

Helmut Kramer

Angewandte Baudynamik

Grundlagen und Beispiele
für Studium und Praxis



Helmut Kramer
Angewandte Baudynamik
Grundlagen und Beispiele
für Studium und Praxis

200 Jahre Wiley – Wissen für Generationen

John Wiley & Sons feiert 2007 ein außergewöhnliches Jubiläum: Der Verlag wird 200 Jahre alt. Zugleich blicken wir auf das erste Jahrzehnt des erfolgreichen Zusammenschlusses von John Wiley & Sons mit der VCH Verlagsgesellschaft in Deutschland, einschließlich des Ernst & Sohn Verlages für Architektur und technische Wissenschaften, zurück. Seit Generationen vermitteln Wiley und Wiley-VCH als auch Ernst & Sohn die Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung und technischer Errungenschaften in der jeweils zeitgemäßen medialen Form.

Jede Generation hat besondere Bedürfnisse und Ziele. Als Charles Wiley 1807 eine kleine Druckerei in Manhattan gründete, hatte seine Generation Aufbruchsmöglichkeiten wie keine zuvor. Wiley half, die neue amerikanische Literatur zu etablieren. Etwa ein halbes Jahrhundert später, während der „zweiten industriellen Revolution“ in den Vereinigten Staaten, konzentrierte sich die nächste Generation auf den Aufbau dieser industriellen Zukunft. Wiley bot die notwendigen Fachinformationen für Techniker, Ingenieure und Wissenschaftler. Das ganze 20. Jahrhundert wurde durch die Internationalisierung vieler Beziehungen geprägt – auch Wiley verstärkte seine verlegerischen Aktivitäten und schuf ein internationales Netzwerk, um den Austausch von Ideen, Informationen und Wissen rund um den Globus zu unterstützen.

Wiley begleitete während der vergangenen 200 Jahre viele Generationen und fördert heute den weltweit vernetzten Informationsfluss, damit auch unsere global wirkende Generation ihre Ansprüche erfüllen kann und ihr Ziel erreicht. Immer rascher verändert sich unsere Welt, und es entstehen neue Technologien, die unser Leben und Lernen zum Teil tief greifend verändern. Beständig nimmt Wiley diese Herausforderungen an und stellt für Sie das notwendige Wissen bereit, das Sie neue Welten, neue Möglichkeiten und neue Gelegenheiten erschließen lässt.

Generationen kommen und gehen: Aber Sie können sich darauf verlassen, dass Wiley Sie als beständiger und zuverlässiger Partner mit dem notwendigen Wissen versorgt.



William J. Pesce
President and Chief Executive Officer



Peter Booth Wiley
Chairman of the Board

Helmut Kramer

Angewandte Baudynamik

**Grundlagen und Beispiele
für Studium und Praxis**



Prof. Dr.-Ing. Helmut Kramer
Kramer + Albrecht, Ingenieurbüro VBI-VPI
Glockengießerwall 1
20095 Hamburg

Titelbild: Fußgängerbrücke über die Gahlensche Straße, Bochum
(ausgezeichnet mit dem Ingenieurbau-Preis 2004)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

ISBN: 978-3-433-01823-1

© 2007 Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgend-
einer Form - durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren - reprodu-
ziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen,
verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of
this book may be reproduced in any form - by photoprint, microfilm, or any other
means - nor transmitted or translated into a machine language without written
permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kenn-
zeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann
frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene
Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie
als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: blotto, Berlin
Satz: Druckhaus „Thomas Müntzer“, Bad Langensalza
Druck: Strauss GmbH, Mörlenbach
Bindung: Litges & Dopf Buchbinderei GmbH, Heppenheim
Printed in Germany

*Dem Andenken meines verehrten Lehrers
an der Technischen Universität Berlin
Professor Dr.-Ing. Hans Lorenz
zum 100. Geburtstag
(1905 – 1996)*

Vorwort

Die Sensibilität der Menschen für Erschütterungen hat im Zuge wachsenden Umweltbewusstseins stark zugenommen. Ganz allgemein werden Verbraucherschutz und Lebensqualität immer ernster genommen. Erschütterungen, die früher sozusagen schicksalhaft hingenommen wurden, führen heute zu langwierigen Gerichtsprozessen. Durch höhere Ausnutzung der Baustoffe werden Baukonstruktionen schlanker und dadurch schwingungsanfälliger im häufig vorkommenden Frequenzbereich. Daher wächst der Druck auf den Tragwerksplaner, dynamische Beanspruchungen von vornherein zu berücksichtigen. Gerichte entscheiden nach dem „Stand der Technik“, also nach dem, was im Kreis der Anwender (Tragwerksplaner) als allgemein bekannt vorausgesetzt werden kann. Beispielsweise stützt sich eine letztinstanzliche Entscheidung des Hamburgischen Obergerichtes vom 14.12.1999, in Ermangelung einer gesetzlichen Regelung, auf die Zumutbarkeitsgrenzen der DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“, deren Kenntnis allgemein vorausgesetzt werden kann. Allerdings entstehen durch die notwendigen Maßnahmen zum Erschütterungsschutz oftmals höhere Baukosten, was dem Bauherren manchmal nur schwer zu vermitteln ist.

