

Hugo BACHMANN
Walter AMMANN

SCHWINGUNGSPROBLEME BEI BAUWERKEN

Durch Menschen und Maschinen
induzierte Schwingungen



International Association for Bridge and Structural Engineering
Association Internationale des Ponts et Charpentes
Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau

IABSE
AIPC
IVBH

Copyright © 1987 by
Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau

Alle Rechte vorbehalten. Nachdrucken und kopieren dieses Buches,
auch auszugsweise, in jeder Form, ohne schriftliche Einwilligung
des Verlegers, verboten.

ISBN 3 85748 051 3
Printed in Switzerland

Verleger:
IABSE - AIPC - IVBH
ETH - Hönggerberg
CH-8093 Zürich, Switzerland

Tel.: Int + 41 1 377 26 47
Telex: 822 186 IABS CH
Telegr.: IABSE, CH-8093 Zürich

VORWORT

Der praktisch tätige Bauingenieur sieht sich in zunehmendem Masse mit Problemen konfrontiert, die aus der Einwirkung zeitlich veränderlicher, d. h. dynamischer Lasten auf ein Bauwerk resultieren. Dies hat unter anderem folgende Gründe:

- Die in der heutigen Zeit geplanten oder erstellten Bauwerke weisen im Vergleich zu früher oft eine erhöhte Schwingungsanfälligkeit auf. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass durch die Verwendung hochwertiger Baustoffe und durch eine stärkere Ausnützung der Materialfestigkeiten einerseits die Spannweiten immer grösser und andererseits die Trägerhöhen und Deckenstärken zunehmend geringer geworden sind. Oft hat sich der Anteil des Eigengewichts bzw. der ständigen Lasten an der meist als statisch wirkend angenommenen Gesamtbelastung reduziert. Massenarme und schlanke, d. h. weniger steife Bauwerke sind jedoch schwingungsanfälliger als massige und gedrungene, d. h. steifere Bauwerke. Treten dann bei einem solchen modernen Bauwerk dynamische Lasten auf, so können erhebliche Schwingungsprobleme entstehen.
- Verschiedene dynamische Einwirkungen sind in letzter Zeit intensiver geworden. Beispielsweise führen Rationalisierungsmassnahmen dazu, dass in Fabrikationsanlagen immer leistungsfähigere Maschinen eingesetzt werden. Die Leistungssteigerung wird z. B. durch eine erhöhte Frequenz eines Produktionsprozesses erzielt, was zu erhöhten dynamischen Lasten und zu einer Mehrbeanspruchung des Bauwerks führen kann.
- Die Ansprüche seitens der Benutzer eines Bauwerks an die Gebrauchsfähigkeit haben sich erhöht. Die Menschen sind infolge der zunehmend auf sie einwirkenden Umwelteinflüsse auch in bezug auf Schwingungen empfindlicher geworden. Deshalb werden die Normen über zulässige Schwingungseinwirkungen auf den Menschen stetig verschärft. Dies bedeutet, dass z. B. Schwingungsamplituden reduziert werden müssen. Auch gesteigerte Ansprüche an die Präzision gewisser Fertigungsprodukte führen dazu, dass die entsprechenden Maschinen (z. B. Fräsmaschinen, Webmaschinen, etc.) nur noch begrenzte Schwingungen aufweisen dürfen.

Weiter ist zu erwähnen, dass neuartige Bauaufgaben eine exaktere Erfassung der verschiedenen Belastungsarten und des dynamischen Verhaltens eines Bauwerks erfordern. Dies ist z. B. der Fall bei Offshore-Konstruktionen, die hohe dynamische Wellenlasten aufzunehmen haben, oder bei kerntechnischen Anlagen, deren Sicherheit auch unter aussergewöhnlichen Belastungen, z. B. Erdbeben, gewährleistet sein sollte. Solche Problemstellungen haben sich jedoch bereits zu eigenständigen und umfangreichen Spezialgebieten entwickelt, die hier nicht dargestellt werden.

