

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei
dynamischen Einwirkungen
Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren
der Baudynamik
Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen

Serviceability of structures under dynamic loads
Methods of analysis and evaluation
in structural dynamics
Basics – methods, procedures and loads

VDI 2038
Blatt 1 / Part 1Ausg. 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	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note	2
Einleitung	2	Introduction	2
1 Anwendungsbereich	5	1 Scope	5
2 Normative Verweise	8	2 Normative references	8
3 Begriffe	10	3 Terms and definitions	10
4 Formelzeichen	10	4 Symbols	10
5 Methoden und Vorgehensweisen in der Baudynamik bei Fragen der Gebrauchstauglichkeit	14	5 Methods and procedures in structural dynamics relating to serviceability questions	14
5.1 Übersicht	14	5.1 Overview	14
5.2 Erfordernis einer baulastdynamischen Beratung und Planung	14	5.2 Requirement for structural dynamics consultation and planning	14
5.3 Einbindung der Baudynamik in Planung und Auslegung	17	5.3 Incorporation of structural dynamics in planning and design	17
5.4 Vorgehensweisen bei der baulastdynamischen Planung und Auslegung	18	5.4 Procedures within structural dynamics planning and design	18
5.5 Anmerkungen zum Sicherheitskonzept zur Gebrauchstauglichkeit	20	5.5 Comments on the serviceability safety concept	20
6 Dynamische Einwirkungen, Übersicht	22	6 Dynamic loads, overview	22
7 Relevante dynamische Einwirkungen für Fragen der Gebrauchstauglichkeit	25	7 Relevant dynamic loads for questions of serviceability	25
7.1 Anregungsarten und ihre Darstellungen	25	7.1 Types of excitation and their representation	25
7.2 Maschinen	30	7.2 Machines	30
7.3 Verkehr	34	7.3 Transportation	34
7.4 Schiffsverkehr, Luftverkehr, tieffrequenter Luftschall aus Verkehr	41	7.4 Waterborne traffic, air traffic, low-frequency airborne sound from traffic	41
7.5 Personen	43	7.5 Persons	43
7.6 Baumaßnahmen	48	7.6 Construction work	48
7.7 Wind	53	7.7 Wind	53
7.8 Ermittlung von dynamischen Einwirkungen bei unbekanntem Kräfte	61	7.8 Determination of dynamic loads with unknown forces	61
Anhang	68	Annex	68
Schrifttum	72	Bibliography	72
Index deutsch	75	Index English	76

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

VDI-Handbuch Schwingungstechnik
VDI-Handbuch Bautechnik – Gebäuderelevante Systeme

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.

Gebrauchstauglichkeit in diesem Zusammenhang kann bedeuten:

- Begrenzung der Schwingungsbeanspruchungen von Bauwerken zur Vermeidung von die Nutzung beeinträchtigenden (Schönheits-)Schäden
- Begrenzung der Belästigung von Menschen – sei es durch die Erschütterungen direkt oder durch den dabei abgestrahlten sekundären Luftschall – im Wohnumfeld, unterwegs oder am Arbeitsplatz zur Sicherstellung des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit
- Begrenzung der Schwingungseinwirkungen auf empfindliche Geräte und Einrichtungen zur Sicherstellung von deren Funktionstüchtigkeit

Die heute zunehmende Bedeutung des Themas resultiert vor allem aus folgenden Punkten:

- Leistungsfähigere Maschinen und Geräte haben zumeist auch ein höheres Erschütterungspotenzial. Das Gleiche gilt für schneller werdenden Verkehr sowie entsprechende Prozesse in Anlagen (vgl. VDI 3842).
- Empfindliche Geräte und Einrichtungen sowie Forschungs- und Produktionsstätten besitzen eine immer geringere Erschütterungsverträglichkeit und stellen daher laufend höhere schwingungstechnische Anforderungen an den Aufstellort, teilweise bereits bis in den Nanobereich.
- Die Tendenz zu Material sparenden Bauweisen mit höherer Ausnutzung der Werkstoffe und

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.

