

Erschütterungen im Bauwesen

Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen

DIN
4150-1

ICS 91.120.25

Ersatz für
DIN 4150-1:1975-09

Vibrations in buildings —
Part 1: Prediction of vibration parameters

Vibrations aux bâtiments —
Partie 1: Prévission des paramètres de vibrations

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	2	Anhang A (informativ)	
1 Anwendungsbereich	3	Quellenarten mit charakteristischen Beispielen	16
2 Normative Verweisungen	3	Literaturhinweise	40
3 Begriffe	3	Bilder	
4 Grundlagen der Vorermittlung	4	Bild 1 — Geometrische Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Entfernung	6
4.1 Verfahren	4	Bild 2 — Anteil der Absorption der Schwingungsenergie im Boden an der Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Entfernung in Abhängigkeit von der Frequenz $D = 0,01$ und $c_s = 200 \text{ m/s}$...	7
4.2 Ausbreitung von Schwingungen	4	Bild 3 — Korrekturfaktor χ	14
4.3 Übertragung auf Bauwerke	7	Bild A.1 — Sprengungen — Erschütterungsausbreitung: Zeitverläufe und Spektren	17
5 Erschütterungsquellen	8	Bild A.2 — Sprengungen — Erschütterungsausbreitung: Amplitudenwerte und Ausgleichsgrade für die einzelnen Komponenten	18
5.1 Anregungen aus Einzelereignissen ...	8	Bild A.3 — Sprengungen — Erschütterungen in einem Gebäude: Zeitverläufe und Spektren	19
5.1.1 Allgemeines	8	Bild A.4 — Sprengungen — Erschütterungen in einem Gebäude: Verhältnis der Spektralamplituden zwischen Messpunkten im Gebäude v_G und dem Freifeld v_F	20
5.1.2 Sprengungen	8		
5.1.3 Fallende Massen	9		
5.2 Anregungen aus Baubetrieb	10		
5.2.1 Allgemeines	10		
5.2.2 Impulsförmige Erschütterungsquellen	10		
5.2.3 Stationäre Erschütterungsquellen ...	10		
5.2.4 Erschütterungen aus allgemeinem Baubetrieb	11		
5.3 Anregungen aus Verkehr	11		
5.3.1 Allgemeines	11		
5.3.2 Schienenverkehr	11		
5.3.3 Straßenverkehr	12		
5.4 Anregungen aus Maschinenbetrieb ...	13		
5.4.1 Allgemeines	13		
5.4.2 Maschinensäle	13		
5.4.3 Maschinen zur Metallverformung ...	14		
5.4.4 Sägegatter	15		

Fortsetzung Seite 2 bis 40

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Bild A.5 — Zeitverläufe und Spektren des Aufprallvorganges für die y-Komponente	21	Bild A.16 — Erschütterungsquelle, Lageplan der Maschinen und Messpunkte	32
Bild A.6 — Zusammenstellung des Aufpralls dreier gleichwertiger Schornsteine aus Stahlbeton	22	Bild A.17 — Vertikale Maschinenfußkräfte	33
Bild A.7 — Schlagrammung — Erschütterungsausbreitung: Zeitverläufe und Spektren	24	Bild A.18 — Einfluss der Anzahl N der Maschinen auf die Vertikalkomponente der Schwinggeschwindigkeit im Messpunkt 1	33
Bild A.8 — Schlagrammung — Erschütterungsausbreitung: Amplitudenwerte und Ausgleichskurve	24	Bild A.19 — Einfluss des Abstands von der Erschütterungsquelle auf die Vertikalkomponente der Schwinggeschwindigkeit	34
Bild A.9 — Vibrationsrammung — Einzelkomponenten v_x , v_y , v_z : Zeitverläufe und Spektren	26	Bild A.20 — Zeitverläufe und Spektren vertikaler Schwinggeschwindigkeiten mit Schwebung	35
Bild A.10 — Vibrationsrammung — Erschütterungsausbreitung: Amplitudenwerte und Ausgleichskurve	26	Bild A.21 — Zeitverläufe und Spektren horizontaler Schwinggeschwindigkeiten mit Schwebung	36
Bild A.11 — Vibrationsrammung von Spundbohlen — Resonanzeffekt im Gebäude: Zeitverläufe und Frequenzspektren	28	Bild A.22 — Anordnung des Messpunktes zur Erschütterungsquelle	37
Bild A.12 — Zeitverläufe und Frequenzspektren einer typischen U-Bahnvorbeifahrt	29	Bild A.23 — Zeitsignal und Spektrum	37
Bild A.13 — Abnahmefunktion der zeitlichen Maximalwerte	29	Bild A.24 — Schmiedepresse — Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit	38
Bild A.14 — Lkw-Vorbeifahrt, Zeitverlauf	31	Bild A.25 — Schmiedehammer — Bewegung des Schmiedehammers	38
Bild A.15 — Lkw-Vorbeifahrt, Schmalbandpektrum	31	Bild A.26 — Üblicher Holzschnittbetrieb, Schwinggeschwindigkeit $v(t)$	39
		Bild A.27 — Gatterleerlauf, Schwinggeschwindigkeit $v(t)$ und Spektrum $v(f)$	39

Vorwort

In der vorliegenden Norm, erstellt vom Arbeitsausschuss 00.04.00 des NABau, wurden mit einstimmigem Beschluss Erfahrungen und Erkenntnisse aufgenommen, die sich seit Erscheinen der Norm im September 1975 in Wissenschaft und Praxis als notwendig und genügend abgesichert erwiesen haben.