Das vorliegende Buch beschränkt sich im wesentlichen auf durch Menschen und Maschinen induzierte Bauwerksschwingungen. *Menscheninduzierte* Schwingungen entstehen insbesondere durch Gehen, Laufen, Hüpfen, Tanzen, etc. Dementsprechend treten sie meist bei Fussgängerbauwerken und einzelnen Hochbauten auf. Zu dieser Thematik gibt es bisher praktisch nur Publikationen über Detailprobleme. Hier wird der Versuch unternommen, über die menscheninduzierten Schwingungen eine systematische Gesamtdarstellung zu geben. *Maschineninduzierte* Schwingungen entstehen durch den Betrieb verschiedenartigster Maschinen und Geräte mit rotierenden, oszillierenden oder stossenden Teilen. Insbesondere über Maschinenfundamente, d.h. über die Lagerung meist grösserer Maschinen auf speziellen Unterkonstruktionen, existiert bereits eine umfangreiche Literatur. In der vorliegenden Arbeit stehen kleinere und mittlere Maschinen im Vordergrund, die auf normalen Geschossdecken in Industriebauten aufgestellt sind und unerwünschte Bauwerksschwingungen hervorrufen können. Entsprechende Fragestellungen sind bisher eher vernachlässigt worden. Es ergeben sich dabei aber weitgehend ähnliche Probleme wie bei den menscheninduzierten Schwingungen. Andere Fragestellungen, wie z. B. durch Maschinen induzierte Bodenerschütterungen und deren Auswirkungen auf andere Bauteile und Bauwerke, werden hier ebenfalls nicht behandelt.

Das Buch ist somit bewusst auf die Bedürfnisse des vor allem im Hochbau tätigen Bauingenieurs ausgerichtet und nicht in erster Linie für den Dynamikspezialisten gedacht. Es ist auch ausdrücklich nicht das Ziel dieses Buches, Anleitungen für die Durchführung umfangreicher dynamischer Berechnungen zu geben. Vielmehr stehen folgende Zielsetzungen im Vordergrund:

1. Aufzeigen, wo dynamische Probleme auftreten können und wo Vorsicht geboten ist.
2. Fördern des Verständnisses für die auftretenden Phänomene und für die grundlegenden Zusammenhänge.
3. Vermitteln von Grundlagen zur Abschätzung des dynamischen Verhaltens der betroffenen Bauwerke bzw. Bauteile.
4. Darstellen geeigneter Massnahmen sowohl vorbeugender Art bei Projektierungen als auch für den Fall erforderlicher Sanierungen.

Diese beschränkte Zielsetzung zwingt oft zu Vereinfachungen und zu Näherungen, deren Anwendbarkeit stets sorgfältig überprüft werden muss. In komplizierteren Fällen sind weitergehende Untersuchungen anhand der aufgeführten Literatur oder durch einen Spezialisten zu empfehlen.

Das Buch gliedert sich im wesentlichen in die folgenden Abschnitte:

- Im 1. Kapitel wird eine knappe Uebersicht über die Vielfalt dynamischer Probleme im Bauingenieurwesen gegeben. Nebst einer allgemeinen Charakterisierung der dynamischen Lasten wird dabei auf Themenkreise hingewiesen, die in diesem Buch nicht näher behandelt werden.

- Im 2. Kapitel werden die menscheninduzierten Schwingungen behandelt. Die dynamischen Lasten aus menschlichen Aktivitäten und deren Auswirkungen sowie mögliche Massnahmen zur Vermeidung oder Begrenzung resultierender Schwingungen bei Fussgängerbauwerken, Bürogebäuden, Turn- und Sporthallen, Tanzlokalen und Konzertsälen sowie bei Sprungtürmen in Schwimmbädern werden eingehend dargestellt.
- Im 3. Kapitel werden die maschineninduzierten Schwingungen im Rahmen der oben erwähnten Einschränkungen behandelt. Wiederum werden die dynamischen Lasten, deren Auswirkungen und die verschiedenen möglichen Massnahmen dargestellt.
- Im 4. Kapitel werden Anhaltswerte für die Auswirkungen dynamischer Lasten behandelt. Diese können bei der Beurteilung von Schwingungsproblemen gelegentlich auch als zulässige Werte verwendet werden.
- Im Anhang A sind ausgewählte Fälle von menschen- und maschineninduzierten Schwingungsproblemen bei Bauwerken beschrieben. Teilweise werden auch Sanierungen dargestellt und erläutert. Aus derartigen praktischen Fällen, insbesondere aus Schadenfällen, lassen sich oft wesentliche Lehren ziehen.
- Im Anhang B sind die wichtigsten Grundlagen aus der Dynamik dargestellt. Gleichentfalls finden sich eine Formelsammlung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen von Balken (Trägern) und Platten (Decken) sowie die Grundlagen für die Bemessung von Schwingungstilgern. Im weiteren werden Hinweise zu den dynamischen Eigenschaften der wichtigsten Baustoffe gegeben.

