

**VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE**

Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken
bei dynamischen Einwirkungen
Untersuchungsmethoden und
Beurteilungsverfahren der Baudynamik
Schwingungen und Erschütterungen –
Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung
Serviceability of structures under dynamic loads
Methods of analysis and evaluation
in structural dynamics
Schock and vibration –
prognosis, measurement, evaluation and reduction measures

VDI 2038
Blatt 2 / Part 2

**Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English**

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung.....	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	3
2 Normative Verweise.....	4
3 Begriffe.....	4
4 Formelzeichen.....	4
5 Baudynamische Berechnungen zur Erschütterungsprognose.....	4
5.1 Elemente einer Prognoserechnung.....	4
5.2 Verfahren.....	4
5.3 Elementare Modelle der Erschütterungsprognose.....	6
5.4 Detaillierte Methoden zur Erschütterungsprognose.....	14
6 Baudynamische Messungen.....	20
6.1 Baudynamische Ingenieurmessungen.....	20
6.2 Experimentelle Modalanalyse (EMA).....	26
6.3 Zustandsüberwachung.....	37
7 Bewertungskriterien der Gebrauchstauglichkeit.....	39
7.1 Bauwerke.....	39
7.2 Menschen.....	50
7.3 Empfindliche Geräte.....	63
8 Maßnahmen zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit.....	71
8.1 Minderungsmaßnahmen an der Schwingungsquelle.....	71
8.2 Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg.....	72
8.3 Minderungsmaßnahmen am zu schützenden Objekt.....	75
Anhang A Grundlagen der rechnerischen Systemanalyse.....	81
Anhang B Digitale Signalanalyse.....	90
Anhang C Experimentelle Modalanalyse.....	101
Schrifttum.....	105
Index deutsch.....	108



Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	3
2 Normative references.....	4
3 Terms and definitions.....	4
4 Symbols.....	4
5 Structural dynamics analyses for vibration prognosis.....	4
5.1 Elements of a prognosis analysis.....	4
5.2 Methods.....	4
5.3 Elementary models of vibration prognosis.....	6
5.4 Detailed methods for vibration prognosis.....	14
6 Structural dynamics measurements.....	20
6.1 Structural dynamics engineering-based measurements.....	20
6.2 Experimental modal analysis (EMA).....	26
6.3 Condition monitoring.....	37
7 Evaluation criteria for serviceability.....	39
7.1 Structures.....	39
7.2 Humans.....	50
7.3 Sensitive equipment.....	63
8 Measures to ensure serviceability.....	71
8.1 Reduction measures at the vibration source.....	71
8.2 Reduction measures on the transmission path.....	72
8.3 Reduction measures at the object to be protected.....	75
Annex A Fundamentals of computational system analysis.....	81
Annex B Digital signal analysis.....	90
Annex C Experimental modal analysis.....	101
Bibliography.....	105
Index English.....	109

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)
Fachbereich Schwingungstechnik

VDI-Handbuch Schwingungstechnik
VDI-Handbuch Bautechnik – Gebäuderelevante Systeme

[This is a preview. Click here to purchase the full publication.](#)

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Bei dynamischen Einwirkungen auf Bauwerke können zur Bewertung der Auswirkungen grundsätzlich unterschiedliche Grenzzustände herangezogen werden. Von den drei Möglichkeiten – Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit – wird in der Richtlinienreihe VDI 2038 ausschließlich die Gebrauchstauglichkeit behandelt.

Die Richtlinienreihe VDI 2038 besteht aus:

Blatt 1 Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen

Blatt 2 Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung

Blatt 3 Sekundärer Luftschall – Grundlagen, Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2038.

Blatt 1 erläutert in der Einleitung den Begriff der Gebrauchstauglichkeit und deren Bedeutung sowie die übergeordnete Zielsetzung der Richtlinienreihe VDI 2038 einschließlich Abgrenzung gegenüber benachbarten Themen. In Abschnitt 5 werden die Methoden und Vorgehensweisen der Baudynamik behandelt sowie speziell die Frage, ob bei einem Bauvorhaben ein Fachingenieur für Baudynamik (Fachingenieur für Schwingungsfragen im Bauingenieurwesen) eingeschaltet werden muss, in welcher Bauphase das geschehen sollte und wer von den am Bau Beteiligten dafür die Verantwortung trägt. Ferner gibt Abschnitt 5 Hinweise zur Schwingungsanfälligkeit von Bauwerken bzw. Bauteilen, zum Sicherheitskonzept bei Gebrauchstauglichkeit sowie zur Prognosesicherheit. In Abschnitt 6 und Abschnitt 7 werden dann die dynamischen Einwirkungen angesprochen und die für

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI Notices (www.vdi-richtlinien.de).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

Introduction

In evaluating the effects of dynamic loads on structures, reference can be made to fundamentally different limit states. Of the three possibilities – load-bearing capacity, durability and serviceability – the series of guidelines VDI 2038 deals exclusively with serviceability.

