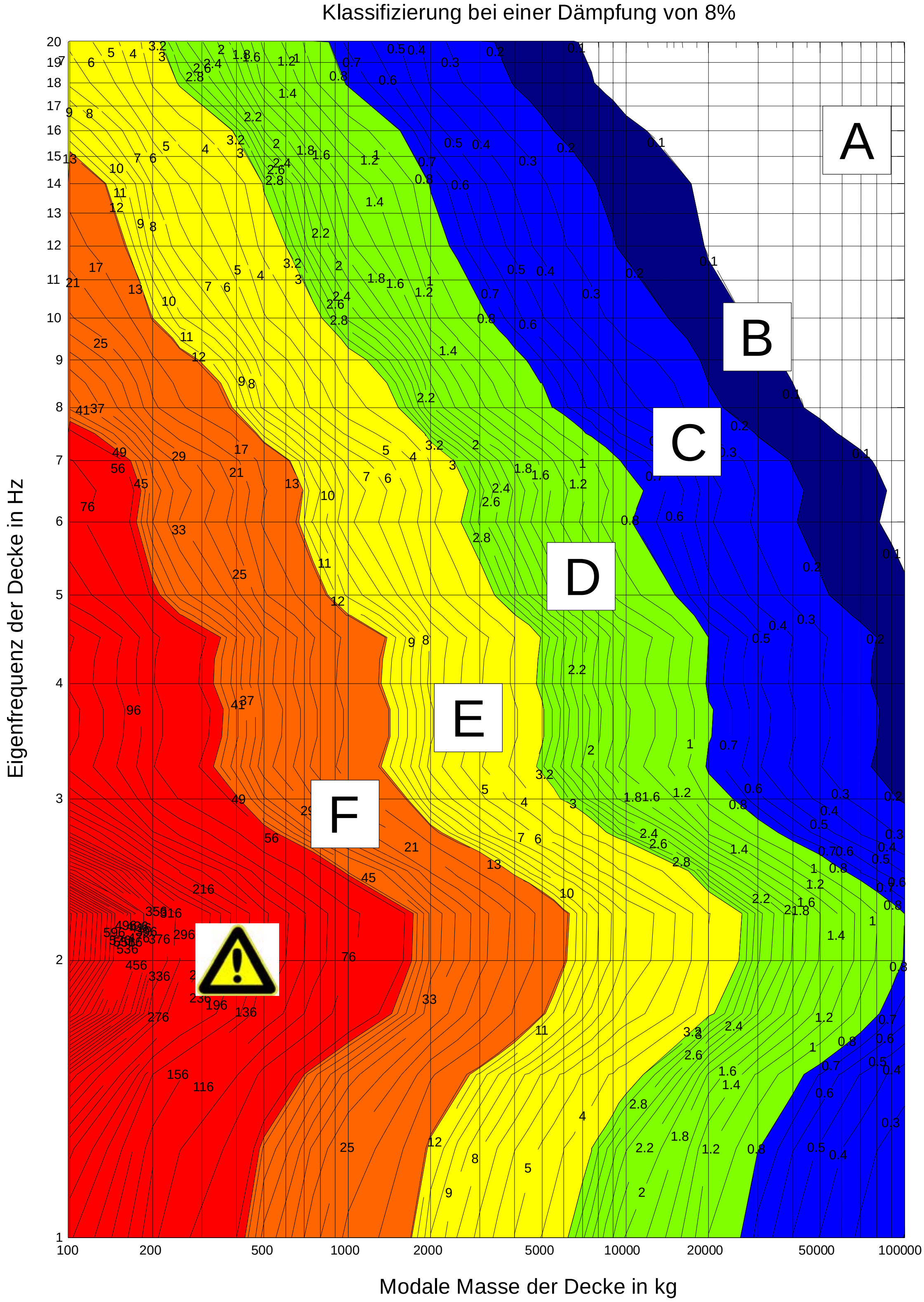


Bild 10: OS-RMS$_{90}$ für 8 % Dämpfung

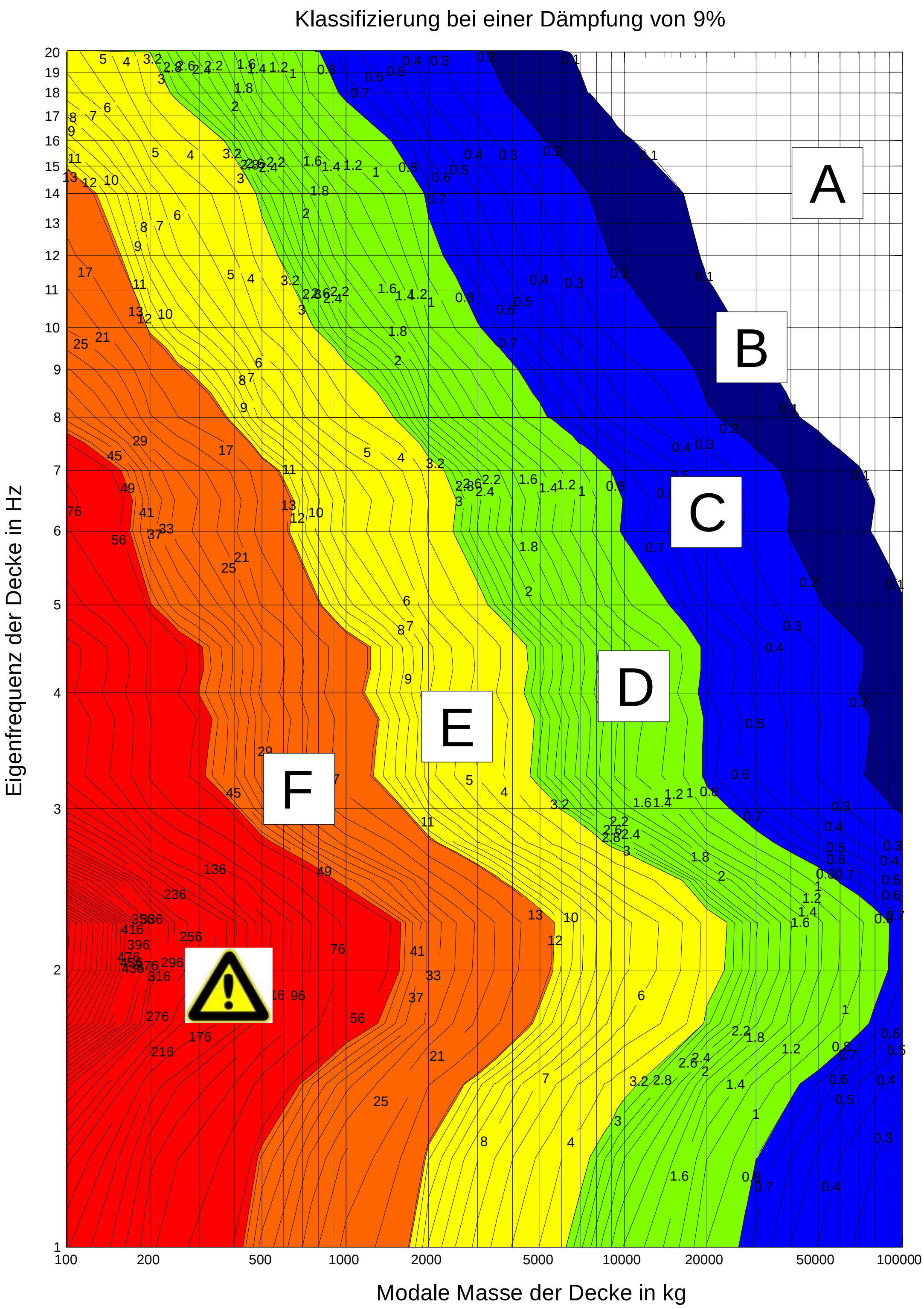


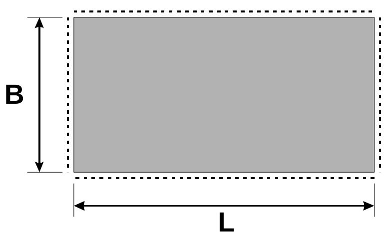
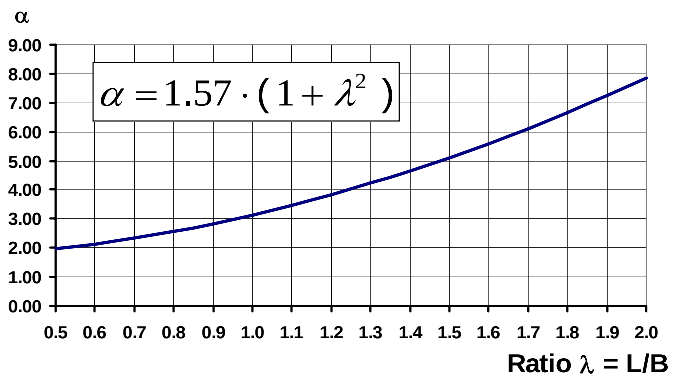
