

# **Forschungsbericht**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschoßbau  
- eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**T 2736**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1996, ISBN 3-8167-4909-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschößbau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Durchgeführt im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik**

**Az: IV 1-5-700/93**

**Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek  
Dipl.-Ing. B. Hoffmeister  
Lehrstuhl für Stahlbau  
RWTH-Aachen**

**Aachen, Oktober 1995**

## Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines .....	1
2	Klassifizierungsmöglichkeiten .....	1
3	Klassifizierung der Belastungsarten .....	2
3.1	Allgemeines .....	2
3.2	Beschreibung der wichtigsten Belastungsarten .....	3
3.2.1	Rhythmische Hüpfübungen, Laufen .....	3
3.2.2	Gehbelastung .....	5
3.2.3	Impulsartige Belastung .....	6
3.2.4	Fahrzeuginduzierte Schwingungen .....	6
4	Klassifizierung von Beurteilungs- und Bewertungskriterien .....	7
4.1	Allgemeines .....	7
4.2	Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit anhand von Durchbiegungen oder Eigenfrequenzen .....	8
4.3	Vorgabe von einzuhaltenden Höchstbeschleunigungen .....	9
4.4	Ingenieurmäßige Abschätzung der Schwingungsanfälligkeit anhand einer Näherungsberechnung .....	10
4.5	Beurteilung der Gebrauchsfähigkeit mi Hilfe von Bewertungsgrößen und -diagrammen .....	10
4.6	Zusammenstellung der Vorschriften, Richtlinien und Empfehlungen .....	12
5	Klassifizierung nach Bauwerkskategorie .....	13
5.1	Allgemeines .....	13
5.2	Klassifizierung entsprechend der Bauwerksnutzung .....	13
5.3	Klassifizierung entsprechend der Bauwerksausführung .....	14
6	Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit mittels Zeitschrittberechnung .....	15
7	Frequenzmessungen an vorhandenen Decken .....	15
8	Schlußfolgerungen .....	16

## 1 Allgemeines

Zunehmender Optimierungs- und Ausnutzungsgrad moderner Stahl- und Verbundkonstruktionen haben zur Folge, daß bedingt durch große Spannweiten bei gleichzeitiger Minimierung der Bauhöhe die Schlankheiten immer größer werden. Diese Tendenz kann zu einer erhöhten Empfindlichkeit der Bauwerke gegenüber dynamischen Anregungen führen.

Die schwingungserzeugenden Belastungen hängen maßgeblich von der Nutzungsart des Bauwerks ab und lassen sich zunächst vereinfacht in verkehrsinduzierte Schwingungen (z.B. Fahrzeuge auf Brücken), maschineninduzierte Schwingungen (z.B. Maschinenfundamente, Industriehallen) und menscheninduzierte Schwingungen (z.B. Bürogebäude, Sporthallen) unterteilen.

Im folgenden werden Hochbaukonstruktionen in Abhängigkeit von ihrer vorgesehenen Nutzungsart mit menscheninduzierten dynamischen Beanspruchungen aus Tanzen, Turnen, Gehen etc. untersucht.

Die vorgenommene Klassifizierung geht von folgenden für den Hochbau typischen Systemen aus:

- a) Bürogebäude, insbesondere Deckenkonstruktionen
- c) Mehrgeschossige Turn- und Sporthallen
- b) Mehrgeschossige Hallen mit verschiedenen Nutzungsarten (z.B. Messehallen)

Für diese Systeme werden im folgenden die repräsentativen Belastungen zusammengestellt und auf der Grundlage vorhandener Empfehlungen und Normen die Möglichkeit zur Nachweisführung aufgezeigt.

## 2 Klassifizierungsmöglichkeiten

Im folgenden wird die Klassifizierung zur Überprüfung der Gebrauchszustände in drei Hauptkriterien unterteilt:

- a) Klassifizierung entsprechend der Belastungsart
- b) Klassifizierung der Beurteilungskriterien
- c) Klassifizierung nach Bauwerkstyp

Diese Einteilung erlaubt eine zunächst voneinander unabhängige Klassifizierung der Einwirkungsseite und der aus der Interaktion zwischen der Einwirkung und der Bauwerksstruktur resultierenden Auswirkung auf den Menschen.

### 3 Klassifizierung der Belastungsarten

#### 3.1 Allgemeines

Der Schwerpunkt der in diesem Forschungsvorhaben behandelten Gebrauchsfähigkeitsaspekte lag auf der Untersuchung von menscheninduzierten Schwingungen. Mögliche Erschütterungsursachen sind:

- a) Rhythmisches Hüpfen
- b) Tanzen
- c) Laufen
- d) Gehen
- e) Impulsbelastungen (Einzelsprung, Fersenstoß)

Bis auf den letzten Fall können alle Belastungsarten als zyklische Funktionen abgebildet werden und damit auch mittels einer Überlagerung mehrerer harmonischer Sinusfunktionen numerisch modelliert werden.

Die durch Menschen hervorgerufenen Belastungstypen können in Abhängigkeit von der **Anzahl beteiligter Personen** klassifiziert werden. Der Synchronisationsgrad, der sowohl von der Anzahl der an der Belastung beteiligten Personen als auch von der Nutzungsart des betroffenen Bauwerks (und damit von der Belastungsart) abhängig ist, ist in dieser Klassifizierung miteingeschlossen. Vereinfacht lassen sich nach diesem Kriterium folgende Belastungsarten definieren:

- a) Synchronisierte rhythmische Übungen einer Personengruppe
- b) Laufen und Gehen einer Personengruppe
- c) Laufen und Gehen einer Einzelperson

Bezogen auf die **Nutzungsart** typischer Bauwerkstypen werden im folgenden die beiden maßgebenden Belastungstypen näher betrachtet:

- a) Sporthallen:                   rhythmische Übungen einer Personengruppe
- b) Bürohausdecke:               Gehen einer Einzelperson

Zusätzlich können die Belastungsarten noch hinsichtlich des **Belastungsortes** in

- a) stationäre (z.B. Hüpfen)
  - b) instationäre (Gehen, Laufen)
- unterteilt werden.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die typischen Merkmale verschiedener Belastungstypen.

**Tabelle 1:** Belastungstypen und deren Merkmale

Belastungsart	Personengruppe	Einzelperson	synchronisiert	nicht synchronisiert	stationär	instationär	maßg. für Hallen	maßg. für Bürodeckel	zyklisch	Einzelstoß
rhythmisches Hüpfen	x		x		x		x		x	
Tanzen	x		(x)	(x)	(x)	(x)	x		x	
Laufen	x	(x)				x	x		x	
Gehen	(x)	x	(x)			x		x	x	
Impulsbelastung		x		x	x			x		x

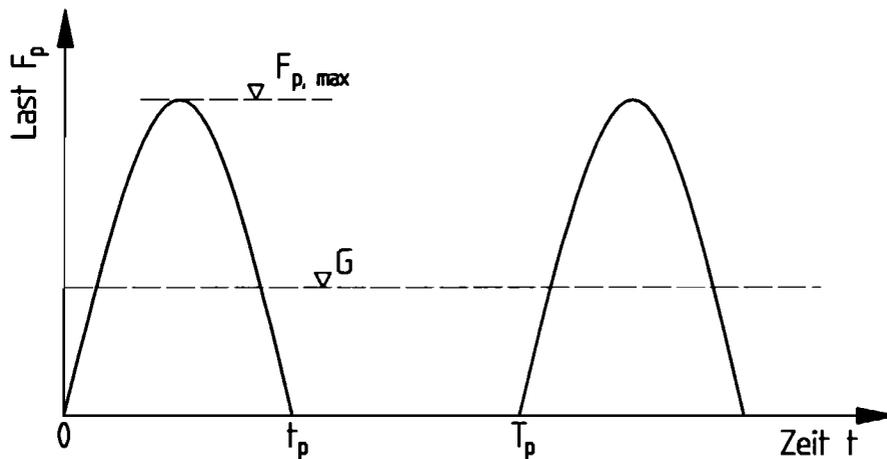
x meistens zutreffend  
 (x) unter Umständen zutreffend

Zusätzlich zu den durch Menschen verursachten Erschütterungen sollte noch der Fall fahrzeuginduzierter Schwingungen erwähnt werden, der hier allerdings nur am Rande behandelt wird.

## 3.2 Beschreibung der wichtigsten Belastungsarten

### 3.2.1 Rhythmische Hüpfübungen, Laufen

Die Belastungen durch rhythmische Hüpfübungen und durch Laufen sind durch einen diskontinuierlichen Bodenkontakt gekennzeichnet. Beide Belastungsfälle lassen sich mit ausreichender Genauigkeit durch das so genannte Halbsinusmodell mathematisch beschreiben (Abb. 1)



**Abb. 1:** Halbsinusmodell für Belastungen mit diskontinuierlichem Bodenkontakt /1/

Die entsprechende mathematische Funktion der Lastfunktion lautet:

$$F_p(t) = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{t_p}\right) & \text{für } t \leq t_p \\ 0 & \text{für } t_p \leq t \leq T_p \end{cases}$$

mit

$k_p$	Verhältnis der dynamischen Last zum Personengewicht
$G$	Personengewicht
$t_p$	Kontaktzeit
$T_p$	Hüpfperiode ( $1/f_s$ )

Die genaue Bedeutung der einzelnen Parameter und deren Abhängigkeit von den Randbedingungen ist in **Anlage A** erläutert.

Die Belastungen durch rhythmisches Hüpfen und durch Laufen unterscheiden sich im wesentlichen durch zwei Merkmale:

- Beim Hüpfen handelt es sich in der Regel um stationäre, beim Laufen um instationäre Belastung
- Die Belastung durch Hüpfen kann durch mehrere Personen, deren Bewegungen synchronisiert ablaufen, erfolgen. Die Belastung durch Laufen wird im allgemeinen nicht synchronisiert erzeugt.

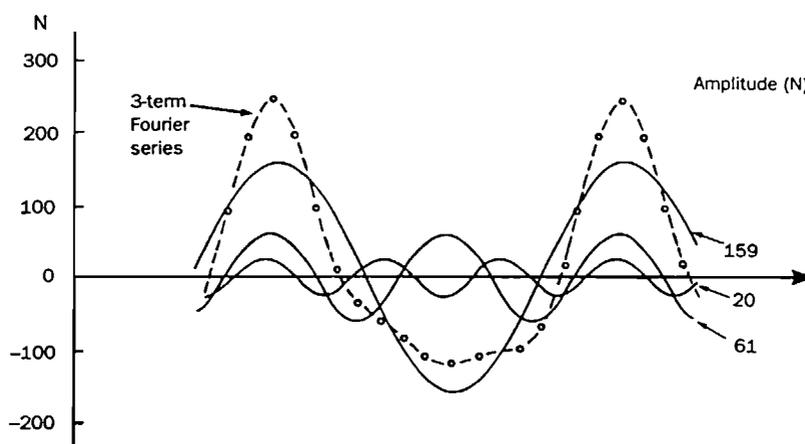
### 3.2.2 Gehbelastung

Bei der Belastung durch gehende Personen handelt es sich um eine instationäre und (außer beim Marschschritt) unsynchronisierte Belastungsart. Der biomechanische Ablauf des Gehens ist in **Anlage A** erläutert, mathematisch läßt sich die Gehbelastung durch die Überlagerung von drei harmonischen Funktionen wie folgt darstellen (Abb. 2):

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \sin(2\Pi f_s t) + \Delta G_2 \cdot \sin(4\Pi f_s t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \sin(6\Pi f_s t - \varphi_3)$$

mit

$G$	Personengewicht
$\Delta G_1$	Amplitude der 1. Harmonischen
$\Delta G_2$	Amplitude der 2. Harmonischen
$\Delta G_3$	Amplitude der 3. Harmonischen
$f_s$	Schrittfrequenz
$\varphi_2$	Phasenverschiebung der 2. Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen
$\varphi_3$	Phasenverschiebung der 3. Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen



**Abb. 2:** Mathematische Modellierung der Gehbelastung

**Anlage A** gibt eine Übersicht über einige Vorschläge für die numerische Modellierung der Belastungsfunktion.

### 3.2.3 Impulsartige Belastung

Impulsartige Belastungen können infolge einzelner Fersenauftritte, eines Einzelsprungs, eines Sprunges aus einer bestimmten Höhe etc. hervorgerufen werden. Diese Belastungsart ist durch eine relativ kurze Einwirkungsdauer gekennzeichnet. Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Impulsen sind groß genug, um diese Belastungsart als Einzelereignis zu betrachten. Eine gute Näherung des wirklichen Kraft-Zeitverlaufs wird durch den in Abb. 3 dargestellten Kraft-Zeitverlauf erreicht.

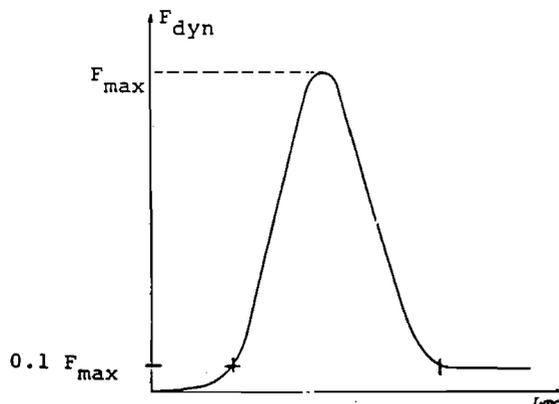
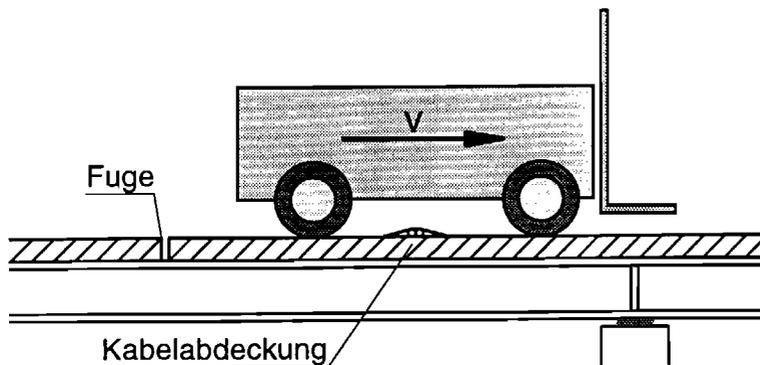


Abb. 3: Kraft-Zeitverlauf einer impulsartigen Belastung

Anlage A gibt einige Vorschläge zur Größenordnung der dynamischen Lasten und der anzusetzenden Einwirkungsdauer.

### 3.2.4 Fahrzeuginduzierte Schwingungen

Fahrzeuginduzierte Schwingungen gehören zu der Kategorie verkehrsinduzierter Erschütterungen, die z.B. bei der Bemessung von Brückenbauwerken eine bedeutende Rolle spielen können (Schwingbeiwerte). Im Zusammenhang mit der Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit und des Komforts von Hochbaukonstruktionen können fahrzeuginduzierte Schwingungen bei bestimmten Nutzungsarten dieser Bauwerke (z.B. Messehallen) von Bedeutung sein. Besonders starke Erschütterungen können beim Überfahren von Querfugen oder Kabelabdeckungen in Hallendecken auftreten (Abb. 4)



**Abb. 4:** Beispiel für Quellen fahrzeuginduzierter Erschütterungen

Die fahrzeuginduzierten Schwingungen sollen hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt werden, eine vertiefte Betrachtung dieser Beanspruchungsart wird hier nicht weiter verfolgt.

## 4 Klassifizierung von Beurteilungs- und Bewertungskriterien

### 4.1 Allgemeines

Die Beurteilung der Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit eines Bauwerks infolge dynamischer Beanspruchung wird im allgemeinen mit Hilfe von Bewertungskriterien durchgeführt. Es existiert eine Reihe von Vorschriften und Empfehlungen in denen verschiedene Kriterien, die entweder eine Schwingungsanfälligkeit von vorne herein verhindern sollen oder die Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit infolge von gemessenen oder berechneten Schwingungsgrößen beurteilen lassen, angegeben sind.

Als Ergebnis der durchgeführten Literaturrecherche können die Empfehlungen und Normen zum Thema *Menscheninduzierte Schwingungen und Beurteilung deren Einwirkung auf Menschen* in folgende Kategorien eingeteilt werden:

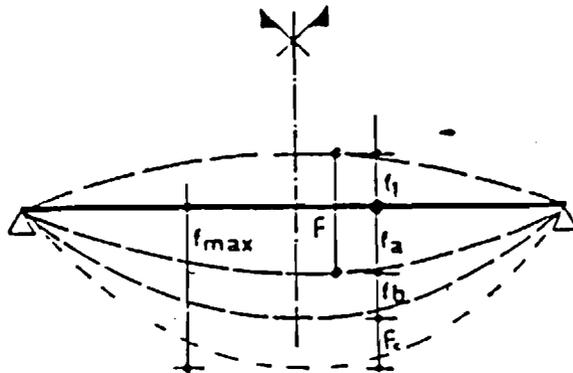
- a) Allgemeine Literatur zur numerischen Erfassung der Belastungsarten und zur Ermittlung der dynamischen Bauwerksreaktionen.
- b) Empfehlungen zur Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit durch Vorgabe maximaler Verformungen oder einzuhaltender Mindesteigenfrequenzen.

- c) Richtlinien zur ingenieurmäßigen Überprüfung der Komfortbedingungen von Bauwerken in Form einer Abschätzung der zu erwartenden für die Beurteilung maßgebenden Werte. Diese Vorgehensweise erfordert keine dynamische Simulationsberechnung und keine Schwingungsmessung und eignet sich insbesondere zur Auslegung von Bauwerken im Entwurfsstadium.
- d) Richtlinien und Vorschriften zur Bewertung der Einwirkungen von Bauwerksschwingungen und -erschütterungen auf Menschen. Diese Vorschriften können im allgemeinen für verschiedene Schwingungs- und Erregungsarten verwendet werden, es muß aber geprüft werden, ob das vorliegende Problem innerhalb der Anwendungsgrenzen dieser Richtlinien liegt.
- Die für die Bewertung der Einwirkung auf den Menschen und die damit verbundene Beurteilung der Gebrauchsfähigkeit benötigten Angaben müssen entweder durch dynamische Simulationsberechnungen oder durch Messungen vor Ort ermittelt werden. Diese Methode eignet sich nur bedingt für die Auslegung von geplanten Bauwerken (aufwendige Zeitschrittberechnungen); Sie wird vor allem für die Überprüfung bereits vorhandener Bauwerke verwendet.

Der Berechnungs- oder Meßaufwand variiert sehr stark in Abhängigkeit von dem gewählten Beurteilungsverfahren und der Komplexität der untersuchten Struktur. Der Aufwand reicht von einer einfachen Durchbiegungs- oder Eigenfrequenzermittlung bis hin zu einer aufwendigen Zeitschrittberechnung oder einer entsprechenden Schwingungsmessung.

#### **4.2 Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit anhand von Durchbiegungen oder Eigenfrequenzen**

Die einfachste Methode zur Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit einer Konstruktion und einer damit einhergehenden Beeinträchtigung der Gebrauchsfähigkeit ist die Vorgabe einer einzuhaltenden (relevanten) Mindesteigenfrequenz oder einer maximal zulässigen Durchbiegung unter ständigen Lasten (Abb 5). Das Ziel dieser Vorgaben ist die Vermeidung von Resonanzeffekten zwischen der möglichen dynamischen Belastung und der betroffenen Konstruktion. Da die dynamische Belastung von der vorgesehenen Nutzung des Bauwerks abhängig ist, muß die Vorgabe der Mindesteigenfrequenzen ebenfalls nutzungsabhängig erfolgen.



**Abb. 5:** Beispiel für die Ermittlung der schwingungsrelevanten Durchbiegung

Solche Vorschläge zur Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit werden unter anderen in den folgenden Vorschriften und Empfehlungen gemacht:

- a) Eurocode 3 /23/
- b) SIA 160 /24/
- c) CEB Bulletin /4/
- d) Bachmann/Ammann /1/
- e) NBN B 03-003 /25/
- f) CTICM /22/

Eine Zusammenstellung der vorgeschlagenen Grenzwerte ist in **Anlage B** dargestellt.

#### 4.3 Vorgabe von einzuhaltenden Höchstbeschleunigungen

Eine weitere vereinfachte Möglichkeit zur Gewährleistung der Gebrauchsfähigkeit von schwingungsgefährdeten Deckenkonstruktionen besteht in der Vorgabe einzuhaltender Höchstbeschleunigungswerte (ohne eine gleichzeitige Berücksichtigung des Frequenzinhalts der Beschleunigung). Die Maximalwerte werden in Abhängigkeit von der Nutzung und der damit einhergehenden Empfindlichkeit der betroffenen Personen abgestuft (siehe /1/).

Dieser Ansatz, der als eine vereinfachte Interpretation der Bewertungskurven (ISO, VDI ...) betrachtet werden kann, stellt für eine schnelle Abschätzung der Gebrauchstauglichkeit eine sinnvolle Alternative dar, zudem es sich bei dem Frequenzbereich, in dem die meisten Deckenschwingungen stattfinden, um einen Bereich handelt, in dem die Kurven gleicher

Wahrnehmbarkeit nach VDI, ISO etc. einen horizontalen Verlauf aufweisen und somit in diesem Frequenzband frequenzunabhängig sind.

#### **4.4 Ingenieurmäßige Abschätzung der Schwingungsanfälligkeit anhand einer Näherungsberechnung**

Einige Quellen schlagen eine in der Praxis mit verhältnismäßig geringem Aufwand durchführbare Abschätzung der zu erwartenden Schwingungsgrößen und geben gleichzeitig Vorschläge an, welche Grenzwerte zur Erfüllung von Gebrauchstauglichkeitsforderungen einzuhalten sind. Hierzu zählen die folgenden Publikationen:

- a) T.A. Wyatt: Design Guide on the Vibration of Floors /2/
- b) Allen/Murray Design Criterion for Walking Vibrations /3/

Der Anwendungsbereich beider Vorschläge ist auf die Untersuchung von Hochbaudecken, bei denen die dynamische Belastung durch gehende Personen i.a. maßgebend ist, beschränkt. Es muß zunächst, ausgehend von dem maßgebenden Schwingungssystem, eine Eigenfrequenzermittlung durchgeführt werden. Unter Ansatz eines geschätzten Dämpfungsdekrementes wird anschließend ein von der Systemeigenfrequenz abhängiger Beurteilungswert ermittelt, der mit den für bestimmte Nutzungsbedingungen angegebenen Grenzwerten verglichen werden kann. Die Berechnungsansätze sind, in Abhängigkeit von der Deckeneigenfrequenz, für Gehbelastung (niedrigfrequente Decken) oder Impulsbelastung (hochfrequente Decken) entwickelt worden; das Ergebnis liefert eine den Besonderheiten des untersuchten Systems entsprechende Aussage über die zu erwartenden Komfortbedingungen hinsichtlich menscheninduzierter Schwingungen.

**Anlage B** enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Ansätze und der Vorgehensweise bei der Gebrauchsfähigkeitsüberprüfung, im **Anlage C** ist ein Anwendungsbeispiel für die Untersuchung einer Verbunddeckenkonstruktion enthalten.

#### **4.5 Beurteilung der Gebrauchsfähigkeit mi Hilfe von Bewertungsgrößen und -diagrammen**

Die Beurteilung der Gebrauchsbeeinträchtigung von Bauwerken mit Hilfe von Bewertungskriterien wird auf die Bewertung der Einwirkungen von Schwingungen auf Menschen zurückgeführt. Die erforderlichen Eingangsgrößen sind in der Regel die auftretenden dynamischen Größen

(Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Verformung) und deren Frequenzinhalte. Diese Größen müssen entweder durch Messungen (möglich nur bei bereits bestehenden Bauwerken) oder durch Berechnungen (in der Regel Zeitschrittberechnungen) ermittelt werden. Die Bewertungsdiagramme sind im allgemeinen in Form von Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke in Abhängigkeit von der Frequenz und der dynamischen Kenngröße (z.B. Beschleunigung) dargestellt (Abb. 6).