The series of guidelines VDI 2038 consists of:

Part 1 Basics – methods, procedures and loads

Part 2 Shock and vibration – prognosis, measurement, evaluation and reduction measures

Part 3 Secondary airborne noise – prognosis, measurement, evaluation and reduction measures

A catalogue of all available parts of this series of guidelines can be accessed on the internet at www.vdi.de/2038.

The introduction to Part 1 explains the term “serviceability” and its importance as well as the higher-level objectives of the series of guidelines VDI 2038, including demarcation with respect to neighbouring subject areas. Section 5 deals with the methods and procedures of structural dynamics, looking in particular at the question of whether a specialist engineer for structural dynamics (an engineer specializing in vibration-related aspects of construction engineering) needs to be called in the building project; if so, at what stage this should happen, and which participating party in the project is responsible for this. In addition, Section 5 provides information about the vibration susceptibility of structures or components, about the safety concept in serviceability as well as about the reliability of prognosis. Section 6 and Section 7 then address dynamic loads and those relevant to ques-

Fragen der Gebrauchstauglichkeit relevanten soweit wie möglich quantitativ angeben.

Darüber hinaus enthält die Richtlinie VDI 2038 Blatt 1 alle für Blatt 1 und Blatt 2 geltenden Formelzeichen und normativen Verweise.

Das vorliegende Blatt 2 behandelt alle weitergehenden Aspekte hinsichtlich Schwingungen und Erschütterungen.

Blatt 3 erläutert die Phänomenologie des von den schwingenden Bauteilen abgestrahlten Luftschalls, des sogenannten sekundären Luftschalls, stellt Methoden zu dessen Prognose dar – vor allem die statistische Energieanalyse (SEA) – und nennt Kriterien zu seiner Beurteilung. Ferner werden Hinweise zur Messung des sekundären Luftschalls gegeben und Minderungsmöglichkeiten angesprochen.

1 Anwendungsbereich

Die Richtlinienreihe VDI 2038 behandelt Einwirkungen, die aufgrund ihrer zeitlichen Änderung zu Schwingungen von Strukturen führen und dadurch Störungen an Bauwerken, Bauteilen, Maschinen und Geräten oder Belästigungen von Menschen hervorrufen können, sei es direkt oder – bei Menschen und Geräten – indirekt über den dabei abgestrahlten sekundären Luftschall. Es werden explizit jedoch nur solche Einwirkungen behandelt, die für die Gebrauchstauglichkeit relevant sind. Alle Abgrenzungen zu benachbarten Themen enthält Blatt 1.

Das vorliegende Blatt 2 behandelt in Fortsetzung von Blatt 1 alle Gebrauchstauglichkeitsfragen hinsichtlich Schwingungen und Erschütterungen. Es enthält in Abschnitt 5 die Methoden zur Auslegung (Berechnung, Prognose) und in Abschnitt 6 die Methoden zur Zustandsbewertung (Messung) von Bauwerken. In Abschnitt 7 sind die Bewertungskriterien der Gebrauchstauglichkeit zusammengetragen und in Abschnitt 8 werden Möglichkeiten zur Sicherstellung bzw. Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit behandelt.

Für Teilaspekte, die über den Rahmen dieser Richtlinie hinausgehen, ist ausgewähltes Schrifttum angegeben.

tions of serviceability are specified quantitatively as far as is possible.

Guideline VDI 2038 Part 1 also contains all of the symbols and normative references applicable to Part 1 and Part 2.

The present part of the guideline, Part 2, examines all further aspects concerning shock and vibration.

Part 3 deals with the phenomenology of the airborne sound emitted by vibrating components, the so-called secondary airborne sound, presents relevant prognostic methods – especially the statistical energy analysis (SEA) – and provides criteria for its evaluation. In addition, information is provided about measuring secondary airborne sound and reduction measures are examined.

1 Scope

The series of guidelines VDI 2038 is concerned with loads which are time-dependent and thus can lead to vibrations in structures and thereby cause problems in buildings, components, machines and equipment or result in annoyance to individuals, either directly or – in the case of individuals and items of equipment – indirectly via emitted secondary airborne sound. However only those loads relevant to serviceability are treated explicitly. Demarcations with respect to neighbouring subject areas will be found in Part 1.

The present part of the guideline, Part 2, as a continuation of Part 1, examines all questions of serviceability as regards shock and vibration. It covers in Section 5 methods of design (analysis, prognosis) and in Section 6 methods of assessing (measuring) the condition of structures. Section 7 summarizes the evaluative criteria for serviceability and Section 8 deals with possible methods of ensuring or improving serviceability.

For subordinate aspects which go beyond the remit of this guideline a selected bibliography is provided.