Bild 11: OS-RMS$_{90}$ für 9 % Dämpfung

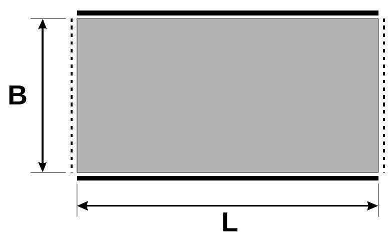
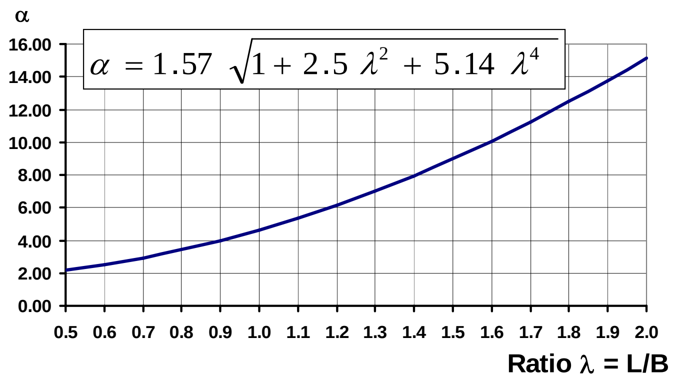
A. Berechnung von Eigenfrequenz und modaler Masse für Decken und andere Bauteile