Die Diskussion im Arbeitsgremium über die Normungsfähigkeit der hier zu regelnden Thematik ergab, dass es zur Zeit kein schematisch anzuwendendes Verfahren zur Vorermittlung der Schwingungsgrößen gibt, das allgemein verbindlich vorgeschrieben werden kann. Aufgabe der Norm kann vielmehr nur sein, die Verlässlichkeit der Vorermittlung bestmöglich sicherzustellen. Dieses wird durch die Beschreibung der grundsätzlichen Vorgehensweise, die Benennung der für die einzelnen Quellenarten zu beachtenden Effekte und die Darstellung von nach dem Stand der Technik durchgeführten Messbeispielen in Anhang A erreicht.

Die Norm ist in einen mehr theoretischen Teil, der die Grundsätze der Erschütterungsausbreitung behandelt, und einen mehr praxisorientierten Teil gegliedert, der eine auf diese Grundsätze abgestellte systematisierende Beschreibung der wesentlichen Erschütterungsquellen beinhaltet. Damit wird der bisher stark branchenspezifisch ausgerichteten Bearbeitungsweise Rechnung getragen.

Die zu regelnde Thematik ist in ihrer Gesamtheit jedoch außerordentlich vielfältig, im Einzelfall sehr komplex und in der Regel örtlich sehr begrenzt. Es kann nicht vorausgesetzt werden, dass alle am Verfahren Beteiligten ohne weiteres in der Lage sind, sich ein Bild von den jeweils auftretenden Erschütterungen zu machen und über die Angemessenheit einer Bearbeitungsstrategie und -tiefe einer Erschütterungsprognose zu befinden. Der Norm sind daher als Anhang A Quellenarten mit charakteristischen Beispielen beigefügt. Dieser Anhang A enthält Darstellungen von praktischen, dem Stand der Technik entsprechenden Messbeispielen und Hinweise auf quellspezifische Besonderheiten.

Die Möglichkeit von Erschütterungsvorermittlungen durch Messungen oder andere deterministische Verfahren wird durch diese Norm nicht eingeschränkt.

DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“ besteht aus:

- Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen
- Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden
- Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen

Änderungen

Gegenüber DIN 4150-1:1975-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aufbau und Inhalt der Norm wurden völlig neu konzipiert.
- b) Die Norm beschränkt sich auf den Abschnitt 3 der Ausgabe September 1975, der sehr viel ausführlicher behandelt wird.
- c) Die Berücksichtigung der Dämpfung wurde aufgenommen.
- d) Es wurde ein Quellenkatalog in Form einer Beispielsammlung hinzugefügt.

Frühere Ausgaben

DIN 4150: 1939-07

DIN 4150-1: 1975-09

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gibt eine Anleitung für die Vorermittlung von Erschütterungen und enthält Verfahren, Angaben und Hinweise, auf deren Grundlage die Werte von Erschütterungsgrößen vorausgesagt werden können. Mit diesen Werten kann eine Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen nach DIN 4150-2 und DIN 4150-3 erfolgen.

ANMERKUNG Wegen der Vielfalt der möglichen Anregungsarten und der nur näherungsweise erfassbaren Einflüsse des Ausbreitungsweges im Boden und der Übertragung auf das Bauwerk erfordert die Prognose von Erschütterungen gründliche Kenntnisse und Erfahrungen. Deshalb sollte ein Gutachter hinzugezogen werden.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

DIN 1311-1, *Schwingungen und schwingungsfähige Systeme — Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung.*

DIN 4150-2, *Erschütterungen im Bauwesen — Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.*

DIN 4150-3:1999-02, *Erschütterungen im Bauwesen — Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.*

DIN 45669-1, *Messung von Schwingungsimmissionen — Teil 1: Schwingungsmesser, Anforderungen, Prüfung.*

DIN 45669-2, *Messung von Schwingungsimmissionen — Teil 2: Messverfahren.*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die in den Normen der Reihe DIN 1311 angegebenen und die folgenden Begriffe:

3.1

Erschütterungen

mechanische Schwingungen fester Körper mit potentiell schädigender oder belastigender Wirkung
[DIN 4150-3:1999-02]

3.2

Freifeld bei Erschütterungen

Geländeoberfläche ohne Einfluss durch ein Bauwerk

4 Grundlagen der Vorermittlung

4.1 Verfahren

Die in dieser Norm dargestellte Verfahrensweise dient zur Abschätzung von Erschütterungen, die

- bei bekannter Erschütterungsquelle auf ein geplantes benachbartes Bauwerk einwirken werden
- oder

- bei bekanntem Bauwerk aus einer geplanten benachbarten Erschütterungsquelle entstehen können.

Bei aus Messungen bekannten oder aus Erfahrung ermittelten Quellenwerten und Emissionen können Ausbreitung und Übertragung auf ein Bauwerk nach den Angaben und Gleichungen (1) bis (4) ermittelt werden. Mit den vorermittelten Werten (Immissionen) ist eine Beurteilung z. B. der Zumutbarkeit oder der Schadenswahrscheinlichkeit nach DIN 4150-2 und DIN 4150-3 durchführbar.