2 Normative Verweise

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 2038 Blatt 1:2012-06 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen; Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik; Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die Begriffe nach VDI 2038 Blatt 1.

4 Formelzeichen

In dieser Richtlinie werden die in VDI 2038 Blatt 1 aufgeführten Formelzeichen verwendet.

5 Baudynamische Berechnungen zur Erschütterungsprognose

5.1 Elemente einer Prognoserechnung

Bei einer Erschütterungsprognose sind prinzipiell folgende Teilschritte zu betrachten:

- Emission – Erschütterungsanregung
- Transmission – Weiterleitung durch den Untergrund
- Immission – Übertragung in das und Weiterleitung im Gebäude
- Bewertung hinsichtlich Gebäude oder Menschen bzw. Geräten im Gebäude

Die Immission kann zusätzlich in den Bereich der primären Immission des Gesamtbauwerks mit der Betrachtung der Bauwerk-Boden-Wechselwirkung und elastischer Gesamtbauwerksresonanzen und in den Bereich der sekundären Immission mit der Schwingungsübertragung auf die einzelnen Bauelemente, insbesondere die Decken, unterteilt werden. Für jeden Bereich können messtechnische und/oder rechnerische Verfahren angewendet werden, die jedoch aufeinander abgestimmt sein müssen.

5.2 Verfahren

Die angewandten Verfahren der Erschütterungsprognose können hinsichtlich des Aufwands, der Komplexität und der erzielten Genauigkeit sehr unterschiedlich sein. Gemäß VDI 2038 Blatt 1, Abschnitt 5 wird der erforderliche Modellierungsaufwand zunächst von der Art der jeweiligen Planungsaufgabe bestimmt. Er hängt jedoch auch von dem jeweils bearbeiteten Prognoseschritt (Emission, Transmission, Immission oder Bewertung) und von der Möglichkeit bzw. der Notwendigkeit er-

2 Normative references

The following referenced document is indispensable for the application of this guideline:

VDI 2038 Blatt 1:2012-06 Serviceability of structures under dynamic loads; Methods of analysis and evaluation in structural dynamics; Basics – methods, procedures and loads

3 Terms and definitions

For the purposes of this guideline, the terms and definitions as per VDI 2038 Part 1 apply.

4 Symbols

The symbols as per VDI 2038 Part 1 are used throughout this guideline.

5 Structural dynamics analyses for vibration prognosis

5.1 Elements of a prognosis analysis

In a vibration prognosis basically the following sub-steps should be considered:

- emission: vibration excitation
- transmission: onward transmission through the ground
- immission: transmission into and onward transmission within the building
- evaluation as regards the building or individuals and items of equipment within the building

Immission can be further subdivided into firstly, the domain of the total structure's primary immission while considering soil-structure-interaction and elastic total-structure resonances and secondly, the domain of secondary immission with vibration transmission into the individual components of the structure, particularly the floors. For each domain, experimental and/or computational methods may be applied but they will need to be coordinated with each other.

5.2 Methods

The methods used for vibration prognosis may differ a great deal as regards the effort involved, complexity and the accuracy achieved. According to VDI 2038 Part 1, Section 5, the modelling effort required is primarily determined by the type of planning task. However it also depends on the prognostic step processed in each case (emission, transmission, immission or evaluation) and on the possibility or necessity of supplementary measurements. With reference to VDI 2038 Part 1, Sec-

gänzender Messungen ab. Mit Bezug auf VDI 2038 Blatt 1, Abschnitt 5 und ISO 14837-1 können folgende Varianten einer Prognoseberechnung unterschieden werden:

Projektierungsmodell

Das relativ grobe Prognosemodell ist in den ersten Phasen einer Projektplanung zu verwenden. Es dient zur Beantwortung der Frage, ob Erschütterungen und/oder sekundärer Luftschall generell relevant sind und falls ja, wo sich die „kritischen Punkte“ befinden. Dieses relativ grobe Modell kann auch zur Ermittlung von Eingangsdaten einer Umweltverträglichkeitsprüfung oder zu einer ersten Auswahl erschütterungstechnisch geeigneter Baumaschinen verwendet werden.

Planungs- und Umweltbewertungsmodell

Dieses schon detailliertere, aber immer noch einfache Modell kann zur genaueren Lokalisierung der Stellen und der Quantifizierung der Stärke einwirkender Erschütterungen und/oder sekundären Luftschalls benutzt werden. Auch Art und Umfang erforderlicher Minderungsmaßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung dieser Einwirkungen können damit ermittelt werden. Dieses Modell ist Bestandteil des Projektplanungsprozesses und wird soweit erforderlich zur Bewertung der Umweltauswirkungen herangezogen. Der Detaillierungsgrad ist so groß, dass Teile der Konstruktion hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften ausreichend genau beurteilt werden können.