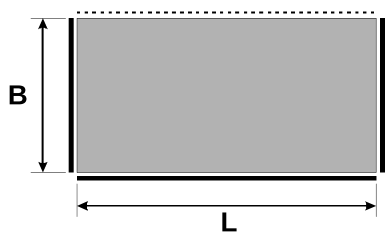
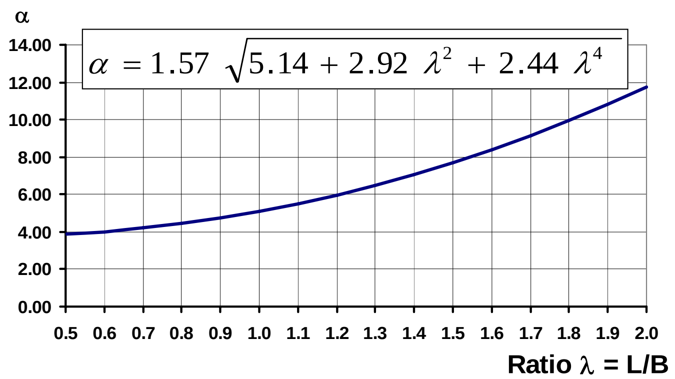
A.1. Eigenfrequenz und modale Masse isotroper Platten

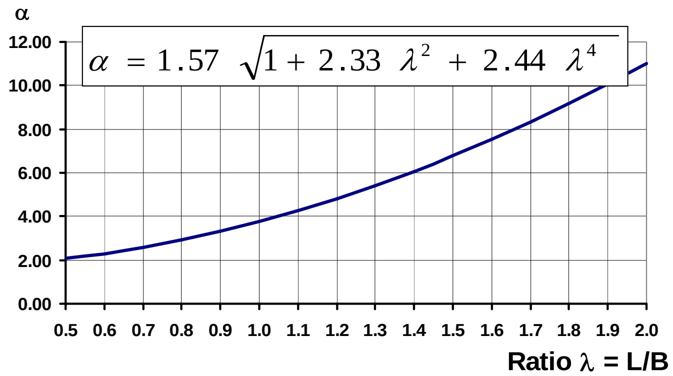
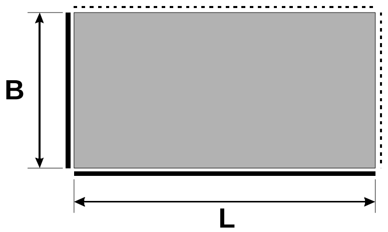
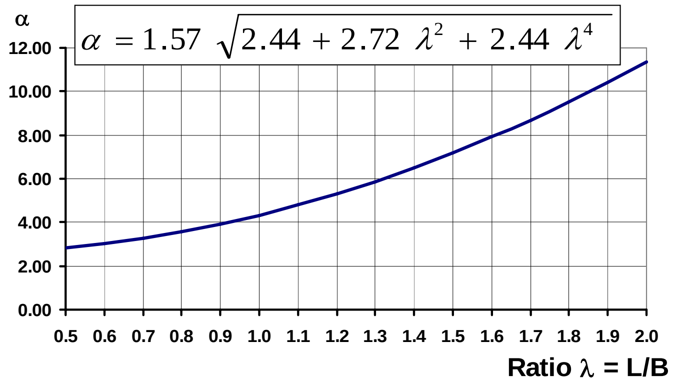
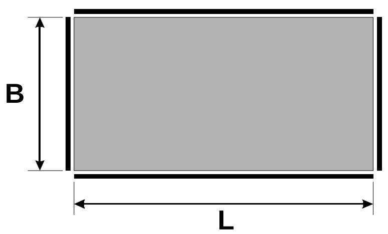
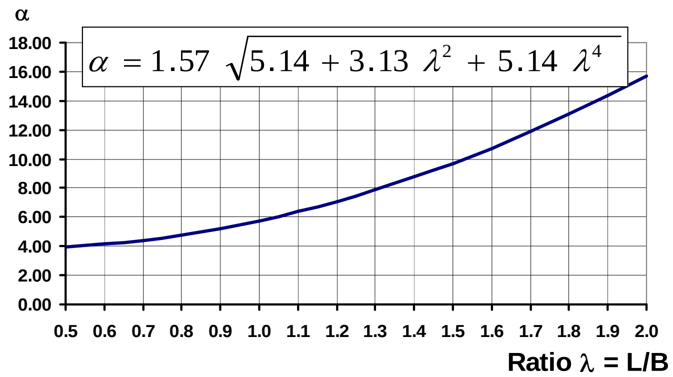
Die nachstehende Tabelle gibt Formeln für die Bestimmung der ersten Eigenfrequenz (nach [2]) und der modalen Masse für Platten mit verschiedenen Auflagerbedingungen.

Bei der Anwendung der Formeln wird unterstellt, dass keine seitlichen Verschiebungen an den Plattenrändern auftreten.

<table>
<tr><th>Lagerungsbedingungen:
eingespannt gelenkig</th><th>Frequenz ; Modale Masse
$f = \frac{\alpha}{L^2}\sqrt{\frac{E\,t^3}{12\cdot\mu\,(1-\upsilon^2)}}$; $M_{\text{mod}} = \beta \cdot M_{tot}$</th></tr>
<tr><td>
</td><td>