In this context serviceability can mean:

- limiting the vibratory stress on structures in order to prevent (cosmetic) damage having a negative effect on utilization
- limiting the nuisance to or disturbance of individuals – either by vibrations directly or by the emitted secondary airborne sound – in their living environment or when travelling or at work in order to secure their well-being and prevent impairment of their performance abilities
- limiting the effects of vibration on sensitive devices and equipment so as to ensure their functional capability

The increasing importance of this topic today is due above all to the following factors:

- More powerful machines and equipment in most cases also have a greater vibration potential. The same is true for transportation, whose speed is increasing, and for the corresponding processes in installations (cf. VDI 3842).
- Sensitive devices and equipment as also research and production facilities are less and less able to tolerate vibration and are therefore continually raising their vibration-related requirements regarding installation locations, in some cases even into the nano range.
- The tendency towards economical use of materials in lightweight designs and construction

damit zum Leichtbau macht Strukturen zunehmend empfänglicher für Schwingungsanregungen aufgrund geringerer Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen.

- Erschütterungsrelevante Baumaßnahmen finden zunehmend im Bestand statt, im Wohnumfeld, in der Nähe von Labors und vielfach in unmittelbarer Nachbarschaft zu historischer Bausubstanz (Denkmalschutz).
- Die Betroffenen – sei es als Personen selbst, sei es als Betreiber oder Nutzer empfindlicher Geräte und Anlagen – reagieren zunehmend sensibler und rechtsbewusster auf Beeinträchtigungen. Die Verursacher von Störungen, aber auch die Ingenieure, deren Planungen die Störungen verhindern sollen, sehen sich häufiger rechtlichen Schritten gegenüber.

Die Methoden, Schwingungen oder Luftschall zu messen und zu analysieren, sind grundsätzlich vorhanden und in Normen und Richtlinien beschrieben. Die zu erwartenden Schwingungen und Schallpegel mit verschiedenen Genauigkeitsansprüchen rechnerisch zu prognostizieren ist ebenfalls grundsätzlich möglich, jedoch gibt es hier weniger Erfahrungen und normative Hinweise.

Bezüglich der Bewertung ist das Bild uneinheitlich. Während für Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Wohnungen ein erprobtes Regelwerk vorliegt, gibt es entsprechende Werte für andere Aufenthaltsorte überwiegend nur als Vorschläge in der Literatur. Dies gilt in gleicher Weise für die Beurteilungskriterien von empfindlichen Geräten und Einrichtungen. Auch für die Bewertung des sekundären Luftschalls fehlen weitgehend noch verbindliche Kriterien.

Es ist daher das Ziel der Richtlinienreihe VDI 2038, die verstreuten Erkenntnisse zum Thema „Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen“ zusammenzutragen, zu ordnen und darzustellen. Dabei wird versucht, Vorgehenswege bei der Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit systematisch zu beschreiben, Lücken zu schließen und soweit wie möglich konkrete Formeln und Zahlen zu nennen.

Schließlich zeigt die Erfahrung, dass bei den am Bau Beteiligten – Bauherr/Nutzer, Genehmigungsbehörde, Entwurfsverfasser, Fachplaner – große Unsicherheit besteht, ob bei einem Bauvorhaben überhaupt und wenn ja, in welcher Planungsphase,

methods is making constructions increasingly more sensitive to vibration excitation due to lower masses and reduced stiffness and damping characteristics.

- Vibration related structural measures are increasingly implemented in the existing building infrastructure, in particular in the living environment, in the vicinity of laboratories and in many cases in direct proximity to historic buildings (protection of buildings and monuments of historic interest).
- Those affected either as individuals or as owners, operators or users of sensitive equipment and systems are reacting to impairments more and more sensitively and with greater awareness of their legal rights. Not only the parties who are responsible for the source of vibration-related disturbances but even the engineers whose planning work is supposed to prevent such problems are increasingly being faced with legal actions.