Neben den wesentlichen Parametern der Anregung (Quelle) und der Struktur des Immissionsortes sind die Eigenschaften des Untergrundes auf dem Ausbreitungsweg und des Baugrundes im Übertragungsbereich von wesentlichem Einfluss auf die zu ermittelnden Schwingungsgrößen. Hinweise enthält auch [1].

Die wesentlichen Erschütterungsquellen werden in Abschnitt 5 nach den folgenden Kriterien charakterisiert:

- Quellentyp geometrisch (siehe 4.2 und Bild 1);
- Quellentyp zeitlich (siehe 4.2 und Bild 1);
- Häufigkeit der Emission;
- Frequenzverteilung;
- Einwirkungsbereich (räumlich);
- Vorhandensein der Quelle (vorübergehend oder dauernd);
- zeitliche Beeinflussbarkeit.

In Abschnitt 5 nicht aufgeführte Erschütterungsquellen sind sinngemäß zu behandeln.

Den Quellenarten zugeordnet enthält Anhang A Beispiele zu Erschütterungsquellen und ihren Auswirkungen mit folgenden Angaben:

- geometrischer Typ mit Zeitverlauf;
- Klassifikation (Zeittyp, Frequenzbereich, Maximalamplituden);
- Anregungsmechanismen;
- Amplituden-Abstandsdiagramme.

4.2 Ausbreitung von Schwingungen

Die von der Erschütterungsquelle in den Untergrund eingeleitete Schwingungsenergie breitet sich in Form verschiedener Wellenarten im Boden aus. Es treten Raumwellen (Kompressions- und Scherwellen) und Oberflächenwellen (Rayleighwellen) auf, die je nach Art der Quelle und Energieeinleitung in den Boden unterschiedlich stark angeregt werden.

Um den Bereich der freien Wellenausbreitung (Fernfeld) von den komplexen Vorgängen in unmittelbarer Nähe der Erschütterungsquellen (Nahfeld) zu trennen, wird ein Bezugsabstand R_1 zur Quellenmitte festgelegt, der den Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld definiert (siehe auch [2]). Für alle Erschütterungsquellen, die als Punkt- oder Linienquelle idealisiert werden können, ist der Bezugsabstand zum Fernfeld definiert zu

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \quad (1)$$

Dabei ist

a die Abmessung der Erschütterungsquelle parallel zur Ausbreitungsrichtung;

λ_R die Wellenlänge der Oberflächenwelle.

Bei Erschütterungsquellen in Oberflächennähe erfolgt die Ausbreitung der Schwingungen vorwiegend an der Erdoberfläche (Rayleighwelle).

Die Größe der durch den Boden weitergeleiteten Schwingungen nimmt mit zunehmender Entfernung von der Erschütterungsquelle ab. Diese Abnahme wird im Wesentlichen durch die geometrische Amplitudenabnahme und die Materialdämpfung des Bodens bestimmt.

Im **Fernfeld** ($R > R_1$) wird die Abnahme der Amplitude der Schwinggeschwindigkeit $\bar{v}$ näherungsweise beschrieben durch

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp[-\alpha(R - R_1)] \quad (2)$$

Dabei ist

$\bar{v}$ die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit, in mm/s;

$\bar{v}_1$ die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit, in mm/s in der Entfernung R_1 ;

R_1 der Bezugsabstand, in m;

R die Entfernung von der Quelle, in m;

n der Exponent, der von Wellenart, Quellengeometrie und Art der Schwingung abhängt;

α der Abklingkoeffizient, in m^{-1} , $\alpha \approx 2\pi D/\lambda$;

D der Dämpfungsgrad;

λ die maßgebende Wellenlänge, in m, $\lambda = c/f$;

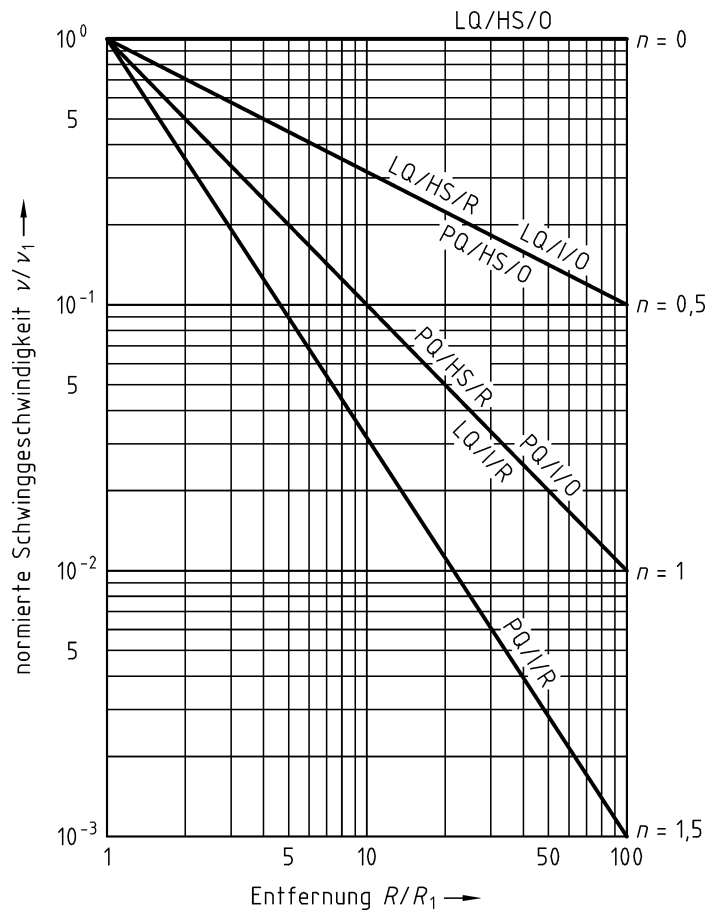
c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, in m/s;

f die Frequenz, in Hz.