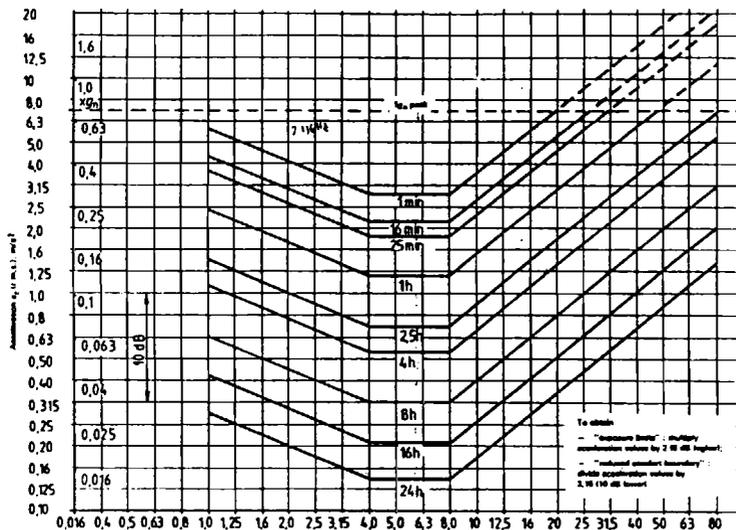
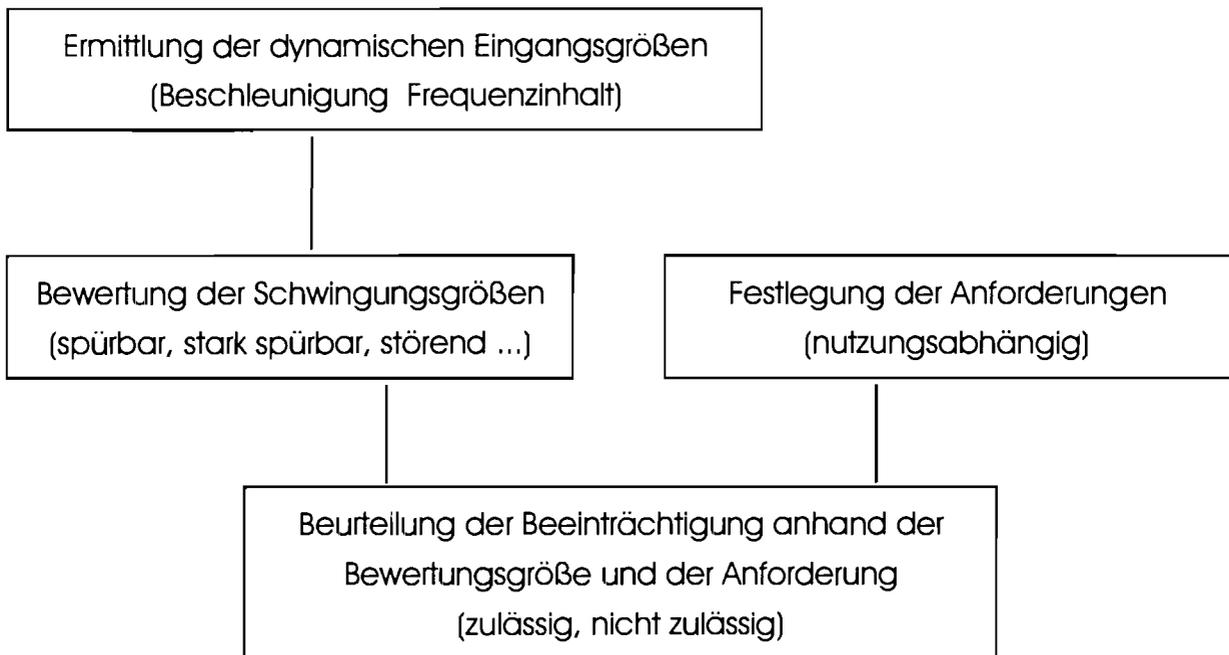


Abb. 6: Beispiel eines Bewertungsdiagramms (ISO 2631)

Je nach Vorschrift wird als beurteilungsrelevant der maximale Wert der Beschleunigung, der Mittelwert (RMS-Wert) oder der RMS-Wert von Terzbändern betrachtet. Die Bewertung mittels der Diagramme liefert die zu erwartende Wahrnehmungsstärke (z.B. wahrnehmbar, stark wahrnehmbar, störend etc.), die durch einen Vergleich mit den der Nutzung entsprechend festgelegten Anforderungen beurteilt werden. In diese Beurteilung kann noch die Dauer der Einwirkung auf den Menschen und in besonderen Fällen auch die Tageszeit der Einwirkung einbezogen werden.

Der prinzipielle Vorgang der Bewertung und Beurteilung von Schwingungen kann der Abb. 7 entnommen werden.



**Abb. 7:** Prinzipieller Ablauf einer Bewertung und Beurteilung von Schwingungen

Zu den Normen und Empfehlungen, denen Bewertungskriterien entnommen werden können, zählen unter anderen:

- a) DIN 4150 /31/
- b) VDI-Richtlinie 2057 /30/
- c) ISO 2631 /29/
- d) BS 6472 /27/

#### **4.6 Zusammenstellung der Vorschriften, Richtlinien und Empfehlungen**

Die nachfolgende Tabelle gibt einen groben Überblick über die in den verschiedenen Vorschriften und Empfehlungen enthaltenen Hinweise zur Beurteilung der Schwingungen in Hochbaukonstruktionen. Eine auszugsweise Darstellung der Einzelnen Quellen ist in **Anlage B** gegeben.

**Tabelle 2:** Zusammenstellung der wichtigsten Vorschriften und deren Inhalte

Inhalte	Vorschriften													
	EC 3	SIA 160	NBN B 03-003	CSTC 132	CTICM	BS 6472	ISO 10137	ISO 2631	VDI 2057	DIN 4150	SCI Design Guide	Allan/Murray	CEB Bulletin	Bachmann/Amman
Belastungsbeschreibung und Modellierung							x				x	x	x	x
Minesteigenfrequenzen maximale Durchbiegungen	x	x	x	x	x								x	x
Beurteilung mittels Ingenieurmodelle											x	x		
Bewertungsangaben und Beurteilungskriterien						x		x	x	x				(x)

## 5 Klassifizierung nach Bauwerkskategorie

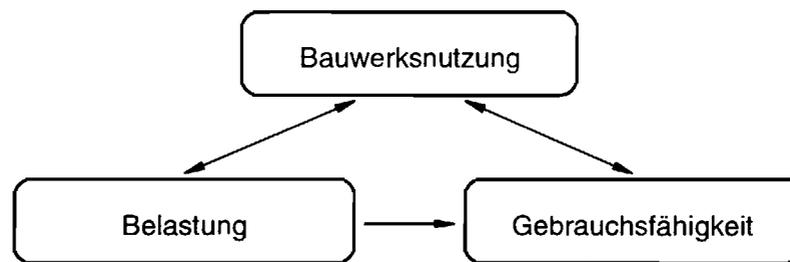
### 5.1 Allgemeines

Die Klassifizierung der Gebrauchszustände nach Bauwerkskategorie kann nach zwei Aspekten ausgerichtet sein:

- a) Einteilung entsprechend der vorgesehenen Nutzung
- b) Einteilung entsprechend der Bauwerksausführung

### 5.2 Klassifizierung entsprechend der Bauwerksnutzung

Die vorgesehene Nutzung eines Bauwerks ist unmittelbar mit der zu erwartenden Belastungsart gekoppelt. Ebenso besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bauwerksnutzung und den anzusetzenden Grenzen für die Gebrauchsfähigkeit (Abb. 8)



**Abb. 8:** Nutzung - Belastung - Gebrauchsfähigkeit

Eine grobe Unterteilung nach Nutzungsarten könnte beispielweise wie folgt unternommen werden:

Nutzung	Belastung	Anforderung an die Gebrauchsfähigkeit
Sporthalle	rhythmisches Hüpfen	relativ gering
Bürogebäude	Gehen	mittel
besondere Nutzung	Gehen	hoch

Es ist noch eine Reihe weiterer Bauwerkskategorien denkbar, die ihrerseits weiter in Unterkategorien unterteilt werden könnten. Für einige Gebäudekategorien (z.B. Messehallen), für die verschiedene Nutzungsarten vorgesehen sind, können in Abhängigkeit von der jeweils stattfindenden Veranstaltung unterschiedliche Belastungen und Gebrauchstauglichkeitskriterien aufgestellt werden.

**Anlage D** beinhaltet einige bereits vorhandene Klassifizierungen der Bauwerke in denen in Abhängigkeit von der Nutzungsart verschiedene Gebrauchstauglichkeitsgrenzen vorgeschlagen wurden.

### 5.3 Klassifizierung entsprechend der Bauwerksausführung

Es existieren einige Ansätze, die eine Klassifizierung der Anforderungen in Abhängigkeit von der baulichen Durchbildung und Bauweise (Stahlbeton, Spannbeton, Verbundkonstruktion oder Stahlkonstruktion) verschiedene Größen für einzuhaltende Steifigkeitsgrenzwerte zur Gewährleistung einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit angeben. Diese im allgemeinen als einzuhaltende Mindesteigenfrequenzen angegebenen Vorschläge führen die unterschiedlichen Anforderungen auf das unterschiedliche Dämpfungsverhalten der verschiedenen Bauweisen (siehe **Anlage D**). Bei Anwendung dieser Vorschläge muß man sich dessen bewußt sein, daß die

Einteilung nach Bauweisen unter Umständen zu pauschalen Beurteilungen führen kann, die in der Wirklichkeit nicht immer zutreffen müssen (so ist zum Beispiel der Einfluß sekundärer Bauelemente auf das Dämpfungsverhalten deutlich größer als die Bauweise des Haupttragwerks).

## **6 Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit mittels Zeitschrittberechnung**

Die Anwendung der meisten Bewertungskriterien zur Beurteilung der Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken infolge dynamischer Beanspruchungen setzt die Kenntnis der dynamischen Größen (i.a. Beschleunigung und Frequenzspektrum) voraus. Diese Größen können bei bestehenden Bauwerken durch Messungen ermittelt werden; im Entwurfsstadium ist hierfür in der Regel eine dynamische Berechnung notwendig.

Für diese Problemstellung wurde das am Lehrstuhl für Stahlbau entwickelte dynamische Simulationsprogramm derart erweitert, daß unter Ansatz beliebiger Last-Zeitverläufe die dynamische Bauwerksreaktion mittels einer Zeitschrittberechnung ermittelt werden kann. Aus den Simulationsergebnissen lassen sich die Zeitverläufe von Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Verformung an ausgesuchten Stellen der Konstruktion ableiten. Mittels einer Fourieranalyse kann anschließend das zugehörige Frequenzspektrum ermittelt werden. Mit diesen Eingangsgrößen ist es möglich die Richtlinien und Normen zur Beurteilung der Schwingungseinwirkungen anzuwenden.

**Anlage E** zeigt die prinzipielle Vorgehensweise und die Ergebnisse solcher Berechnungen am Beispiel einer Doppelsporthalle und einer Bürodecke.

## **7 Frequenzmessungen an vorhandenen Decken**

Die Ermittlung der Eigenfrequenzen von Deckenkonstruktionen ist ein wichtiger Bestandteil einer Untersuchung der Schwingungsanfälligkeit einer Decke. Um die üblichen Ansätze auf ihre Richtigkeit hin zu überprüfen wurde eine Reihe von Schwingungsmessungen an bereits bestehenden Verbunddeckenkonstruktionen durchgeführt. Die Meßergebnisse wurden anschließend mit den rechnerisch ermittelten Werten verglichen.

Die Meßergebnisse und die Vergleichsberechnungen sind in **Anlage F** dargestellt.

## **8      Schlußfolgerungen**

Der vorliegende Bericht liefert einen Überblick über den gegenwärtig vorhandenen Kenntnisstand über menscheninduzierte Schwingungen sowie deren Ursachen und Auswirkungen. Es werden ebenfalls die verfügbaren Vorschriften und Empfehlungen zur Bewertung und Beurteilung von Schwingungen und deren Auswirkung auf die Gebrauchsfähigkeit von Konstruktionen vorgestellt.

Es zeigt sich, daß die Ansätze zur Beschreibung der wichtigsten Belastungsarten in den relevanten Literaturstellen weitgehend übereinstimmend sind. Somit können auf Basis dieser Angaben dynamische Simulationsberechnungen zur Ermittlung und Überprüfung der Gebrauchsfähigkeit verhältnismäßig zuverlässig durchgeführt werden.

Bei den Normen und Empfehlungen zu Bewertung und Beurteilung der Auswirkung von Schwingungen auf die Gebrauchsfähigkeit hin bestehen dagegen zum Teil deutliche Unterschiede sowohl hinsichtlich der Vorgehensweise als auch bei den Ergebnissen. Hier besteht offensichtlich noch Forschungs- und Harmonisierungsbedarf.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Bachmann H., Amman W.  
Vibrations in Structures Induced by Man and Machines  
Structural Engineering Documents, IABSE 1987
- /2/ Wyatt T.A.  
Design Guide on the Vibration of Floors  
SCI - Publication, 1989
- /3/ Allen D.E., Murray T.M.  
Design Criterion for Walking Vibrations  
ASCE - Publication, 1993
- /4/ Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines  
CEB Bulletin d'Information N° 209, 1991
- /5/ Fisher J. M., West M. A.  
Serviceability Design Considerations for Low-Rise Buildings  
AISC Steel Design Guide Series N° 3, 1990
- /6/ Rainer J. H., Swallow J. C.  
Dynamic Behaviour of a Gymnasium Floor  
NRCC - Publication N° 26403, 1986
- /7/ Schneider M.  
Ein Beitrag zu fußgängerinduzierten Brückenschwingungen  
Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, TU München, Heft 5/91
- /8/ Fischer M., Brune B.  
Zum Schwingungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Stahl  
Berichte aus dem Fachgebiet Stahlbau der Universität Dortmund, Mitteilung N° 11, 1990
- /9/ Ohlsson S.  
Springness and Human-Induced Floor Vibrations - a Design Guide  
Swedish Council for Building Research, 1988

- 
- /10/ Symposium/Workshop on Serviceability of Buildings (Movements, Deformations, Vibrations) - Proceedings Vol. I and II  
University of Ottawa, 1988
- /11/ Structural Serviceability of Buildings, International Colloquium Göteborg 1993  
IABSE - Proceedings, Vol. 69
- /12/ Cantieni R.  
Untersuchung von Deckenschwingungen bei einem Bürogebäude  
EMPA - Bericht N° 116/2, 1985
- /13/ Cantieni R.  
Schulhaus Böswisli, Turnhalle, Schwingungsmessungen an der Zwischendecke  
EMPA - Bericht (unveröffentlicht), 1987
- /14/ Sedlacek G, Drosner S.  
Gutachten zur Frage des Schwingungsverhaltens der Geschoßdecken in der Ebene I der Halle 10 der Messehallen Berlin (unveröffentlicht)  
Lehrstuhl für Stahlbau, Aachen, 1985
- /15/ Sedlacek G.  
Aspekte der Gebrauchsfähigkeit von Stahlbauten  
Stahlbau 10, 1984
- /16/ Sedlacek G., Bild S.  
Serviceability Limits to Tall Buildings  
Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1988
- /17/ Hoffmeister B., Kuck J., Sedlacek G.  
Schwingungsanalyse der Doppelsporthalle Berlin-Wilmersdorf (unveröffentlicht)  
Lehrstuhl für Stahlbau, Aachen 1991
- /18/ Hoffmeister B, Kuck J., Sedlacek G.  
Schwingungsanalyse der Sporthalle Berlin-Treptow (unveröffentlicht)  
Lehrstuhl für Stahlbau, Aachen 1994

- 
- /19/ Bachmann H. et al  
Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines  
Birkhäuser Verlag, 1995
- /20/ Uchida N, Kawamura M, Aoyagi T, Kiriwara H.  
Vibration of Floor Beams due to Walking Occupants - Study on Measured Data  
IABSE - Workshop "Serviceability Limit States for Steel Buildings", Zürich 1989
- /21/ Deformation Requirements for Buildings  
NRCC Technical Translation, 1980
- /22/ Etats Limites de Service  
Document CCCA-ELS-4, CTICM, 1987
- /23/ ENV 1993-1-1 (Eurocode 3) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten  
1993
- /24/ SIA 160 Action on Structures, 1990
- /25/ Norme Belge NBN B 03-003  
Déformations des structures - Valeurs limites de déformation - Bâtiments  
1991
- /26/ Deformations admissibles dans le Bâtiments  
Centre Scientifique et Technique de la Construction, Note d'Information Technique 132  
1980
- /27/ BS 6472 Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)  
1992
- /28/ ISO 10137 (Draft) Bases for design of structures - Serviceability of buildings against  
vibrations, 1990
- /29/ ISO 2631/1 Evaluation of human exposure to whole-body vibration  
Part 1: General requirements  
1985

- 
- /30/ VDI 2057 Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, 1987  
Blatt 1: Grundlagen, Gliederung, Begriffe  
Blatt 2: Bewertung  
Blatt 3: Beurteilung
- /31/ DIN 4150 Erschütterungen im Bauwesen  
Teil 1: Grundsätze, Voremittlung und Messung von Schwingungsgrößen, 1975  
Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, 1975 und 1992  
Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, 1986
- /32/ DIN 45669 Messung von Schwingungsimmissionen  
Teil 1: Anforderungen an Schwingungsmesser, 1981  
Teil 2: Meßverfahren, 1984
- /33/ DIN 45651 Oktavfilter für elektroakustische Messungen  
1964
- /34/ DIN 45652 Terzfilter für elektroakustische Messungen  
1964
- /35/ Müller Ch.  
Untersuchungen zum Tragverhalten von Flachdeckenkonstruktionen in Stahl- und  
Stahlverbundbauweise  
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH-Aachen, 1995

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschobebau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

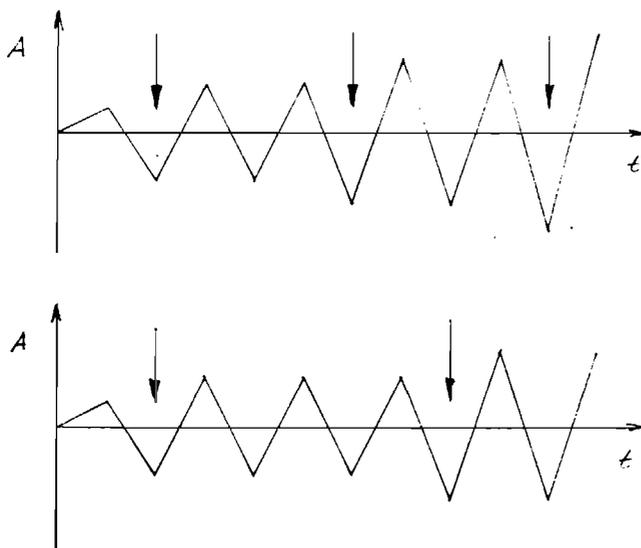
**Az: IV 1-5-700/93**

## **ANLAGE A**

**Zusammenstellung der wichtigsten Belastungsarten**

## Anlage A - Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Dynamische Belastungen - Allgemeines</b> .....	<b>1</b>
1.1	Zyklische Belastungen .....	1
1.2	Impulsartige Belastungen .....	2
<b>2</b>	<b>Belastung durch rhythmische, synchronisierte Übungen</b> .....	<b>2</b>
2.1	Allgemeines .....	2
2.2	Vorschläge von Bachmann/Amann /1/ zum Ansatz von synchronisierten Belastungsfunktionen .....	4
2.3	ISO 10137 - Annex A: Vorschläge zum Ansatz von synchronisierten Belastungsfunktionen .....	5
2.4	Zusammenfassung .....	6
<b>3</b>	<b>Belastung durch Gehen</b> .....	<b>6</b>
3.1	Allgemeines .....	6
3.2	Vorschläge von Bachmann/Amann /1/ zur Abbildung der Gehfunktion .....	8
3.3	Vorschläge von Wyatt /2/ zur Abbildung der Gehfunktion .....	8
3.4	Vorschläge in ISO 10137 /28/ zur Abbildung von Geh- und Laufbelastungen .	9
3.5	Vorschläge für Gehbelastung nach Allen/Murray /3/ .....	10
<b>4</b>	<b>Impulsartige Belastungen</b> .....	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>12</b>



**Abb. 2:** Beispiele für 2. Und 3. Harmonische als dynamische Belastungsfunktionen

## 1.2 Impulsartige Belastungen

Bei impulsartigen Belastungen handelt es sich um Einzelereignisse, die sich durch eine kurze Einwirkungsdauer auszeichnen. Diese Belastungsart kann durch den s.g. "heel drop" (heftiges Auftreffen mit den Fersen), durch einen Sprung aus einer bestimmten Höhe (z.B. vom Stuhl) oder beim Sprung mehrere Stufen hinunter hervorgerufen werden.

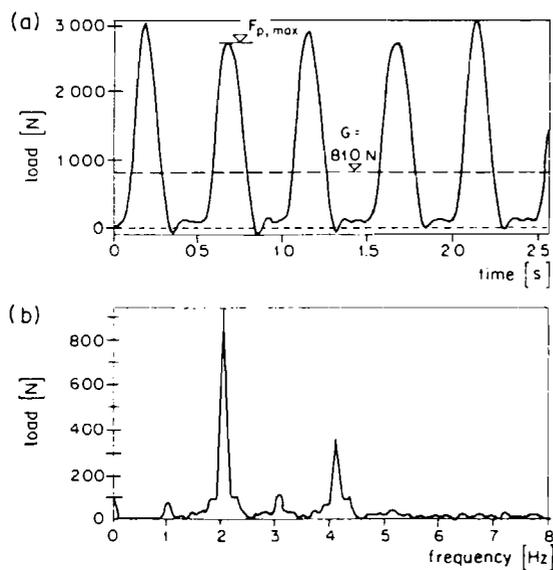
Im Hinblick auf die Gebrauchsfähigkeit von Deckenkonstruktionen spielt die Impulsbelastung eine wichtige Rolle bei verhältnismäßig steifen Decken, bei denen keine Resonanzerscheinungen zu erwarten sind.

## 2 Belastung durch rhythmische, synchronisierte Übungen

### 2.1 Allgemeines

Die Belastung durch rhythmische, synchronisierte Belastungsfunktionen (Hüpfen, Tanzen) ist in der Regel maßgebend für die Auslegung hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit von s.g. Doppelsporthallen, die über eine Zwischendecke mit relativ großer Spannweite verfügen.

Abb. 3 zeigt die gemessenen Belastungs-Zeitverläufe von rhythmischen Hüpfübungen.



**Abb. 3:** Gemessene Zeitverläufe von Hüpfbelastungen

Der mathematische Ansatz zur Beschreibung einer durch rhythmisches Hüpfen verursachten dynamischen Belastung auf ein Bauwerk muß folgende Parameter berücksichtigen:

- Hüpf Frequenz

Anzusetzen ist die ungünstigste, anatomisch mögliche Hüpf Frequenz. Diese entspricht i.a. der kleinsten ganzzahligen Vielfachen der kritischen Eigenfrequenz der Konstruktion.

- Zeitverlauf der Belastung (für eine Person)

Hierunter fallen die von der Hüpf Frequenz abhängigen Lastamplituden und die Kontaktzeit.

- Personenbelegung (Personenanzahl/Fläche)

Diese Einflußgröße hängt im wesentlichen vom Platzbedarf zur Ausübung der rhythmischen Übung ab.

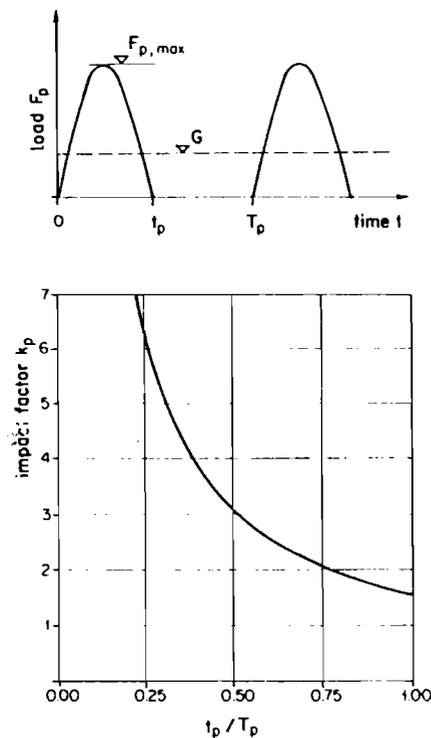
- Erreichbarer Synchronisationsgrad

Der Synchronisationsgrad hängt im wesentlichen von der Anzahl der zu synchronisierenden Personen und von einer möglichen Selbstsynchronisation mit den Bauwerksschwingungen ab.

Die Belastungsannahmen für den Lastfall rhythmische Belastung sind u.a. in /1/ und Annex A zu /28/ beschrieben.

## 2.2 Vorschläge von Bachmann/Amann /1/ zum Ansatz von synchronisierten Belastungsfunktionen

Zur Abbildung der Hüpfbelastung wird hier wird das Halbsinusmodell vorgeschlagen (Abb. 4). Die Abhängigkeit des dynamischen Faktors von der Hüpf Frequenz resultiert aus der Energiebetrachtung wonach die Gesamtenergie über einen Zeitraum konstant bleiben muß.



**Abb. 4:** Last-Zeit Funktion für Laufen und Hüpfen nach /1/

Die wichtigsten Annahmen für die Belastung durch Hüpfen sind:

### a) Hüpf Frequenz

- über längere Zeit (1 - 2 min): 1,0 - 2,8 Hz
- kurzzeitig: 2,0 - 3,2 Hz
- biologische Grenze: 3,5 Hz

## b) Kontaktzeit und Einfluß der Personenanzahl

- Einzelperson:  $t_p/T_p = 0,15 \cdot f_s$   
max.  $k_p = 6$  (dyn. Inkrement)
- Personengruppe:  $t_p/T_p = 0,20 \cdot f_s$   
max.  $k_p = 4,5$

### 2.3 ISO 10137 - Annex A: Vorschläge zum Ansatz von synchronisierten Belastungsfunktionen

Die ISO 10137 gibt im Annex A einige Vorschläge zu den dynamischen, durch Menschen hervorgerufenen Belastungsarten an. Es werden ebenfalls Vorschläge zu deren numerischer Modellierung sowie Anhaltswerte für die maßgebenden Größen angegeben.