Detailmodell

Dieses Modell erlaubt die Beurteilung aller Teilsysteme im Einzelnen und ist als Hilfe bei den detaillierten Entwürfen sowie bei der Festlegung spezieller Minderungsmaßnahmen, die durch die Umweltbewertung als notwendig erkannt wurden, zu verwenden. Diese Modellart muss Bestandteil der Konstruktions- und Bauphase eines Projekts sein.

Die Rechenverfahren sollten soweit wie möglich durch Messungen ergänzt werden. Ist das zu beurteilende Gebäude vorhanden, können die Übertragungsfunktionen vom Freifeld zu den kritischen Bauwerkspunkten gemessen werden. Ist die Schwingungsquelle vorhanden, kann die Freifeldbodenanregung am geplanten Bauwerksstandort ermittelt werden.

Im Folgenden werden für die oben genannten Prognosebereiche einige typische Vorgehensweisen bzw. Modellierungsarten aufgeführt:

tion 5 and ISO 14837-1 the following variants of a prognostic analysis may be distinguished:

Project planning model

During the initial phases of project planning the relatively rough prognostic model should be used. Its job is to answer the question as to whether vibrations and/or secondary airborne sound are generally relevant and if so, where the “critical points” are to be found. This relatively rough model can also be used for determining input data for an environmental impact assessment or for making an initial selection of construction machinery which is suitable as regards vibration.

Planning and environmental assessment model

This model, which although more detailed is nevertheless still simplistic, can be used for more precise localization and quantifying the level of active vibrations and/or secondary airborne sound. In this way even the type and scope of the measures required to reduce or prevent these effects can be identified. This model is a constituent part of the project planning process and where necessary is used for assessing environmental impacts. The level of detailing is high enough to permit a sufficiently accurate assessment of parts of the construction as regards their dynamic properties.

Detailed model

This model permits a detailed assessment of all subsystems and is to be used as a resource in preparing the detailed drafts as well as in deciding on special reduction measures which were indicated as necessary by the environmental assessment. This type of model must form a constituent part of a project's design and building phases.

The calculation methods should as far as possible be supplemented by measurements. If the building being assessed is already in existence, the transmission functions from the free-field to the critical points in the structure can be measured. If the source of vibration is present, the free-field ground excitation at the planned structure's location can be determined.

A number of typical procedures or types of modelling will be listed below for the prognostic areas mentioned above:

Emission

- vorgegebene Last-Zeit-Funktionen oder Spektren
- Feder-Masse-Modelle für Maschinen, Maschinenfundamente, Fahrzeuge
- räumliche Modelle mit und ohne Berücksichtigung des Untergrunds mit verschiedenen numerischen und/oder analytischen Verfahren

Transmission

- einfache Näherungsformeln für den Untergrund (empirisch, analytisch, Halbraum, Schichtung)
- analytische Modelle und Rechenverfahren für homogenen und geschichteten Halbraum sowie begrenzte Systeme
- hinsichtlich Geometrie und Material detailgetreue (meist numerische) Rechenmodelle wie Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Randelemente-Methode (Boundary Element Method, BEM)
- auf Messungen basierende Ausbreitungskurven

Immission

- Näherungsformeln für die Fundamentsteifigkeit und -dämpfung (homogener und geschichteter Halbraum)
- Feder-Masse-Modelle für Untergrund-Fundament-Bauwerk
- vereinfachte Stabwerksmodelle für das aufgehende Bauwerk
- analytische Deckenmodelle (Balken, Platte)
- Feder-Masse- oder Modal-Modelle
- gekoppelte Wand-Decken-Modelle
- Finite-Elemente-Modelle des gesamten Bauwerks mit Untergrund und gegebenenfalls einschließlich der Schwingungsausbreitung im Untergrund

5.3 Elementare Modelle der Erschütterungsprognose**5.3.1 Einfache Modelle für die Transmission**

Das einfachste Modell zur Beschreibung der Erschütterungsausbreitung im Untergrund ist der homogene Halbraum, der durch die Parameter

ρ	Dichte
ν	Querkontraktionszahl
$\mathcal{D}$	Dämpfungsgrad
G	Schubmodul und
$c_s = \sqrt{G/\rho}$	Scherwellengeschwindigkeit

beschrieben wird. Die spektralen Schwinggeschwindigkeitsamplituden in Abhängigkeit von der Frequenz f_a und den Abständen r zur Quelle (einer harmonischen Kraft der Amplitude $\hat{F}$) ergeben sich näherungsweise aus den beiden Asymptoten

Emission

- specified load-time histories or spectra
- mass-spring models for machines, machinery foundations, vehicles
- three-dimensional models which do or do not take the ground into consideration with various computational and/or analytic methods