Die geometrische Amplitudenabnahme entsprechend $(R/R_1)^{-n}$ wird durch die Verminderung der Energiedichte mit wachsender Entfernung von der Erschütterungsquelle hervorgerufen. Der Exponent n hängt ab von (siehe Bild 1):

- 1) Quellentyp geometrisch: Punktquelle (PQ) oder Linienquelle (LQ);
- 2) Quellentyp zeitlich: harmonisch/stationär (HS) oder impulsförmig (I);
- 3) Wellenart: Raumwelle (R) oder Oberflächenwelle (O).

Bei in ihrer Ausdehnung begrenzten Linienquellen (z. B. lange Fundamente) entspricht der Exponent in unmittelbarer Nähe dem der Linienquelle und nähert sich mit wachsender Entfernung dem der Punktquelle an. Fundamente mit Seitenabmessungen von mehr als etwa einer halben Wellenlänge können nicht mehr als Punktquelle betrachtet werden. Eisenbahnzüge z. B. können als eine Kette von Punktquellen (ausgedehnte Quelle mit nicht phasengleicher Anregung) dargestellt werden, für die der Exponent im Fernfeld zwischen 0,3 und 0,5 liegt. Es sei denn, die Quelle ist ortsfest (z. B. eine Weiche), dann gilt PQ/I/O, d. h. Punktquelle mit impulsförmigem Zeitverlauf, die Oberflächenwellen erzeugt.



Legende

Quellentyp geometrisch:

LQ Linienquelle

PQ Punktquelle

Quellentyp zeitlich:

HS harmonisch/stationär

I impulsförmig

Wellenart:

R Raumwelle

O Oberflächenwelle

Bild 1 — Geometrische Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Entfernung

Lokal können erhebliche Abweichungen von der Näherung nach Bild 1 auftreten, z. B. bei

- starker Gliederung des Bodens;
- vorhandener Bebauung;
- Geländesprüngen;
- Zusammenwirken mehrerer Erschütterungsquellen.

In diesen Fällen sind im Allgemeinen zusätzliche Überlegungen erforderlich. Die in Bild 1 angegebenen Grenzkurven können als Anhalt dienen. Für impulsförmig emittierende Quellen ist dort die stets vorhandene Dispersion der Wellenausbreitung im natürlichen Untergrund berücksichtigt [3].

Grundwasser begünstigt die Ausbreitung von Kompressionswellen. Oberflächenwellen werden dagegen nur gering vom Grundwasser beeinflusst.

Die zusätzliche Minderung der Amplituden durch Absorption der Schwingungsenergie im Boden (Materialdämpfung) erfolgt frequenzabhängig nach $\exp[-\alpha(R - R_1)]$. Der in α enthaltene Dämpfungsgrad D hängt von der Struktur des Bodens, seinem statischen Druckzustand und der dynamischen Verformungsamplitude ab. Für Voruntersuchungen und Abschätzungen darf D für Lockergestein maximal mit 0,01 angesetzt werden (siehe auch [2]). Höhere Werte sind nachzuweisen. Aus der Definition des Abklingkoeffizienten geht hervor, dass höherfrequente Schwingungen stärker gedämpft werden als tieffrequente (siehe Bild 2).

Im **Nahfeld** ($R < R_1$) gelten die angegebenen Näherungsbeziehungen nicht, deshalb sind dort für die Prognose besondere rechnerische oder experimentelle Untersuchungen erforderlich.

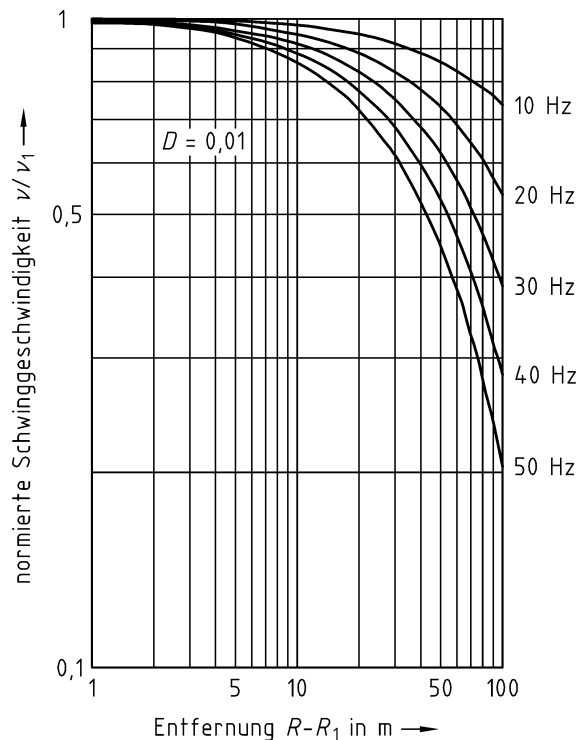


Bild 2 — Anteil der Absorption der Schwingungsenergie im Boden an der Abnahme der Schwingungsamplitude mit der Entfernung in Abhängigkeit von der Frequenz für $D = 0,01$ und $c_s = 200$ m/s

4.3 Übertragung auf Bauwerke

Beim Übergang der Erschütterungen vom Boden auf das Fundament des Gebäudes werden diese durch die Elastizität des Baugrunds, die Gebäudemasse sowie durch Ausmittlungseffekte in Abhängigkeit von den Grundrissabmessungen im Verhältnis zu relevanten Wellenlängen verändert.