Zu verschiedenen der behandelten Fragestellungen und Probleme, insbesondere im Bereich der menscheninduzierten Schwingungen, liegen oft nur in beschränktem Umfang Forschungsergebnisse und praktische Erfahrungen vor. Die Verfasser sind deshalb dankbar für Hinweise und Kritik sowie für Beschreibungen weiterer praktischer Fälle.

Die Autoren möchten sich herzlich bedanken: Bei Fachkollegen, die praktische Fälle zur Verfügung gestellt oder durch fachliche Diskussionen und aufbauende Kritik Unterstützung geleistet haben, bei Herrn Dr. D. Somaini, Dipl. Bauing. ETH, der beim Abfassen verschiedener Abschnitte massgeblich beteiligt war, sowie bei Frl. S. Burki, Frl. R. Feusi, Frau S. Schenkel, Dipl. Bauing. ETH, Frl. H. Ungricht, Dipl. Bauing. ETH, Herrn K. Baumann, Dipl. Bauing. ETH, Herrn R. Vogt, Dipl. Bauing. ETH, und Herrn L. Sieger, die beim Bereinigen und Schreiben des Textes und bei der Gestaltung der Bilder mitgewirkt haben.

Vorwort

Inhaltsverzeichnis

<i>1. Uebersicht über baudynamische Probleme</i>	1
1.1 Charakterisierung der dynamischen Lasten	1
1.1.1 Allgemeines	1
1.1.2 Harmonische Lasten	4
1.1.3 Periodische Lasten	4
1.1.4 Transiente Lasten	4
1.1.5 Impulsartige Lasten	5
1.1.6 Weitere Merkmale der Lasten	5
1.2 Auswirkungen der dynamischen Lasten und entsprechende Massnahmen	5
1.2.1 Allgemeines	5
1.2.2 Menscheninduzierte Schwingungen	7
1.2.3 Maschineninduzierte Schwingungen	7
1.2.4 Windinduzierte Schwingungen	8
1.2.5 Wasserwelleninduzierte Schwingungen	9
1.2.6 Erdbebeninduzierte Schwingungen	9
1.2.7 Erschütterungen durch Schienen- und Strassenverkehr	10
1.2.8 Erschütterungen durch Bauarbeiten	10
1.2.9 Aufprallinduzierte Beanspruchungen	11
1.2.10 Explosionsinduzierte Beanspruchungen	11
1.2.11 Beanspruchungen durch plötzlichen Ausfall tragender Bauteile	12
<i>2. Menscheninduzierte Schwingungen</i>	13
2.1 Allgemeines	13
2.2 Dynamische Lasten aus menschlichen Aktivitäten	13
2.2.1 Gehen, Laufen	14
a) Allgemeine Charakterisierung	14
b) Zeitlicher Verlauf der vertikalen Last	16
c) Zeitlicher Verlauf der horizontalen Last	23
d) Einfluss mehrerer Personen	25
e) Mutwilliges Anregen	27

2.2.2	Hüpfen	27
	a) Allgemeine Charakterisierung	27
	b) Zeitlicher Verlauf der Last	28
	c) Einfluss mehrerer Personen	31
	d) Mutwilliges Anregen	32
2.2.3	Tanzen	32
2.2.4	Einzelstösse	33
2.3	Auswirkungen menscheninduzierter Schwingungen	33
2.4	Massnahmen gegen menscheninduzierte Schwingungen	35
2.4.1	Fussgängerbauwerke	36
	a) Frequenzabstimmung	36
	b) Berechnung einer erzwungenen Schwingung	38
	c) Sondermassnahmen	38
2.4.2	Bürogebäude	39
	a) Frequenzabstimmung	40
	b) Berechnung einer erzwungenen Schwingung	41
	c) Sondermassnahmen	41
2.4.3	Turn- und Sporthallen	41
	a) Frequenzabstimmung	42
	b) Berechnung einer erzwungenen Schwingung	43
	c) Sondermassnahmen	44
2.4.4	Tanzlokale und Konzertsäle	44
	a) Frequenzabstimmung	44
	b) Berechnung einer erzwungenen Schwingung	45
	c) Sondermassnahmen	46
2.4.5	Sprungtürme	46
3.	<i>Maschineninduzierte Schwingungen</i>	49
3.1	Allgemeines	49
3.2	Dynamische Lasten verschiedener Maschinentypen	49
	3.2.1 Maschinen mit rotierenden Teilen	50
	3.2.2 Maschinen mit oszillierenden Teilen	54
	3.2.3 Maschinen mit stossenden Teilen	58
3.3	Auswirkungen maschineninduzierter Schwingungen	60
	3.3.1 Auswirkungen infolge der eigentlichen Schwingungen	60
	3.3.2 Auswirkungen infolge von Luftschall- und Körperschallwellen	62
3.4	Massnahmen gegen maschineninduzierte Schwingungen	63
	3.4.1 Maschinen mit vorwiegend rotierenden oder oszillierenden Teilen	63
	a) Frequenzabstimmung	64
	b) Berechnung einer erzwungenen Schwingung	71
	c) Sondermassnahmen	71