Transmission

- simple approximative formulas for the ground (empirical, analytical, half-space, stratification)
- analytical models and calculating methods for homogeneous and stratified half-space as well as adjacent systems
- (mostly numerical) computational models accurate in every detail as far as geometry and material are concerned, such as the finite element method (FEM) or boundary element method (BEM)
- propagation curves based on measurements

Immission

- approximative formulas for foundation stiffness and damping (homogeneous and stratified half-space)
- mass-spring models for ground-foundation-structure
- simplified framework models for the above-ground structure
- analytical floor models (beam, slab)
- mass-spring or modal models
- coupled wall-floor models
- finite element models of the entire structure with ground and if applicable including vibration propagation in the ground

5.3 Elementary models of vibration prognosis**5.3.1 Simple models for transmission**

The simplest model for describing vibration propagation in the ground is the homogeneous half-space, which is described by these parameters:

ρ	density
ν	Poisson's ratio
$\mathcal{D}$	damping ratio
G	shear modulus, and
$c_s = \sqrt{G/\rho}$	shear wave velocity

The spectral vibration velocity amplitudes as a function of the frequency f_a and the distances r from the source (of a harmonic force of amplitude $\hat{F}$) are obtained approximatively from the two asymptotes for the near-field and the far-field ac-

für das Nahfeld und das Fernfeld gemäß Gleichung (1), Bild 1a:

$$v(r, f) = \frac{\hat{F} \cdot f_a \cdot (1 - \nu)}{G \cdot r} e^{-\vartheta r^*} \begin{cases} 1 & \text{für / for } r^* \leq 2,5 \\ \sqrt{r^* / 2,5} & \text{für / for } r^* > 2,5 \end{cases} \quad (1)$$

Dabei ist

where

$$r^* = \frac{\Omega \cdot r}{c_s}$$

In vielen Fällen genügt die Fernfeldasymptote, welche die an der Bodenoberfläche dominierende Rayleighwelle beschreibt. Werden die Schwinggeschwindigkeitsamplituden an zwei verschiedenen Entfernungen von der Quelle verglichen, dann ergibt sich das Abnahmegegesetz (vgl. VDI 2038 Blatt 1, Abschnitt 7.6) zu

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{r_1}{r_2} e^{-\vartheta(r_2^* - r_1^*)} = \sqrt{\frac{r_2^*}{r_1^*}} e^{-\vartheta(r_2^* - r_1^*)} \quad (2)$$

Hierbei liegt auch der Bezugspunkt im Fernfeld.

Der wichtigste Parameter bei der Erschütterungsausbreitung im Boden ist die Bodensteifigkeit. Der dafür maßgebende Schubmodul G des Bodens bei kleinen Dehnungen variiert im Allgemeinen zwischen

10^7 N/m^2 und 10^9 N/m^2 bzw.
 10 MN/m^2 und 1000 MN/m^2 .

Das entspricht Scherwellen-Geschwindigkeiten zwischen 70 m/s (lockerer Sand) und 700 m/s (dichter Kies), siehe auch [1]. Da die Schwingungsamplituden der Schwingungsquelle mit der Bodensteifigkeit abnehmen, ergeben sich auch hierfür Unterschiede von 1 : 100.

In many cases the far-field asymptote, which describes the Rayleigh wave dominant at the ground surface, will suffice. Comparison of the vibration velocity amplitudes at two different distances from the source yields the attenuation law (cf. VDI 2038 Part 1, Section 7.6):

Here even the reference point is in the far-field.

The most important parameter in vibration propagation in the ground is ground stiffness. With small strains the shear modulus G of the ground which is of critical importance to this generally varies between

10^7 N/m^2 and 10^9 N/m^2 or
 10 MN/m^2 and 1000 MN/m^2 .

This corresponds to shear wave velocities between 70 m/s (loose sand) and 700 m/s (compact gravel) (see also [1]). Since the oscillation amplitudes of the vibration source fall with subgrade stiffness, this also results in differences of 1 : 100.

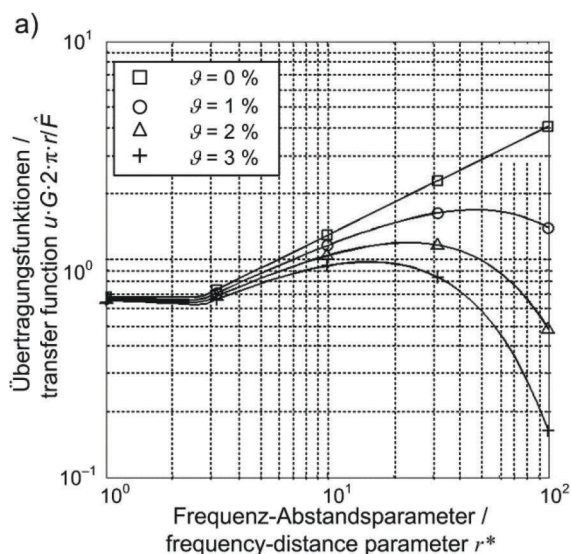


Bild 1. Beispielhafte Übertragungsfunktionen des Bodens: a) normierte Übertragungsfunktionen für verschiedene Dämpfungsgrade; b) Übertragungsfunktionen (Admittanzen) für verschiedene Abstände zur Quelle ($c_s = 100 \text{ m/s}$, $\vartheta = 2,5 \%$)