The methods for measuring and analyzing vibrations or airborne sound are generally available and described in standards and guidelines. In principle it is also possible to calculate predictions for the expected levels of noise and vibrations. However less experience and fewer normative references are available here for this task.

As regards evaluation the picture lacks uniformity. Although a proven code of practice exists related to the effects of vibration on individuals in dwellings, the corresponding values for other structures with human occupancy are available in the literature only in the form of recommendations. The situation is essentially the same with the evaluation criteria for sensitive devices and equipment. Even for the evaluation of secondary airborne sound there is still an extensive lack of binding criteria.

It is therefore the aim of the series of guidelines VDI 2038 to collect the findings scattered in the literature related to the “serviceability of structures under dynamic loads” and to organize and present this information. At the same time an attempt will be made to provide a systematic description of procedures for evaluating the serviceability of structures, to fill up gaps and where possible to provide specific formulae and figures.

Finally experience shows that uncertainties exist between the participating parties – the owners and users of buildings, the approving authorities, the architects, the planning specialists – as to whether a construction project even needs (and if so, during

ein Fachingenieur für Baudynamik (Fachingenieur für Schwingungsfragen im Bauingenieurwesen) hinzugezogen werden muss und wer dafür die Verantwortung trägt. Auch hier versucht die Richtlinienreihe VDI 2038 Hilfestellung zu geben und Kriterien zu nennen.

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.

Das vorliegende Blatt 1 enthält, wie oben erläutert, neben den Grundlagen im engeren Sinn die Hinweise zur Einbindung des Fachingenieurs für Baudynamik in den Planungs- und Auslegungsprozess sowie alle Aspekte der Einwirkungen. Im Anhang finden sich Angaben zur Prognosesicherheit.

Blatt 2 enthält die Verfahren zur rechnerischen Prognose sowie zur messtechnischen Ermittlung von Schwingungen und Erschütterungen und vor allem die Methoden, Kriterien und Anhaltswerte zur Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, Menschen und empfindliche Geräte. Ferner werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Erschütterungsminderung an der Quelle, auf dem Übertragungsweg und am Empfänger behandelt. Die theoretischen Grundlagen sind in Anhang A bis Anhang C zusammengestellt.

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.

Anmerkung: Der von der Quelle über die Luft auf direktem Weg übertragene Schall wird im Gegensatz zum hier behandelten sekundären Luftschall als primärer Luftschall bezeichnet. Dieser ist Thema der Bauakustik und des Schallimmissionschutzes.

Im englischen Sprachraum wird der sekundäre Luftschall oft auch als „re-radiated sound“ bezeichnet. Wegen der Analogie zu den deutschen Bezeichnungen wird hier dem Begriff „secondary airborne sound“ der Vorzug gegeben.

which planning phase) a structural dynamics engineer (an engineer specializing in vibration-related issues in construction engineering), nor is it at all clear who would take the responsibility for this. Also for this purpose the series of guidelines VDI 2038 seeks to provide assistance and implement relevant criteria.

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 sound; Basics, prognosis, measurement, evaluation and reduction measures

A list of the parts of this series of guidelines which are currently available may be found on the internet at www.vdi.de/2038.

The present Part 1 contains, as explained above, not only the basic principles in the stricter sense but also information about involving the structural dynamics engineer in the planning and design process as well as information about all aspects of vibration loading. The Annex covers the reliability of prognosis.

Part 2 covers the procedures used in theoretical prognosis and in determining shock and vibration by experimental methods and in particular the methods, criteria and reference values relevant to assessing the effects of vibration on structures, individuals and sensitive equipment. This part also examines the various possibilities available for reducing vibrations at their source, on the transmission path and at the receiver. The theoretical principles are dealt with in Annex A to Annex C.

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.