3.4.2	Maschinen mit vorwiegend stossenden Teilen	71
a)	Frequenzabstimmung	72
b)	Berechnung einer erzwungenen Schwingung	72
4.	Anhaltswerte für Schwingungseinwirkungen	75
4.1	Allgemeines	75
4.2	Anhaltswerte für Bauwerke	76
4.2.1	Norm DIN 4150, Teil 3 (1983)	78
4.2.2	Norm SN 640312 (1978)	79
4.2.3	Richtlinien KDT 046/72 (1972)	79
4.2.4	Entwurf ISO/DIS 4866 (1984)	82
4.3	Anhaltswerte für Personen	82
4.3.1	Norm DIN 4150, Teil 2 (1975)	84
4.3.2	Norm ISO 2631 (1980)	88
4.3.3	Richtlinie VDI 2057 (1981)	90
4.3.4	BRE Digest 278 (1983)	91
4.3.5	British Standard BS 5400, Part 2 (1978)	91
4.3.6	British Standard BS 6472 (1984)	91
4.3.7	NBC Canada, Commentary A (1985)	92
4.3.8	Vorschrift SBA 123 (1982)	92
4.3.9	Nichtnormierte Anhaltswerte für Fussgängerbauwerke aus der Literatur	93
4.4	Anhaltswerte für Maschinen und Einrichtungen	94
4.5	Grobe Anhaltswerte für verschiedene Bauwerkstypen bzw. Nutzungsarten	96
<i>ANHANG A: Praktische Fälle</i>		99
Fall Nr. 1:	Fussgängerbrücke mit $f_1 \cong 1.92 \text{ Hz}$	99
Fall Nr. 2:	Fussgängerbrücke mit $f_1 \cong 2.3 \text{ Hz}$	101
Fall Nr. 3:	Fussgängerbrücke mit $f_1 \cong 4 \text{ Hz}$	101
Fall Nr. 4:	Horizontal quer schwingende Fussgängerbrücke mit $f_{1,hq} \cong 1.1 \text{ Hz}$	103
Fall Nr. 5:	Bürogebäude	103
Fall Nr. 6:	Messepavillon	105
Fall Nr. 7:	Turnhalle	107
Fall Nr. 8:	Sporthalle mit Tribüne	110
Fall Nr. 9:	Gymnastiklokal	110
Fall Nr. 10:	Konzertsaal mit Popmusik-Konzerten	110
Fall Nr. 11:	Tribüne in Stadion	112
Fall Nr. 12:	10 m-Sprungturm	113
Fall Nr. 13:	5 m-Sprungturm	114
Fall Nr. 14:	10 m-Sprungturm in Hallenbad	114
Fall Nr. 15:	Webereigebäude	114
Fall Nr. 16:	Industriegebäude mit Kunststoff-Formmaschinen	116

Fall Nr. 17: Industriegebäude mit Metallverformungspresse	118
Fall Nr. 18: Industriegebäude mit Bohrautomaten	119
Fall Nr. 19: Molkereigebäude mit Butterfässern	120
Fall Nr. 20: Industriegebäude mit Prägepressen	121
Fall Nr. 21: Fertigungs- und Montagegebäude mit Fräs- und Schleifmaschinen	122
Fall Nr. 22: Schulhaus mit Wärmepumpenanlage	122