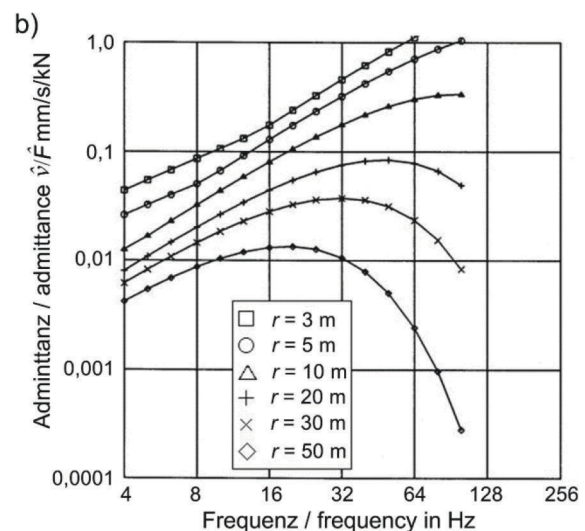


Figure 1. Examples of transfer functions of the ground: a) standardized transfer functions for different damping ratios; b) transfer functions (admittances) for different distances to the source ($c_s = 100 \text{ m/s}$, $\vartheta = 2,5 \%$)

Der zweitwichtigste Parameter zur Beschreibung der Erschütterungsausbreitung im Untergrund ist die Materialdämpfung des Baugrunds, die bei praktisch relevanten Erschütterungen im Bereich von etwa $\vartheta = (0,01 \dots 0,05)$ liegt (größer bei weicheren Böden und bei größeren Schwingungsamplituden). Sie bewirkt eine zusätzliche exponentielle Amplitudenabnahme der Schwingungen mit der Entfernung und der Frequenz.

Die Dichte ρ und die Querkontraktionszahl ν variieren nur in engen Grenzen und haben daher im Allgemeinen nur einen geringen Einfluss auf die Größe der Erschütterungsamplituden (siehe [1]).

Für räumlich ausgedehnte Quellen wie Maschinen, Rammen, Schienenverkehr ist die oben angegebene Gesetzmäßigkeit noch zu modifizieren. Es sind die Fläche der Maschinengründung und die Tiefenlage des Kraftangriffspunkts in ihrer Wirkung zu berücksichtigen. Bei Schienenverkehr müssen eine Reihe von über die Zuglänge verteilten Lasten überlagert werden.

Bei einer gleichmäßigen Lastverteilung über eine Quelle der Länge $2 \cdot b$ ergibt sich eine Reduktion der Bodenamplituden von

$$\frac{u}{u_0} = \frac{\sin b^*}{b^*}$$

$$b^* = \frac{\Omega \cdot b}{c_s} \quad (3)$$

durch die Überlagerung der mit unterschiedlicher Phase eintreffenden Lastanteile.

Bei n unkorrelierten dynamischen Achslasten eines Zuges hingegen ergibt die Überlagerung gemäß

$$\hat{F}_{\text{ges}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \hat{F}_i^2} \quad (4)$$

eine Verstärkung bis zum maximal $\sqrt{n}$ -fachen der Amplitude einer einzelnen Achslast. In unmittelbarer Gleisnähe entspricht die Erschütterungsabnahme eines Zugs dem Abnahmegesetz einer Linienlast (r^0), mit zunehmender Entfernung dem einer Punktlast ($r^{0,5}$). In [59] wird als mittleres Abnahmegesetz $r^{-0,4}$ vorgeschlagen.

5.3.2 Einfache Modelle für die Immission

Basierend auf einer Vielzahl von Messungen an verschiedenartigen Gebäuden lassen sich die beim Übergang vom Freifeld auf das Gebäudefundament zu erwartenden Amplituden der vertikalen Schwinggeschwindigkeit mit dem einfachen Modell eines fußpunkterregten Einfreiheitsgrad-Schwingers berechnen, der durch die Übertragungsfunktion

The second most important parameter for describing ground-borne vibration propagation is the material damping of the soil, which in the case of vibrations of practical relevance falls within the range of around $\vartheta = (0,01 \dots 0,05)$ and is greater with softer ground and with larger oscillation amplitudes. It causes an additional exponential decay in the amplitude of vibrations with distance and frequency.