In vertikaler Richtung kann für überwiegend harmonische Schwingungen diese Wechselwirkung in einem unteren Frequenzbereich näherungsweise durch die Übertragungsfunktion eines Einmassen-Schwingers beschrieben werden, dessen Eigenfrequenz bestimmt ist durch

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_B}{m_B}} \quad (3)$$

Hierin ist k_B die Federsteifigkeit des Untergrundes, m_B ist die Gebäudemasse, die als phasengleich schwingend anzunehmen ist. Für mittlere Bodensteifigkeiten, charakterisiert durch Scherwellengeschwindigkeiten von $c_s = 150$ m/s bis 200 m/s (siehe [4]), ergeben sich als Anhalt folgende Eigenfrequenzen f_B :

- 1- bis 2-geschossige Bauwerke: ≈ 15 Hz
- 2- bis 6-geschossige Bauwerke: ≈ 8 bis 12 Hz
- Bauwerke mit mehr als 6 Geschossen: < 8 Hz

Der maximale Übertragungswert ergibt sich aus $V_F = 1/(2D_0)$. Hierin ist D_0 die so genannte Systemdämpfung des Ersatzsystems „Bauwerk auf dem Boden“. Für Lockergestein darf diese zu mindestens $D_0 = 0,25$ angesetzt werden [4]. Für stark geschichtete, weiche und/oder felsige Böden ist D_0 im Einzelnen nachzuweisen.

Für Erschütterungen mit Frequenzen oberhalb der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz gelten diese einfachen Übertragungsbeziehungen nicht mehr, da in zunehmendem Maße elastische Eigenschaften der Gründungskonstruktion und des Gebäudes Einfluss gewinnen. In diesem Bereich kann ein mittlerer Übertragungswert von 0,5 angesetzt werden. Kleinere Übertragungswerte sind im Einzelnen nachzuweisen. Ist ein Gebäude auf felsigem Untergrund gegründet, ist beim Übergang auf die Gebäudefundamente keine Minderung vorhanden.

Bei der Weiterleitung der Erschütterungen vom Fundament über die Gebäudewände auf die Decken werden sie in der Regel verstärkt. Die größten Schwingungen sind im Resonanzbereich der Gebäudedecken zu erwarten. Der maximale Übertragungswert kann mit $V_D = 1/(2D_1)$ abgeschätzt werden, wobei für Gebäude mit Stahlbetondecken $0,02 < D_1 < 0,05$ gilt. Durch kurze Deckenspannweiten und Zwischenwände — auch nichttragende — sowie durch Gründung auf Lockergestein wird die Dämpfung verstärkt, d. h. die Resonanzüberhöhung gemindert.

Die angegebenen Abschätzungen gelten für den Fall, dass das Gebäude gleichphasig mit überwiegend harmonischen Schwingungen über seine gesamte Länge und Breite angeregt wird. Befindet sich die Erschütterungsquelle dicht am Gebäude oder ist sie ortsveränderlich oder sind die erzeugten Erschütterungen impulsförmig, kann eine stark unterschiedliche Phasenlage der Erschütterungen im Bereich der Gebäudefundamente auftreten. In diesem Fall liegt die angegebene Abschätzung auf der sicheren Seite.

In horizontaler Richtung sind Schwingungen insbesondere bei hohen und schlanken Bauwerken und bei niedrigen Anregungsfrequenzen von Bedeutung. In diesen Fällen kann zur groben Abschätzung der niedrigsten horizontalen Eigenfrequenz mehrgeschossiger Bauwerke ($n \geq 5$) die so genannte Stockwerksformel verwendet werden:

$$f_1 \approx \frac{10}{n} \text{ in Hz} \quad (4)$$

Dabei ist

f_1 die Frequenz, in Hz;

n die Anzahl der Stockwerke.

5 Erschütterungsquellen

5.1 Anregungen aus Einzelereignissen

5.1.1 Allgemeines

Einzelereignisse sind hier Ereignisse, die zeitlich so voneinander getrennt sind, dass die Wirkungen zweier aufeinander folgender Ereignisse nicht mehr zusammentreffen können oder an dem betrachteten Ort nur einmal auftreten. In der Regel kann ihr Eintreten zeitlich festgelegt und organisatorisch beeinflusst werden. Das gilt auch für die Stärke ihrer Anregung, d. h., vor dem geplanten Ereignis sind geeignete Maßnahmen durchführbar.

Erschütterungen aus Einzelereignissen führen in der Regel nicht zu ausgeprägten Resonanzen von Gebäuden oder Bauteilen.