Dieses Buch ist aus einer Lehrveranstaltung im Studiendekanat Bauwesen an der TU Hamburg-Harburg hervorgegangen. Sie umfasst Vorlesungen, schwingungstechnische Experimente sowie durchgerechnete Beispiele und versteht sich als anwendungsorientierte Einführung in die Baudynamik. Die Auswahl des Stoffes ist an den in der Praxis häufig auftretenden Problemen orientiert. Auf windinduzierte Schwingungen und Erdbeben musste trotz ihrer großen Bedeutung verzichtet werden, um den Stoff nicht zu sehr auszuweiten. Allerdings helfen die hier vermittelten Grundlagen, sich in diese Anwendungsfälle anhand von Spezialliteratur einzuarbeiten.

Die Baustatik ist ein Sonderfall der Baudynamik.

Die Baudynamik gehört zum Arbeitsbereich des Tragwerksplaners. Die Berechnungsmodelle der Baustatik beruhen auf der Voraussetzung, dass Einwirkungen auf Baukonstruktionen unendlich langsam auftreten, obwohl es in der Natur zeitunabhängige Vorgänge nicht gibt. Deshalb muss der Tragwerksplaner von Fall zu Fall entscheiden, ob die Zeitabhängigkeit der Einwirkungen vernachlässigt werden kann. Obwohl Schwingungsprobleme in der Praxis zunehmend auftreten, werden sie von den Tragwerksplanern gerne umgangen, um mit vertrauten statischen Ersatzlasten, Stoßfaktoren oder Schwingbeiwerten zu rechnen, ohne sich allerdings immer ihrer Anwendungsgrenzen bewusst zu sein. Dieses Buch soll die Anschaulichkeit und das Grundverständnis für zeitabhängige Vorgänge wecken, um den Leser in die Lage zu versetzen, auch komplizierte Phänomene anhand weiterführender Literatur bearbeiten zu können. Schließlich stehen heute elektronische Programme zur Verfügung, die sehr komplexe Strukturen berechnen können, deren Ergebnisse allerdings durch überschlägige Berechnungen an einfachen Modellen einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden müssen.

**„Phantasie ist wichtiger als Wissen,
denn Wissen ist begrenzt.“**

Albert Einstein

Ingenieure, die sich über die Baustatik hinausgehend während ihrer Ausbildung mit Baudynamik beschäftigt haben, können eine erweiterte berufliche Qualifikation vorweisen. In den 35 Jahren Praxiserfahrung des Verfassers hat sich aber gezeigt, dass damit für den beruflichen Erfolg nur eine von drei notwendigen Voraussetzungen gegeben ist. Neben der fachlichen Kompetenz sind soziale und innovative Kompetenz für den beruflichen Erfolg ausschlaggebend. Gerade hoch spezialisierte Ingenieure beschränken sich gern auf ihre fachliche Kompetenz, worin eine der Ursachen für ihre geringe Akzeptanz in der Öffentlichkeit zu sehen ist. „Soziale Kompetenz“ bedeutet Teamfähigkeit, Kompromissfähigkeit und Mitarbeitermotivation: „Jeder Mitarbeiter ist auch ein Mitmensch“. Ohne kommunikatives Handeln wird ein technisches Werk nicht gelingen. „Innovative Kompetenz“ bedeutet, über den Erfahrungsschatz hinaus neue Lösungen zu finden. Jede vorhandene Lösung eines technischen Problems ist verbesserungsfähig! Um das Gehirn von Routine und Monotonie zu befreien, hilft ganz allgemein Vielseitigkeit, insbesondere interdisziplinäres Denken, Interesse an anderen Fachgebieten wie Rechtsfragen, Ökonomie, Kunst und Philosophie sowie an ökologischen und gesellschaftlichen Zusammenhängen.