ANHANG B: Grundlagen der Schwingungsberechnung 125

B 1 Einmassenschwinger	126
B 1.1 Freie Schwingung	126
B 1.2 Erzwungene Schwingung infolge äusserer Last	130
B 2 Mehrmassenschwinger	139
B 2.1 Freie Schwingung	139
B 2.2 Erzwungene Schwingung infolge äusserer Last	141
B 3 Kontinuierliche Systeme, Eigenfrequenzen	146
B 3.1 Einfache Balken	146
B 3.2 Durchlaufträger	148
B 3.3 Rahmen	148
B 3.4 Bogen	149
B 3.5 Platten	152
B 3.6 Dynamische Näherungsberechnung von Systemen mit kontinuierlicher Massenverteilung	155
B 4 Harmonische Analyse	158
B 5 Frequenzabstimmung	163
B 5.1 Tiefabstimmung	164
B 5.2 Hochabstimmung	168
B 6 Bauwerksverhalten unter stossartiger Last	169
B 6.1 Einzelstösse	169
B 6.2 Periodische Stösse	171
B 7 Schwingungstilger	172
B 7.1 Prinzip	172
B 7.2 Arten von Schwingungstilgern	173
B 7.3 Lineare Schwingungstilger	173
B 7.4 Stosstilger	176
B 8 Materialkennwerte bei dynamischer Beanspruchung	177
B 8.1 Festigkeits- und Dehnkennwerte	177
B 8.2 Biegesteifigkeit ungerissener und gerissener Stahlbetonkonstruktionen	179
B 8.3 Dämpfungskennwerte	181

Literaturverzeichnis	185
Bezeichnungen	190

1. UEBERSICHT UEBER BAUDYNAMISCHE PROBLEME

In diesem Kapitel wird zunächst eine Charakterisierung der dynamischen Lasten vorgenommen. Anschliessend sind ihre Auswirkungen und mögliche Massnahmen zu deren Begrenzung dargestellt.

1.1 Charakterisierung der dynamischen Lasten

1.1.1 Allgemeines

Im weitesten Sinn kann ein Grossteil der im Bauingenieurwesen vorkommenden Lasten als dynamische Lasten bezeichnet werden, weil sie veränderlich in der Zeit sind. Zu praktischen Zwecken können jedoch langsam aufgebrachte Lasten als statische Lasten behandelt werden, weil die durch die langsame Lastaufbringung hervorgerufenen Trägheits- und Dämpfungskräfte so klein sind, dass sie vernachlässigt werden können. Der wesentliche Unterschied zwischen statischen und dynamischen Lasten besteht somit im Vorhandensein von Trägheits- und Dämpfungskräften. Diese Kräfte beruhen auf den im Bauteil induzierten Beschleunigungen bzw. Geschwindigkeiten, und sie müssen bei der Ermittlung der Schnittkräfte und der Auflagerreaktionen berücksichtigt werden. Der zeitliche Verlauf und der Maximalwert dieser dynamischen Kräfte hängen sowohl von der Art der Einwirkung als auch vom eigentlichen dynamischen Verhalten des Bauwerks (Schwingungsverhalten) selbst ab.

Je nach zeitlichem Verlauf können folgende dynamische Lasten unterschieden werden (vgl. Bilder 1.1 und 1.2):

- harmonische Lasten
- periodische Lasten
- transiente Lasten
- impulsartige Lasten.

2. MENSCHENINDUZIERTE SCHWINGUNGEN

2.1 Allgemeines

In zunehmendem Masse treten Fälle auf, wo Bauwerke durch Menschen zu störenden oder gar schädlichen Schwingungen angeregt werden. Wegen der verhältnismässig geringen und meist als statisch wirkend angenommenen Nutzlast werden solche Tragwerke oft sehr schlank konstruiert, und es wird übersehen oder die Gefahr unterschätzt, dass dynamische Lasten für die Dimensionierung massgebend sein können. Andererseits stellen früher kaum übliche Aktivitäten und Veranstaltungen wie beispielsweise Konditionstrainings zu rhythmischer Musik in Turnhallen dynamische Einwirkungen dar, die zu erheblichen Beanspruchungen führen können. Dabei geht es meist weniger um eine unzulässige Beanspruchung der eigentlichen Tragstruktur des Bauwerks, sondern um eine mögliche Beschädigung sekundärer Bauteile (z. B. Fassadenelemente, Fenster) sowie vor allem um eine mögliche Beeinträchtigung von Personen. Diese können sich durch derartige Schwingungen stark verunsichert fühlen, was bis zum fluchtartigen Verlassen des Aufenthaltsortes gehen kann (vgl. [2.1] bzw. Praktischer Fall Nr. 7). Dabei werden durch andere Personen bzw. Personengruppen induzierte Schwingungen oft als unangenehmer empfunden, als wenn die Betroffenen selbst an der Anregung beteiligt sind. Bei menscheninduzierten Schwingungen handelt es sich somit vorwiegend um ausgesprochene Gebrauchsfähigkeitsprobleme.