Für das Nahfeld sind gesonderte Überlegungen erforderlich.

5.1.2 Sprengungen

Bei Sprengungen zur Lösung und Zerlegung von Gesteinen oder Bauteilen unter oder über Tage sind Erschütterungen unvermeidbar. Diese Erschütterungen dauern nur wenige Sekunden.

Sprengungen sind punktförmige, impulsartige Quellen. Erschütterungen von Sprenganlagen, die aus mehreren räumlich und zeitlich getrennten Einzelladungen (Zündzeitstufen) bestehen, ergeben sich als Überlagerungen der Erschütterungen der Einzelladungen.

Emissionsstärke und Einwirkungsbereich werden vor allem durch die Größe der Lademenge und die Art der Sprengung bestimmt. Ausbreitung und Frequenzinhalt werden durch die örtlichen geologischen Verhältnisse stark beeinflusst. Im Zeitbereich lassen sich in größerer Entfernung im Allgemeinen höherfrequente Raumwellen und niederfrequente Oberflächenwellen unterscheiden.

Bei der Rohstoffgewinnung und im Verkehrswege- und Leitungsbau verändert sich die räumliche Beziehung zwischen Quelle und Einwirkungsort mit dem Abbaufortschritt. Bei Steinbrüchen und Bergwerken ist in der Regel über viele Jahre mit Sprengerschütterungen zu rechnen, die selten häufiger als einmal täglich auftreten. Bei Baumaßnahmen treten sie nur zeitweise und selten länger als ein Jahr auf. Sprengerschütterungen von Gewinnungssprengungen sind nur sehr selten über eine Entfernung von 1 500 m um Steinbrüche oder 400 m bei Sprengungen für Baumaßnahmen hinaus von Bedeutung.

Für die Prognose von Sprengerschütterungen im Fernfeld kann näherungsweise die folgende empirische Abstands-Lademengen-Beziehung verwendet werden:

$$v_{\max} = k \left(\frac{L}{L_0} \right)^b \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-m} \quad (5)$$

Dabei ist

- $v_{\max}$ der Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit im Freifeld, in mm/s;
- L die Lademenge Sprengstoff, in kg je Zündzeitstufe;
- L_0 = 1 kg (Bezugsgröße);
- R die Entfernung von der Sprengstelle, in mm;
- R_0 = 1 m (Bezugsgröße);
- k ein Beiwert, in mm/s, empirisch ermittelt (z. B. durch Probesprengungen);
- b, m Kennzahlen, empirisch ermittelt.

Die Zahlenwerte für k , m , b sind durch in Bezug auf den Untergrund, das Sprengverfahren und den Entfernungsbereich vergleichbare Fälle zu belegen, wobei die mögliche Streubreite angemessen zu berücksichtigen ist (siehe auch [5]).

5.1.3 Fallende Massen

Arbeiten zur Baugrundverbesserung mit großen fallenden Massen (z. B. dynamische Intensivverdichtung) und Abbrucharbeiten (z. B. durch Sprengung oder mit Fallbirnen) erzeugen durch die Aufprallvorgänge kompakter Massen oder umstürzender Bauwerke auf den Baugrund Erschütterungen, die sich im Boden ausbreiten.

Die Größe der Aufprallerschütterungen und ihr Frequenzgehalt hängen ab von:

- Fallgewicht G ;
- Fallhöhe h ;
- Ausbildung der Aufprallfläche;
- Bodenart und -steifigkeit;
- Bodenschichtung;
- Oberflächenrelief zwischen Aufprall- und Messstelle.

Die Größe der Aufprallerschütterungen ist näherungsweise der Quadratwurzel der Fallenergie E proportional:

$$v_{\max} = k \left(\frac{E}{E_0} \right)^{0,5} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-m} \quad (6)$$

Dabei ist

- $v_{\max}$ der Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit im Freifeld, in mm/s;
 E die Fallenergie ($E = Gh$), in kJ;
 E_0 = 1 kJ (Bezugsgröße);
 R die Entfernung von der Fallstelle, in mm;
 R_0 = 1 m (Bezugsgröße);
 k ein Beiwert, in mm/s, empirisch ermittelt;
 m eine Kennzahl, empirisch ermittelt.

Die Zahlenwerte für k und m sind durch in Bezug auf den Untergrund, das Fallverhalten und den Entfernungsbereich vergleichbare Fälle zu belegen.

Beim Umstürzen von hohen Bauwerken (z. B. Bauwerke aus Stahlbeton oder Schornsteine) kann zur Erschütterungsminderung ein Fallbett aus verformbaren Massen (Sand, Bauschutt) angeordnet werden. Die Fallenergie und die Fallstelle können dabei durch Massenkonzentration, z. B. nach [6], ermittelt werden.

Die Erschütterung durch die Abbruchsprengung selbst ist gesondert zu untersuchen, sie ist in der Regel jedoch kleiner als die aus den fallenden Massen.

5.2 Anregungen aus Baubetrieb

5.2.1 Allgemeines

Bei der Durchführung von Baumaßnahmen können durch die Anwendung bestimmter Baumethoden verfahrensbedingt nennenswerte Erschütterungen auftreten. Diese Quellen lassen sich in der Regel als impulsförmige oder stationäre Punktquellen charakterisieren.