Note: The sound from the source which is transmitted on a direct path via the air is referred to as primary airborne sound as distinct from the secondary airborne sound dealt with in this guideline. Primary airborne sound is a subject of architectural acoustics and noise immission protection.

In the English speaking world instead of “secondary airborne sound” often “re-radiated sound” is used. Because of the analogy to the German wording preference is given to “secondary airborne sound”.

Für Teilaspekte, für die (noch) keine ingenieurmäßig aufbereiteten Angaben existieren, ist in den drei Blättern jeweils ausgewähltes Schrifttum angegeben.

Die normativen Verweise sowie die Formelzeichen sind – einhüllend über Blatt 1 und Blatt 2 – in Blatt 1 angegeben.

Zur besseren Übersicht ist die Gliederung aller drei Blätter in Bild 1 nochmals dargestellt.

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 sekundären Luftschall. Es werden explizit jedoch nur solche Einwirkungen behandelt, die für das Thema Gebrauchstauglichkeit relevant sind.

A selective bibliography is given in each of the three parts of the guideline for subordinate aspects for which engineering-based information is not yet available.

The normative references and also the symbols given in Part 1 cover both Part 1 and Part 2 of the guideline.

For the sake of clarity the areas covered by all three parts are shown graphically in Figure 1.

1 Scope

The VDI 2038 series of guidelines 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 secondary airborne sound. However only those loads relevant to serviceability will be treated explicitly.