β ≈ 0,25 für alle λ</td></tr>
<tr><td>
</td><td>

β ≈ 0,20 für alle λ</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

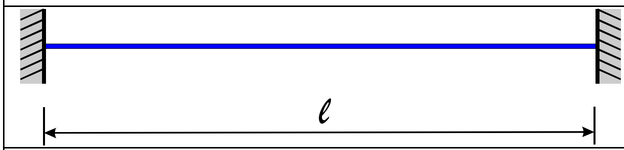
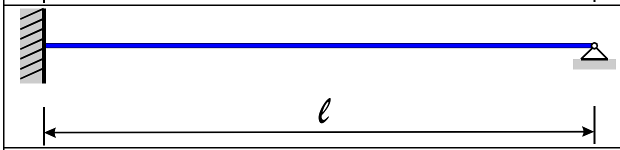
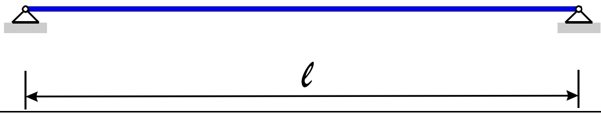
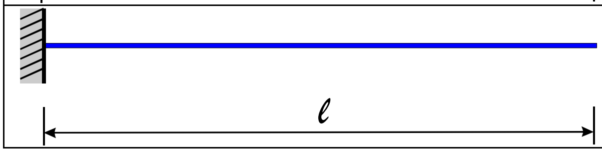
Lagerungsbedingungen: eingespannt gelenkig	**Frequenz ; Modale Masse** $f = \frac{\alpha}{L^2}\sqrt{\frac{E\,t^3}{12\cdot\mu\,(1-\upsilon^2)}}$ **;** $M_{\text{mod}} = \beta\cdot M_{tot}$
	β ≈ 0,18 für alle λ
	 β ≈ 0,22 für alle λ
	 β ≈ 0,21 für alle λ
	 β ≈ 0,17 für alle λ
	E Elastizitätsmodul in N/m² t Plattendicke in m μ Masse der Decke einschließlich repräsentativer Verkehrslast in kg/m² ν Querkontraktionszahl M_{tot} Gesamtmasse der Decke einschließlich repräsentativer Verkehrslast in kg

A.2. Eigenfrequenz und modale Masse von Balken

Die erste Eigenfrequenz eines Balkens kann unter Berücksichtigung der Auflagerbedingungen mit den Gleichungen in Tabelle 4 ermittelt werden
Dabei ist:

E Der Elastizitätsmodul in N/m²
I das Trägheitsmoment 2. Grades in m^4
μ die längenbezogene Masse einschließlich repräsentativer Verkehrslast in kg/m
ℓ die Länge des Balkens

Tabelle 4: Bestimmung der ersten Eigenfrequenz von Balken

Lagerungsbedingungen	Eigenfrequenz	Modale Masse
	$f = \frac{4}{\pi}\sqrt{\frac{3EI}{0.37\,\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0{,}41\,\mu\,l$
	$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3EI}{0.2\,\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0{,}45\,\mu\,l$
	$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3EI}{0.49\,\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0{,}5\,\mu\,l$
	$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3EI}{0.24\,\mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0{,}64\,\mu\,l$

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 A.1.

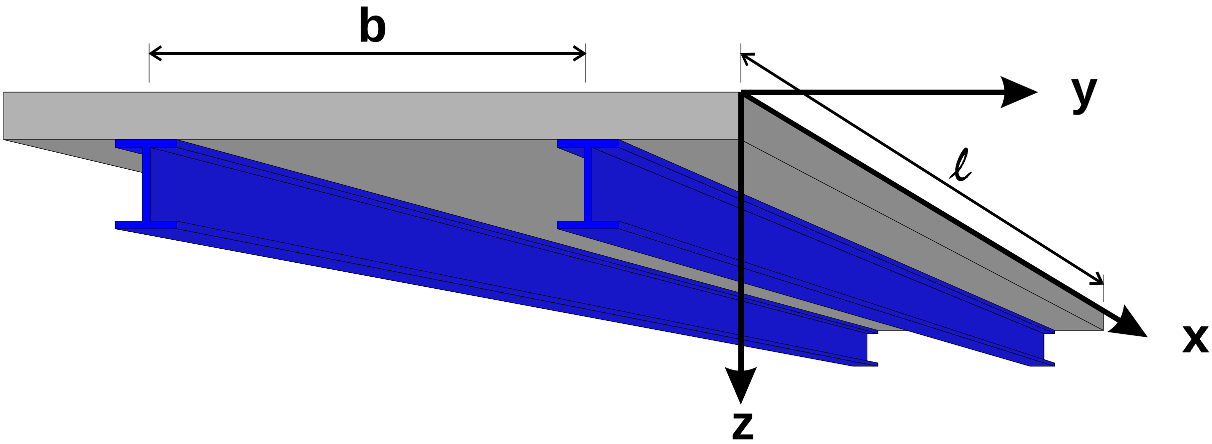


Bild A.1: Angaben zu Abmessungen und Achsen für eine orthotrope Platte

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

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

Dabei ist:

μ	die Masse einschließlich repräsentativer Verkehrslast pro m² in kg/m²,
ℓ	die Länge der Decke in m (in x-Richtung),
b	die Breite der Platte in m (in y-Richtung),
E	das Elastizitätsmodul in N/m²,
I_x	das Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die x-Achse in m^4,
I_y	das Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die y-Achse in m^4,

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} aus ständiger Last, z.B. durch 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:

$$K = \frac{M \cdot g}{\frac{3}{4}\delta_{max}},$$

Dabei ist

M die Gesamtmasse des Schwingungssystems,

$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ die Erdbeschleunigung und

$\frac{3}{4}\delta_{max}$ die mittlere Durchbiegung.

Die Näherung für die Eigenfrequenz lautet:

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

A.5. Näherung von Dunkerley zur Bestimmung der Eigenfrequenz

Das Näherungsverfahren von Dunkerley ist ein Handrechenverfahren zur Bestimmung der Eigenfrequenz. Es kann angewendet, 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, A.3 und A.2 ermittelt werden.