5.2.2 Impulsförmige Erschütterungsquellen

Impulsförmige Erschütterungen werden z. B. erzeugt durch

- Schlagrammen;
- Fallmeißel, z. B. zum Lockern von Fels beim Herstellen von Bohrpfählen;
- Fallende Massen, z. B. bei Abbrucharbeiten oder bei Anwendung der dynamischen Intensivverdichtung (siehe 5.1.3);
- Sprengungen (siehe 5.1.2).

Hierbei ist die Erschütterungsstärke näherungsweise proportional zur Quadratwurzel der in den Baugrund eingeleiteten Energie, die tatsächliche Erschütterungsstärke hängt bei diesen Vorgängen aber in besonderem Maße von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Der Frequenzbereich ist durch ein breitbandiges Spektrum mit Frequenzen bis etwa 80 Hz charakterisierbar.

Weiterhin kann es durch den Betrieb großer Maschinen und die Bewegung großer Massen zu stoßartigen Erschütterungen kommen (Bagger, Baustellenverkehr auf unebenem Untergrund, Bohrpfahl-Verrohrungsmaschine).

5.2.3 Stationäre Erschütterungsquellen

Stationäre Erschütterungen werden z. B. erzeugt beim Einsatz von

- Vibrationsrammen;
- Verdichtungsgeräten wie Vibrationswalzen und -platten und Tiefenrüttler.

Erschütterungstechnisch sind für den Einsatz der genannten Geräte in der Regel hohe Arbeitsfrequenzen ($f > 35$ Hz) günstiger als tiefere, da damit der Resonanzbereich von Geschossdecken in Gebäuden im Allgemeinen gemieden wird. Allerdings können beim Anfahren und Abschalten von Maschinen mit unveränderlichem statischen Moment beim Durchfahren von Deckeneigenfrequenzen kurzzeitig Resonanzüberhöhungen auftreten.

Vibrationsbäre mit tiefer Arbeitsfrequenz ($f > 30 \text{ Hz}$) können, insbesondere beim Auftreten von Rammwiderständen, durch das Absinken der Betriebsfrequenz in den Deckenresonanzbereich und durch die stärkere Energieabstrahlung auch in größerer Entfernung noch starke Erschütterungen hervorrufen.

Entscheidend für die Größe der von Vibrationsrammen erzeugten Erschütterungen ist, in welchem Maße sich die dynamische Energie des Rüttlers in Formänderungsarbeit des Bodens (Einbringen des Rammguts) und elastische Energie (Erschütterungsausbreitung) aufteilt. Dieses Verhältnis hängt von den Eigenschaften des Erregers und seiner Betriebsfrequenz sowie von den Eigenschaften von Rammgut und Boden ab.

Bei den Verdichtungsgeräten hängt die Größe der Erschütterungen im Wesentlichen von der Fliehkraft und von den Bodeneigenschaften ab. Die Größe der Erschütterungen nimmt mit dem Verdichtungsgrad zu.

Kleine Plattenrüttler — mit einer Fliehkraft bis etwa 25 kN — erzeugen erfahrungsgemäß auch in geringer Entfernung von Gebäuden bei üblicher Verwendung keine Erschütterungen in der Größe der Anhaltswerte nach DIN 4150-3:1999-02, Abschnitt 5.

5.2.4 Erschütterungen aus allgemeinem Baubetrieb

Auf Baustellen gibt es viele Vorgänge, die in der Regel nicht zu wesentlichen Erschütterungen führen, wie z. B. die Herstellung von Bohrpfählen oder Schlitzwänden. Jedoch können z. B. beim Auftreten von Hindernissen wesentliche Erschütterungen entstehen. Auch der Einsatz von Tunnelbohrmaschinen in der Nähe von Gebäuden kann zu wesentlichen Erschütterungen führen.

5.3 Anregungen aus Verkehr

5.3.1 Allgemeines

Anregungen aus Verkehr sind nur in Ausnahmefällen durch organisatorische Maßnahmen im zeitlichen Rahmen beeinflussbar. Sie gehören einerseits zum täglichen Umfeld der Nutzer, was ihrer Akzeptanz entgegenkommt, andererseits werden sie häufig von weiteren Emissionen anderer Art begleitet, so dass die Gesamtwirkung für die Akzeptanz von entscheidender Bedeutung ist und damit die prognostizierten Erschütterungen nicht allein bestimmend für die Beurteilung sein können (Näheres enthält [7]).

5.3.2 Schienenverkehr

Die von einem Rad-Schiene-System ausgehenden Erschütterungen werden in Wechselwirkung mit der Fahrbahn und dem Untergrund durch die Räder, Achsen und Radsätze des Zuges erzeugt, wobei folgende Ursachen wirksam werden:

- periodische Schwankung der Fahrwegsteifigkeit infolge diskreter Stützung der Schienen durch die Schwellen oder durch elastische Schienenlager (Stützungsabstand 0,6 m bis 0,9 m);
- Unebenheiten der Schienenlauffläche;
- Abweichungen von der vorgegebenen Gleislage;
- Unrundheiten der Räder und Flachstellen auf den Radlaufflächen;
- Eigenschwingungen von Fahrzeugteilen, besonders der Drehgestelle, und Biegeschwingungen der Radsätze.