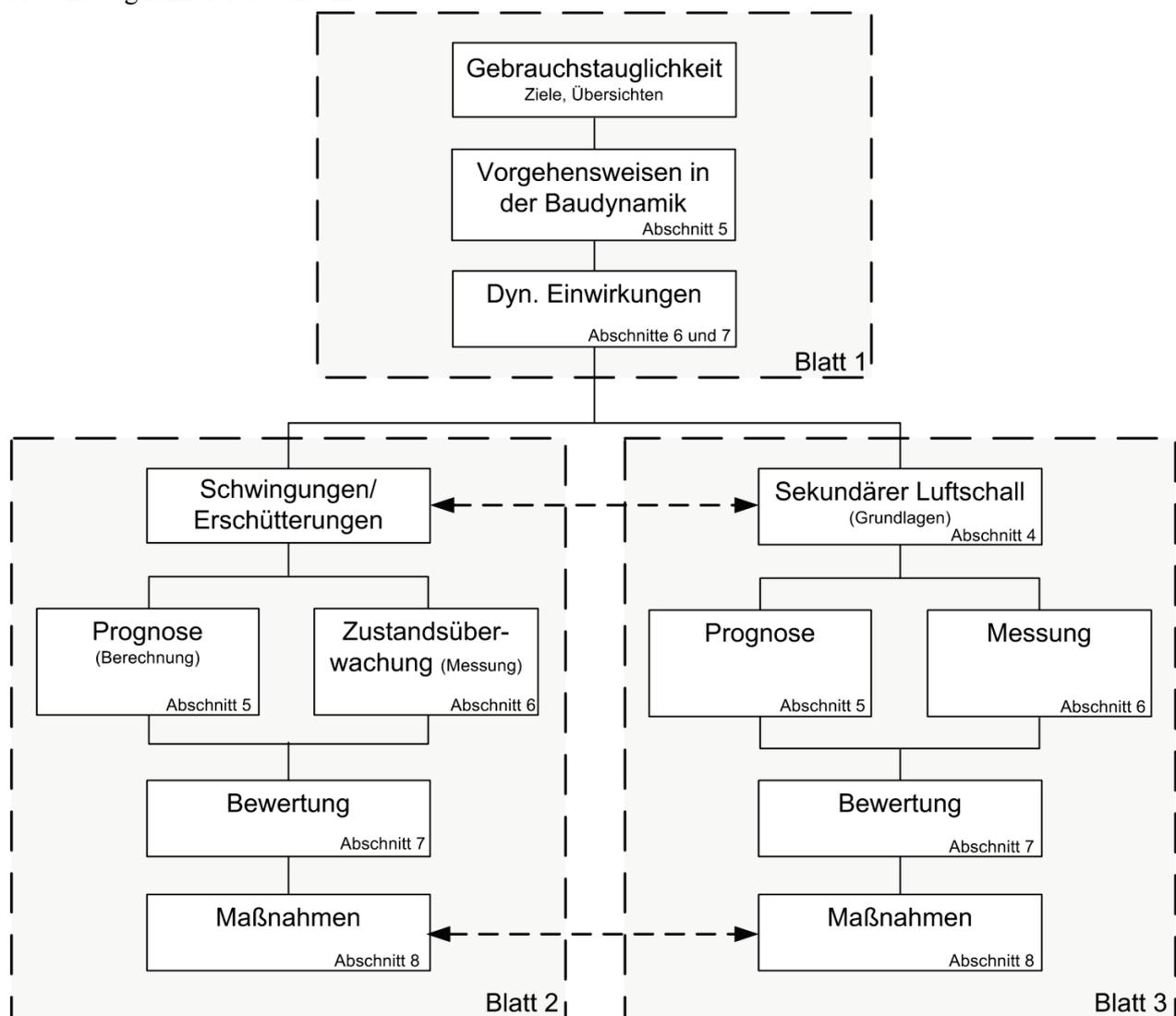


Bild 1. Übersicht über die Richtlinienreihe VDI 2038

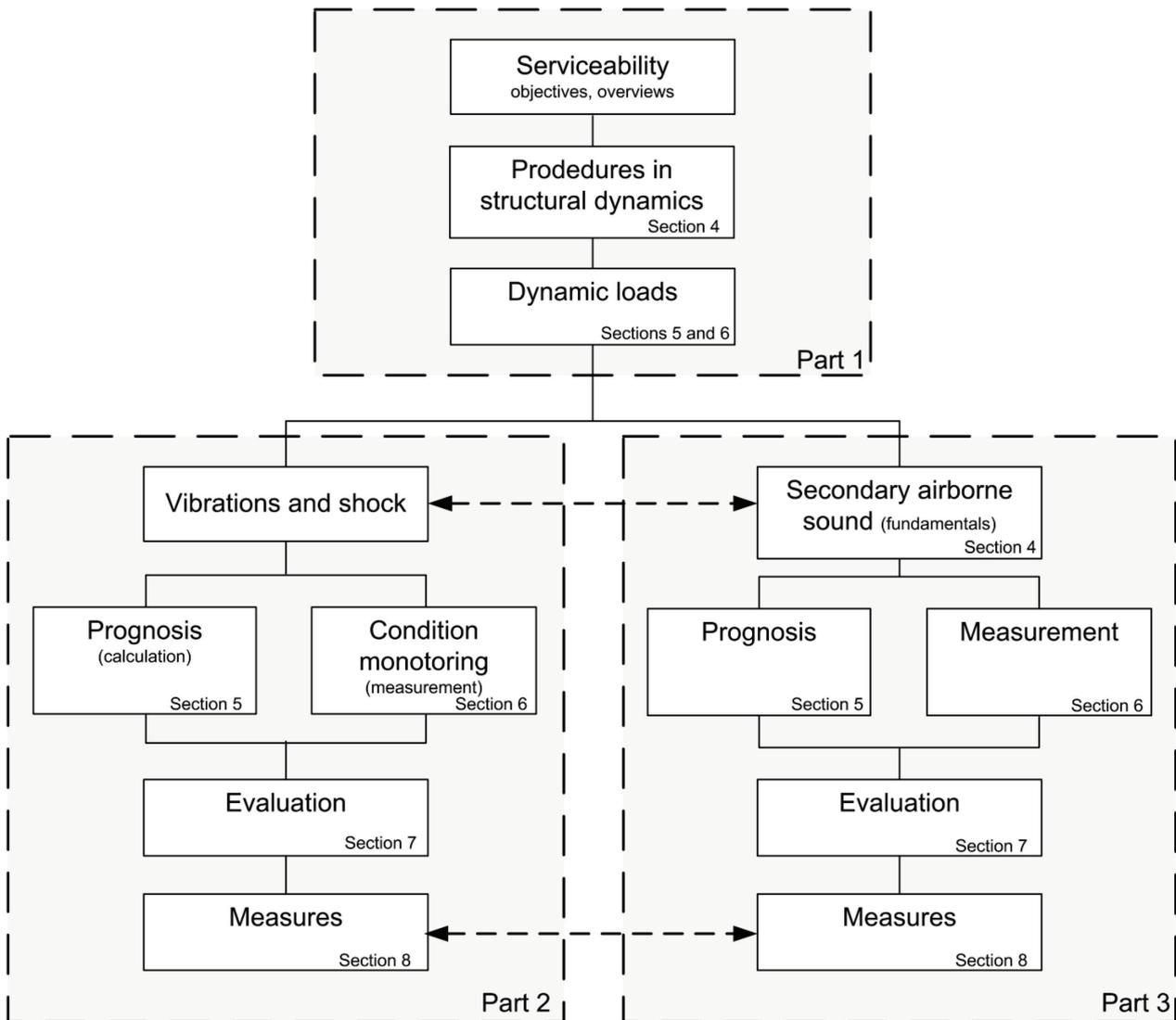


Figure 1. Overview of the series of guidelines VDI 2038

Die vorliegende Richtlinie enthält in Abschnitt 5 zunächst eine systematische Erläuterung der Methoden und Vorgehensweisen der Baudynamik. Dabei wird auch ausführlich auf die Frage eingegangen, ob bei einem Bauvorhaben ein Fachingenieur für Baudynamik eingeschaltet werden sollte, in welcher Bauphase das geschehen sollte und wer von den am Bau Beteiligten dafür die Verantwortung trägt (Abschnitt 5.1 bis Abschnitt 5.3). Dieser Aspekt ist für Architekten, Projektsteuerer und Generalunternehmer sowie gegebenenfalls andere, die am Bau Verantwortung tragen, von Bedeutung. Denn im Gegensatz zu anderen Fachingenieuren, wie für Tragwerksplanung, Baugrund, Bauakustik, Thermische Bauphysik, ist der Baudynamiker vielfach noch nicht im Bewusstsein der Beteiligten als Mitwirkender in der Planung verankert. An ihn wird sich häufig erst erinnert, wenn es zu spät ist und mehr oder weniger starke Beeinträchtigungen der Gebrauchstauglichkeit durch Schwingungs-

Section 5 of the present guideline first sets out a systematic exposition of the methods and procedures used in structural dynamics. Here there is also a detailed treatment of the question whether a structural dynamics engineer should be involved in a building construction project, during which phase of the project this should take place and which individual amongst those involved in the project should have the responsibility for this (Section 5.1 to Section 5.3). This aspect is of importance to architects, project managers and general contractors and where applicable also to other individuals with responsibilities in the project. This is because the structural dynamics engineer, in contrast to other specialist engineers (such as those involved in structural design, soil engineering architectural acoustics, thermal building physics), is often not yet firmly embedded as a planning team member in the consciousness of the other individuals involved. In many cases the need for this involve-

probleme oder sekundären Luftschall sich herausgestellt haben, die teilweise nicht mehr oder nur noch mit erheblichem Aufwand korrigiert werden können. Die rechtzeitige Einschaltung des Baudynamikers hilft hier technische Probleme zu mindern oder zu vermeiden. Zugleich schafft die Berücksichtigung baudynamischer Kriterien bereits bei der Vertragsgestaltung erhöhte Rechtssicherheit.