Hinsichtlich der rhythmischen Belastungen (Hüpfen, Tanzen etc.) werden für die Belastungsannahmen die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Werte vorgeschlagen:

<i>Belastungsart</i>	<i>Üblicher Frequenzbereich der Belastung [Hz]</i>	<i>Statische Belastung durch die einwirkenden Personen*) q, kN/m<sup>2</sup></i>	<i>Fourierkoeffizient <math>\alpha_1</math> für die vertikale Richtung**)</i>
<i>Tanzen</i>	<i>1,5 - 3</i>	<i>0,6 (0,4 Paare/m<sup>2</sup>)</i>	<i>0,5</i>
<i>Hüpfanz</i>	<i>1,5 - 4</i>	<i>***)</i>	<i>bis 2</i>
<i>Lebhaftes Konzert oder Sportveranstaltung</i>	<i>1,5 - 3</i>	<i>1,5 (2 Personen/m<sup>2</sup>)</i>	<i>0,25</i>
<i>Hüpfübungen</i>	<i>1,5 - 3</i>	<i>0,4 (0,5 Personen/m<sup>2</sup>)</i>	<i>1,5</i>

#### Anmerkungen:

- \*) *Belastung unter üblichen Bedingungen. Bei besonderen Anlässen kann die Belastungsdichte höher sein und sollte berücksichtigt werden. Diese Werte gelten nicht für die Tragfähigkeitsermittlung.*
- \*\*\*)  *$\alpha_1$  gilt für übliche Fälle bei mindestens 20 beteiligten Personen. Die  $\alpha_1$ -Werte sollten für stark koordinierte Bewegungsabläufe (z.B. Hüpfanz) mit weniger als 20 Beteiligten erhöht werden. Der Fourierkoeffizienten für die zweite Harmonische kann mit  $0,4 \cdot \alpha_1$  angesetzt werden.*
- \*\*\*) *Unter extremen Bedingungen wurden Belastungen zwischen 1,5 bis 10 kN/m<sup>2</sup> (2 bis 12,5 Personen/m<sup>2</sup>) beobachtet.*

Die Belastungsfunktion kann mit den Tabellenwerten entsprechend der folgenden Beziehung angenommen werden, wobei hier von einer Harmonischen zur Abbildung der dynamischen Lastkomponente ausgegangen werden kann:

$$F(t) = Q \cdot \left( 1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot t + \varphi_n) \right)$$

## 2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann der Lastfall rhythmisches Hüpfen wie folgt charakterisiert werden:

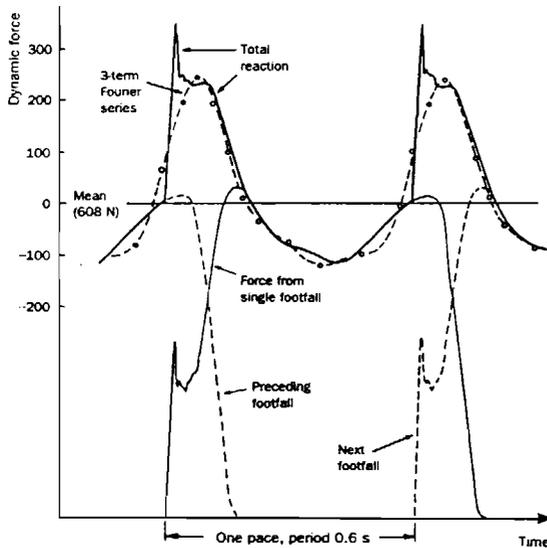
- a) Maßgebend für Gebäude mit entsprechender Nutzungsart (Sporthallen, Tanzhallen, Mehrzweckhallen etc.)
- b) Stationäre Belastung, zyklischer Verlauf
- c) i.a. Belastung durch eine Personengruppe

## 3 Belastung durch Gehen

### 3.1 Allgemeines

Gehen ist im allgemeinen als maßgebend für die Feststellung des dynamischen Verhaltens und der dynamischen Gebrauchsfähigkeit von Bürodecken anzusehen. Die Laufbelastung, die ebenfalls möglich ist, kann hier als eine Ausnahmelastung, die nicht toleriert werden muß, betrachtet werden.

Abb. 5 zeigt den gemessenen Kraft-Zeitverlauf eines Gehvorgangs.



**Abb. 5:** Gemessene Gehbelastung

Die Gehbelastung läßt sich u.a. durch die folgenden Merkmale charakterisieren:

- a) maßgebend für Bürodecken
- b) zyklische Belastung mit kontinuierlichem Bodenkontakt
- c) nichtstationäre Belastungsart

Die Ansätze zur mathematischen Beschreibung der Gehbelastung in Form einer zyklischen Funktion mit mehreren harmonischen Komponenten sind unter anderen in /1/ /2/ /3/ /28/ beschrieben. Alle Ansätze stimmen darin überein, daß die Geh-Belastungsfunktion mit guter Genauigkeit durch die Berücksichtigung von drei harmonischen Teilfunktionen abgebildet werden kann. Diese Funktion läßt sich daher für alle Vorschläge wie folgt ausdrücken:

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \sin(2\pi f_s t) + \Delta G_2 \cdot \sin(4\pi f_s t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \sin(6\pi f_s t - \varphi_3)$$

mit

- |              |  |
|--------------|--|
| $G$          | Personengewicht  |
| $\Delta G_1$ | Amplitude der 1. Harmonischen  |
| $\Delta G_2$ | Amplitude der 2. Harmonischen  |
| $\Delta G_3$ | Amplitude der 3. Harmonischen  |
| $f_s$        | Schrittfrequenz  |
| $\varphi_2$  | Phasenverschiebung der 2. Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen |
| $\varphi_3$  | Phasenverschiebung der 3. Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen |

### 3.2 Vorschläge von Bachmann/Amann /1/ zur Abbildung der Gehfunktion

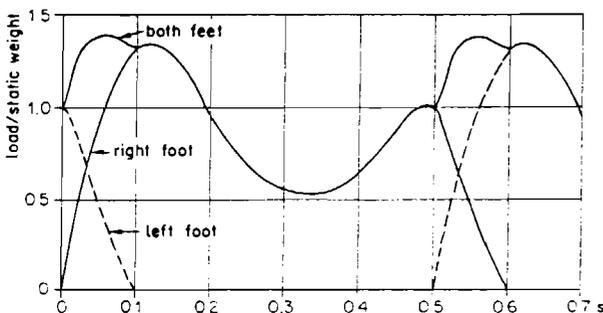
Die Belastung durch gehende Personen wird in /1/ hinsichtlich der Schrittfrequenz wie folgt beschrieben:

- a) mittlere Schrittfrequenz: 2,0 Hz
- b) üblicher Frequenzbereich: 1,5 - 2,5 Hz
- c) Gehgeschwindigkeit: 1,1 - 2,2 m/s

Die einzelnen Faktoren zur Abbildung der Gehbelastung durch drei harmonische Funktionen werden wie folgt vorgeschlagen:

- a) erste harmonische Komponente
  - $\Delta G_1 = 0,4 \cdot G$  für  $f_s = 2,0$  Hz
  - $\Delta G_1 = 0,5 \cdot G$  für  $f_s = 2,4$  Hz
- b) zweite und dritte harmonische Komponente
  - $\Delta G_2 = \Delta G_3 = 0,1 \cdot G$
  - $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$

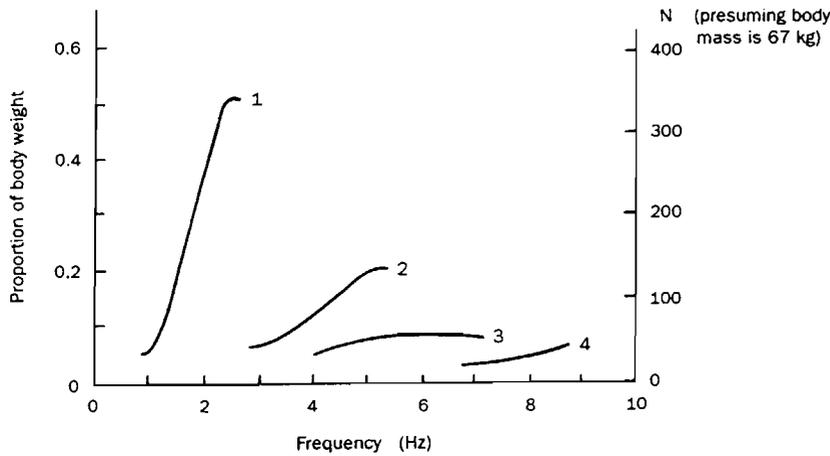
Die mit diesen Koeffizienten angesetzte Gehbelastungsfunktion ist in Abb. 6 dargestellt



**Abb. 6:** Gehbelastungsfunktion mit Koeffizienten nach /1/

### 3.3 Vorschläge von Wyatt /2/ zur Abbildung der Gehfunktion

Wyatt gibt in seiner Empfehlung /2/ Vorschläge an, die auf die Arbeit von Ohlsson und Rainer, Pernica und Allen zurückgehen. Hiernach variieren die Fourierkoeffizienten der einzelnen harmonischen Teilfunktionen in Abhängigkeit von der Gehfrequenz (Abb. 7).



**Abb. 7:** Fourierkoeffizienten der Gehfunktion in Abhängigkeit von der Gehfrequenz

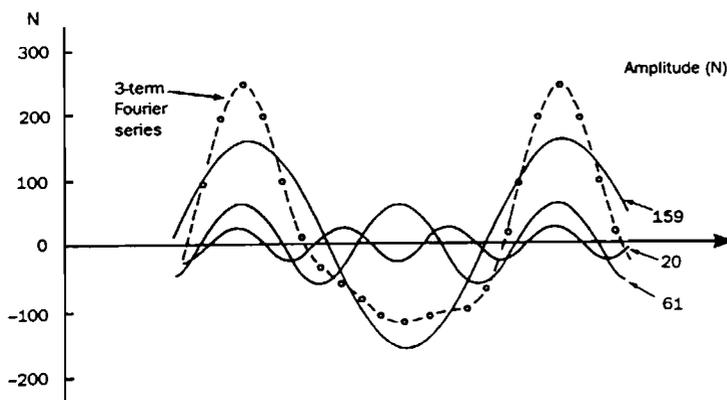
Für die Gehfrequenz von 2 Hz ergibt sich mit den Ansätzen der in Abb. 8 dargestellte Last-Zeitverlauf der Gehfunktion. Die Fourierkoeffizienten und Phasenwinkel der Lastfunktion sind wie folgt:

a)

$$\Delta G_1 = 0,333 \cdot G$$

$$\Delta G_2 = 0,133 \cdot G \quad \varphi_2 = -\pi/2$$

$$\Delta G_3 = 0,067 \cdot G \quad \varphi_3 = -\pi$$



**Abb. 8:** Gehbelastungsfunktion mit den in /2/ vorgeschlagenen Koeffizienten

### 3.4 Vorschläge in ISO 10137 /28/ zur Abbildung von Geh- und Laufbelastungen

Annex A zur ISO 10137 gibt ebenfalls Vorschläge an, wie die Belastung durch Gehen und Laufen mathematisch abgebildet werden kann. Hier wird ebenfalls vorgeschlagen die Belastungsfunktionen durch drei harmonische Komponenten zu modellieren (vgl. Seite 7). Die nachfolgende Tabelle beinhaltet die Fourierkoeffizienten der einzelnen Harmonischen sowie die zugehörigen üblichen Frequenzbereiche.

<i>Lastfall</i>	<i>Nr. d. Harmonischen</i> <i>n</i>	<i>Übliche Frequenz</i> <i>der Belastung</i> <i>Hz</i>	<i>Fourierkoeffizient für</i> <i>vertikale Kongruente</i> $\alpha_n$
<i>Gehen</i>	1	1,7 - 2,3	0,4
	2	3,4 - 4,6	0,2
	3	5,1 - 6,9	0,06
<i>Laufen</i>	1	2,5 - 3,3	1,4
	2	5,0 - 6,6	0,4
	3	7,5 - 9,9	0,1

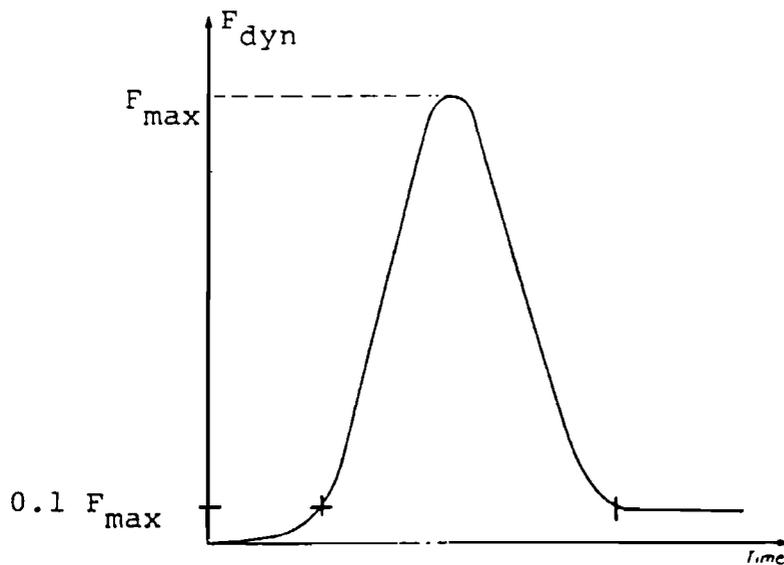
### 3.5 Vorschläge für Gehbelastung nach Allen/Murray /3/

Das "Design Criterion for Walking Vibrations" beinhaltet ebenfalls Vorschläge für die Erfassung der Gehbelastungsfunktion. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Quellen, werden hier vier Harmonische für die mathematische Abbildung der Belastung vorgeschlagen. Die Frequenzbereiche und die Fourierkomponenten (Dynamic Factors) sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

<i>Nr. der Harmonischen i</i>	<i>Frequenzbereich (Hz)</i>	<i>Dynamischer Lastfaktor <math>\alpha_i</math></i>
1	1,6 - 2,2	0,5
2	3,2 - 4,4	0,2
3	4,8 - 6,6	0,1
4	6,4 - 8,8	0,05

## 4 Impulsartige Belastungen

Impulsartige Belastungen verursachen kurzzeitige dynamische Belastungsspitzen, die durch den in Abb. 9 dargestellten Kraft-Zeitverlauf näherungsweise abgebildet werden können /28/.



**Abb. 9:** Beispiel für eine Kraft-Zeitfunktion einer Impulsartigen Belastung

ISO 10137 gibt in Anhang A die zu den verschiedenen Ursachen zugehörigen dynamischen Faktoren sowie die anzusetzende Dauer der Belastung an. Diese Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt.

	Belastung	Mittelwert für	Belastungsdauer
		$F_{\text{max}}/Q$	$t_d$ [sec]
1.	Fersenabsenkung	5	0,04
2.	Springen aus einer Höhe von		
	20 cm	10	0,03
	40 cm	11	0,04
	60 cm	13	0,04
	80 cm	16	0,05
3.	Treppensteigen		
	1 Stufe aufwärts	1,4	0,40
	1 Stufe abwärts	2,0	0,30
	2 Stufe abwärts	3,9	0,05
	3 Stufe abwärts	5,0	0,05
4.	Treppen herunterlaufen	2,7	0,20

## **5 Zusammenfassung**

Wie aus der Zusammenstellung der verfügbaren Quellen zu ersehen ist, gibt es eine Reihe von Vorschlägen zur mathematischen Erfassung der menschenverursachten dynamischen Belastungen.

Die Belastung durch rhythmisches Hüpfen kann durch den Ansatz der Halbsinusfunktion mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden.

Die vorhandenen Vorschläge für die Beschreibung der Gehbelastung basieren auf dem Ansatz von mehreren Harmonischen und geben mehr oder weniger ähnliche Werte für die üblichen Frequenzbereiche und die zugehörigen Fourierkoeffizienten an. Diese bereits vorhandenen Vorschläge bilden eine geeignete Basis für einen einheitlichen Vorschlag im Rahmen der Eurocodes.

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschoßbau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Az: IV 1-5-700/93**

## **ANLAGE B**

**Zusammenstellung der Bewertungs- und Beurteilungskriterien  
für die Gebrauchsfähigkeit hinsichtlich Schwingungen**

## Anlage B - Inhaltsverzeichnis

1	Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit durch die Vorgabe von Mindeststeifigkeiten .....	1
1.1	Allgemeines .....	1
1.2	Eurocode 3 /23/, .....	1
2	Bewertungs- und Beurteilungskriterien anhand von Bewegungsgrößen und Frequenzen .....	3
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Beschränkung der maximalen Beschleunigungswerte ohne Mitberücksichtigung der Frequenzen .....	4
2.3	ISO 2631 .....	5
2.4	DIN 4150 Teil 2 .....	6
2.4.1	DIN 4150 Teil 2 - 1975 .....	6
2.4.2	DIN 4150 Teil 2 - 1990 (Entwurf) und 1992 .....	10
2.5.1	Bewertung der Schwingungseinwirkungen .....	14
2.5.2	Beurteilung der Schwingungseinwirkungen .....	17
2.6	British Standard 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibrations in buildings .....	18
3	Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit mittels Ingenieurvorberechnungen .....	21
3.1	Allgemeines .....	21
3.2	T.A. Wyatt: Design Guide on the Vibration of Floors .....	21
3.3	ASCE-Publikation "Design Criterion for Walking Vibrations" von D.E. Allen und T.M. Murray .....	23

# 1 Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit durch die Vorgabe von Mindeststeifigkeiten

## 1.1 Allgemeines

Einige der Normen und Empfehlungen schlagen eine Begrenzung der Schwingungsanfälligkeit indem Sie eine einzuhaltende Mindeststeifigkeit der Deckenkonstruktionen vorgeben. Die Vorgabe kann in Form einer maximalen Durchbiegung unter ständigen Lasten oder in Form einer einzuhaltenden Mindesteigenfrequenz erfolgen. Damit wird die Absicht verfolgt die Eigenfrequenzen der Konstruktionen in Abhängigkeit von der Nutzungsart soweit anzuheben, daß eine Resonanz der für diese Nutzung kritischen Belastung mit der Deckeneigenfrequenz weitgehend vermieden werden kann.

Für den Zusammenhang zwischen der Deckendurchbiegung  $y_0$  [mm] und der Deckeneigenfrequenz  $f_0$  [Hz] besteht die folgende Näherungsbeziehung:

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{y_0}}$$

## 1.2 Eurocode 3 /23/, CTICM /22/, NBN B 03-003 /25/

Eurocode 3 /23/ schlägt zwei Begrenzungskriterien für die Mindeststeifigkeit der Deckenkonstruktionen, wobei unterschieden wird ob es sich um eine "gewöhnliche" Hochbaudecke oder eine durch rhythmische, koordinierte Übungen belastete Deckenkonstruktion handelt:

- (1) *Die periodischen Schwingungen und Schwingungen von Tragwerken, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, müssen so begrenzt sein, daß ein spürbares Unbehagen der Nutzer ausgeschlossen wird.*
- (2) *Für Decken, die regelmäßig von Menschen begangen werden, wie z.B. Decken von Wohnungen, Büros und ähnliche, sollte die untere Eigenfrequenz nicht kleiner als 3 Hz sein. Diese Bedingung gilt bei gleichzeitig eingehaltener Gesamtverformung  $\delta_1 + \delta_2$  (wie in 4.2.2 angegeben, jedoch unter Verwendung der häufigsten Kombinationen berechnet) unter 28 mm als erfüllt. Diese Grenzwerte dürfen bei Nachweis höherer Dämpfungswerte überschritten werden.*
- (3) *Wird auf einer Decke rhythmisch gesprungen oder getanzt, wie z.B. auf Decken von Turnhallen oder Tanzsälen, sollte die untere Eigenfrequenz nicht kleiner als 5 Hz sein.*

*Diese Bedingung gilt bei gleichzeitig eingehaltener Gesamtverformung  $\delta_1 + \delta_2$  (wie unter 4.2.2 angegeben, jedoch unter Verwendung der häufigsten Kombination berechnet) unter 10 mm als erfüllt.*

- (4) *Wenn erforderlich, sollte mit einer Schwingungsberechnung nachgewiesen werden, daß die Beschleunigung und der Schwingungsbereich kein deutliches Unbehagen für die Nutzer oder Beschädigung der Einrichtung hervorrufen können.*

Bei  $\delta_1$  handelt es sich um die Durchbiegung infolge Eigengewicht, bei  $\delta_2$  um die Durchbiegung infolge der häufigsten Kombination aus Verkehrslasten.

Das CTICM-Dokument und die Norme Belge B 03-003 schlagen gleiche Grenzwerte zur Vermeidung von Schwingungsanfälligkeit und damit verbundener Beeinträchtigungen der Gebrauchsfähigkeit.

### 1.3 SIA 160 /24/, Bachmann/Amann /1/, CEB Bulletin /4/

SIA 160 (Einwirkungen auf Bauwerke) schlägt, in Abhängigkeit von der Nutzung, folgende einzuhaltende Grenzwerte für die Mindesteigenfrequenzen vor:

**Tabelle 1:** Mindestfrequenzen nach SIA 160

<i>Bauwerk</i>	<i>Frequenz [Hz]</i>
<i>Turn- und Sporthallen</i>	<i>&gt; 8.0</i>
<i>Tanzlokale und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung</i>	<i>&gt; 7.0</i>
<i>Konzertsäle mit fester Bestuhlung</i>	<i>&gt; 3.4</i>
<i>Bauwerke für Fußgänger</i>	<i>*)</i>

- \*) *Bei Bauwerken für Fußgänger und Radfahrer sind Eigenfrequenzen zwischen 1.6 und 2.4 Hz sowie zwischen 3.5 und 4.5 Hz zu vermeiden. Läufer können auch bei Bauwerken mit Eigenfrequenzen zwischen 2.4 und 3.5 Hz Schwingungen anregen.*

**Bachmann/Amann** schlagen für Bauwerke, in denen rhythmische Übungen oder Tanzveranstaltungen stattfinden können, folgende Grenzwerte für Mindesteigenfrequenzen vor:

**Tabelle 2:** Mindestfrequenzen nach Bachmann/Amann /1/

	<i>Sportveranstaltung</i>	<i>Tanzveranstaltung</i>
<i>Stahlbetonkonstruktion</i>	$f_1 > 7,5 \text{ Hz}$	$f_1 > 6,5 \text{ Hz}$
<i>Spannbetonkonstruktion</i>	$f_1 > 8,0 \text{ Hz}$	$f_1 > 7,0 \text{ Hz}$
<i>Verbundkonstruktion</i>	$f_1 > 8,5 \text{ Hz}$	$f_1 > 7,5 \text{ Hz}$
<i>Stahlkonstruktion</i>	$f_1 > 9,0 \text{ Hz}$	$f_1 > 8,0 \text{ Hz}$

Diese Vorschläge sind identisch mit den Vorschlägen im CEB-Bulletin /4/, die ebenfalls von Bachmann vorgeschlagen wurden.

## 1.4 Zusammenfassung

Ein Vergleich der unter 1.2 und 1.3 aufgeführten Werte zeigt, daß zwischen den beiden "Gruppen", die eine Mindesteigenfrequenz zur Sicherung der Gebrauchsfähigkeit hinsichtlich menscheninduzierter Schwingungen vorschlagen, deutliche Unterschiede bestehen. Angesichts der gemessenen Belastungsfrequenzen bei rhythmischen, koordinierten Übungen oder Tänzen, die bis ca. 3 Hz reichen können, erscheint die vorgeschlagene Mindesteigenfrequenz von 5 Hz als alleiniges Kriterium als zu gering. Hier besteht noch Harmonisierungsbedarf.

## 2 Bewertungs- und Beurteilungskriterien anhand von Bewegungsgrößen und Frequenzen

### 2.1 Allgemeines

Zahlreiche Normen und Richtlinien schlagen vor die Auswirkung von Schwingungen auf Menschen in Abhängigkeit von den Bewegungsgrößen (i.a. Beschleunigung) und den zugehörigen Frequenzen zu bewerten und anschließend hinsichtlich ihrer Akzeptanz zu beurteilen. Die Bewertung erfolgt in der Regel mit Hilfe von s.g. Bewertungsdiagrammen, in denen über den Schwingungsfrequenzen die Beschleunigungswerte aufgetragen sind, die zu gleicher Bewertung führen (Kurven gleicher Wahrnehmbarkeit). Die anschließende Beurteilung der gefundenen Bewertungsergebnisse kann in Abhängigkeit von der Bauwerksnutzung und der Tätigkeit der betroffenen Personen durchgeführt werden.