Bild 12 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 eine des Verbundträgers. Beide Schwingungsformen haben ihre eigene Eigenfrequenz (f_1 für die Schwingung der Betonplatte und f_2 für den Verbundträger).

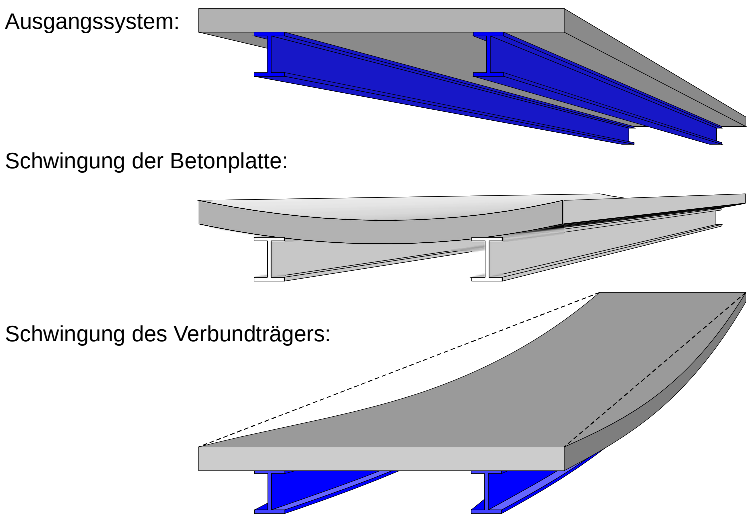


Bild 12: Beispiel für die Aufteilung der Schwingungsform

Nach Dunkerley ergibt sich die Eigenfrequenz des Gesamtsystems f zu:

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

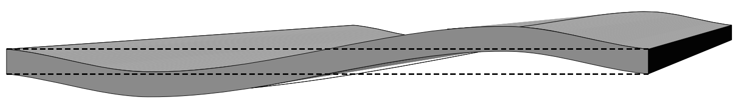
A.6. Näherung für die modale Masse

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 13.

Erwartete Schwingungsform:



Lastansatz:

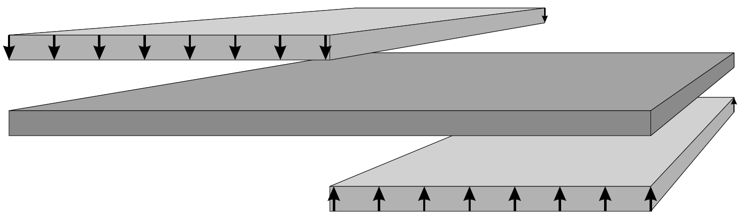


Bild 13: Lastansatz zur Bestimmung einer Näherung für die Schwingungsform (Beispiel)

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:

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

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:

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

Dabei ist

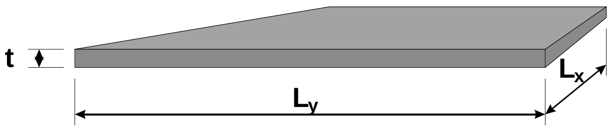
f_i die vertikale Verschiebung am Knoten i (auf die maximale Verschiebung normalisiert)

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, $L_x \sim L_y$



- Näherung für die erste Schwingungsform:

$$f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times \sin\left(\frac{\pi \times y}{l_y}\right), \quad \left|f(x,y)\right|_{max.} = 1{,}0$$

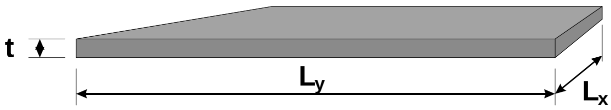
- Massenverteilung

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

- Modale Masse

$$M_{\text{mod}} = \mu \times \int_F f^2(x,y) \times dF = \frac{M}{l_x \times l_y} \times \int_{l_y}\int_{l_x} \sin^2\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times \sin^2\left(\frac{\pi \times y}{l_y}\right) \times dx \times dy = \frac{M}{4}$$

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 $l_y - \frac{l_x}{2} \le y \le l_y$:

$$f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times \sin\left(\frac{\pi \times y}{l_y}\right), \quad \left|f(x,y)\right|_{max.} = 1{,}0$$

2. $\frac{l_x}{2} \le y \le l_y - \frac{l_x}{2}$:

$$f(x,y) = \sin\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times 1.0, \quad \left|f(x,y)\right|_{max.} = 1{,}0$$

- Massenverteilung

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

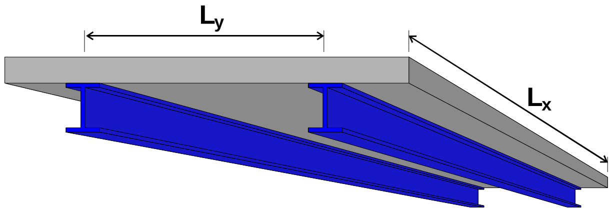
- Modale Masse

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

$$= \frac{M}{l_x \times l_y} \times \left[2 \times \int_{x=0}^{l_x} \int_{y=0}^{l_x/2} \sin^2\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times \sin^2\left(\frac{\pi \times y}{l_y}\right) \times dx \times dy + \int_{x=0}^{l_x} \int_{y=0}^{l_y - l_x} \sin^2\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) \times dx \times dy \right]$$

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

Beispiel 3: Platte spannt in eine Richtung zwischen den Trägern, Platte und Träger sind gelenkig gelagert



- Näherung für die erste Schwingungsform:

$$f(x,y) = \frac{\delta_x}{\delta} \times \sin\left(\frac{\pi \times x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \times \sin\left(\frac{\pi \times y}{l_y}\right), \quad |f(x,y)|_{\max.} = 1{,}0$$

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

$\delta = \delta_x + \delta_y$

- Massenverteilung

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

- Modale Masse

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

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

B. Beispiele

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.