Im vorliegenden Kapitel werden vorerst die aus den verschiedenen menschlichen Aktivitäten resultierenden dynamischen Lasten dargestellt. Anschliessend werden ihre Auswirkungen aufgezeigt. Die zu treffenden Massnahmen sind nach den wichtigsten Bauwerkstypen, bei denen mit menscheninduzierten Schwingungen gerechnet werden muss, gegliedert.

2.2 Dynamische Lasten aus menschlichen Aktivitäten

Der Mensch verursacht als Folge körperlicher Aktivitäten die verschiedensten dynamischen Lasten. Dabei kann es sich um periodische oder um transiente Lasten handeln (vgl. Bild 1.1).

Periodische Lasten resultieren vor allem aus den folgenden menschlichen Bewegungsformen:

- Gehen
- Laufen
- Hüpfen
- Tanzen.

3. MASCHINENINDUZIERTE SCHWINGUNGEN

3.1 Allgemeines

Maschineninduzierte Schwingungen von Bauwerken bzw. Bauteilen haben in der Praxis eine zunehmende Bedeutung. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Nebst den bauwerksseitigen Aspekten wie stärkere Materialausnützung und grössere Spannweiten sind es oft neuartige, meist vergrösserte oder schneller laufende Maschinen, die zu Problemen führen. Die auftretenden Schwingungen können dann unter Umständen die Inbetriebnahme neuer Fabrikationsanlagen beeinträchtigen oder sogar gänzlich verhindern. Häufig geht es dabei in erster Linie nicht um die Beanspruchung des Bauwerks und um daraus resultierende Sicherheitsprobleme, sondern um die Beeinträchtigung von Personen, die sich dauernd oder vorübergehend in der Nähe der Maschinen aufhalten müssen, sowie um fabrikationstechnische Probleme, indem beispielsweise die ungewollten Bewegungen der Maschine zu fehlerhaften Produkten führen können. Bei maschineninduzierten Schwingungen handelt es sich somit meist – ähnlich wie bei menscheninduzierten Schwingungen – um Gebrauchsfähigkeitsprobleme.

Im vorliegenden Kapitel werden zu Beginn die dynamischen Lasten verschiedener Maschinentypen charakterisiert. Anschliessend werden die möglichen Auswirkungen auf die betroffenen Bauwerke bzw. Bauteile erläutert und geeignete Massnahmen dargestellt. Dabei stehen kleinere und mittlere Maschinen im Vordergrund, die auf Geschossdecken montiert sind und unerwünschte Bauwerksschwingungen bewirken können.

3.2 Dynamische Lasten verschiedener Maschinentypen

Je nach Fabrikationszweck, Zustand und Ausgestaltung der Maschinen wirken diese mit sehr unterschiedlichen dynamischen Lasten auf die betroffenen Bauwerke bzw. Bauteile ein. Diese Lasten hängen insbesondere davon ab, ob die massgebenden Einwirkungen von rotierenden, oszillierenden oder stossenden Teilen in der Maschine stammen. Die nachfolgende Unterscheidung der dynamischen Lasten verschiedener Maschinentypen stützt sich dementsprechend auf diese drei Einwirkungsarten ab.

Der zeitliche Verlauf der abgegebenen dynamischen Lasten ist in der Regel periodisch, in Ausnahmefällen sogar harmonisch (vgl. Abschnitt 1.1, Bild 1.1 und Bild 1.2). Jede periodische Last kann jedoch durch Fourier-Zerlegung in eine Anzahl harmonischer Lastanteile aufgeteilt werden. Die entsprechenden theoretischen Erläuterungen sind im Anhang B 4 dargestellt.