Die Eingangswerte der Beschleunigung können, je nach Norm, die Maximalwerte, die Mittelwerte einer bestimmten Zeitspanne (RMS-Werte) oder die RMS-Werte bestimmter Frequenzbänder

sein. Für die Ermittlung der RMS-Werte (auch Effektivwerte genannt) gilt:

a) bei Periodischen Schwingungen 
$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt}$$

b) bei statistisch stationären Schwingungen 
$$a_{eff} = \sqrt{\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} q^2(t) dt}$$

## 2.2 Beschränkung der maximalen Beschleunigungswerte ohne Mitberücksichtigung der Frequenzen

Die Eigenfrequenzen der meisten Deckenkonstruktionen bewegen sich im Bereich zwischen 4 und 8 Hz, für den in den meisten Richtlinien die Wahrnehmbarkeit bei gleichen Beschleunigungswerten als konstant angenommen wird. Es liegt daher nahe, daß es für solche Konstruktionen ausreichend ist alleine die Beschleunigungswerte, ohne eine zusätzliche Betrachtung der Frequenzinhalte, als Basis für die Bewertung und Beurteilung der Schwingungen zu benutzen. Solch ein Vorschlag wurde in /1/ gemacht, in dem, in Abhängigkeit von der Nutzung und der Tätigkeit der betroffenen Personen, Grenzwerte für Maximalwerte der Beschleunigung zusammengestellt wurden:

**Tabelle 3:** Maximalwerte der Beschleunigungen /1/

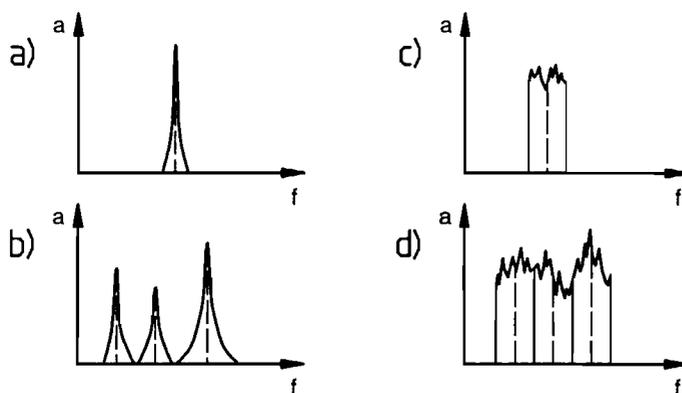
<i>Bauwerkstyp</i>	<i>Akzeptanzgrenze</i>
<i>Fußgängerbrücken</i>	$a \leq 5 \div 10\% g$
<i>Bürogebäude</i>	$a \leq 2\% g$
<i>Sporthallen</i>	$a \leq 5 \div 10\% g$
<i>Tanz- und Konzerthallen</i>	$a \leq 5 \div 10\% g$
<i>Produktionsstätten</i>	$v \leq \sim 10 \text{ mm/s}$

Diese Werte sind in erster Linie dafür gedacht, eine schnelle und wenig aufwendige Beurteilung von gemessenen oder vorausgerechneten Schwingungswerten, insbesondere wenn keine genauen Angaben über den Zeitverlauf und den Frequenzinhalt vorhanden sind, durchzuführen.

## 2.3 ISO 2631

Die ISO-Norm 2631 schlägt die Verwendung der RMS-Werte der Beschleunigung für die Bestimmung der Einwirkung auf den Menschen. Es wird zwischen Beschleunigungen in z-Richtung (Fuß-Kopf-Achse) und Querschleunigungen (x- und y-Richtung) unterschieden; entsprechend der Beschleunigungsrichtung werden die zugehörigen Frequenzbereiche unterschiedlich gewichtet.

Zur Ermittlung der maßgebenden Frequenzen werden in Abhängigkeit von dem Frequenzinhalt folgende Vorgehensweisen vorgeschlagen (vergl. Abb. 1):



**Abb. 1:** Verschiedene Typen des Frequenzspektrums

- a) **Diskrete (einzelne) Frequenz**  
Hier werden die einzelne Frequenz und der zugehörige RMS-Wert (bei reinen Sinusschwingungen gilt  $a_{r.m.s.} = a_{max}/\sqrt{2}$ ) als Eingangswerte für das Bewertungsdiagramm benutzt.
- b) **Mehrere diskrete Einzelfrequenzen**  
Hier sollten für jede diskrete Frequenz die RMS-Werte getrennt ermittelt werden, die Frequenzen und die Beschleunigungswerte werden mittels des Diagramms getrennt bewertet.
- c) **Schwingungen innerhalb eines Terzbandes ("Schmalband-Schwingung")**  
In diesem Fall sollen die RMS-Werte des Gesamten Frequenzbandes mit dem zugehörigen Mittelwert der Frequenz als Eingangswerte für die Bewertung mittels des Diagramms dienen.

## d) Breitbandschwingung

Sind die Frequenzen über mehr als ein Terzband verteilt, dann sollen die RMS-Werte der einzelnen Terzbänder ermittelt und mit den zugehörigen Mittelwerten der Frequenzen für die Anwendung des Bewertungsdiagramms einzeln verwendet werden.

Das Bewertungsdiagramm (siehe Abb. 2) zeigt Kurven, bei denen gleiche Einwirkungsdauer in Abhängigkeit von der Frequenz und dem RMS-Wert der Beschleunigung hingenommen werden kann. Je nach zugrundegelegten Anforderungen kann der Kurvenverlauf um 6 dB nach unten ("exposure limits") oder um 10 dB nach oben ("reduced comfort boundary") verschoben werden. Das entspricht einer Multiplikation der Beschleunigungswerte mit dem Wert 2 bzw. einer Division durch den Wert 3,15.

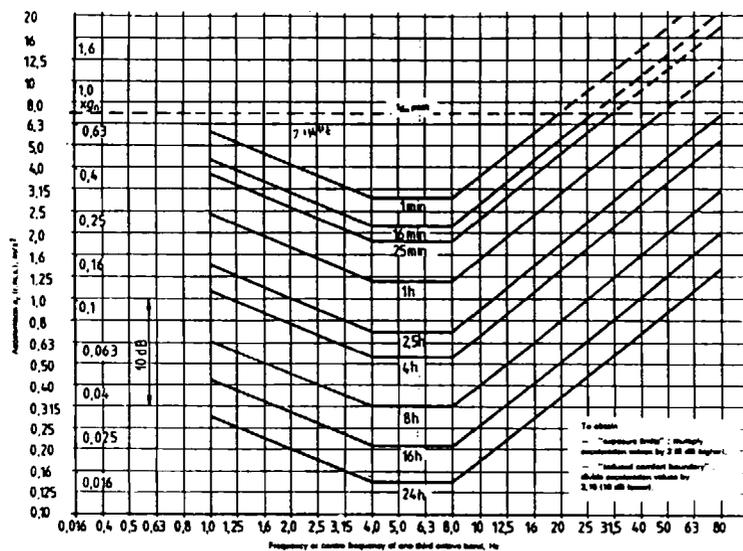


Abb. 2: Bewertungskurven nach ISO 2631

## 2.4 DIN 4150 Teil 2

Die DIN 4150 - Teil 2 "Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden" existiert in einer Fassung von 1975 (Vornorm) und 1992, der ein Normenentwurf (1990) vorausgegangen war.

Der Vollständigkeit halber und zum besseren Verständnis werden hier die alte und die neue Fassung der Norm betrachtet.

### 2.4.1 DIN 4150 Teil 2 - 1975

Diese Norm enthält Angaben für die Beurteilung von Erschütterungen im Frequenzbereich von 1 bis 80 Hz, die in Gebäuden auf Menschen übertragen werden. Die Grundlage für die Beurteilung der Schwingungen, im Hinblick auf ihre Einwirkungen auf Menschen, bildet die bauwerksbezogene Wahrnehmungsstärke KB. Als Eingangswerte für die KB-Ermittlung können

- Schwingweg
- Schwinggeschwindigkeit
- Schwingbeschleunigung

jeweils als Scheitel- oder Effektivwert verwendet werden.

Die Ermittlung der KB-Werte erfolgt nach den folgenden Beziehungen:

$$KB = a \frac{\alpha}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}}$$

$$KB = v \frac{\beta \cdot f}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}}$$

$$KB = w \frac{\gamma \cdot f^2}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}}$$

- mit
- $a$  = Schwingbeschleunigung in  $m/s^2$
  - $v$  = Schwinggeschwindigkeit in  $mm/s$
  - $w$  = Schwingweg in  $mm$
  - $f$  = Schwingfrequenz in  $Hz$
  - $f_0$  = 5.6 Hz (Bezugsfrequenz)

Bei der Anwendung dieser Norm muß beachtet werden, daß die Ermittlungen der KB-Werte, die mit den Scheitel- und Effektivwerten ermittelt werden, nur bei rein sinusförmiger Schwingung zu gleichen Ergebnissen führen. Bei beliebigen periodischen und nichtperiodischen Schwingungen empfiehlt die DIN ausdrücklich die Verwendung von Scheitelwerten für die Ermittlung der KB-Werte.

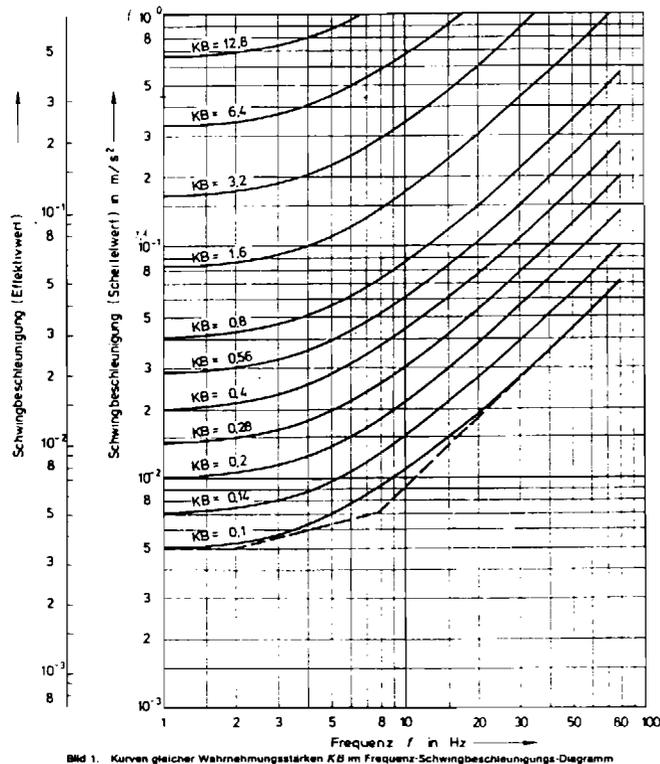


Bild 1. Kurven gleicher Wahrnehmungsstärken KB im Frequenz-Schwingbeschleunigungs-Diagramm

**Abb. 3:** Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen bzw. vergleichbaren Räumen – nach DIN 4150 (1975) /31/

Beim Vergleich der in der DIN 4150 dargestellten Diagramme (siehe Abb. 3) mit Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke fällt beim Vergleich mit anderen Normen (ISO, VDI, BS) auf, daß die Form der Kurven (in Abhängigkeit von der Erschütterungsfrequenz) von den Formen anderer Vorschriften deutlich abweicht. Die Erklärung hierfür ist im *Anhang A* zur DIN 4150 zu finden:

*Im Internationalen Standard ISO 2631 (...) sind Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke definiert, und zwar eine Kurve für die in Richtung der Wirbelsäule des Menschen einwirkenden Erschütterungen und eine weitere für Erschütterungen, die quer zur Wirbelsäule einwirken. Diese Kurven gelten insbesondere für Menschen in stehender und sitzender, auch angelehnter Haltung. Beim Aufenthalt von Menschen in Gebäuden können verschiedene Haltungen angenommen werden, wie Stehen, Liegen oder Sitzen, und die Erschütterungen sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung (bezogen auf die Achsen des Gebäudes) einwirken. Um die Beurteilung der Belästigung der Menschen durch Erschütterungen in dieser Umgebungssituation zu vereinfachen – indem Sie von der Einwirkungsrichtung unabhängig gemacht sind – ist der Verlauf der Bewertungskurve in Form nur eines Polygonzuges definiert. Dieser Polygonzug steht in folgendem Zusammenhang zu den in dem genannten ISO-Standard angegebenen Kurven:*

1. *Im Frequenzbereich oberhalb von 8 Hz ist er proportional zur Schwingungsgeschwindigkeit und entspricht damit dem für die z-Richtung (längs der Wirbelsäule) angegebenen Verlauf.*
2. *Im Frequenzbereich von 1 bis 2 Hz stimmt sein Verlauf mit der in dem genannten ISO-Standard definierten Kurve für die x- und y-Richtung (quer zur Wirbelsäule) überein; er ist*

proportional zur Schwingungsbeschleunigung. Bei einer Frequenz von 1 Hz ist der Mensch für Erschütterungen, die quer zur Wirbelsäule (...) Einwirken, empfindlicher, als für die in z-Richtung (...) einwirkenden Erschütterungen. Bei 1 Hz beträgt der Faktor der Schwingbeschleunigungsamplituden nach ISO  $a_x/a_z$  oder  $a_y/a_z = 0,356$ .

3. Im Frequenzbereich von 2 bis 8 Hz sind die Endpunkte der unter 1. Und 2. genannten Kurvenabschnitte geradlinig verbunden.

Die in dieser Norm definierten Bewertungskurven erfassen damit in den drei Frequenzbereichen zwischen 1 und 80 Hz die "empfindlichste" Wahrnehmung bezüglich der Einwirkungen.

Aufgrund der o.g. Abweichungen von der ISO 2631 und aufgrund der Verwendung von Scheitelwerten, ist zu erwarten, daß die Beurteilung der (vertikalen) Deckenschwingungen nach der DIN deutlich ungünstiger ausfallen wird als die Beurteilung nach der ISO oder VDI Richtlinie. Aus der Tatsache heraus, daß die niedrigeren Frequenzen (1-8 Hz) auf die Empfindsamkeit des Menschen auf horizontale Schwingungen hin ausgelegt sind, kann die DIN-Norm nicht ohne Einschränkung auf Deckenschwingungen angewendet werden.

Die Beurteilung der Einwirkung der Schwingungen auf den Menschen erfolgt mit den ermittelten KB-Werten nach der folgenden Tabelle:

**Tabelle 4:** Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbaren Räumen nach DIN 4150 Teil 2 (1975)

	1	2	3	4
	Baugebiet <sup>1)</sup>	Zeit	KB-Anhaltswerte	
			dauernd und mit Unterbrechungen wiederholt auftretende Erschütterungen	selten auftretende Erschütterungen
1	Reines Wohngebiet (WR)	tags	0,2 (0,15) <sup>2)</sup>	4
	Allgemeines Wohngebiet (WA) Wochenendhausgebiet (SW) Kleinsiedlungsgebiet (WS)	nachts	0,15 (0,1) <sup>2)</sup>	0,15
2	Dorfgebiet (MD)	tags	0,3 (0,2) <sup>2)</sup>	8
	Mischgebiet (MI) Kerngebiet (MK)	nachts	0,2	0,2
3	Gewerbegebiet (GE) (gilt auch für Büroräume)	tags	0,4	12
		nachts	0,3	0,3
4	Industriegebiet (GI)	tags	0,6	12
		nachts	0,4	0,4
5	Sondergebiet nach Nutzungsart und Wohnungsanteil (SO)	tags	0,1 bis 0,6	4 bis 12
		nachts	0,1 bis 0,4	0,15 bis 0,4

<sup>1)</sup> Die Baugebiete entsprechen der Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO –) vom 26.11.1968 (BGBl. I S. 1237 und 1969 S. 11). Weicht die tatsächliche bauliche Nutzung im Einwirkungsbereich der Anlage erheblich von der im Bebauungsplan festgesetzten baulichen Nutzung ab, so ist von der tatsächlichen baulichen Nutzung unter Berücksichtigung der vorgesehenen baulichen Entwicklung des Gebietes auszugehen.

<sup>2)</sup> Das Einhalten der in Klammern angegebenen Werte ist insbesondere bei horizontalen Erschütterungen von Gebäuden bei Frequenzen unterhalb von etwa 5 Hz anzustreben.

## 2.4.2 DIN 4150 Teil 2 - 1990 (Entwurf) und 1992

Der Anwendungsbereich dieser Norm entspricht der DIN-Norm von 1975. Gegenüber der Vornorm wurden u.a. folgende Änderungen vorgenommen:

(...)

- b) *Zur Beurteilung der Wirkung von Erschütterungen werden für die verschiedenen Gebietsarten und für tags und nachts jeweils 3 Anhaltswerte angegeben. Werden diese nach den jeweils genannten Beurteilungskriterien eingehalten, sind erhebliche Belästigungen im allgemeinen nicht zu erwarten.*
- c) *Als Beurteilungsgröße wird nicht mehr der Höchstwert des Schwinggeschwindigkeits-Zeitverlaufs und der daraus mit Hilfe der jeweils zugehörigen Frequenz ermittelte KB-Wert verwendet. Vielmehr wird aus den frequenz- und zeitbewerteten Erschütterungssignalen der  $KB_{F_{max}}$ -Wert und gegebenenfalls aus den in Takten von je 30 Sekunden Dauer ermittelten  $KB_{FTT}$ -Werten die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTT}$  zur Beurteilung verwendet.*
- d) *Die Verfahren zur Beurteilung der Erschütterungssimulationen werden untergliedert für*
  - *dauernd und wiederholt auftretende Erschütterungen*
  - *selten auftretende kurzzeitige Erschütterungen*
  - *Erschütterungen bei Baumaßnahmen*
  - *Erschütterungen durch Straßen- und Schienenverkehr*

Die Verweise auf die DIN 45669 (Messung von Schwingungssimulationen) zeigen, daß die neue Fassung der DIN 4150 ist vor allem auf die Auswertung von Meßergebnissen hin ausgelegt ist. Aus der Schwingungsgröße wird eine bauwerksbezogene Bewertete Schwingstärke  $KB_F$  gewonnen. Für den Beurteilungszeitraum wird die maximale Bewertete Schwingstärke  $KB_{F_{max}}$  und, falls erforderlich, die Beurteilungsgröße  $KB_{FTT}$  bestimmt. Diese Werte können anschließend mit den vorgeschlagenen Grenzwerten verglichen werden.

Die Eingangsgröße (Unbewertetes Schwingensignal) ist das der Schwingschnelle proportionale Signal. Dieses Signal wird durch den Amplitudenfrequenzgang geteilt, das Ergebnis ist das Frequenzbewertete Erschütterungssignal  $KB(t)$ . Die Gleichung für den Frequenzgang lautet:

$$|H_{KB}(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}}$$

mit:  $f_0$      5,6 Hz (Grenzfrequenzgang des Hochpasses)  
 $f$          Frequenz in Hz

Mit Hilfe des Frequenzbewerteten Erschütterungssignals können die Zeitbewerteten Erschütterungssignale ermittelt werden:

- Bewertete Schwingstärke

$$KB_{\tau}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi=1}^t e^{-\xi/\tau} KB^2(t-\xi) d\xi}$$

Ist die Zeitkonstante  $\tau = 125$  ms, dann wird für die Bewertete Schwingstärke das Zeichen  $KB_{\tau}(t)$  verwendet

- Maximale Bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$   
 $KB_{Fmax}$  ist der höchste Wert von  $KB_{\tau}(t)$ , der während der Einwirkung auftritt

- Taktmaximalwert  $KB_{FTi}$   
Der innerhalb einer Taktrate von 30 s erreichte Maximalewert von  $KB_{\tau}(t)$

- Taktmaximale-Effektivwert  $KB_{FTm}$

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2}$$

mit  $N$  Anzahl der Takte

- Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{FTr}$   
Der Wert  $KB_{FTr}$  ist der Taktmaximal-Effektivwert über die Beurteilungszeit unter Berücksichtigung eines Gewichtungsfaktors für Einwirkungen, die in Ruhezeiten fallen. Die Werte werden getrennt für die vertikale und die beiden horizontalen Richtungskomponenten ermittelt. Der größte Wert ist die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTr}$ .

Für Einwirkungen außerhalb von Ruhezeiten gilt:

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{T_{e1}}{T_r} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_{e1}}{T_r}}$$

mit  $T_r$  Beurteilungszeit  
 $T_{e1}$  Einwirkungszeit außerhalb von Ruhezeiten

Für Einwirkungen auch während der Ruhezeiten gilt:

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{T_r} (T_{e1} \cdot KB_{FTm1}^2 + 2T_{e2} \cdot KB_{FTm2}^2)}$$

mit  $T_r$  Beurteilungszeit  
 $T_{e1}$  Einwirkungszeit außerhalb von Ruhezeiten  
 $T_{e2}$  Einwirkungszeit während der Ruhezeiten

$K_{BFTm1}$  Taktmaximal-Effektivwert außerhalb der Ruhezeiten

$K_{BFTm2}$  Taktmaximal-Effektivwert während der Ruhezeiten

Die Beurteilung der Erschütterungsimmissionen für dauernd und wiederholt auftretende Einwirkungen wird mit dem größten der für die drei Richtungen (x, y, z) ermittelten Werte  $KB_{Fmax}$  und, wenn notwendig mit  $KB_{Tr}$ , durch einen Vergleich mit den in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Anhaltswerten  $A_u$  und  $A_o$  durchgeführt.

- Ist  $KB_{Fmax}$  kleiner oder gleich dem (unteren) Anhaltswert  $A_u$ , dann ist die Anforderung dieser Norm eingehalten.
- Ist  $KB_{Fmax}$  größer als der (obere) Anhaltswert  $A_o$ , dann ist die Anforderung nicht eingehalten.
- Ist  $KB_{Fmax}$  größer als  $A_u$  aber kleiner oder gleich  $A_o$ , gilt die Anforderung dieser Norm dann als eingehalten, wenn die Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{FT}$  nicht größer als  $A_r$  nach der folgenden Tabelle ist.

**Tabelle 5:** Anhaltswerte A für die Beurteilung von Erschütterungen in Wohnungen und vergleichbaren Räumen nach DIN 4150 Teil 2 - 1992

Zeile	Einwirkungsort	tags			nachts		
		$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonal untergebracht sind (Industriegebiete).	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (Gewerbegebiete)	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (Kerngebiete, Mischgebiete, Dorfgebiete)	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (reine Wohngebiete, allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete)	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte (Krankenhäuser, Kurkliniken), soweit Sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

### Näherungsverfahren zur Ermittlung der Beurteilungsgrößen

Zusätzlich zu dem Normalverfahren sieht die DIN 4150 ebenfalls eine näherungsweise Bestimmung der Beurteilungsgrößen  $KB_{Fmax}$  und  $KB_{FT}$  vor, wenn der Zeitverlauf des Signals  $v(t)$  vorliegt. Hierfür wird der Höchstwert des  $v(t)$ -Signals der Aufzeichnung und ein zugehöriger

Schätzwert der Frequenz ermittelt. Hiermit läßt sich das  $KB$ -bewertete Signal und anschließend der Schätzwert des Effektivwerts  $KB_{Fmax}^*$  mit  $c_F$  nach der nachfolgenden Tabelle wie folgt ermitteln:

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v_{\max}}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}}$$

$$KB_{Fmax}^* = KB \cdot c_F$$

**Tabelle 6:** Erfahrungswerte für die Konstanten  $c_F$  für verschiedene Arten von Erschütterungseinwirkungen nach DIN 4150 (1992)

Zeile	Kurzbeschreibung der Einwirkungsart	$c_F$
1	Harmonische Schwingungen mit geringen Verzerrungen (z.B. Sägewerke in großer Entfernung oder bei wesentlicher Resonanzbeteiligung)	0,9
2	Wie Zeile 1, jedoch stärker verzerrt – mehr als ca. 20 % Verzerrungen (z.B. Sägewerke in enger Nachbarschaft, wenn noch mehrere Oberschwingungen vorhanden sind)	0,8
3	Stochastische Schwingungen und periodische Vorgänge mit Schwebungen a) mit Resonanzbeteiligung (z.B. Webereien, Rammen, gemessen auf mitschwingenden Wohnungsfußböden)	0,8
	b) ohne Resonanzbeteiligung (z.B. auf nicht unterkellerten Wohnungsfußböden)	0,7
4	Einzelereignisse kurzer Dauer a) mit Resonanzbeteiligung	0,8
	b) ohne Resonanzbeteiligung	0,6

Der  $KB$ -Wert nach der vereinfachten Methode entspricht dem  $KB$ -Wert nach der Vornorm DIN 4150 (1975).

Falls die Bestimmung von  $KB_{FTr}^*$  erforderlich ist, muß eine ausreichend große Anzahl von Höchstwerten aus 30s-Takten ermittelt werden die ebenfalls näherungsweise bewertet werden können. Das weitere Vorgehen entspricht der normalen Vorgehensweise nach dieser DIN.

## 2.5 VDI 2057 - Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen

Die VDI-Richtlinie setzt sich aus drei Teilen zusammen:

### Blatt 1 – Grundlagen, Gliederung, Begriffe

Dieser Teil der VDI-Richtlinie definiert, analog zu ISO 2631, die Bezugskordinaten zur Festlegung und Beschreibung der Einwirkungsrichtungen auf den Menschen. Es werden hier außerdem die Begriffe der Bewerteten Schwingstärke, des Effektiv- und Maximalwertes etc. analog zur DIN 4150 (1992) erläutert.

### Blatt 2 – Bewertung

Dieser Teil der VDI-Richtlinie behandelt die Bewertung der Erschütterungseinwirkungen auf den Menschen in Abhängigkeit von seiner Körperhaltung. Hierauf wird nachfolgend näher eingegangen.

### Blatt 3 – Beurteilung

Hier wird die Beurteilung der Einwirkungen im Hinblick auf Komfort, Leistungsfähigkeit und Gesundheit hin erläutert. Hierauf wird nachfolgend näher eingegangen.