Die dadurch erzeugten dynamischen Radaufstandskräfte stellen für den Zug eine stationäre Anregung dar, für das Gleis selbst sind sie eine punktförmige, impulsförmige Belastung, und für die Umgebung wirken sie sich mit zunehmender Entfernung vom Gleis als eine ausgedehnte Quelle aus (siehe hierzu 4.2).

Zusätzlich werden an Störstellen, wie

- Lücken, insbesondere an Weichen,
- unebenen Schweißstellen und anderen punktförmigen Schienenunebenheiten,
- hohlliegenden Schwellen und Fahrbahnübergängen,
- Widerlagern und Stützen von Brücken,

impulsförmige Erschütterungen erzeugt, die sich für die Umgebung wie ortsfeste Punktquellen darstellen.

Die Stärke und der Frequenzbereich der Erschütterungsanregung werden wesentlich beeinflusst durch

- die konstruktive Gestaltung des Oberbaus, wie z. B. Schotteroberbau, feste Fahrbahn, elastische Schienenlagerung, Unterschottermatte, Masse-Feder-System. Tendenziell wirkt sich eine weichere Lagerung und/oder eine größere Oberbaumasse erschütterungsmindernd für die Umgebung aus.
- die Größe des Schienenprofils. Ein größeres Schienenprofil führt zu einer Verringerung der Durchbiegung zwischen zwei Stützpunkten und damit zu geringerer Anregung von Erschütterungen.
- die Fahrbahnlage, wobei eine Trassenlage auf einem Damm oder im Einschnitt oder im Tunnel in der Regel zu einer Minderung der Erschütterung führt.
- die Fahrgeschwindigkeit, wobei in der Regel die Erschütterungsstärke mit wachsender Geschwindigkeit bis zu einer systemabhängigen Grenze zunimmt.
- Radsatzabstände und Fahrzeugmassen. Größere unabgefederte Massen führen zu stärkerer Erschütterungsanregung.
- den Zustand der Laufflächen von Rad und Schiene.

Weitere Einflüsse können sich ergeben aus

- Fahrbahnverlauf: Kurven, Steigung, Gefälle;
- Fahrzuständen: Bremsen, Anfahren;
- Radsatzlasten;
- den dynamischen Eigenschaften der Brückenbauwerke und aufgeständerten Fahrbahnen.

Bei Anregungen durch Flachstellen, Radunrundheiten, Schwellenabstand und periodische geometrische Unregelmäßigkeiten des Fahrweges ergeben sich die Anregungsfrequenzen aus $f_A = v_Z/d$ und den Vielfachen, wobei v_Z die Zuggeschwindigkeit und d der signifikante Störstellenabstand ist (z. B. Schwellenabstand, Radumfang, Radsatz- und Drehgestellabstände, Querträgerabstand bei Brücken). Im Gegensatz dazu sind die Anregungsfrequenzen durch Eigenschwingungen von Fahrzeugteilen fahrgeschwindigkeitsunabhängig. Diese liegen üblicherweise beim abgefederten Wagenkasten als Starrkörper zwischen 1 Hz und 3 Hz (Sekundärfeder), beim Drehgestell zwischen 6 Hz und 10 Hz (Primärfeder).

Häufig werden bestimmte Frequenzbereiche in Abhängigkeit von der Oberbauart bevorzugt übertragen. Diese Frequenzbereiche werden durch die Radsatzmassen und -lasten und durch die Steifigkeit des Gleises und des Untergrunds bestimmt. Diese liegen bei einem Schotteroberbau häufig zwischen 40 Hz und 80 Hz, im Tunnel bei Verwendung von Unterschottermatten zwischen 15 Hz und 40 Hz und bei Masse-Feder-Systemen zwischen 5 Hz und 20 Hz.

Der im Rahmen dieser Norm zu berücksichtigende Einwirkungsbereich von Schienenverkehrserschütterungen kann erfahrungsgemäß mit maximal 80 m vom Anregungsort angenommen werden. Jedoch können bei Strecken auf Untergrund mit Weichschichten tieffrequente Erschütterungen größerer Reichweite angeregt werden.

5.3.3 Straßenverkehr

Die durch die allgemeine, statistisch verteilte Oberflächenrauheit der Fahrbahn oder durch Reibungskräfte beim Beschleunigen oder Bremsen der Fahrzeuge hervorgerufenen Erschütterungen sind in der Regel von untergeordneter Bedeutung.

Dagegen können bei unebenen Fahrbahnen verkehrsbedingte Erschütterungen durch mechanische Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugen und Fahrbahn entstehen. Sie sind im Allgemeinen nur bei schweren Fahrzeugen wie Lastkraftwagen oder Omnibussen von Bedeutung. Es gibt zwei wesentliche Mechanismen der Erschütterungserzeugung. Beim Befahren von größeren Unebenheiten (z. B. Kanaldeckeln, Bahnübergängen, Kopfsteinpflaster) oder Schädstellen in der Fahrbahn werden

- impulsförmig Schwingungen in den Boden eingeleitet;
- das Fahrzeug oder Teile davon (Fahrgestell, Achsen) zu Eigenschwingungen angeregt, die auf die Fahrbahn und damit den Boden rückwirken.

Bei weichem Untergrund und/oder geringer Fahrbahnsteifigkeit (z. B. an nicht ausgebauten Ortsdurchfahrten) können niederfrequente Schwingungen auftreten.