Es folgt in Abschnitt 6 die Ansprache aller wesentlichen dynamischen Einwirkungen in einer Übersicht und die Herausarbeitung der im Weiteren konkret behandelten. Diese werden in Abschnitt 7 im Einzelnen beschrieben und soweit wie möglich zahlen- und formelmäßig dargestellt.

Nicht behandelt werden Fragen des primären Luftschalls und des Trittschallschutzes, also der Bauakustik, sowie Fragen des Arbeitsschutzes bei der Bedienung von oder der Arbeit in der Nähe von erschütterungsintensiven Maschinen. Hierzu wird auf die Richtlinien VDI 2057 bzw. ISO 2631 verwiesen.

Der in dieser Richtlinie zu betrachtende Frequenzbereich beschränkt sich bei mechanischen Schwingungen zumeist auf den Bereich bis 315 Hz. In der Regel liegt die Obergrenze deutlich niedriger.

Die bezüglich Erschütterungen grundsätzlich gleiche Thematik enthält ISO 10137. Dort wird die Bewertung der Erschütterungen ausschließlich auf der Basis von Beschleunigungen durchgeführt, im Gegensatz zu der in Mitteleuropa üblichen Bewertung anhand von bewerteten Schwinggeschwindigkeiten. Eine Überschneidung besteht auch mit DIN 4150-2, die sehr detailliert die Auswirkung von Erschütterungen auf Menschen in Wohnungen anhand bewerteter Schwinggeschwindigkeiten, den *KB*-Werten, zu beurteilen ermöglicht. Da derzeit eine Entscheidung zwischen Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen als Beurteilungsmaßstab nicht zu erwarten ist, werden in der Richtlinienreihe VDI 2038 soweit sinnvoll beide Möglichkeiten verwendet. Der Vorteil der Verwendung der Schwinggeschwindigkeit liegt darin, dass sowohl die menschliche Wahrnehmung als auch die Beanspruchung von Strukturen primär der Schwinggeschwindigkeit proportional sind und dass der Übergang auf Schwingweg oder Schwingbeschleunigung jeweils nur eine Integration oder Differenzierung erfordert.

ment becomes apparent when it is already too late and, due to vibration problems or secondary airborne sound, serviceability impairments of a greater or lesser severity have emerged which in some cases can only be corrected with considerable effort or even not at all. Timely involvement of the structural dynamics engineer is useful here in reducing or preventing technical problems. At the same time, taking structural dynamics criteria into consideration even at the contract formulation stage will ensure a greater degree of confidence regarding the legal situation.

In Section 6 an overview is given addressing all of the principle dynamic loads and identifying those to be dealt with in concrete terms later on. These are described individually in Section 7 and where possible presented both numerically and as formulae.

The guideline will not be concerned with questions relating to primary airborne sound or to footfall insulation in other words, architectural acoustics. Neither will the guideline deal with questions relating to industrial health and safety relevant to operating or working close to high-vibration machines. In this regard see guidelines VDI 2057 and ISO 2631.

The frequency range to be examined in the present guideline in the case of mechanical vibrations is restricted in most cases to the range up to 315 Hz. The upper limit is as a rule considerably lower.

Basically the same shock and vibration topics are covered in ISO 10137. Here vibrations are evaluated exclusively on the basis of accelerations, in contrast to the evaluative approach usual in central Europe which uses weighted vibration velocities. There is also an overlap with DIN 4150-2, which, in a very detailed approach, makes it possible to evaluate the effect of vibrations on individuals in dwellings with the aid of weighted vibration velocities, the *KB* values. Since a decision in favour of velocities or accelerations as an evaluative criterion is not currently to be expected, the VDI 2038 series of guidelines will use both possibilities where this makes sense. The advantage of using vibration velocity is that not only human perception but also stress in structures is primarily proportional to vibration velocity and that the transition to vibration displacement or vibratory acceleration in each case only requires a single integration or differentiation.