#### 2.5.1 Bewertung der Schwingungseinwirkungen

Die Bewertung der Schwingungseinwirkungen auf Menschen nach VDI-Richtlinie 2057 kann in Abhängigkeit von der Körperhaltung der betroffenen Person durchgeführt werden. Vorgesehen sind:

- *Bewertung der Einwirkung im Sitzen und Stehen*
- *Bewertung der Einwirkung im Liegen*
- *Bewertung der Einwirkung bei nicht vorgegebener Körperhaltung*
- *Bewertung der Einwirkung über das Hand-Arm-System*

Zusätzlich ist die Bewertung in Abhängigkeit von der Einwirkungsrichtung ( $x, y, z$ ) bezogen auf die betroffene Person durchzuführen.

Für die hier schwerpunktmäßig zugrundegelegten Fälle von Hallen- und Bürodecken ist die Bewertung der Schwingungseinwirkungen auf sitzende und stehende Personen zutreffend, während für Einwirkungen auf Menschen in Wohnungen eine Bewertung bei nicht vorgegebener Körperhaltung (wie DIN 4150) oder im Liegen erforderlich sein kann.

Die Frequenzbewertung wird durch die  $K$ -Wert-Bildung durchgeführt. Hierfür sieht die Richtlinie zwei Verfahren vor:

- *Frequenzbewertung des Gesamtsignals einschließlich Bandbegrenzung mit elektronischen Bewertungsfiltren und Normierung nach DIN 45669 Teil 1 und DIN 45671 Teil 1.*
- *Rechnerisches Ermitteln aus Terzspektren nach den in Abschnitt 3,4,5 und 6 dieser Richtlinie angegebenen spezifischen Formeln und ggf. Summierung entsprechend Anhang 2*

### **Bewertung der Einwirkung im Sitzen und Stehen**

Diese Bewertung gilt für folgende Einwirkungen:

- Schwingungseinleitung über das Gesäß im Sitzen
- Schwingungseinleitung über die Füße im Stehen

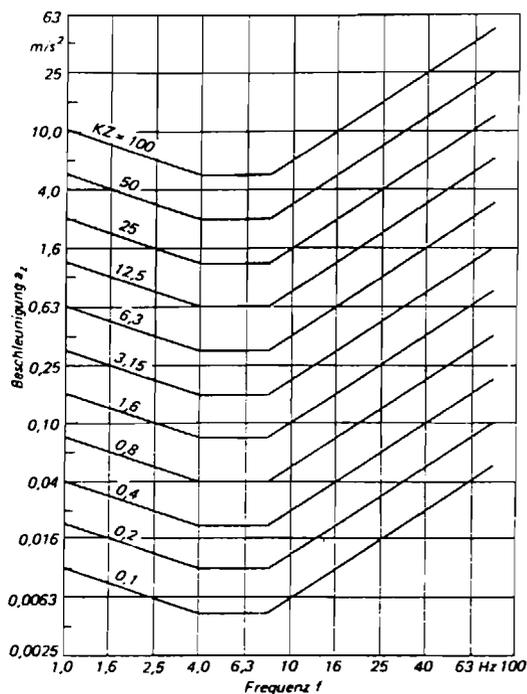
Für die im Fall der Deckenschwingungen maßgebende  $z$ -Richtung gelten für die Bewertete Schwingstärke  $KZ$  folgende Beziehungen:

$$1 \text{ Hz} \leq f \leq 4\text{Hz}: \quad KZ = 10 \frac{a_z}{\text{m/s}^2} \sqrt{f/\text{Hz}}$$

$$4 \text{ Hz} \leq f \leq 8\text{Hz}: \quad KZ = 20 \frac{a_z}{\text{m/s}^2}$$

$$8 \text{ Hz} \leq f \leq 80\text{Hz}: \quad KZ = 160 \frac{a_z}{\text{m/s}^2} \frac{\text{Hz}}{f}$$

Die Ermittlung ist auf der Basis von Terzspektren durchzuführen, wobei der Effektivwert der Beschleunigung  $a_z$  und die Frequenz  $f$  in  $z$ -Richtung anzusetzen sind.



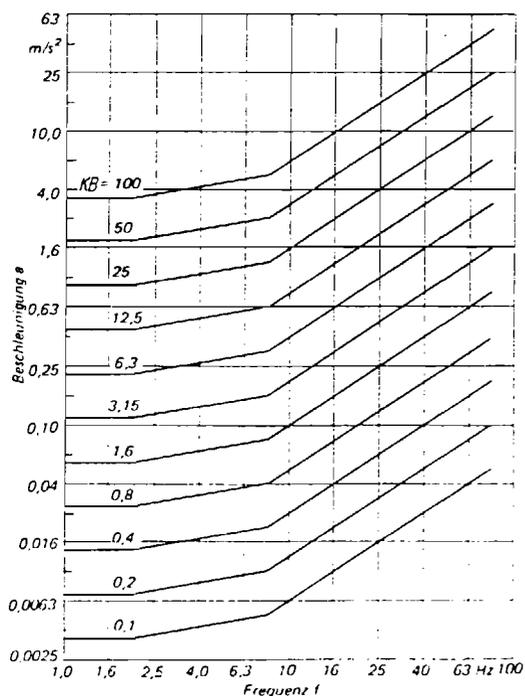
**Abb. 4:** Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärke nach VDI 2057 für Einwirkung in z-Richtung auf den sitzenden oder stehenden Menschen

Eine graphische Darstellung der Kurven gleicher Schwingstärke ist in Abb. 4 dargestellt. Die Form der Kurven stimmt mit der Form der Kurven nach ISO 2631 überein, zwischen dem KZ-Wert und der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{zw}$  nach ISO besteht folgende rechnerische Beziehung:

$$KZ = 20 \frac{a_{zw}}{m/s^2}$$

### Bewertung der Einwirkungen bei nicht vorgegebener Körperhaltung

Dieser Bewertungsansatz ist in Fällen anzuwenden, in denen keine eindeutige Aussage über die Körperhaltung oder ein häufiger Wechsel der Körperhaltung im Betrachtungszeitraum stattfindet. Die Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärke für diesen Fall sind in Abb. 5 gegeben.



**Abb. 5:** Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärke bei nicht vorgegebener Körperhaltung (VDI 2057)

## 2.5.2 Beurteilung der Schwingungseinwirkungen

Die Beurteilung der Schwingungseinwirkungen auf den Menschen sollte folgende Kriterien berücksichtigen:

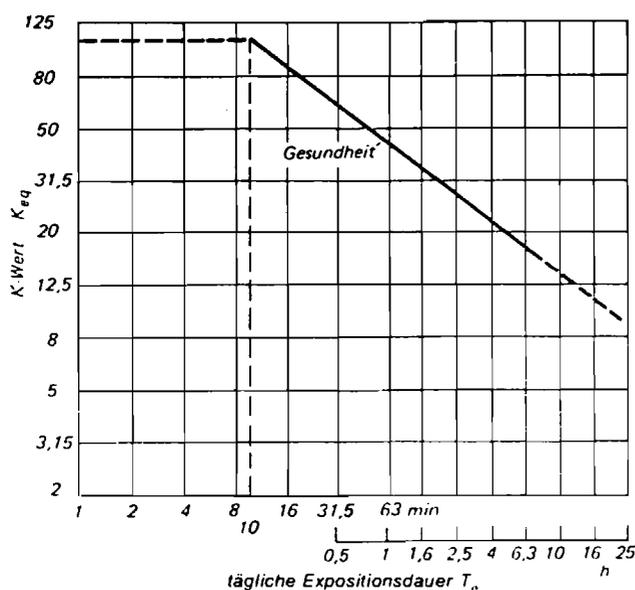
- Wohlbefinden (Komfort)
- Leistungsfähigkeit
- Gesundheit

Als Hilfe bei der Beurteilung kann die nachfolgende Tabelle mit Hinweisen zur subjektiven Wahrnehmung verwendet werden:

**Tabelle 7:** Zusammenhang zwischen Bewerteter Schwingstärke und subjektiver Wahrnehmung (VDI 2057 Blatt 3)

Bewertete Schwingstärke $K_X, K_Y, K_Z, K_B$	Beschreibung der Wahrnehmung
< 0,1	nicht spürbar
0,1	Fühschwelle
0,4	gerade spürbar
1,6	gut spürbar
6,3	stark spürbar
100 > 100	sehr stark spürbar

Für eine Abschätzung des Einflusses der Schwingstärke und der Einwirkungsdauer gibt die Richtlinie das folgende Diagramm an:



**Abb. 6:** Richtwert-Kurve für die Beurteilung des Kriteriums Gesundheit nach VDI 2057 Teil 3

## 2.6 British Standard 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibrations in buildings

BS 6472 findet Anwendung bei der Bewertung von Schwingungseinwirkungen auf Menschen in verschieden genutzten Gebäuden (Wohnhäuser, Produktionswerkstätten, Büroräume sowie s.g. "Kritische Räume", etwa OP-Säle). Die Bewertung findet unter Verwendung eines s.g. *Vibration Dose Values*, der aus den RMS-Werten der frequenzbewerteten Schwingung unter Berücksichtigung der Einwirkungshäufigkeit und -dauer ermittelt wird.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die zu benutzenden Wichtungsfaktoren, die nachfolgende Abbildung 7 die Bewertungskurven in Abhängigkeit von der Frequenz und der Beschleunigung

**Tabelle 8:** Multiplikationsfaktoren nach BS 6472

<b>Table 5. Multiplying factors used to specify satisfactory magnitudes of building vibration with respect to human response</b>			
Place	Time	Multiplying factors (see notes 1 and 5)	
		Exposure to continuous vibration [16 h day, 8 h night] (see note 2 and appendix B)	Impulsive vibration excitation with up to 3 occurrences (see note 8)
Critical working areas (e.g. hospital operating theatres, precision laboratories (see notes 3 and 10))	Day	1	1
	Night	1	1
Residential	Day	2 to 4 (see note 4)	60 to 90 (see notes 4 and 9, and appendix B)
	Night	1.4	20
Office	Day	4	128 (see note 6)
	Night	4	128
Workshops	Day	8 (see note 7)	128 (see notes 6 and 7)
	Night	8	128

NOTE 1. Table 5 leads to magnitudes of vibration below which the probability of adverse comments is low (any acoustical noise caused by structural vibration is not considered).

NOTE 2. Doubling of the suggested vibration magnitudes may result in adverse comment and this may increase significantly if the magnitudes are quadrupled (where available, dose/response curves may be consulted).

NOTE 3. Magnitudes of vibration in hospital operating theatres and critical working places pertain to periods of time when operations are in progress or critical work is being performed. At other times magnitudes as high as those for residences are satisfactory provided there is due agreement and warning.

NOTE 4. Within residential areas people exhibit wide variations of vibration tolerance. Specific values are dependent upon social and cultural factors, psychological attitudes and expected degree of intrusion.

NOTE 5. Vibration is to be measured at the point of entry to the entry to the subject. Where this is not possible then it is essential that transfer functions be evaluated.

NOTE 6. The magnitudes for vibration in offices and workshop areas should not be increased without considering the possibility of significant disruption of working activity.

NOTE 7. Vibration acting on operators of certain processes such as drop forges or crushers, which vibrate working places, may be in a separate category from the workshop areas considered in table 3. The vibration magnitudes specified in relevant standards would then apply to the operators of the exciting processes.

NOTE 8. Appendix C contains guidance on assessment of human response to vibration induced by blasting.

NOTE 9. When short term works such as piling, demolition and construction give rise to impulsive vibrations it should be borne in mind that undue restriction on vibration levels can significantly prolong these operations and result in greater annoyance. In certain circumstances higher magnitudes can be used.

NOTE 10. In cases where sensitive equipment or delicate tasks impose more stringent criteria than human comfort, the corresponding more stringent values should be applied. Stipulation of such criteria is outside the scope of this standard.

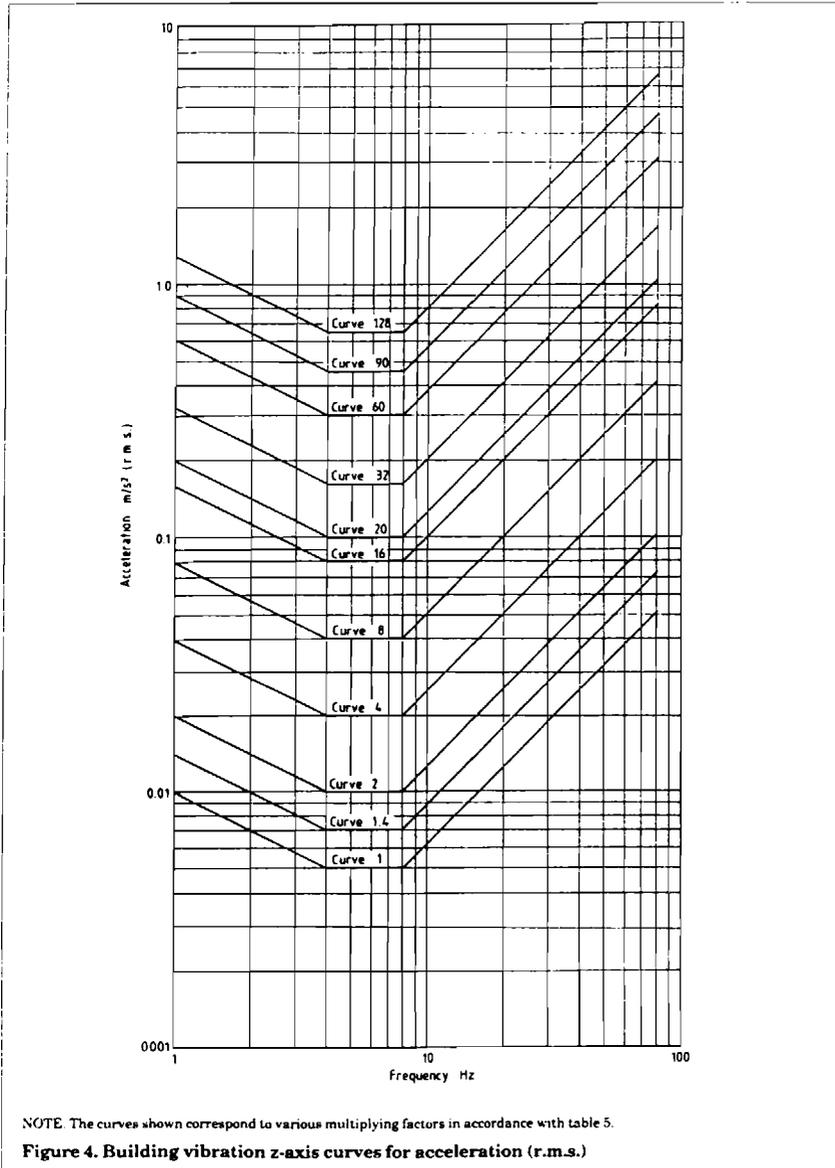


Abb. 7: Bewertungskurven nach BS 6472

### 3 Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit mittels Ingenieurvorberechnungen

#### 3.1 Allgemeines

Während die zuvor vorgestellten Normen und Richtlinien in erster Linie darauf ausgerichtet sind, in bereits bestehenden Gebäuden die Beeinträchtigung durch Schwingungen mit Hilfe von gemessenen Werten zu beurteilen, stellen die nachfolgenden Vorschläge die Möglichkeit dar gezielt die Schwingungsanfälligkeit geplanter Deckenkonstruktionen auf ihre Schwingungsempfindlichkeit hinsichtlich menscheninduzierter Schwingungen zu überprüfen. Damit unterscheiden Sie sich grundsätzlich von den vorangegangenen Normen, bei denen erst ein bereits existierender Zustand (oder dessen dynamische Zeitschrittsimulation) als Grundlage für die Beurteilung verwendet werden kann.

#### 3.2 T.A. Wyatt: Design Guide on the Vibration of Floors

Die von T.A. Wyatt verfaßte Richtlinie ist eine Publikation des Steel Construction Institutes (SCI), die zunächst gezielt für die Beurteilung von Verbunddecken entworfen wurde.

Als Belastung sind die Lastfälle Gehen und Laufen sowie der s.g. "plötzliche Fersenkontakt" (auf Zehenspitzen stehen und plötzlich absenken) vorgesehen. Das in dieser Richtlinie vorgesehene Akzeptanzkriterium ist abhängig von einem Reaktionsfaktor, der die Deckenreaktion auf die mit einer bestimmten Frequenz auftretende dynamische Belastung beschreibt.

Der Reaktionsfaktor  $R$  wird in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz der Decke (die verhältnismäßig einfach durch eine Modalanalyse oder durch eine näherungsweise Handberechnung ermittelt werden kann), der Massenbelegung und des statischen Systems ermittelt:

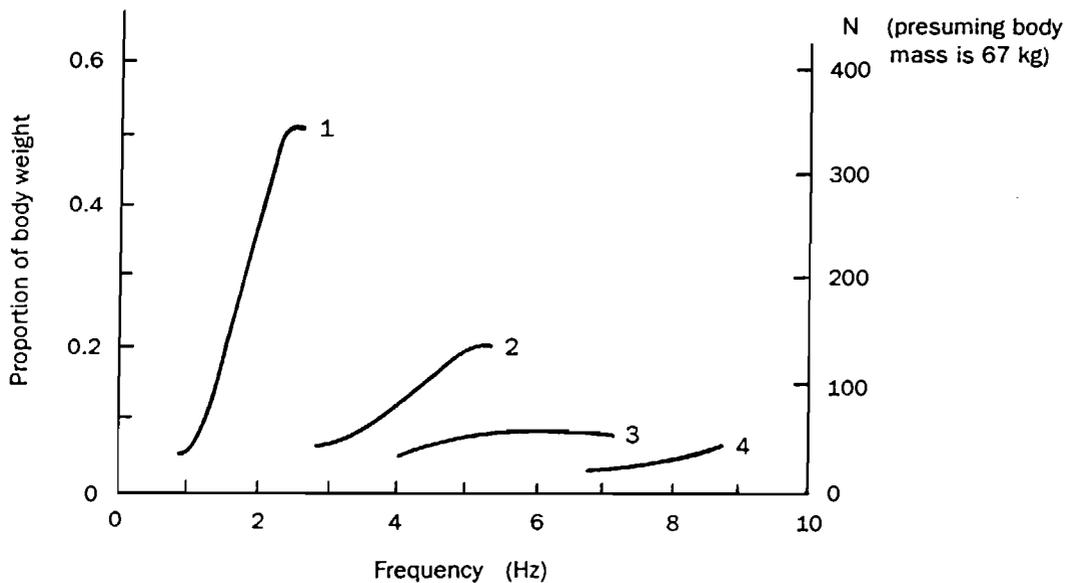
$$R = \frac{68000 \cdot C_f}{m \cdot S \cdot L_{eff} \cdot \xi}$$

mit:

- $m$ : Massenbelegung der Decke [ $\text{kg/m}^2$ ] einschließlich eines Zuschlags von 10 % für die anteiligen Verkehrslasten
- $S$ : zu berücksichtigende Einflußbreite des Deckensystems
- $L_{eff}$ : effektive Spannweite des Deckensystems

- $\xi$ : Dämpfungsfaktor (logarithmisches Dämpfungsdekrement)  
 $C_f$ : Fourier-Koeffizient (Faktor für den dynamisch wirksamen Teil der anregenden Kraft aus Gehen oder Laufen)

Der von der Eigenfrequenz der Decke abhängige Fourier-Koeffizient kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden:



**Abb. 8:** Fourierkoeffizienten in Abhängigkeit von der Deckeneigenschwingung nach /2/

Die daraus resultierende wirksame Kraftamplitude wird mit

$$\bar{P} = C_f \cdot P_1$$

ermittelt.  $P_1$  ist hierbei für den Lastfall Gehen mit 240 N anzusetzen.

Als Grenzwerte für das Akzeptanzkriterium  $R$  werden die folgenden Größen angegeben:

	max. $R$
Besonderes Büro (special office)	4
Büro allgemein (general office)	8
Geschäftiges Büro (busy office)	12

### 3.3 ASCE-Publikation "Design Criterion for Walking Vibrations" von D.E. Allen und T.M. Murray

Die ASCE-Publikation "Design Criterion for Walking Vibrations" von Allen und Murray entspricht in ihrem Anwendungsgebiet dem "Design Guide..." von T.A. Wyatt. Die ASCE-Publikation dient in erster Linie zur Abschätzung der dynamischen Reaktionen von Geschoßdecken unter Gehbelastung. Es werden auch Grenzwerte vorgeschlagen, nach denen eine Decke als gebrauchsfähig eingestuft werden kann. Diese Richtlinie kann jedoch nicht für die Beurteilung von Bauwerken angewendet werden, die einer harmonischen Belastung durch mehrere Personen (wie Turnhallen) ausgesetzt sind.

#### a) Bauwerksreaktion

Die Ermittlung der dynamischen Reaktion einer Decke oder einer Fußgängerbrücke kann unter der vereinfachten Annahme einer auf der Stelle gehenden Person (harmonische Funktion an einem Ort) ermittelt werden.

Für die Ermittlung der maximal auftretenden Beschleunigung der belasteten Konstruktion (ausgedrückt durch das Verhältnis der Beschleunigung zur Erdbeschleunigung) wird die folgende Beziehung vorgeschlagen:

$$\frac{a}{g} = \frac{\alpha_i \cdot P}{0,5 \cdot W} \cdot \frac{R}{2 \cdot \beta} \cdot \cos(2\pi i f t)$$

- mit
- $a$ : Beschleunigung im eingeschwungenen Zustand
  - $g$ : Erdbeschleunigung
  - $\alpha_i$ : dynamischer Beiwert der maßgebenden  $i$ -ten Harmonischen
  - $R$ : Reduktionsfaktor (s.u.)
  - $W$ : Trägergewicht
  - $\beta$ : Dämpfungsbeiwert

Der Faktor  $\frac{1}{2\beta}$  ist der übliche Faktor zur Ermittlung der Beschleunigung in einem stabilen (eingeschwungenen) Resonanzzustand und  $0,5 W/g$  ist die Masse eines Einmassenschwingers dessen dynamischen Eigenschaften den Eigenschaften eines Balkens auf zwei Stützen mit dem Gewicht  $W$ , der in der Grundmode schwingt, entsprechen.

Der Reduktionsfaktor  $R$  berücksichtigt, daß eine volle Resonanz nicht erreicht wird, wenn die Last (Person) sich bewegt und daß die lasterzeugende Person und die betroffene Person (für die die

Bauwerksreaktion maßgebend ist) sich nicht am gleichen Ort befinden. Es wird vorgeschlagen, den Faktor  $R$  zu 0,7 für Fußgängerbrücken und zu 0,5 für Deckenkonstruktionen anzunehmen.

#### b) Entwurfskriterium

Mit der Beziehung für  $a/g$  und der ISO 10137 läßt sich eine Einstufung der zu erwartenden Spitzenbeschleunigung durchführen.

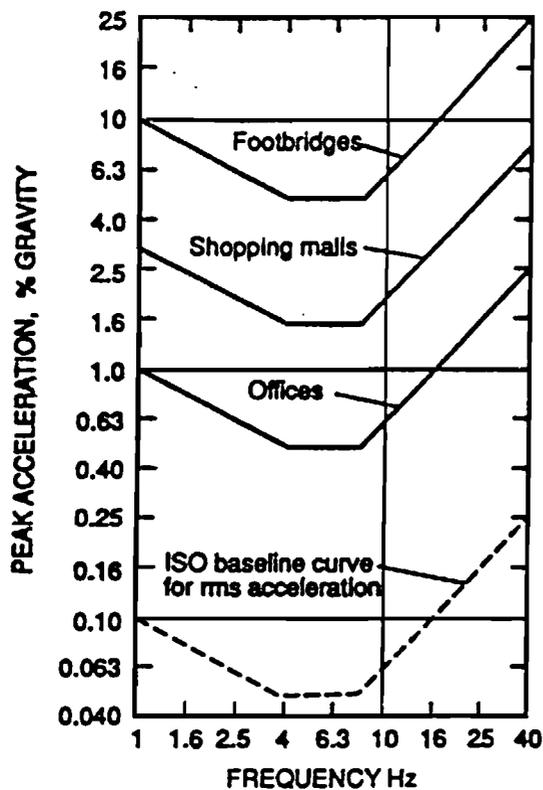


Abb. 9: In ISO 10137 vorgeschlagene Grenzwerte der Beschleunigung (aus /3/)

Das Akzeptanzkriterium läßt sich auch in Form eines Mindestwertes für das Produkt aus dem Dämpfungsbeiwert  $\beta$  und dem Gewicht  $W$  ausdrücken:

$$\beta \cdot W \geq \frac{R \cdot \alpha_i \cdot P}{a_o/g}$$

In der nachfolgenden Tabelle sind die vorgeschlagenen Mindestwerte in Abhängigkeit von der Nutzungsart und der maßgebenden Frequenzbereiche zusammengestellt:

Deckeneigenfrequenz $f_0$ [Hz]	Bürogebäude $\beta \cdot W$ [kN]	Kaufhäuser $\beta \cdot W$ [kN]	Fußgängerbrücken $\beta \cdot W$ [kN]
1,6 - 2,2	28	9,3	4
3,2 - 4,4	14	4,7	2
4,8 - 6,6	7	2,3	1
6,4 - 8,8	3,5	1,1	0,5

Näherungsweise läßt sich der Mindestbeiwert des Akzeptanzkriteriums  $\beta \cdot W$  in Form einer Exponentialfunktion ausdrücken:

$$\beta \cdot W \geq K \cdot e^{-0,35 \cdot f_0}$$

mit  $f_0$ : Eigenfrequenz der Decke

$K$ : Konstanter Beiwert in Abhängigkeit von der Nutzungsart der Konstruktion

Die vorgeschlagenen Werte für  $K$  sind in der nachfolgenden Tabelle zusammen mit den anzuwendenden Dämpfungswerten  $\beta$  zusammengestellt:

	$K$ [kN]	$\beta$
Büros, Wohngebäude, Kirchen	58	0,03 <sup>1)</sup>
Kaufhäuser	20	0,02
Fußgängerbrücken	8	0,01

<sup>1)</sup> 0,05 für Decken mit Zwischenwänden, 0,02 für Decken mit wenigen nichttragenden Elementen.