Density ρ and Poisson's ratio ν vary only within tight limits and thus generally have only a small influence on the magnitude of vibration amplitudes (see [1]).

For spatially extended sources such as machines, rams or rail traffic, the relationship given above still requires modification. The effects of the area of the machine foundation and of the depth of the force application point need to be taken into consideration. In the case of rail traffic a series of loads distributed over the length of the train have to be superposed.

In the case of an even load distribution over a source of length $2 \cdot b$ a reduction in ground amplitudes of

occurs due to superpositioning of incoming load components with different phases.

On the other hand, with n uncorrelated dynamic axle loads for a train, superpositioning according to

gives an amplification up to a maximum of $\sqrt{n}$ times the amplitude of a single axle load. In the direct vicinity of the track the attenuation in vibration from a train corresponds to the decay rule for a linear load (r^0) and, with increasing distance, to that of a point load ($r^{0,5}$). In [59] $r^{-0,4}$ is suggested as a mean decay rule.

5.3.2 Simple model for immission

On the basis of a large number of measurements in various types of building, the vertical vibration velocity amplitudes expected during the transition from free-field to building foundation can be calculated using the simple model of a base-excited single-degree-of-freedom system, which is described by the transfer function

$$\frac{\hat{v}}{\hat{v}_0} = \frac{k + d \cdot i \cdot \Omega}{k + d \cdot i \cdot \Omega - m \cdot \Omega^2} \quad (5)$$

beschrieben wird $i = \sqrt{-1}$

Die Parameter sind die Gesamtgebäudemasse m , der Realteil der Gründungssteifigkeit k und der Dämpfungskoeffizient d . Die Gründungssteifigkeiten lassen sich auch mit einem Detailmodell für die Gebäudegründung und den jeweiligen Bodenaufbau frequenzabhängig berechnen. Die einfachste Alternative besteht jedoch darin, zu der gesamten Fundamentfläche A ein äquivalentes Kreisfundament mit dem Radius r_{ers} auf einem homogenen Boden zu berechnen, für das annähernd konstante, frequenzunabhängige Werte gelten (Vertikal-schwingungen):

$$k = \frac{4Gr_{\text{ers}}}{1 - \nu} \quad (6)$$

$$d = \frac{3,4\sqrt{G\rho r_{\text{ers}}^2}}{1 - \nu}$$

mit $r_{\text{ers}} = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

Die Übertragungsfunktionen (Bild 2) haben ein Maximum etwas unterhalb der ungedämpften Eigenfrequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Oberhalb dieser Resonanzstelle, für $f_a \geq \sqrt{2}f_0$, werden die Übertragungswerte kleiner als eins, das heißt die Amplituden im Gebäude werden gegenüber den anregenden Freifeldamplituden abgemindert.

where $i = \sqrt{-1}$

The parameters are the total mass of the structure m , the real part of the foundation stiffness k and the damping coefficient d . The foundation stiffnesses can also be calculated frequency-dependent using a detailed model for the building foundation and the corresponding ground structure. The simplest possibility is however to calculate for the entire foundation area A an equivalent circular foundation of radius r_{ers} on homogeneous ground, for which approximately constant, frequency-independent values apply (vertical vibrations):

with $r_{\text{ers}} = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

The transfer functions (Figure 2) have a maximum a little below the undamped natural frequency

Above this resonance point, for $f_a \geq \sqrt{2}f_0$, the transmission values are less than one – in other words, the amplitudes in the building are reduced with respect to the exciting free-field amplitudes.

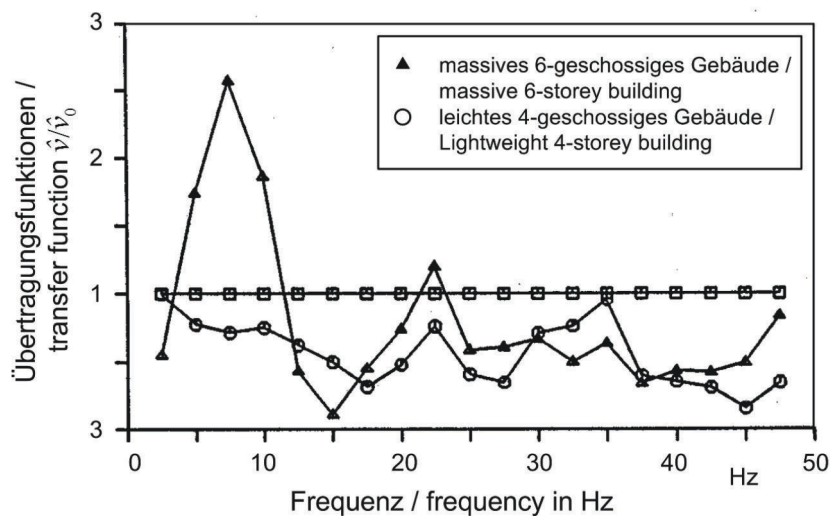


Bild 2. Beispielhafte gemessene Übertragungsfunktionen von Wohngebäuden

Figure 2. Examples of measured transfer functions for residential buildings

Für mittlere Bodensteifigkeiten $c_s = (150 \dots 200)$ m/s ergeben sich als Anhaltswerte folgende Boden-Bauwerks-Eigenfrequenzen:

$f_0 > 15$ Hz : 1- bis 2-geschossige Bauwerke
 $8 < f_0 < 12$ Hz : 2- bis 6-geschossige Bauwerke
 $f_0 < 8$ Hz : mehr als 6 Geschosse

Der maximale Übertragungswert im Bereich der Resonanzfrequenz errechnet sich zu $DLF = 1/(2 \cdot \eta)$ und wird überwiegend durch die Abstrahlungsdämpfung des Baugrunds bestimmt. Aus einer Vielzahl von Messungen hat sich als ein guter Mittelwert für Lockergestein ein Dämpfungsgrad von $\eta = 0,25$ für die vertikale Richtung herausgestellt. Für geschichtete und besonders steife Böden (z.B. Fels) ist der Dämpfungsgrad im Allgemeinen kleiner.

Oberhalb der Boden-Bauwerk-Eigenfrequenz nehmen nach Gleichung (5) die Amplituden gemäß

$$\frac{\hat{v}}{\hat{v}_0} \approx \frac{d \cdot i \cdot \Omega}{-m \cdot \Omega^2} \approx \frac{d}{-m \cdot i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_a} \quad (8)$$

mit etwa $1/f_a$ ab.

Die Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz f_0 ist proportional zur Wellengeschwindigkeit des Bodens. Mit den Steifigkeitswerten für ein Kreisfundament ergibt sich

$$f_0 \sim \sqrt{\frac{k}{m}} \sim \sqrt{G} \sim c_s \quad (9)$$

Dagegen ist die Dämpfung und damit die Resonanzüberhöhung unabhängig von der Steifigkeit des Bodens.

Folgende zusätzliche Effekte müssen gegebenenfalls beim Übergang der Erschütterungen vom Boden ins Gebäude noch berücksichtigt werden (für detaillierte Methoden zu deren Beschreibung vgl. Abschnitt 5.4.3):

- Bei ausgedehnten Gebäudegrundflächen ist die Anregung hinsichtlich Größe und Phase nicht für alle Fundamentpunkte gleich. Die Steifigkeit des Gebäudes gleicht diese Unterschiede zum Teil aus und das Gebäude reagiert nur noch auf eine mittlere Anregung. Dieser Wellenlauffeffekt führt deshalb zu einer zusätzlichen Reduktion der Gebäudeschwingungen infolge Verringerung der Fundamentalschwingungen.
- Bei höheren Gebäuden sind die Verformungen über die Gebäudehöhe mit zu beachten. Durch die Bauwerkselastizität ergibt sich einerseits eine tiefere erste Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz mit größeren Resonanzüberhöhungen als beim starren Gebäude. Dabei sind die Ampli-

The following ground-structure natural frequencies are obtained as reference values for mean ground stiffnesses $c_s = (150 \dots 200)$ m/s:

$f_0 > 15$ Hz : 1- to 2-storey structures
 $8 < f_0 < 12$ Hz : 2- to 6-storey structures
 $f_0 < 8$ Hz : more than 6 storeys

The maximum transmission value within the range of resonance frequency is calculated as $DLF = 1/(2 \cdot \eta)$. It is predominantly determined by the radiation damping of the ground. A large number of measurements has yielded a damping ratio of $\eta = 0,25$ for the vertical direction as a good mean value for loose rock. The damping ratio is generally smaller for stratified and particularly stiff ground (such as rock).

Above the ground-structure natural frequency, following Equation (5), amplitudes fall in accordance with

at about $1/f_a$.

The structure-ground natural frequency f_0 is proportional to the wave velocity of the ground. With stiffness values for a circular foundation this yields

On the other hand, damping and thus the resonance peak is independent of the stiffness of the ground.

The following additional effects may also need to be taken into consideration in the transition of vibrations from the ground into the building (for detailed methods of describing these effects, cf. Section 5.4.3):

- In the case of extensive building footprints, excitation is not the same for all points in the foundation as regards magnitude and phase. The stiffness of the building evens out these differences to a certain extent and the building then only reacts to a mean excitation. This wave propagation effect thus results in an additional reduction in building vibration as a consequence of the reduction in foundation vibration.
- In the case of higher buildings attention should also be paid to the deformations over the height of the building. The elasticity of the structure on the one hand means a lower first structure-ground natural frequency with higher resonance peaks than is found with a rigid