Bild 14: Tragwerk des Gebäudes

Die Decke spannt über 4.2 m zwischen den Trägern. Ihre Gesamtdicke beträgt 160 mm. Die Hauptträger sind Lochstegträger (ACB-Arcelor-Cellular-Beam), die als Verbundträger ausgeführt werden. Sie sind in die Stützen voll momententragfähig eingespannt. In der Grundriss ist in Bild 15 dargestellt. Der Teil der Decke, der für die Schwingungsberechnung angesetzt ist, ist schraffiert gekennzeichnet.

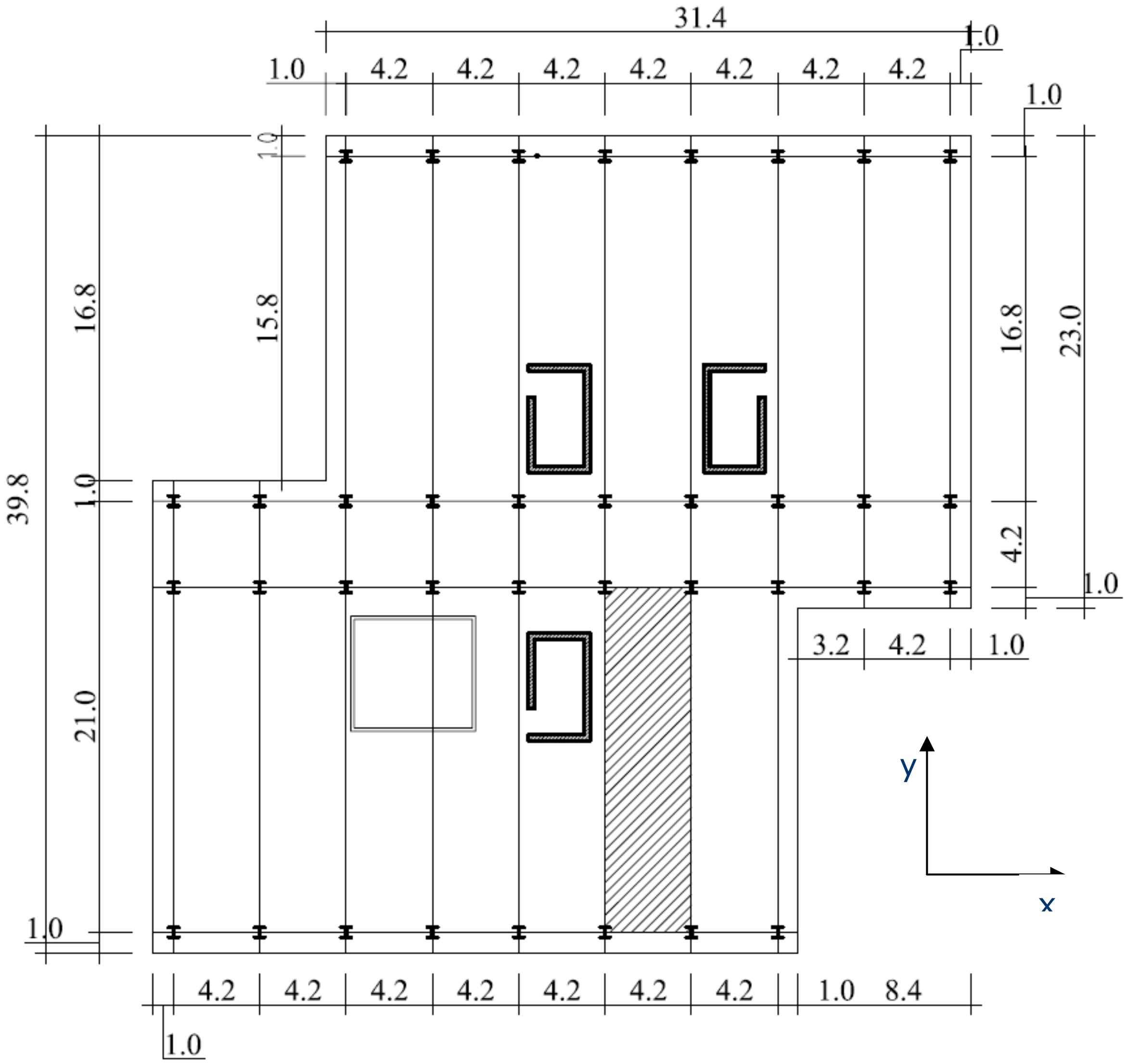


Bild 15: Grundriss

Die Hauptträger besitzen eine Spannweite von 16.8 m und wurden als ACB/HEM400 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 4.1 beschrieben, wird der Nominalwert des E-Moduls von Beton für die dynamische Berechnung erhöht:

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

Die erwartete erste Schwingungsform des untersuchten Deckenbereichs ist in Bild 17. 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 16) 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 16: Träger-Stützen Verbindung