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschößbau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Az: IV 1-5-700/93**

**ANLAGE C**

**Anwendungsbeispiel zum  
Design Guide on The Vibration of Floors  
von T.A. Wyatt**

## **Anlage C - Inhaltsverzeichnis**

1	System und statische Belastung .....	1
2	Querschnittswerte .....	2
3	Durchbiegungen, Eigenfrequenz und Systemdämpfung .....	3
4	Schwingungsnachweis .....	4

## 1 System und statische Belastung

In dieser Beispielberechnung wird das Hoesch-Verbunddeckensystem unter Verwendung des Verbunddeckenprofils E 51 V mit 1,0 mm Blechdicke angenommen.

Der prinzipielle Aufbau des Deckensystems und die Abmessungen des statischen Systems sind den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen.

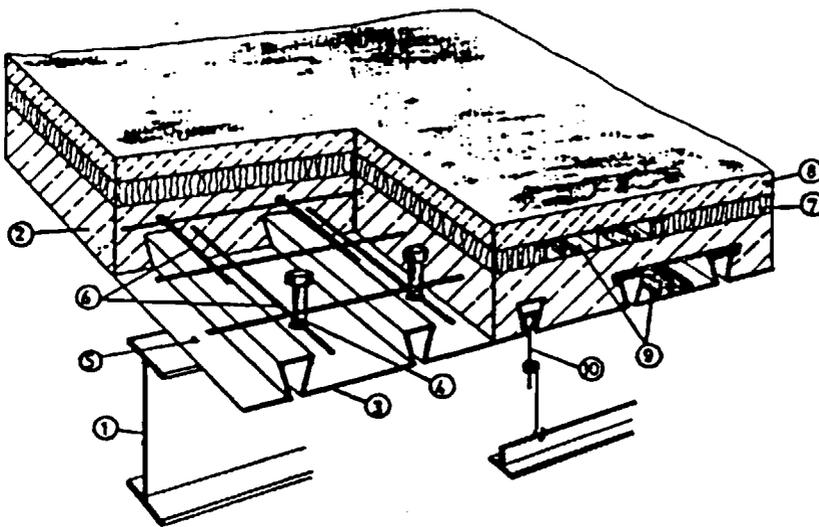


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau einer Hoesch-Verbunddecke

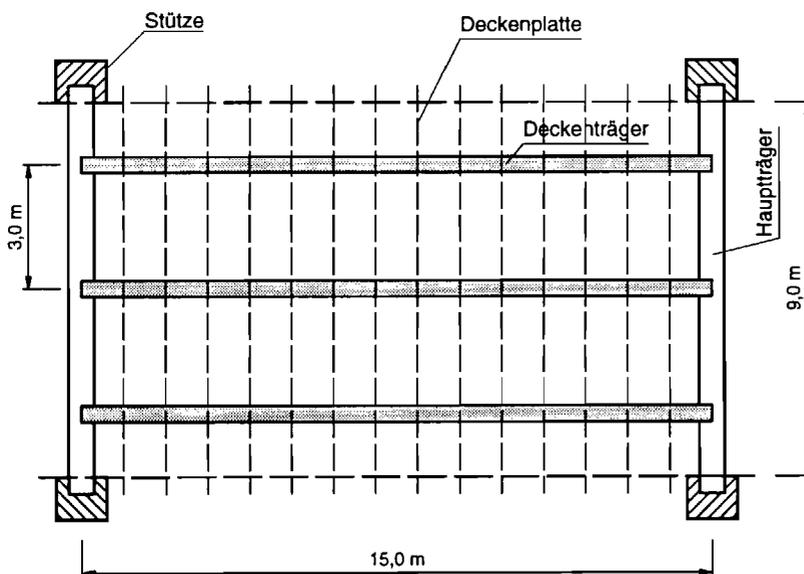


Abb. 2: Statisches System der Deckenkonstruktion

Die als mitschwingende Masse anzusetzende statische Belastung setzt sich aus den ständigen Lasten (Eigengewicht der Konstruktion + Belag etc.) und 10 % der Verkehrslast zusammen.

### Belastung auf Deckenkonstruktion

- ständige Lasten:  $g = 4,00 \text{ kN/m}^2$
- Verkehrslast:  $p = 5,00 \text{ kN/m}^2$
- 10 % der Verkehrslast  $\bar{p} = 0,50 \text{ kN/m}^2$

Hieraus folgt die für den Schwingungsnachweis anzusetzende Last:

$$\bar{q} = 4,50 \text{ kN/m}^2$$

Das entspricht einer mitschwingenden Masse von

$$\bar{m} = \frac{4,5 \cdot 1000}{9,81} = 458,7 \text{ kg/m}^2$$

Belastung auf Deckenträger:

- Streckenlast auf Deckenträger: ( $b_m = 3.0 \text{ m}$ )  
 $q = 13.5 \text{ kN/m}^2$

Das entspricht einer mitschwingenden Masse von

$$m = \frac{13,5 \cdot 1000}{9,61} = 1376 \text{ kg/m}$$

## 2 Querschnittswerte

Für die Ermittlung der Querschnittswerte werden die folgenden Werkstoffeigenschaften angenommen:

Stahl:  $E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2$

Beton:  $E_c = 2300 \text{ kN/cm}^2$

– Verhältnis der E-Moduli:

$$n = \frac{E_a}{E_c} = 9,13$$

Die Querschnittswerte werden unter Annahme elastischen Verhaltens der Werkstoffe und ohne Berücksichtigung der Ribbildung (Zustand I) ermittelt. Zusätzlich wird hier von einer starren Verdübelung ausgegangen.

Mit diesen Annahmen ergeben sich (ohne weitere Herleitung) die folgenden Steifigkeiten:

Deckenplatte	$EI_{DP} = 4532,2 \text{ kN/m}^2/\text{m}$
Deckenträger	$EI_{DT} = 446933,6 \text{ kN/m}^2$
Hauptträger	$EI_{HT} = 2318626,8 \text{ kN/m}^2$

### 3 Durchbiegungen, Eigenfrequenz und Systemdämpfung

a) Durchbiegungen

- Deckenplatte (Durchlaufträger)

$$\delta_{DP} = \frac{q \cdot l^4}{384 \cdot EI} = \frac{4,5 \cdot 3,0^4}{4532,2 \cdot 384} = 0,209 \text{ mm}$$

- Deckenträger (Einfeldträger)

$$\delta_{DT} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI} = \frac{513,5 \cdot 15,0^4}{384 \cdot 446933,6} = 19,912 \text{ mm}$$

- Hauptträger (Einfeldträger)

$$\delta_{HT} = \frac{P \cdot l^3}{2,4 \cdot 10,19 \cdot EI} = \frac{101,25 \cdot 9,00^4}{24,46 \cdot 2318626,8} = 1,302 \text{ mm}$$

b) relative Durchbiegungen:

- Deckenplatte  $RF_{DP} = 0,209/21,423 = 0,0098$
- Deckenträger  $RF_{DT} = 19,912/21,423 = 0,9295$
- Hauptträger  $RF_{HT} = 1,302/21,423 = 0,0608$

c) Eigenfrequenz:

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{\delta}} = \frac{18}{\sqrt{21,423}} = 3,89 \text{ Hz}$$

d) Dämpfung

Der Schwingungsnachweis wird mit einem zugrundegelegten Dämpfungsmaß  $\zeta = 3 \%$  (Verbundkonstruktion) durchgeführt.

## 4 Schwingungsnachweis

- Mit der ermittelten Eigenfrequenz von  $f_0 = 3.89 \text{ Hz}$  läßt sich der zugehörige Fourierkoeffizient aus Abb. 3 entnehmen:

$$f_0 = 3,89 \text{ Hz} \rightarrow C_f = 0,4$$

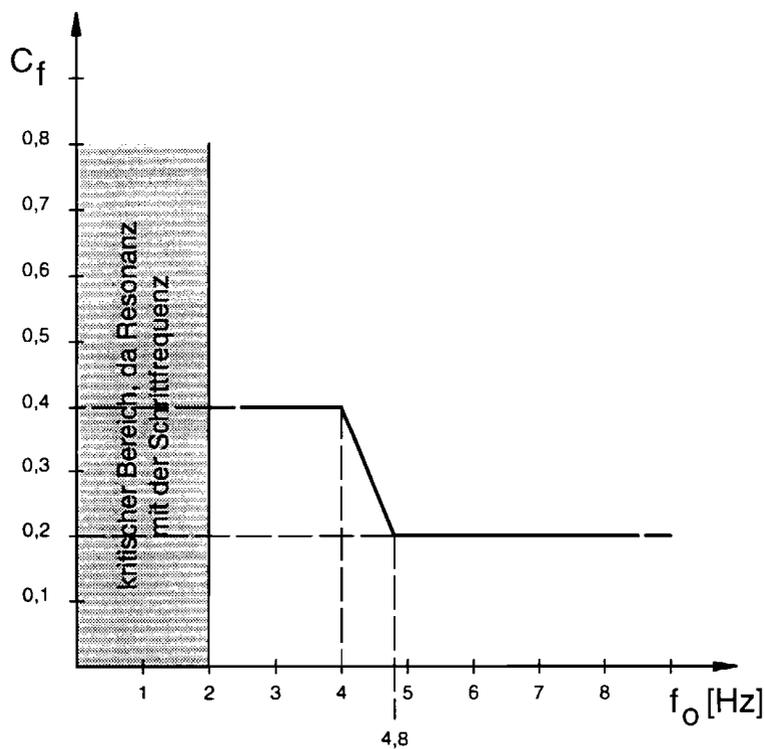


Abb. 3:  $C_f$  - Faktoren nach /2/

- Breite des maßgebenden Deckenbereiches  $W$

$$W = 18,0 \text{ m}$$

- Dynamische Breite des Deckenbereiches  $S^*$

$$S^* = 4,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{Decke}}{\mu \cdot f_0^2}} = 4,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{4532,2}{0,4587 \cdot 3,89^2}} = 22,75 \text{ m}$$

- Effektive Breite des Deckenbereiches  $S$

$$\text{Es gilt: } S = S^* \leq W \quad \text{wenn } RF_{HT} < 0,2$$

$$S = \max(S^*, L_{DT}) \quad \text{wenn } RF_{HT} \geq 0,2$$

$$\text{hier: } S = 18,0 \text{ m}$$

- Effektive Trägerspannweite  $L_{eff}$

$$L_{eff} = L_{DT} = 15,0 \text{ m}$$

Damit läßt sich das Akzeptanzkriterium wie folgt bestimmen:

$$R = \frac{68000 \cdot C_f}{\mu \cdot S \cdot L_{eff} \cdot \xi} = \frac{68000 \cdot 0,4}{458,7 \cdot 18,0 \cdot 15,0 \cdot 0,03} = 7,32$$

Der Akzeptanzwert  $R$  liegt unter dem für allgemeine Büros geltenden Wert von 8, die Gebrauchsfähigkeit wäre damit nachgewiesen.

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschößbau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Az: IV 1-5-700/93**

**ANLAGE D**

**Klassifizierung der Bauwerke in  
Abhängigkeit von der Nutzungsart  
und Bauweise**

**Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek  
Lehrstuhl für Stahlbau  
RWTH-Aachen**

**Aachen, Oktober 1995**

## **Anlage D – Inhaltsverzeichnis**

1	Allgemeines .....	1
2	CEB Bulletin Vibrations Problems in Structures .....	1
3	ISO 10137 .....	2
4	Bachmann/Ammann - Vibrations in Structures .....	2

## 1 Allgemeines

Eine Reihe der vorgestellten Richtlinien, Empfehlungen und Normen geben Anhaltswerte für einzuhaltende Grenzwerte, die sich meistens nach der vorgesehenen Nutzungsart des Gebäudes richten. Diese Werte werden üblicherweise in Form von einzuhaltenden Mindesteigenfrequenzen angegeben. Da die dynamische Antwort einer Konstruktion maßgebend von der Dämpfung der Struktur abhängig ist, wird diese Einteilung noch um den Parameter Bauweise erweitert, da davon ausgegangen wird, daß diese maßgeblich das Dämpfungsverhalten beeinflußt.

In einigen Quellen werden auch Werte für die für eine Berechnung anzunehmenden Dämpfungswerte vorgestellt, die ebenfalls Bauweisenabhängig klassifiziert werden.

Da aufgrund eines engen Zusammenhangs zwischen der Bauwerksnutzung, der Bauweise, der Dämpfung und der Systemantwort besteht, ist hier eine eindeutige Trennung nicht immer möglich.

## 2 CEB Bulletin Vibrations Problems in Structures

Es werden hier zwei in Abhängigkeit von der Bauweise eingeteilte Tabellen vorgestellt, die einerseits die anzunehmende Strukturdämpfung und andererseits einzuhaltende Mindesteigenfrequenzen beinhalten. Bei der zweiten Tabelle wird gleichzeitig eine Einteilung nach Nutzungsart vorgenommen.

Dämpfungswerte  
nach CEB-Bulletin

Construction type	min.	mean	max.
Reinforced concrete	0.014	0.025	0.035
Prestressed concrete	0.010	0.020	0.030
Composite	0.008	0.016	0.025
Steel	0.006	0.012	0.020

Mindesteigenfrequenzen  
nach CEB-Bulletin

	Sport floors	Dance floors
Reinforced concrete structures	$f_1 > 7.5$ Hz	6.5 Hz
Prestressed concrete structures	$f_1 > 8.0$ Hz	7.0 Hz
Composite structures	$f_1 > 8.5$ Hz	7.5 Hz
Steel structures	$f_1 > 9.0$ Hz	8.0 Hz

### 3 ISO 10137

Die ISO-Norm 10137 schlägt ebenfalls die anzunehmenden Dämpfungswerte für die gebräuchlichsten Bauweisen von Deckenkonstruktionen vor:

Dämpfungswerte verschiedener Konstruktionen nach ISO 10137:

Type of floor	Range of spans for damping ratios given, m	Damping ratio $\zeta$ (% of critical)		
		Typical range	Extreme range	Values for preliminary design
1. Steel joist-concrete slab simply supported	9 — 15	0.8 — 3.0	0.6 — 7.4	1.5
2. Steel joist-concrete slab, continuous slab construction across walls, bare floors	4 — 8	1.0 — 5.0	0.8 — 8.6	1.8
3. Fully composite steel beams with shear connectors to concrete slab	6 — 20	1.5 — 5.0	0.5 — 8.0	1.8
4. Prestressed concrete, precast	2 — 15	0.8 — 3.0	0.5 — 6.5	1.4
5. Reinforced concrete, monolythic	5 — 15	1.0 — 3.0	0.6 — 5.0	1.2
6. Wood joist floors	2 — 9	1.5 — 4.0	1.0 — 5.5	2.0

Note to Table B2:

*Damping ratios depend on type of construction, material, presence of non-structural elements, age, quality of construction and amplitude and frequency of vibration. For concrete structures the presence or absence of cracks is also significant. For any form of construction, the type of joints and the type of bearings employed play an important role in damping. For floors, the presence of floor and ceiling finishes and partitions can increase the damping considerably.*

### 4 Bachmann/Ammann - Vibrations in Structures

Diese Literaturquelle behandelt Bauwerkstypen, für die verschiedene Nutzungen vorgesehen sind. Es werden folgende Vorschläge für einzuhaltende Mindesteigenfrequenzen vorgeschlagen, wobei diese wiederum in Abhängigkeit von der Bauweise unterteilt werden:

**Bürogebäude:**

Stahlbeton	$f > 7.5 \text{ Hz}$
Spannbeton	$f > 8.0 \text{ Hz}$
Verbunddecken mit Ortbetonplatte	$f > 8.5 \text{ Hz}$
Stahldecken (mit Betondecken auf Profilblechen)	$f > 9.0 \text{ Hz}$

**Turnhallen:**

Stahlbeton	$f > 7.5 \text{ Hz}$
Spannbeton	$f > 8.0 \text{ Hz}$
Verbunddecken mit Ortbetonplatte	$f > 8.5 \text{ Hz}$
Stahldecken (mit Betondecken auf Profilblechen)	$f > 9.0 \text{ Hz}$

**Konzert- und Veranstaltungshallen:**

Stahlbeton	$f > 6.5 \text{ Hz}$
Spannbeton	$f > 7.0 \text{ Hz}$
Verbunddecken mit Ortbetonplatte	$f > 7.5 \text{ Hz}$
Stahldecken (mit Betondecken auf Profilblechen)	$f > 8.0 \text{ Hz}$

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschößbau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Az: IV 1-5-700/93**

## **ANLAGE E**

**Berechnungen mittels eines Simulationsprogramms  
- Doppelsporthalle, Bürohausdecke -**

**Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek  
Lehrstuhl für Stahlbau  
RWTH-Aachen**

**Aachen, Oktober 1995**

## Anlage E – Inhaltsverzeichnis

1	Verwendetes Programm .....	1
2	Simulation des dynamischen Verhaltens einer Verbunddecke .....	1
2.1	Allgemeines .....	1
2.2	System und Belastung .....	1
2.3	Berechnungsergebnisse .....	4
3	Simulation des dynamischen Verhaltens einer Doppelsporthalle .....	5
3.1	Allgemeines .....	5
3.2	System und Belastung .....	5
3.3	Berechnungsergebnisse .....	7

## **1 Verwendetes Programm**

Die Überprüfung des Akzeptanzkriteriums erfolgt mit Hilfe des am Lehrstuhl für Stahlbau entwickelten Simulationsprogramms DYNACS. Dieses Programm ermöglicht die Abbildung des Statischen Systems mit Hilfe von finiten Balkenelementen, denen neben statischen Kennwerten (Steifigkeiten, Materialverhalten etc.) auch dynamische Eigenschaften (Masse, Dämpfung) zugewiesen werden können. Als Belastung können auf beliebige Knoten des Systems beliebige Last-Zeit-Verläufe aufgebracht werden. Damit lassen sich die dynamischen Einwirkungen simulieren, die unter Verwendung des Zeitschrittverfahrens zu einer dynamischen Reaktion des Systems führen.

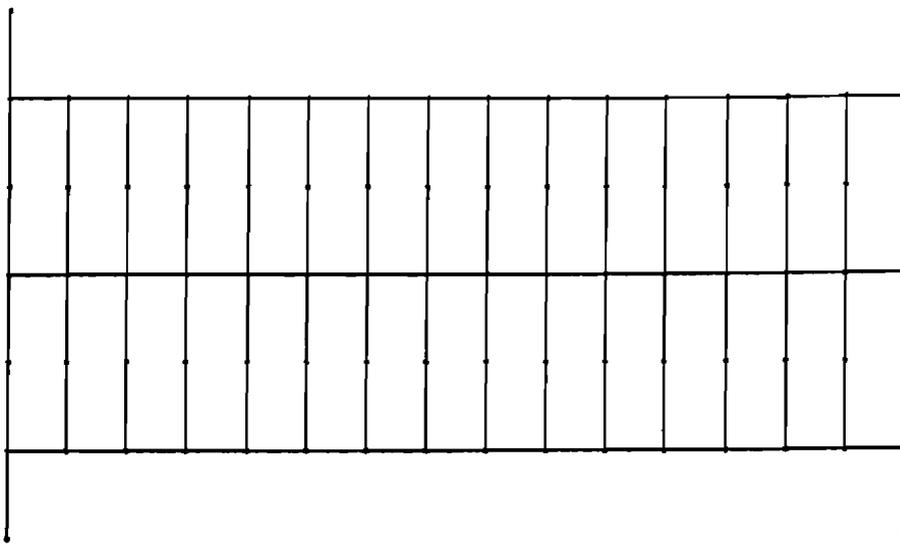
## **2 Simulation des dynamischen Verhaltens einer Verbunddecke**

### **2.1 Allgemeines**

Das untersuchte System entspricht dem in Anlage C als Anwendungsbeispiel gerechneten System. Es handelt sich hierbei um eine Bürodecke, so daß als maßgebende Belastung die dynamische Belastung aus Gehen angenommen werden kann.

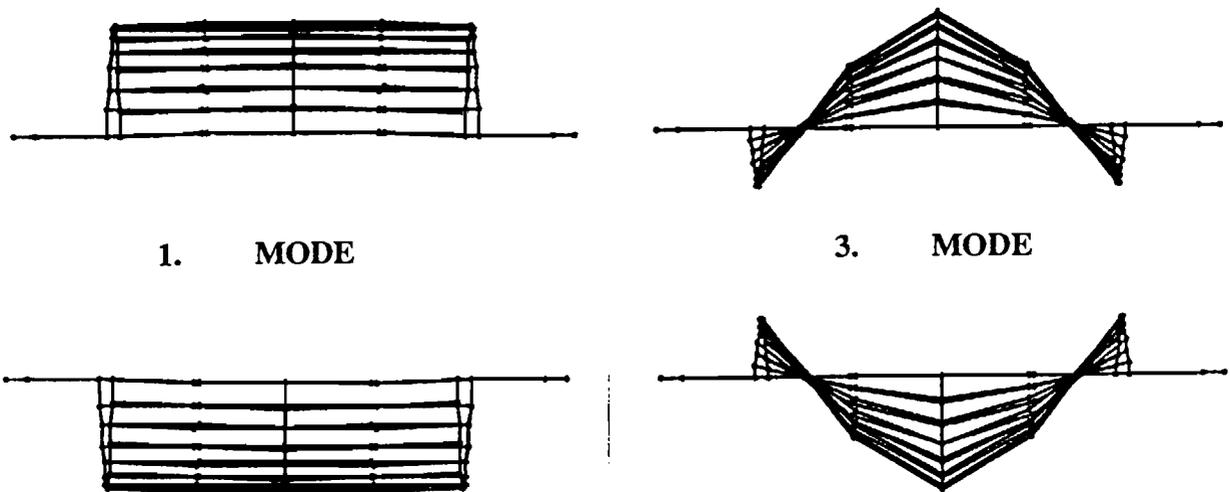
### **2.2 System und Belastung**

Das System wird mit Hilfe von Stabelementen als Trägerrost abgebildet (siehe Abb. 1)



**Abb. 1:** Abbildung des Deckensystems als Trägerrost

Es wurde zunächst eine Modalanalyse des Systems durchgeführt, die die kritische Eigenfrequenz und die zugehörige Mode lieferte (siehe Abb. 2).



**Abb. 2:** Die kritischen Eigenmoden des Deckensystems

Mit der Kenntnis der Eigenfrequenz wurde eine Gehbelastung generiert, deren Zweite Harmonische genau die kritische Eigenfrequenz des Systems traf. Die angesetzte periodische Belastung wurde durch die Fourierkomponenten und den konstanten Anteil aus Eigengewicht der angenommenen Person beschrieben:

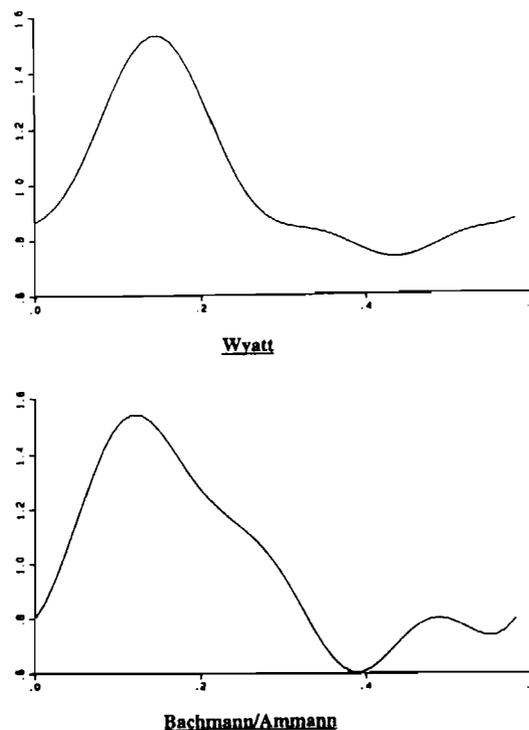
$$F(t) = G + C_f \cdot G \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n)$$

mit  $G$ : Gewicht der Person  
 $C_f$ : Fourierkoeffizient der Komponente  
 $n$ : Nr. der Fourierkomponente  
 $\omega$ : Eigenkreisfrequenz des Systems  
 $\varphi_n$ : Phasenverschiebung der Komponente  
 $t$ : Zeitpunkt

Für die Beschreibung der Last-Zeit-Funktion aus der Gehbelastung wurden alternativ die Ansätze von T. A. Wyatt und Bachmann/Amann verwendet.