4. ANHALTSWERTE FÜR SCHWINGUNGSEINWIRKUNGEN

4.1 Allgemeines

In der Praxis des Bauingenieurs geht es häufig darum, gemessene oder gerechnete Schwingungswerte (z. B. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Verschiebungen) zu beurteilen. Dazu dienen die sogenannten Anhaltswerte. Wie dieser Begriff andeutet, handelt es sich um Richtwerte, bei deren Ueber- bzw. Unterschreitung nicht unbedingt ein bereits unzulässiger Zustand eintreten muss. Nur in seltenen Fällen geben Anhaltswerte eine mehr oder weniger feststehende Grenze an, sondern vielmehr eine zweckmässige Grössenordnung, die eine gewisse Streubreite beinhaltet. Trotzdem werden Anhaltswerte auch im Sinne zulässiger Werte benützt, z. B. wenn sie Bestandteil von Verträgen oder anderen Bindungen sind.

Anhaltswerte für Schwingungen von Bauwerken bzw. Bauteilen unter dynamischen Lasten können durch folgende Auswirkungen bestimmt sein:

- Beanspruchungen des Bauwerks bzw. Bauteils (Verformungen, Ermüdung, Festigkeit)
- physiologische Wirkungen auf Personen (mechanische, akustische, optische Einwirkungen)
- Einflüsse auf Produktionsprozesse (Toleranzprobleme bei Erzeugnissen, etc.) sowie Beanspruchungen von Maschinen und Einrichtungen (Verformungen, Ermüdung, Festigkeit).

Das Festlegen der verschiedenen Anhaltswerte bzw. der zulässigen Werte für Schwingungen ist ein komplexes Problem. Nebst der Definition zulässiger Schwingungswerte für Maschinen und Einrichtungen mit Rücksicht auf Produktionsprozesse gehört die Festlegung von Anhaltswerten bezüglich der physiologischen Wirkung von Schwingungen auf Personen zu den schwierigsten Problemen, und sie weist einen erheblichen Ermessensspielraum auf. Etwas zuverlässiger sind demgegenüber meist Angaben über Anhaltswerte für die Bauwerksbeanspruchungen. Dies deshalb, weil diese Art Schwingungen relativ einfach erfasst und beurteilt werden kann.

Anhaltswerte können als physikalische Grössen, insbesondere als

- Schwingweg
 - Schwinggeschwindigkeit
 - Schwingbeschleunigung
- oder auch als
- empirisch abgeleitete Grösse (z. B. als KB-Wert nach [4.1]) ausgedrückt werden.

Entsprechend den verschiedenen oben erwähnten Auswirkungen werden die zulässigen Werte festgelegt als

Anhang A

PRAKTISCHE FÄLLE

Nachfolgend werden praktische Fälle mit menschen- und maschineninduzierten Schwingungen beschrieben. Meist handelt es sich um Problemfälle mit interessanten Merkmalen, die zu Beanstandungen Anlass gegeben haben und bei denen teilweise auch die Sanierung beschrieben wird. Die Fälle werden im Hinblick auf den praktischen Nutzen bewusst nicht auf abstrakte Weise dargestellt, sondern möglichst wirklichkeitsnah geschildert.

Die Fälle entstammen teilweise eigener Expertentätigkeit, oder sie konnten der Literatur entnommen werden. Zum Teil wurden sie den Verfassern auch von Berufskollegen mit der Erlaubnis zur Veröffentlichung zur Verfügung gestellt. Hiefür möchten sich die Verfasser ausdrücklich bedanken. Sie wären auch den Lesern dankbar für Hinweise auf weitere interessante Fälle und entsprechende Beschreibungen. Aus solchen Fällen, insbesondere aus Schadenfällen, lassen sich oft wesentliche Lehren ziehen.

Fall Nr.1: Fussgängerbrücke mit $f_1 = 1.92 \text{ Hz}$

Eine als einfacher Balken mit einer Spannweite von 40 m ausgebildete Fussgängerbrücke wies unter normalen Betriebsbedingungen (Begehung durch Passanten) deutlich spürbare Vertikalschwingungen auf [A1.1]. Um die Zulässigkeit dieser Schwingungen abzuklären, wurden Versuche und Messungen durchgeführt.