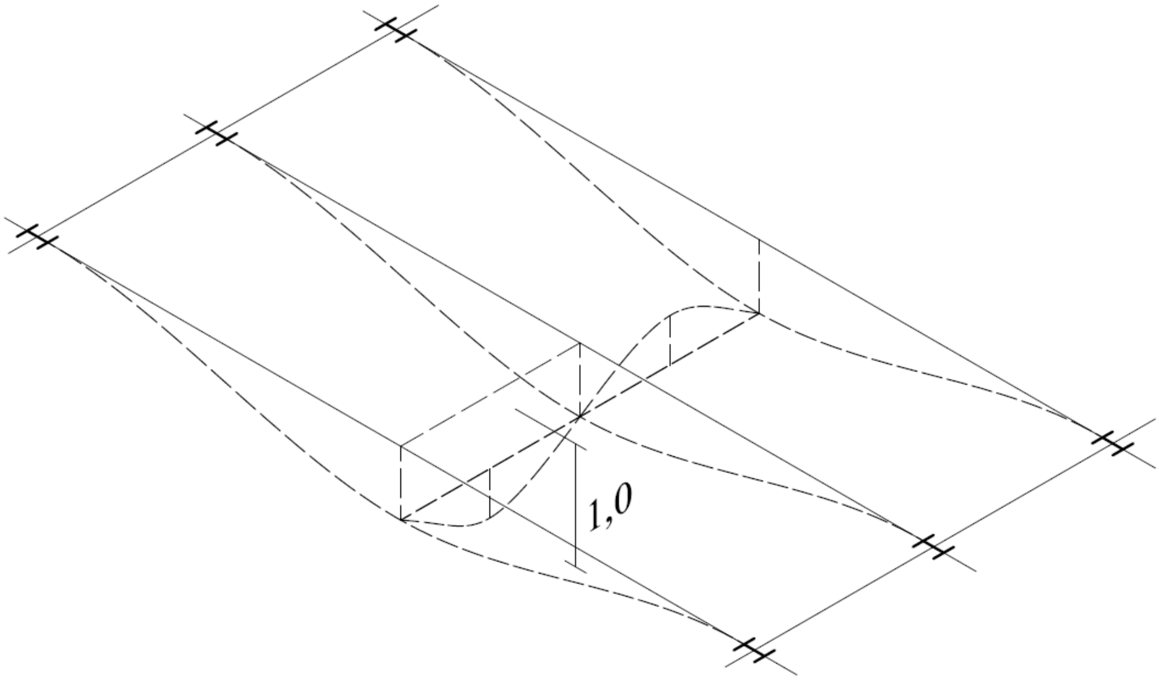


Bild 17: Erwartete erste Schwingungsform des betrachteten Deckenteils

Querschnittswerte

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

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

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

- 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:

  $$A_{a,netto} = 21936\,mm^2$$

  $$A_{a\,brutto} = 29214\,mm^2$$

  $$A_i = 98320\,mm^2$$

  $$I_i = 5.149 \times 10^9\,mm^4$$

Lastannahmen

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

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

  - 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:

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

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

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

  - Verkehrslast:

    $$q_{Decke} = 0.3 \times \frac{4.2}{2} \times 2 = 0.63 \frac{kN}{m^2}$$

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 in der Durchbiegung des Hauptträgers ermittelt werden:

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

Dabei ist:

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

$$\delta_{Träger} = \frac{1 \times (23.0 + 0.63) \times 16800^4}{384 \times 210000 \times 5.149 \times 10^9} = 4.5mm$$

Die Gesamtdurchbiegung ergibt sich zu:

$$\delta_{\max} = 1.9 + 4.5 = 6.4\,mm$$

Die erste Eigenfrequenz berechnet sich somit zu:

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{6.4}} = 7.1\,Hz$$

Modale Masse

Die Gesamtmasse der Platte 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 der berechneten Decken bestimmt werden mit:

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

Dämpfung

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

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

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 5). eingestuft. Der erwartete OS-RMS-Wert ist näherungsweise 0.5 mm/s.

Nach Tabelle 1 wird Klasse C als für Büronutzung geeignet eingestuft. Die Schwingungsanforderungen an die Decke sind also erfüllt.

B.2. Dreigeschossiges Bürogebäude

B.2.1. Beschreibung der Decke

Die Spannweite der Decke zwischen den Trägern dieses Bürogebäudes, Bild 18, beträgt 15m 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 19.