In beiden Fällen wurde angenommen, daß die Belastung durch eine Person (0,72 kN) verursacht wird, der Einwirkungsort wurde während der Zeitschrittberechnung nicht verändert.

Der Unterschied der beiden Ansätze liegt in den Annahmen für die Fourierkoeffizienten  $C_f$  und den Phasenwinkel  $\varphi_n$ , die zu den in Abb. 3 dargestellten Zeitverläufen führten (jeweils nur eine Periode dargestellt).



**Abb. 3:** Last-Zeitfunktion der Gehbelastungen (jeweils nur eine Periode)

## 2.3 Berechnungsergebnisse

Die mit den angenommenen Belastungen durchgeführten Zeitschrittberechnungen wurden bis zu dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem sich ein eingeschwungener Zustand einstellt. Die Ergebnisse der Berechnungen lagen in Form von Verformungs-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Verläufen ausgewählter Punkte vor (Abb. 4). Betrachtet wurde sowohl der Ort der Lasteinwirkung als auch die benachbarten Punkte. Eine Auswertung der Ergebnisse auf die Maximalwerte der Beschleunigung hin zeigte, daß beide Ansätze vergleichbare Werte liefern. Die ermittelten maximalen Beschleunigungswerte lagen im Bereich um 0,7 % g und bestätigen damit, daß die nach dem "Design Guide" festgestellte Einstufung mit  $R = 7,32$  (Anlage D) zu zutreffenden Aussagen führt.

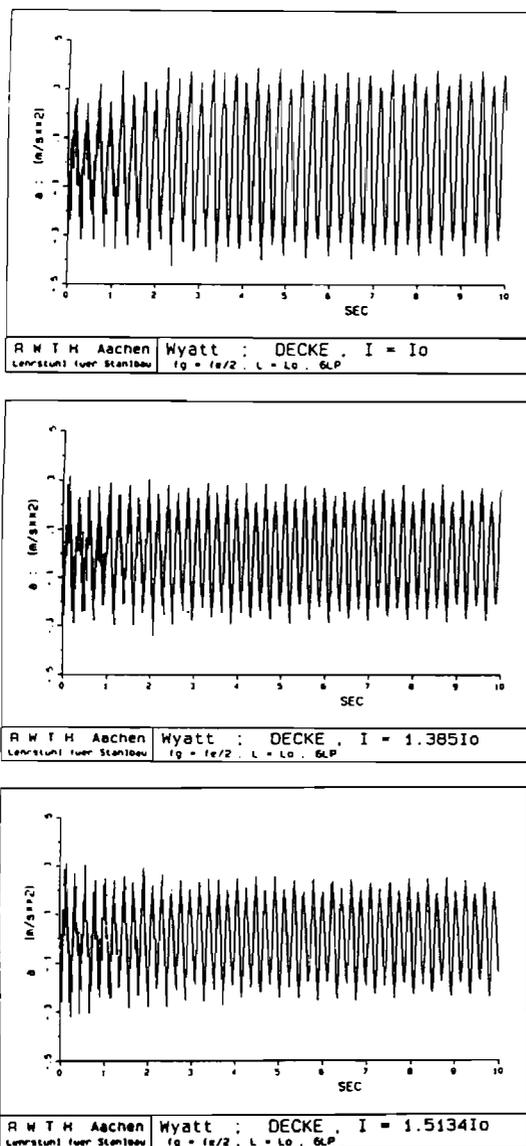
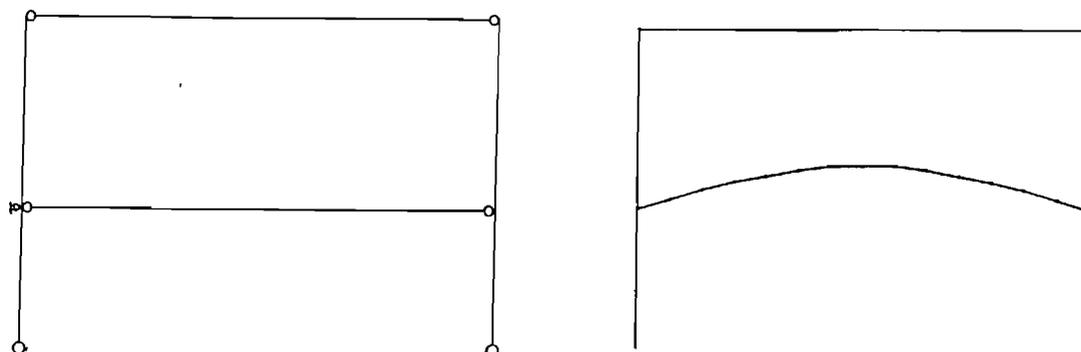


Abb. 4: Zeitverläufe der ermittelten dynamischen Größen



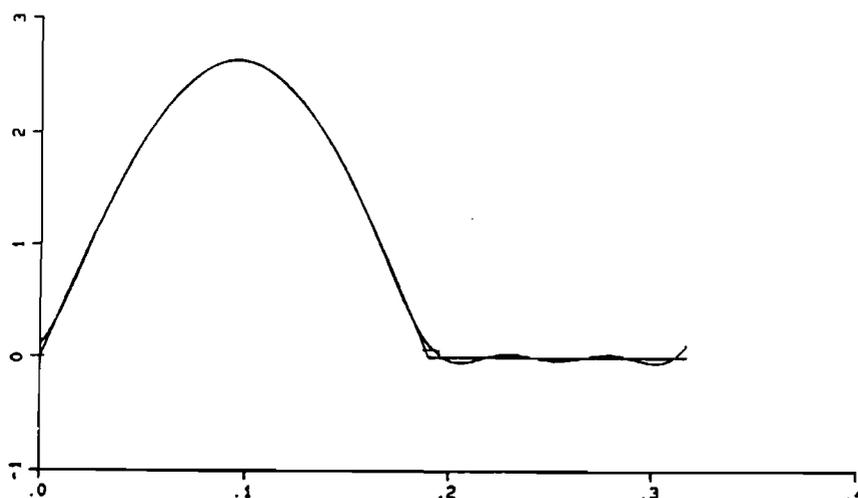
Abb. 6 zeigt das ebene statische Modell sowie die kritische Eigenmode des Systems.



**Abb. 6:** Ebenes Modell der Halle und die maßgebende Mode

Die maßgebliche Belastung der Zwischendecken von Sport- und Turnhallen wird entsprechend der voraussichtlichen Nutzung solcher Bauwerke durch rhythmische Sportübungen verursacht. Als kritischer Lastfall kann hier das "Hüpfen" betrachtet werden, eine eingehende Betrachtung dieses Lastfalls ist in Anlage B gegeben.

Die Beschreibung des Last-Zeit-Verlaufes beim Hüpfen von einer oder mehreren Personen kann genügend genau durch das sogenannte Halbsinusmodell gegeben werden (Abb. 7). Es handelt sich hierbei, im Gegensatz zum Gehen, um eine Belastung bei der der Bodenkontakt zeitweise nicht vorhanden ist, in diesen Zeitabschnitten ist die Belastung gleich Null.



**Abb. 7:** Verwendete Abbildung der Hüpfbelastung - Halbsinusmodell und Näherung (nur eine Periode dargestellt)

### **3.3 Berechnungsergebnisse**

Die Berechnungen wurden ähnlich wie bei der Deckenberechnung bis zu dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem sich ein eingeschwungenes System ergab. Die Bewertung der dynamischen Kenngrößen wurde unter Verwendung verschiedener Normen durchgeführt, wobei bei der Bewertung die voraussichtliche Einwirkungsdauer, die Häufigkeit sowie die Tatsache, daß es sich bei den betroffenen Personen um hüpfende Personen handelt berücksichtigt werden mußten. Aus diesen Ergebnissen, die für unterschiedliche Dämpfungsansätze ermittelt wurden, konnte festgestellt werden, daß der in Eurocode vorgeschlagene Mindestfrequenzwert von 5 Hz nicht ausreichend ist, daß jedoch die in SIA 160 vorgeschlagenen Grenzwerte verhältnismäßig konservativ sind. Die ermittelte Eigenfrequenz, bei der zwar "spürbare" aber zumutbare Beeinträchtigungen ermittelt wurden lag zwischen 6 und 7 Hz.

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Schwingungsanfälligkeit für den Geschobebau -  
eine Studie zur Klassifizierung der  
Gebrauchseigenschaften für den Eurocode 1**

**Az: IV 1-5-700/93**

**ANLAGE F**

**Schwingungsmessungen an Verbunddecken**

**Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek  
Lehrstuhl für Stahlbau  
RWTH-Aachen**

**Aachen, Oktober 1995**

## Anlage F – Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung .....	1
2	Schwingungsmessungen an Flachdecken .....	2
3	Eigenfrequenzberechnung .....	8
4	Schlußfolgerungen .....	11

## 1 Problemstellung

Für den Entwurf eines Bauwerkes muß sein Verhalten unter Einwirkung von Erschütterungen aus folgenden Gründen berücksichtigt werden:

Die Beanspruchung des Bauwerkes durch Einwirkung von Schwingungen kann

1. das Gebäude hinsichtlich seiner Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen.
2. bei Menschen negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit haben, im Extremfall sogar eine Gefährdung für die Gesundheit darstellen.

Die Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen ist nicht eindeutig.

Nach der VDI-Richtlinie 2057 /30/ wird folgendermaßen vorgegangen:

Ausgehend von den Schwingungsgrößen Schwingweg  $s$  [m], Schwinggeschwindigkeit  $v$  [m/s] und Schwingbeschleunigung  $a$  [m/s<sup>2</sup>] wird die Frequenz bewertet. Hierfür wird die sogenannte Bewertete Schwingstärke  $K$  in Abhängigkeit von der Frequenz, der jeweiligen Einwirkungsrichtung, der Größe der Beschleunigung in diese Richtung und der Einwirkungsart ermittelt. Es wird zwischen einer Einwirkung im Sitzen und Stehen, im Liegen, bei nicht vorgegebener Körperhaltung und über das Hand-Arm-System unterschieden. Mit diesem  $K$ -Wert und der täglichen Expositionsdauer kann anhand der Richtkurve für das Beurteilungskriterium "Gesundheit" festgestellt werden, ob Gesundheitsschäden bei Menschen zu erwarten sind, wenn die Einwirkungsdauer sich über Jahre hinweg wiederholt. Durch die Bewertete Schwingstärke kann auch die subjektive Wahrnehmung abgeschätzt werden, deren Spektrum von "nicht spürbar" bis zur Schmerzgrenze reicht.

Das Vorgehen nach DIN 4150 "Erschütterungen im Bauwesen" /31/ ist ähnlich.

Ausgehend von Schwingbeschleunigung, -geschwindigkeit oder -weg wird in Abhängigkeit von der Frequenz der Erschütterung die Wahrnehmungsstärke, der sogenannte KB-Wert, bestimmt. Dieser wird mit einem KB-Anhaltswert, der von der Art des Baugebietes, der Tageszeit und der Häufigkeit und Dauer der auftretenden Erschütterungen abhängig ist, verglichen.

Eine Beurteilung, wie sie oben beschrieben worden ist, kann nur ein Anhalt sein, da die Einwirkung von Schwingungen von jedem Menschen individuell wahrgenommen wird.

In diesem Kapitel wird sich in erster Linie auf die Ermittlung der Eigenfrequenz von Flachdeckenkonstruktionen beschränkt. Diese wird als maßgebende Größe bei der Beurteilung des Schwingungsverhaltens angesehen. Für die Beurteilung ist in den meisten Fällen die Grundfrequenz ausschlaggebend.

Um die Eigenfrequenz im voraus bestimmen zu können, müssen folgende Punkte bekannt sein:

1. ein statisches Modell, welches das tatsächliche Tragverhalten des Bauwerkes möglichst genau abbildet;
2. die Massenverteilung;
3. die Steifigkeiten (EI);

Bei bestehenden Bauwerken können die vorhandenen Eigenfrequenzen durch Messungen bestimmt werden. Oftmals stimmen die gemessenen nicht mit den nach dem statischen System aus der Traglaststatik berechneten Eigenfrequenzen überein.

Im folgenden werden Gründe für diesen Unterschied gesucht.

## 2 Schwingungsmessungen an Flachdecken

Messungen von Decken können folgendermaßen durchgeführt werden:

Die Decke wird in ein geeignetes Raster unterteilt und ein Referenzpunkt festgelegt. Mit dem Meßgerät, welches zwei Aufnehmer besitzt, werden Geschwindigkeiten in vertikale Richtung an zwei verschiedenen Orten in Abhängigkeit von der Zeit gemessen und synchron aufgetragen. Dabei verbleibt ein Aufnehmer bei jeder Messung an dem Referenzpunkt, bei dem die Anregung, z. B. durch den Sprung eines Meßgehilfen, erfolgt. Mit dem zweiten Aufnehmer wird das festgelegte Raster "abgearbeitet".

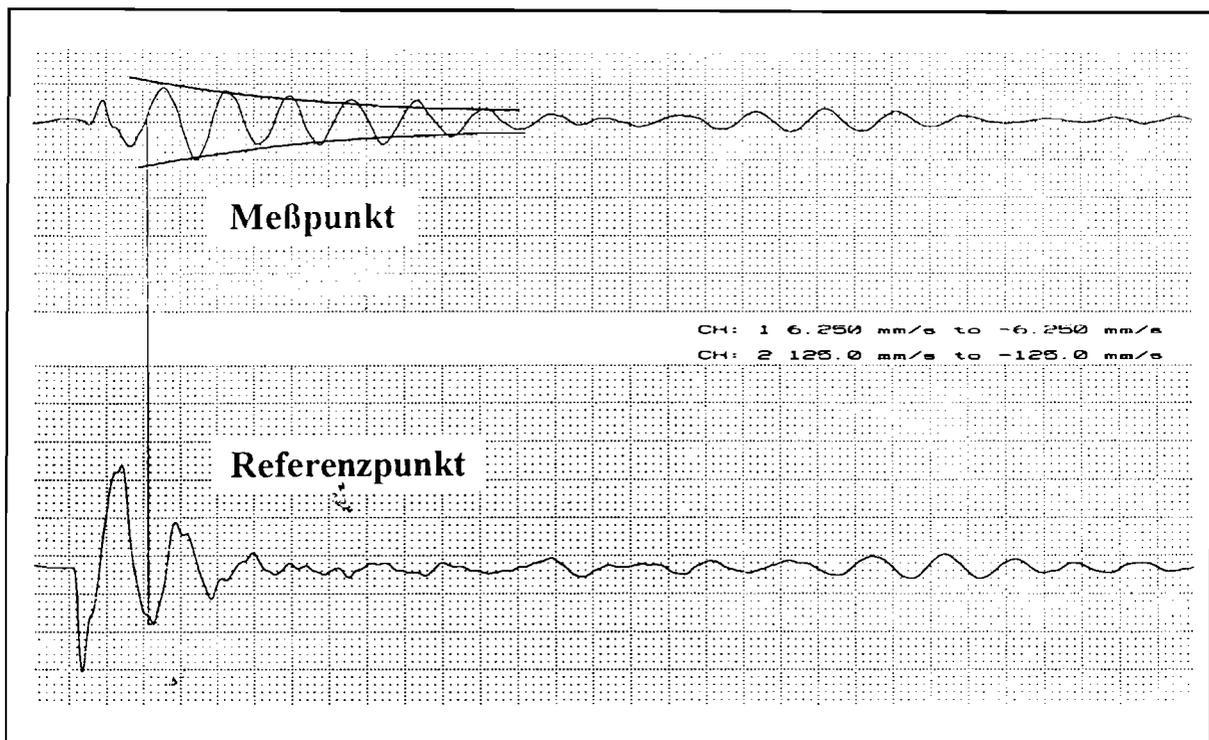
Durch Auswerten der Meßschriebe kann nun die Schwingdauer T abgelesen werden, mit der dann die Eigenfrequenz berechnet werden kann. Auch die Dämpfung kann für die abklingenden Schwingungskurven ermittelt werden.

Durch den direkten Vergleich der vertikalen Geschwindigkeiten des jeweiligen Meßpunktes mit der des Referenzpunktes zu einem Zeitpunkt kann das Schwingungsgebirge bestimmt werden, da, wie aus der Beziehung

$$y = \frac{\dot{y}}{\omega} = \frac{\dot{y}}{2\pi f}$$

hervorgeht, die Geschwindigkeit proportional zur Verformung ist.

In Bild 1 ist der Meßschrieb einer solchen Schwingungsmessung abgebildet.



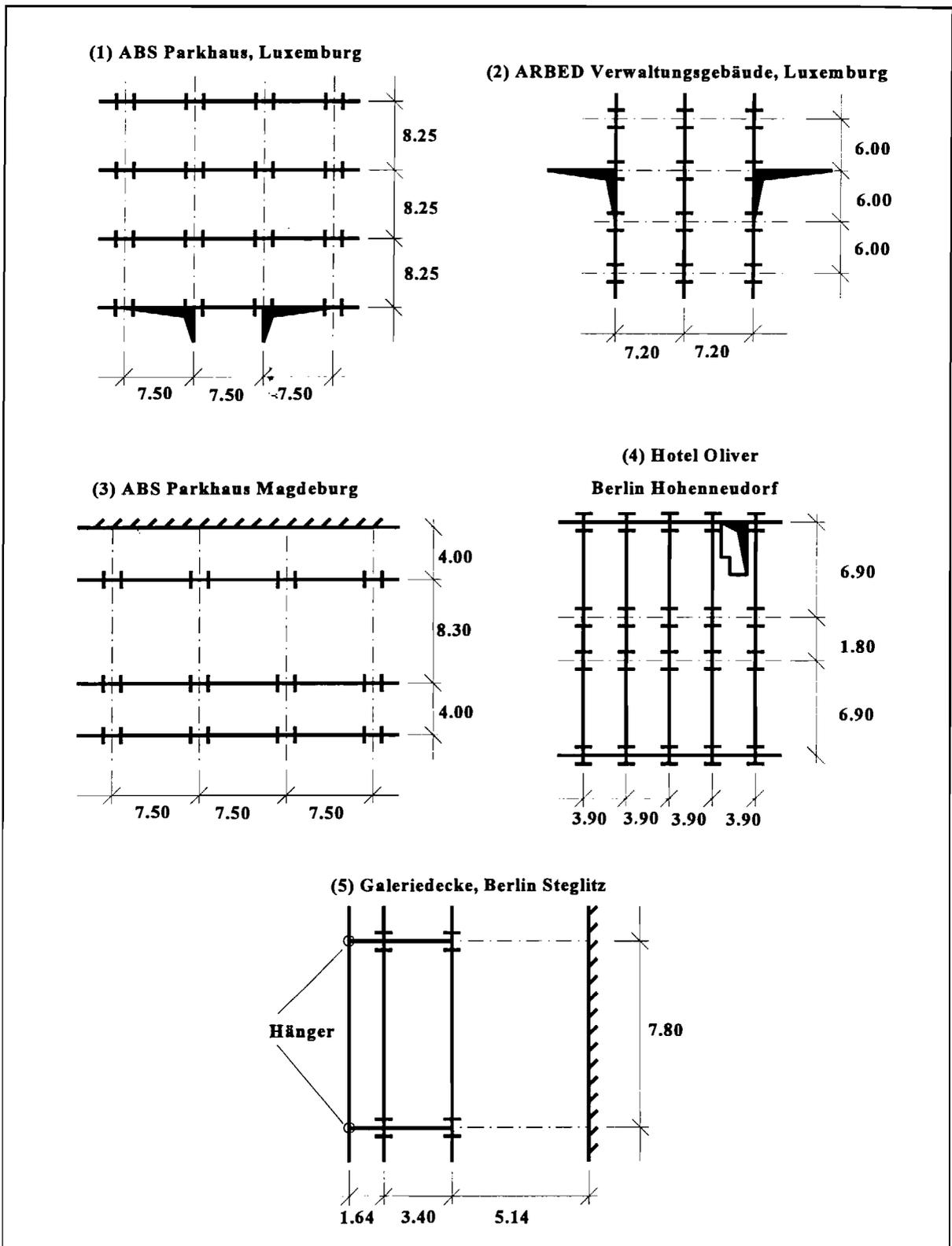
**Abb. 1:** Meßschrieb einer Schwingungsmessung

Mitarbeiter des Lehrstuhls für Stahlbau der RWTH Aachen haben Messungen nach der oben beschriebenen Methode an Flachdecken folgender Gebäude durchgeführt:

1. ABS Parkhaus, Esch sur Alzette, Luxemburg
2. ARBED Verwaltungsgebäude, Esch sur Alzette, Luxemburg
3. ABS Parkhaus, Magdeburg
4. Hotel Oliver, Berliner Str. 5, Berlin-Hohenneudorf
5. Galeriedecke Geschäftshaus, Schloßstraße 101, Berlin-Steglitz

Dieses Kapitel gibt u. a. die Auswertung der Messungen hinsichtlich der Eigenfrequenzen wieder.

In Bild 2 sind Ausschnitte der Grundrisse der oben erwähnten Bauwerke dargestellt.



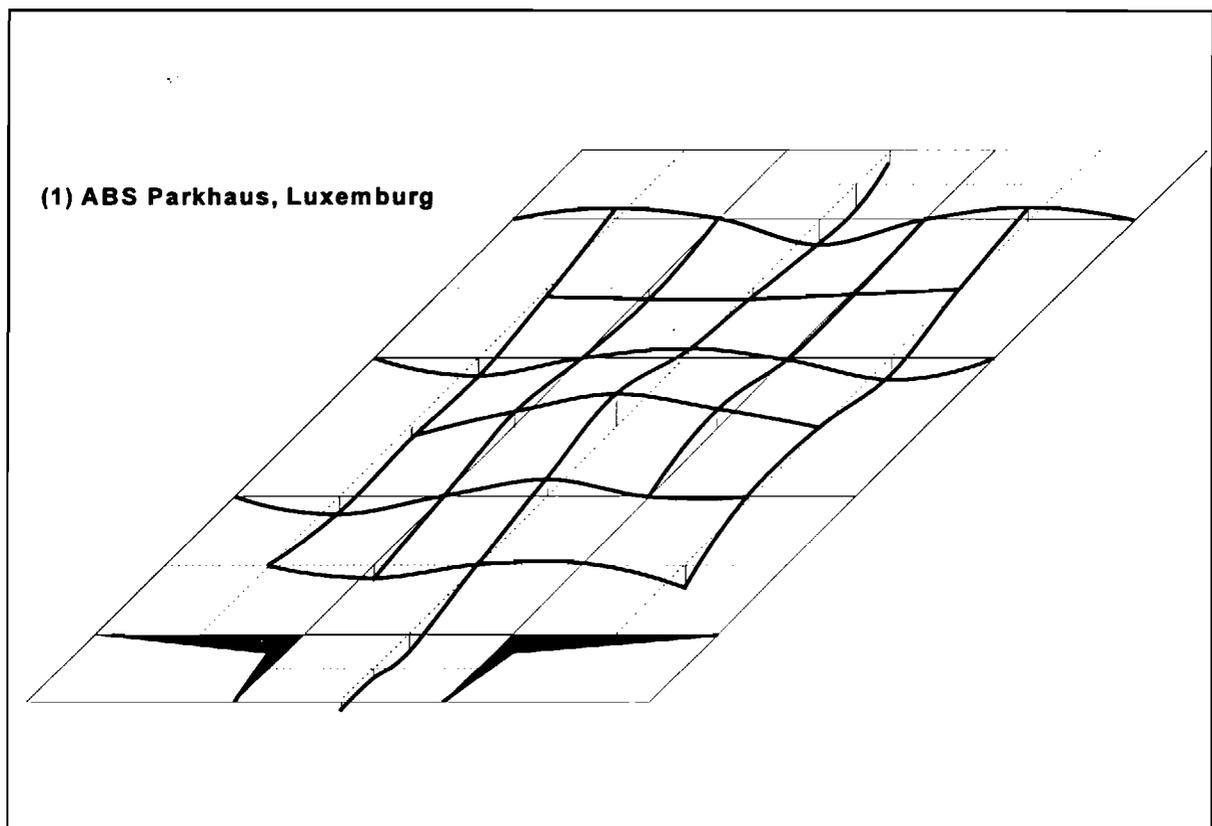
**Abb. 2:** Schematische Grundrisse der untersuchten Bauwerke mit Angabe der Stützensausrichtung

Die gemessenen Eigenfrequenzen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