Bild A1.1a zeigt einen Ausschnitt aus einem typischen Messverlauf der Brückenschwingungen in vertikaler Richtung (Schwinggeschwindigkeit). Kennzeichnend ist der schwebartige Verlauf, der sowohl bei normaler Begehung durch Passanten als auch bei einer Anregung durch drei in Brückenmitte kontinuierlich hüpfende Personen (mutwilliges Anregen) zu beobachten war. Bild A1.1b zeigt einen Ausschnitt aus einem Ausschwingversuch nach Impulsanregung durch drei synchron hüpfende Personen (Einzelimpuls). In zwei verschiedenen Messzyklen ergab sich beim Passieren von ca. 29 Personen pro Minute eine maximale Schwingwegamplitude von $\pm 4.6 \text{ mm}$, was einer Beschleunigung von 6.7% g entspricht. Das Dämpfungsmass konnte aus drei Ausschwingversuchen zu 2.3%,

Anhang B

GRUNDLAGEN DER SCHWINGUNGSBERECHNUNG

Im Anhang B werden Grundlagen aus der Dynamik dargestellt, soweit dies für ein besseres Verständnis der in den Kapiteln 2 und 3 behandelten Problemstellungen erforderlich ist. Für wichtige praktische Probleme sind Beispiele beigelegt. Für die Lösung von Problemstellungen, die ausserhalb der Zielsetzung dieser Unterlagen liegen, wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Der Anhang B umfasst folgende Abschnitte:

- B 1 Einmassenschwinger
- B 2 Mehrmassenschwinger
- B 3 Kontinuierliche Systeme, Eigenfrequenzen
- B 4 Harmonische Analyse
- B 5 Frequenzabstimmung
- B 6 Bauwerksverhalten unter stossartiger Last
- B 7 Schwingungstilger
- B 8 Materialkennwerte bei dynamischer Belastung

Die Behandlung der Bewegungs-Differentialgleichung erfolgt im allgemeinen mit der komplexen Schreibweise, so dass der Phasenwinkel implizit berücksichtigt wird. In verschiedenen Bereichen wird jedoch auch die klassische Schreibweise mit Hilfe der Winkelfunktionen benützt. Bei den beiden Schreibweisen werden für die Verschiebungsgrössen in der Regel folgende Bezeichnungen verwendet:

- $u(t)$ = komplexe Schreibweise
- $x(t)$ = klassische Schreibweise

LITERATURVERZEICHNIS

Kapitel 1: Uebersicht über baudynamische Probleme

- [1.1] Ammann W., Mühlematter M., Bachmann H.: «Zugversuche an Bewehrungs- und Spannstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit», Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Bericht Nr. 7709-1, Birkhäuser Verlag Basel, Stuttgart, Juni 1982.
- [1.2] Ammann W.: «Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stossartiger Belastung», Dissertation No. 7285, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Juni 1983.

Kapitel 2: Menscheninduzierte Schwingungen

- [2.1] Bachmann H.: «Durch Menschen verursachte Bauwerksschwingungen am Beispiel einer Turnhalle», Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 6, 1983.
In Englisch: «Vibrations of Building Structures Caused by Human Activities, Case Study of a Gymnasium», National Research Council of Canada, Technical Translation 2077, 1984.
- [2.2] Matsumoto, Y., Nishioka T., Shiojiri H., Matsuzaki K.: «Dynamic Design of Footbridges», IABSE-Proceedings, P-17/78, August 1978.
- [2.3] Schulze H.: «Dynamische Einflüsse der Verkehrslast auf Fussgängerbrücken», Signal und Schiene, Heft 2, pp 91-93 und Heft 3, pp 143-147, 1980
- [2.4] Kramer H., Kebe H. W.: «Durch Menschen erzwungene Bauwerksschwingungen», Der Bauingenieur 54, pp 195-199, 1979.
- [2.5] Tilly G. P., Cullington D. W., Eyre R.: «Dynamic Behaviour of Footbridges», IABSE-Surveys, S-26/84, May 1984.
- [2.6] Wheeler, J.E.: «Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges» Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, ST9, pp 2045-2065, September 1982.
- [2.7] Galbraith F. W., Barton M. V.: «Ground loading from Footsteps», The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 48, No. 5 (Part 2), pp 1288-1292, 1970.
- [2.8] Harper F.C.: «The Mechanics of Walking», Research Applied in Industry, Vol. XV, No. 1, pp 23-28, January 1962.
- [2.9] Blanchard J., Davies, B.L., Smith J.W.: «Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges», Proceedings, Symposium of Dynamic Behaviour of Bridges, Supplementary Report 275, Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, England, May 1977.