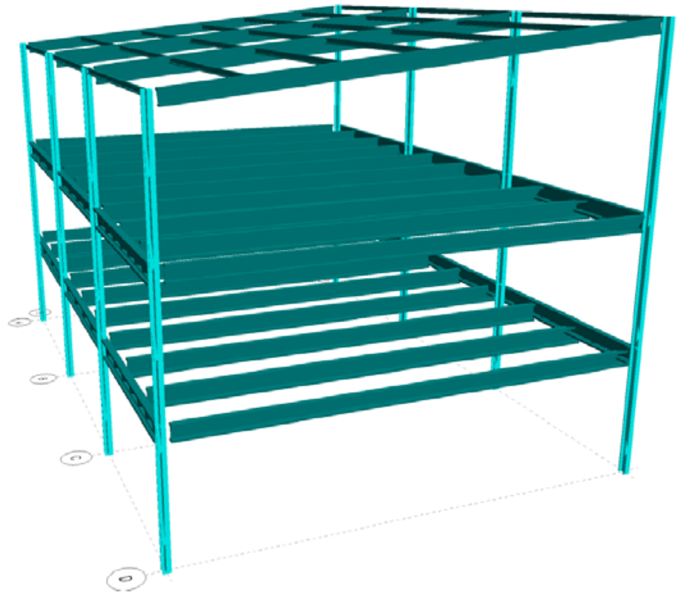


Bild 18: Gebäudeübersicht

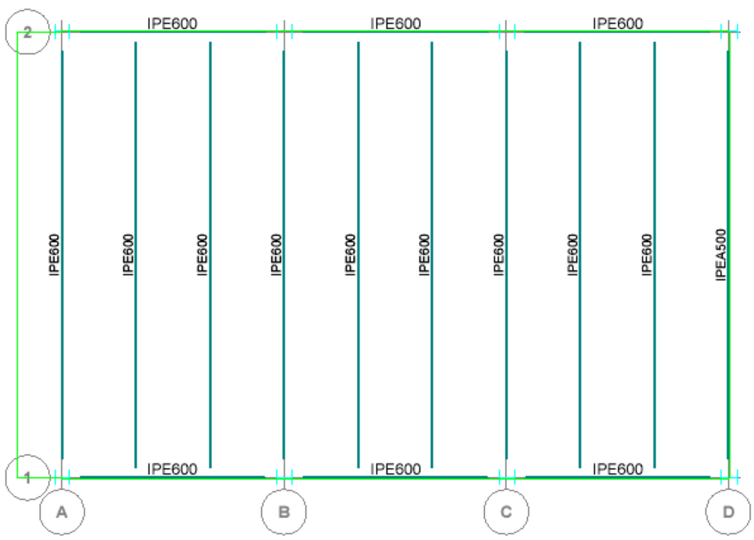


Bild 19: Grundriss der Decke mit Querschnittswahl

Die Deckenplatte ist eine Verbunddecke mit einer Gesamtdicke von 15 cm. Bei den Stahlblechen handelt es sich um COFRASTRA 70, Bild 20.

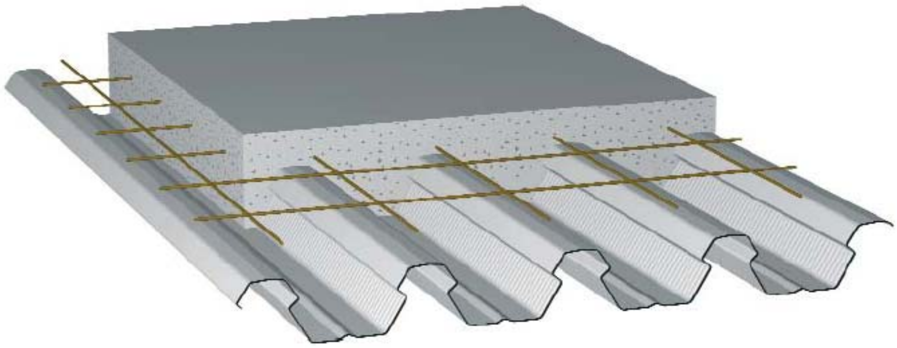


Bild 20: Deckenaufbau

Die nominellen Werkstoffeigenschaften sind:

- Stahl S235: E_s = 210000 N/mm², f_y = 235 N/mm²
- Beton C25/30: E_{cm} = 31000 N/mm², f_{ck} = 25 N/mm²

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

Querschnittswerte

- Decke (quer zum Träger):
  A = 1170 cm²/m
  I = 20355 cm^4/m

- Verbundträger (b_{eff} = 2.5m; E=210000 N/mm²):
  A = 468 cm²
  I = 270089 cm^4

Lastannahmen

- Decke (quer zum Träger):
  g = 3.5 kN/m²
  Δg = 0.5 kN/m²
  g + Δg = 4.0 kN/m² (ständige Last)
  q = 3.0 x 0.1 = 0.3 kN/m² (10% der Verkehrslast)
  p_{total} = 4.3 kN/m²

- Verbundträger (b_{eff} = 2,5m; E=210000 N/mm²):
  g = (3.5+0.5) x 2.5 + 1.22 = 11.22 kN/m²
  q = 0.3 x 2.5 = 0.75 kN/m
  p_{total} = 11.97 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 werden die Auflagerungen der Decke aus zwei Verfahren berücksichtigt. Beim ersten Verfahren wird die Balkenformel verwendet, wobei Randverformungen der Platte vernachlässigt werden.

Beim zweiten Verfahren wird die Randverformung einmal durch die Berechnung als orthtrope Platte und einmal mit Eigengewichtsansatz berücksichtigt.

- Anwendung der Balkenformel (Abschnitt A.2):

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

$$f = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3EI}{0.49\ \mu l^4}} = \frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{3 \times 210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{0.49 \times 1220 \times 15^4}} = 4{,}77\ Hz$$

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

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

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

$$= 4.76 \times 1.00 = 4{,}76$$

- Anwendung des Eigengewichtsansatzes (Abschnitt A.3):

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.

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

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

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

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

$$\Rightarrow \qquad f_1 = \frac{18}{\sqrt{14.2}} = 4.78\,Hz$$

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:

$$M_{\text{mod}} = 0{,}5\ \mu\ l = 0{,}5 \times 1220 \times 15 = 9150\ kg$$

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 5). Der erwartete OS-RMS$_{90}$ ist etwa 3.2 mm/s.

Nach Tabelle 1 wird Klasse D als für Bürogebäude brauchbar eingestuft. Das heißt die Anforderungen sind erfüllt.