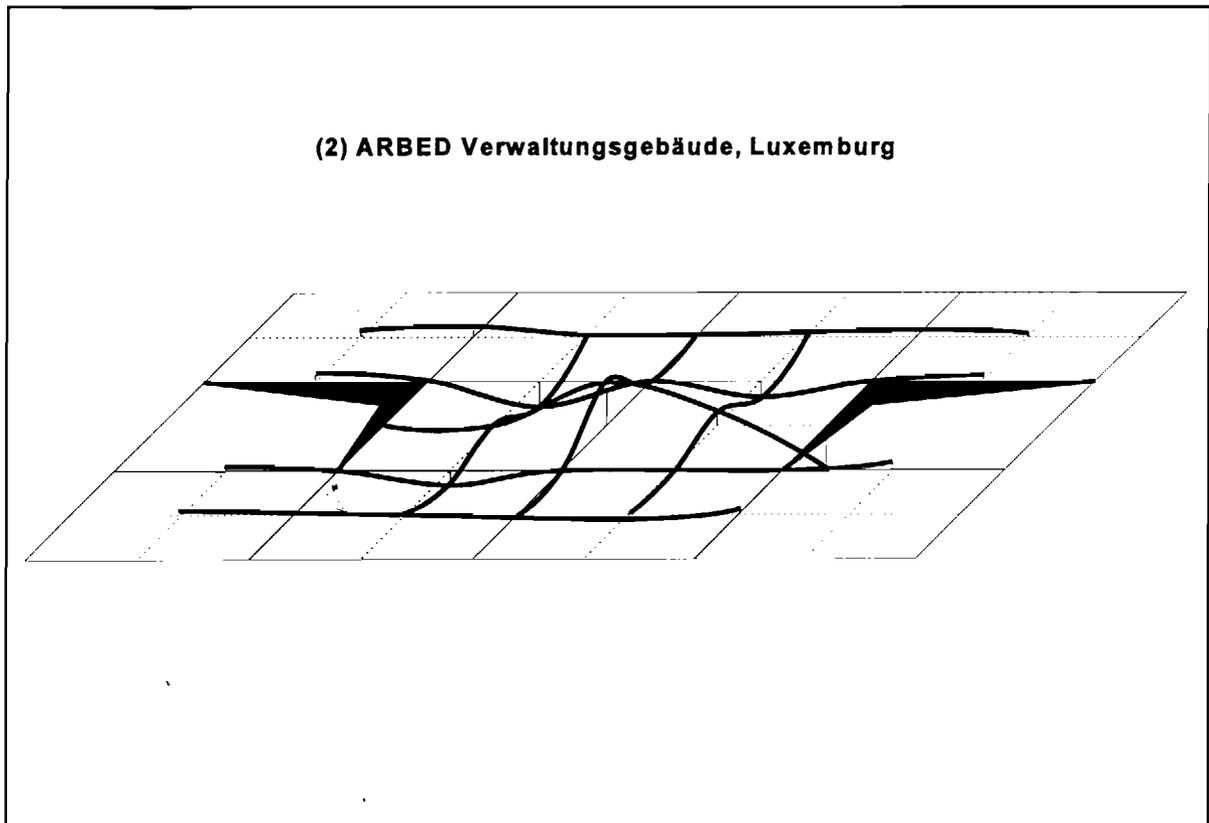
Nr.	Gebäude	Eigenfrequenz f [Hz]
1	ABS Parkhaus, Luxemburg	12.5
2	ARBED Verwaltung, Luxemburg	16.7
3	ABS Parkhaus, Magdeburg	10.9
4	Hotel Oliver, Berlin Hohenneudorf	15.2
5	Galeriedecke, Berlin Steglitz	10.9

**Tabelle 1:** Gemessene Eigenfrequenzen

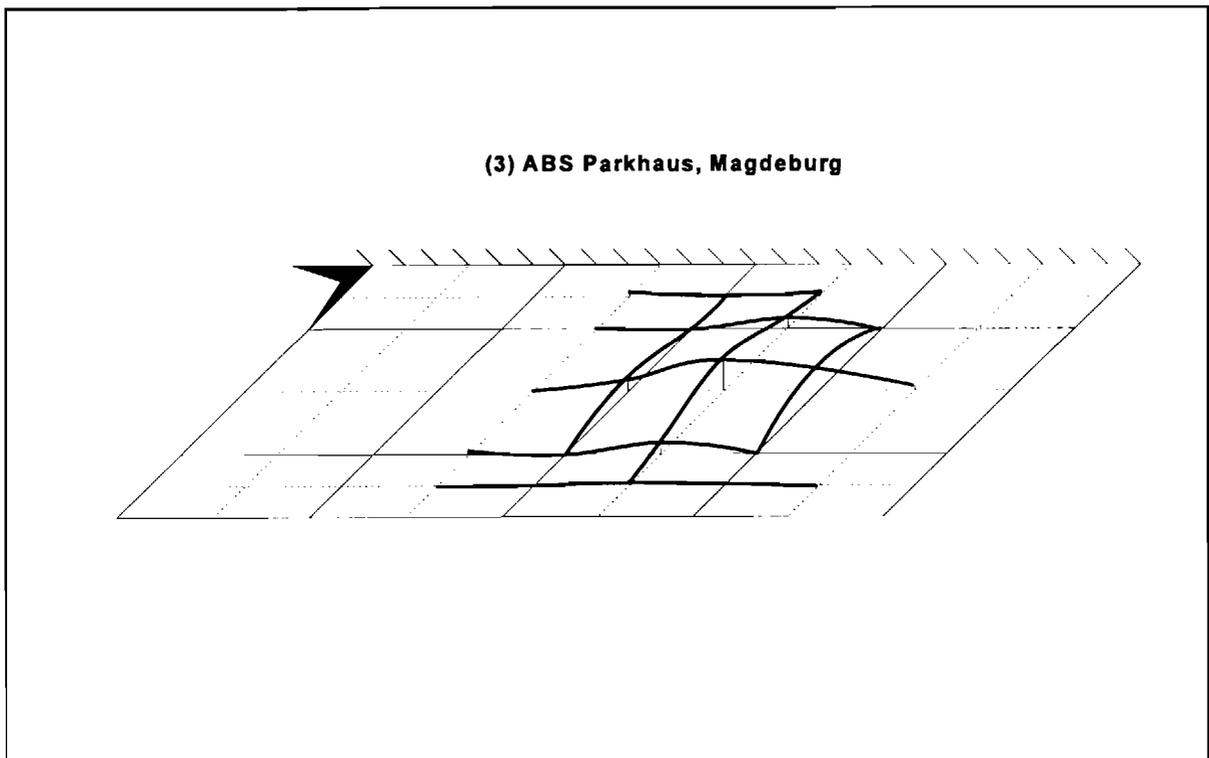
Die Bilder 3 bis 7 zeigen die Schwingungsgebirge, die sich aus den Messungen ergeben.



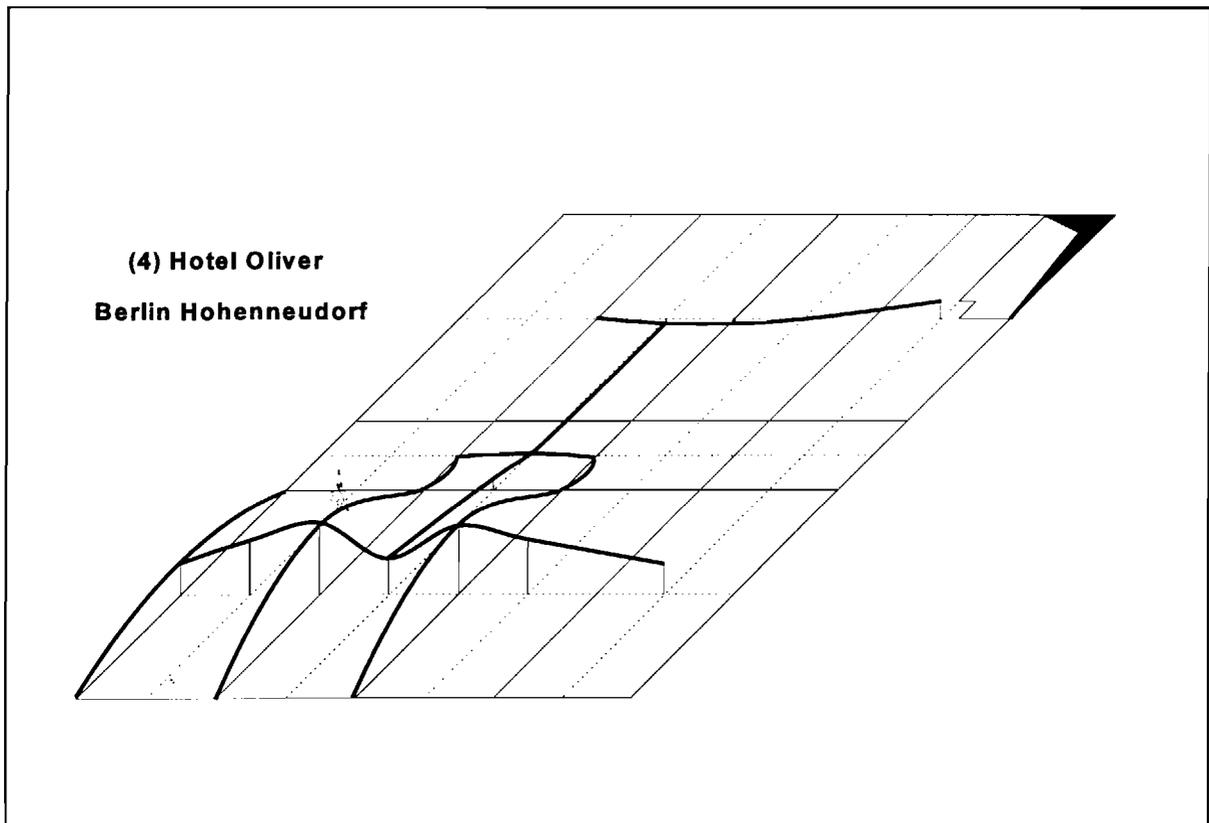
**Abb. 3:** Schwingungsgebirge ABS Parkhaus, Luxemburg



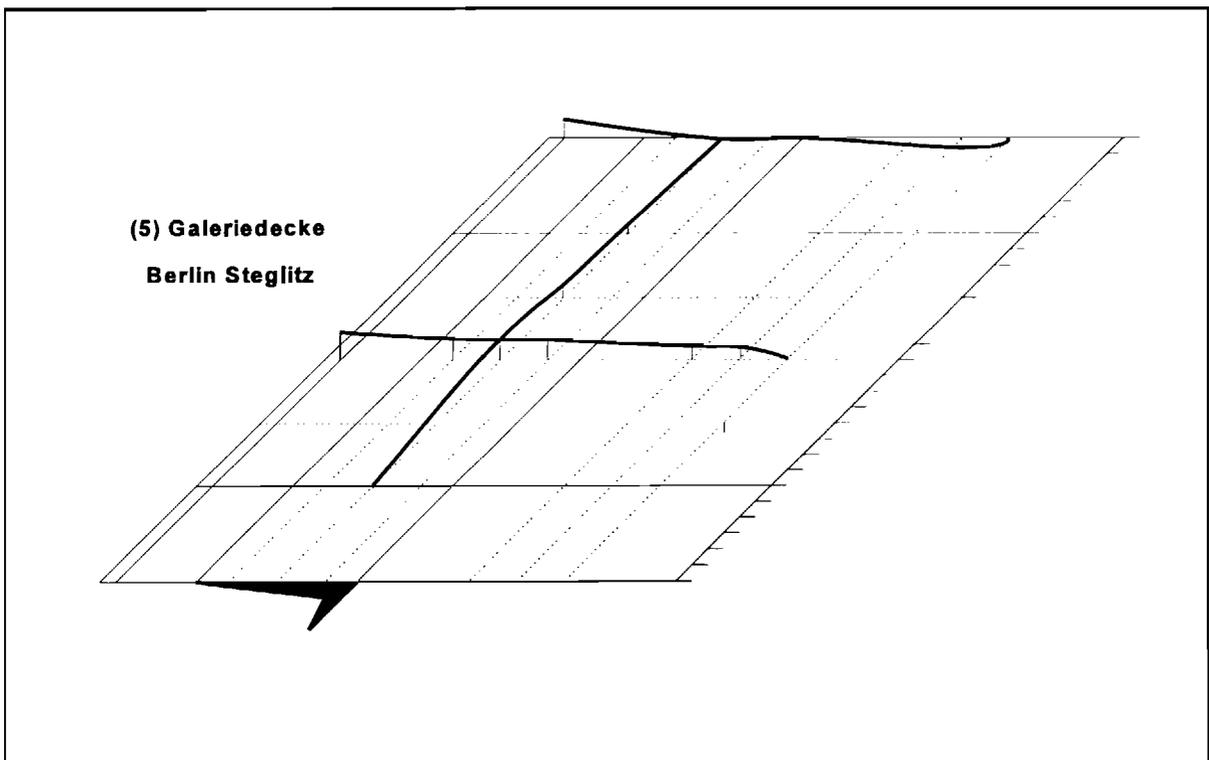
**Abb. 4:** Schwingungsgebirge ARBED Verwaltungsgebäude, Luxemburg



**Abb. 5:** Schwingungsgebirge ABS Parkhaus, Magdeburg



**Abb. 6:** Schwingungsgebirge Hotel Oliver, Berlin Hohenneudorf



**Abb. 7:** Schwingungsgebirge Galeriedecke, Berlin Steglitz

Die Ablesung der Meßgrößen auf dem Meßschrieb an zwei Punkten zur gleichen Zeit kann u. U. ungenau erfolgen, wenn eine geringe Phasenverschiebung vorhanden ist. Sind die Schwingungen an den beiden Meßpunkten gleich- oder gegenphasig, sind die Ergebnisse recht genau, da Maximalausschläge und Nulldurchgänge ohne schleifende Schnitte abgelesen werden können.

Das Hauptergebnis sind jedoch die Eigenfrequenzen (Tabelle 1), die durch diese Messungen exakt bestimmt werden können.

### **3 Eigenfrequenzberechnung**

Ein Hauptproblem bei der theoretischen Bestimmung der Eigenfrequenz ist die Festlegung des statischen Systems. Die Steifigkeiten und die Massen der einzelnen Bauteile hingegen können ohne große Fehler ermittelt werden.

Bei Flachdecken ohne für die Tragfähigkeit angesetzten Verbund wurden in der Vergangenheit Einfeldträger als statisches System angenommen und die Eigenfrequenz am ebenen Modell ermittelt. Durch dieses Vorgehen ergeben sich jedoch Eigenfrequenzen, die oft um ein Vielfaches unter den gemessenen liegen und somit schlicht falsch berechnet wurden.

Im folgenden wird daher versucht, ein realistisches und gleichzeitig ingenieurmäßiges Berechnungsschema zur genaueren Bestimmung der Eigenfrequenz von Flachdecken zu entwickeln.

Folgende Annahmen sind Ausgangsbasis für den Berechnungsvorschlag:

1. Die Schwingungsuntersuchungen werden im Gebrauchszustand durchgeführt. Dies bedeutet, daß die maßgebenden Verformungen, wie auch bei den Schwingungsmessungen, sehr klein sind. Daher hat ein ungewollter und natürlich auch der gewollte Verbund seine volle Wirkung, so daß sich eine Durchlaufwirkung einstellt.
2. Es handelt sich um ein Flächentragwerk, dessen Schwingungsverhalten durch ein einziges ebenes Modell nicht zufriedenstellend simuliert werden kann.
3. Die meist unterschiedlichen Tragwirkungen und Steifigkeiten in den zwei orthogonalen Richtungen müssen berücksichtigt werden.

Aufgrund der oben beschriebenen Punkte wird folgendes Vorgehen, das sich als zutreffend herausgestellt hat und auch physikalisch nachvollziehbar ist, zur Berechnung der Eigenfrequenz von Flachdecken vorgeschlagen:

1. Für ein Platteninnenfeld werden die beiden senkrecht aufeinander stehenden maßgebenden Schnitte folgendermaßen festgelegt:

Schnitt 1: in Plattenlängsrichtung

Schnitt 2: in Trägerlängsrichtung

Im Zweifelsfall muß die Eigenfrequenz für mehrere Schnitte in beide Richtungen bestimmt werden, wobei der Schnitt mit der kleinsten Frequenz maßgebend ist.

2. Bestimmung der Massenverteilung  $\mu$  [kg/m<sup>2</sup>].
3. Bestimmung der Steifigkeit EI [MNm<sup>2</sup>] für den jeweils betrachteten Schnitt.
4. Festlegen des statischen Systems. In den meisten Fällen kann wegen der sich einstellenden Durchlaufwirkung ein eingespannter Einfeldträger angenommen werden.
5. Berechnung der für jede Richtung maßgebenden kleinsten Eigenfrequenz:

$$f = \alpha_j^2 \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}} \frac{1}{2\pi}$$

$\alpha_1^2 = 22.37$  für einen beidseitig eingespannten Träger

$\alpha_1^2 = 9.869$  für einen frei aufliegenden Träger

$\alpha_1^2 = 3.516$  für einen Kragarm

$\alpha_1^2 = 15.418$  für einen Träger mit einem eingespannten und einem gelenkigen Auflager

Die Eigenfrequenzen können auch nach anderen Methoden berechnet werden.

In Plattenlängsrichtung kann die Ermittlung der Steifigkeiten und der Massenverteilung für einen 1m-Streifen erfolgen.

In Trägerlängsrichtung ist Steifigkeit des "Verbundträgers" unter Berücksichtigung mitwirkender Plattenbreiten  $b_m$  maßgebend. Die verteilte Masse ergibt sich aus der Einflußbreite des Trägers, die in der Regel die halbe Plattenlänge rechts und links des Trägers beträgt.

6. Die Eigenfrequenz der Flachdecke wird nun nach Dunkerley aus den Frequenzen des maßgebendes Schnittes der jeweiligen Richtung ermittelt:

$$\frac{1}{f_{th}^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2}$$

Auf diese Art wurden die Eigenfrequenzen der fünf untersuchten Bauwerke bestimmt. Die Ergebnisse sind nicht exakt, da Pläne und Statiken nur Schätzungen der Wirklichkeit darstellen.

Ein weiteres Problem ist, die Steifigkeiten der verputzten Spannbetonhohldielen, die bei den beiden Parkhäusern und dem Verwaltungsgebäude eingesetzt wurden, realitätsnah abzuschätzen. Überschlägig wurde mit den Werten des Vollquerschnittes gerechnet.

Auch die Abschätzung der mitwirkenden Plattenbreiten kann nur grob über bekannte Faustformeln geschehen.

Trotz der Vereinfachungen können die Berechnungen als genügend genau angesehen werden, da das statische System die Abschätzung der Eigenfrequenz am stärksten beeinflußt. Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Steifigkeiten und der Massenbelegung haben demgegenüber nur geringen Einfluß. Hinzu kommt, daß Steifigkeit und Massenbelegung in sehr engem Zusammenhang stehen, d. h. eine Änderung des einen Wertes zieht eine in etwa proportionale Veränderung der anderen Größe mit sich, wodurch das zur Eigenfrequenzberechnung benötigte Verhältnis der beiden Größen sich nur wenig ändert.

In Tabelle 2 sind die berechneten Eigenfrequenzen der maßgebenden Schnitte für die jeweilige Richtung und die resultierende Frequenz nach Dunkerley angegeben.

	$(EI)_1$ [MNm <sup>2</sup> /m]	$\mu_1$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$f_1$ [Hz]	$(EI)_2$ [MNm <sup>2</sup> ]	$\mu_2$ [kg/m]	$f_2$ [Hz]	$f_{th}$ [Hz]
1	57.12	530	17.17	168.5	4372.5	12.43	10.07
2	57.12	530	22.55	173.8	3816	21.11	15.41
3	57.12	530	16.97	168.5	3259.5	14.39	10.98
4	39.17	600	59.81	76.5	1104	19.68	18.69
5	23.15	575	25.53	50.94	1196	12.08	10.92

**Tabelle 2:** Für die jeweilige Richtung berechnete Eigenfrequenz und Überlagerung nach Dunkerley

Folgendes ist bei der Berechnung der Massenbelegung zu beachten:

Bei den Systemen mit ungewolltem, in der statischen Berechnung nicht angesetzten Verbund, d. h. bei den Slim-Floor-Decken (Nr. 1, 2, 3), berechnet sich die Massenbelegung in Trägerlängsrichtung aus der gesamten Einflußbreite. Dies bedeutet, daß jeweils das halbe Gewicht der Spannbetonfertigteilplatten von beiden Seiten des Slim-Floor-Trägers auf diesen wirken. Das Vorgehen ist dadurch zu erklären, daß die Betonplatten senkrecht zu ihrer

Haupttragrichtung praktisch keine Lasten abtragen.

Bei den "echten" Verbunddecken (Nr. 4, 5) wird der Plattenwirkung dadurch Rechnung getragen, daß nur ein Teil des Gewichts aus den Platten, nämlich die Masse im Bereich der mitwirkenden Plattenbreite, für die Eigenfrequenzberechnung in Trägerlängsrichtung angesetzt wird.

Im folgenden werden die Berechnungen der Eigenfrequenzen nach den Angaben aus der Traglaststatik durchgeführt ( $f_{\text{konv}}$ ) und in Tabelle 3 den resultierende Frequenzen nach Dunkerley ( $f_{\text{th}}$ ) und den gemessenen, also den tatsächlich vorhandenen Eigenfrequenzen ( $f_{\text{gemessen}}$ ), gegenübergestellt.

Für die Slim-Floor-Träger bedeutet dies, daß diese als gelenkig gelagerte Einfeldträger berechnet werden.

Nr.	Gebäude	$f_{\text{konv}}$ [Hz]	$f_{\text{th}}$ [Hz]	$f_{\text{gemessen}}$ [Hz]
1	ABS Parkhaus, Luxemburg	3.1	10.1	12.5
2	ARBED Verwaltungsgebäude	3.5	15.4	16.7
3	ABS Parkhaus, Magdeburg	3.6	11.0	10.9
4	Hotel Oliver	9.3	18.7	15.2
5	Galeriedecke, Steglitz	8.4	12.1	10.9

**Tabelle 3:** Vergleich der berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen

Folgendes Ergebnis ist aus Tabelle 3 zu entnehmen:

Wird zur Berechnung der Eigenfrequenz  $f_{\text{konv}}$  einer Flachdecke das für die Berechnung der Tragsicherheit gewählte ebene statische System herangezogen, ergeben sich Werte, die um ein Vielfaches unter den gemessenen liegen. Vor allem bei den Flachdecken in Slim-Floor-Bauweise wird die Eigenfrequenz viel zu niedrig abgeschätzt.

Die Berechnungen nach dem Vorschlag ( $f_{\text{th}}$ ) ergeben Frequenzen, die realistisch sind.

#### 4 **Schlußfolgerungen**

Zur Berechnung der Eigenfrequenz von Flachdecken wird der in Kapitel 3 beschriebene Vorschlag gemacht. Durch die Überlagerung der jeweils berechneten Frequenz aus zwei

Richtungen nach Dunkerley wird die gegenseitige Beeinflussung aus dem unterschiedlichen Tragverhalten berücksichtigt.

Die Berechnung nach Dunkerley ist eine Näherung, bei der die Eigenfrequenz immer etwas zu niedrig abgeschätzt wird. Durch dieses Verfahren können jedoch komplexe Tragwerke mit kompliziertem Schwingungsverhalten in einfache Systeme wie z. B. eingespannte Einfeldträger zerlegt werden, für die die Eigenfrequenzen auch mit verteilter Massenbelegung sehr einfach und zutreffend bestimmt werden können.

Aus dem Verfahren nach Dunkerley ergibt sich außerdem folgendes:

Haben die berechneten Eigenfrequenzen der beiden Richtungen unterschiedliche Größenordnungen, so hat die größere Frequenz wegen der Addition der quadratischen Kehrwerte nur einen geringen Einfluß auf die resultierende Eigenfrequenz.

Sind jedoch die Eigenfrequenzen der beiden Richtungen in etwa gleich, so wird die resultierende Eigenfrequenz erheblich abgemindert. Im Extremfall, d. h. bei genau gleichen Werten in beide Richtungen, beträgt die resultierende Eigenfrequenz noch ca. 71% der für ein ebenes Modell errechneten.

Eine andere Methode ist, die Eigenfrequenzberechnung für das komplette Flächentragwerk durchzuführen, ohne dieses in ebene Systeme aufzuteilen. Dies setzt jedoch den Einsatz geeigneter Computerprogramme voraus.

Noch eine weitere Möglichkeit ist denkbar: Zuerst wird einer der maßgebenden Schnitte ermittelt. Für dieses statische System wird dessen Ersatzsteifigkeit bestimmt. Für das statische System der anderen Richtung werden die Auflager mit Federn mit der vorher berechneten Ersatzsteifigkeit versehen. Dadurch kann die Eigenfrequenz für das gewählte System genau bestimmt werden, was jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Dieses ist jedoch nur eine Scheingenauigkeit, da immer noch die Massenverteilung und vor allem das statische System festgelegt werden muß, was oft nur durch wage Annahmen geschehen kann.

Zur Überprüfung des Berechnungsvorschlages und der gemachten Annahmen wäre es interessant, Schwingungsmessungen an einer Flachdecke in Slim-Floor-Bauweise mit Spannbetonfertigteilplatten durchzuführen, bevor die Fugen vergossen, der Auffüllbeton ein- und der Aufbeton bzw. der Estrich aufgebracht wird. In diesem Fall wären die statischen Systeme und die Massenverteilung eindeutig und könnten zum Vergleich mit bereits fertigen Bauten herangezogen werden.