Eine weitere Ursache für die geringe Akzeptanz der Ingenieure in der Öffentlichkeit besteht darin, dass ihnen die negativen Folgen technischen Fortschritts angelastet werden, obwohl es in einem demokratisch verfassten Gemeinwesen keine privilegierte ethische Kompetenz – also auch nicht die der Ingenieure – geben kann. Während es das Ziel der aristotelischen Wissenschaft war zu erklären, *warum* Naturvorgänge ablaufen, entstand die moderne Wissenschaft, als Galilei damit begann zu beschreiben, *wie* Naturvorgänge ablaufen. Er schaffte damit die Grundlage heutiger Forschung und damit die Trennung von Wissenschaft (Technik) und Ethik.

Dennoch bleibt der Vorwurf bestehen, dass sich Ingenieure zu wenig in der Öffentlichkeit positionieren und dadurch das mangelnde Verständnis der Bevölkerung für ihre Arbeit selbst verschulden.

„Nichts ist praktischer als eine gute Theorie.“

Immanuel Kant

Zum Schluss sei auf den weit verbreiteten Irrtum hingewiesen, wonach gute theoretische Grundkenntnisse nur für wissenschaftliches Arbeiten notwendig sind. Ausbildungskonzepte, die einen schnellen beruflichen Erfolg durch „praxisorientierte Ausbildung“ versprechen, übersehen, dass innovative Lösungen vor allem von den Ingenieuren kommen, die die Mühe nicht gescheut haben, sich die theoretischen Grundlagen ihres Fachgebietes anzueignen. Um Wettbewerbsvorteile zu erzielen, muss der in der Praxis tätige Ingenieur den sich ständig ändernden Anforderungen des Marktes gerecht werden, was mit Standardlösungen nicht gelingt. Er muss in der Lage sein, Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen zu verstehen, um sie schnell umsetzen zu können. Eine Beschleunigung des Wissenschaftstransfers fördert die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.

Der Schwingungstilger ist ein typisches Beispiel, wie die zunächst theoretische Lösung eines gekoppelten linearen gewöhnlichen Differentialgleichungssystems zu einem eminent wichtigen Anwendungsfall wurde. Die Neugierde des Ingenieurs, tiefer in sein Fachgebiet einzudringen, ist eine wesentliche Ursache für technischen Fortschritt. Jeder Ingenieur – einerlei ob er in der Forschung, in der Planung, in der Ausführung oder in der Verwaltung tätig ist – sollte sich der Herkunft seiner Berufsbezeichnung aus dem lateinischen ingenium = Erfindungskraft bewusst sein.

Picasso wurde von einem Freund darauf hingewiesen, dass Frauen nicht so aussehen, wie er sie malen würde. Seine Antwort: „Dann wurde es Zeit, sie zu erfinden.“ Ergo: Von der Kunst können wir Ingenieure lernen, neue Wirklichkeiten zu schaffen.

Danksagen möchte ich in erster Linie meinem Partner, Herrn Dipl.-Ing. Friedhelm Albrecht, für sein großes Verständnis und seine uneingeschränkte Unterstützung dieses Buchprojektes. Unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danke ich für ihre fachkundige Hilfe bei der Erstellung des Manuskriptes. Herr Dipl.-Ing. Leif Lorenzen, Frau Dipl.-Ing. Ina Martens und Frau Dipl.-Ing. Jana Vorbau haben bei der Ausarbeitung der Anwendungsbeispiele ihre umfangreichen Kenntnisse und Erfahrungen in der Baudynamik eingebracht. Besondere Verantwortung oblag Frau Dr.-Ing. Kira Holtzendorff und Herrn Dipl.-Ing. Jörg Lamers, die aus einem stichwortartigen Vorlesungsmanuskript die Grundlage für eine gut verständliche Buchfassung zu erstellen hatten und durch ihre Anmerkungen und Korrekturen wesentlich zur Verbesserung beigetragen haben. Die zahlreichen Skizzen wurden mit großem Geschick von Frau Silvia Meier angefertigt. Ebenfalls danke ich Herrn Dipl.-Ing. Marc Oliver Rosenquist, der mit dem Kapitel 13 „Schwingungsmessungen“ dieses Buch um einen wichtigen Aspekt bereichert hat. Last but not least möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Quast danken, der die Anregung zu dieser Vorlesung gab und mir in jeder Beziehung hilfreich zur Seite stand. Seinem Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. R. Steffens ist es zu verdanken, dass die schwingungstechnischen Experimente zu einer eindrucksvollen und lehrreichen Vorführung wurden. Schließlich ist der Mut des Verlages Ernst & Sohn hervorheben, ein Außenseiterthema, wie es die Baudynamik noch immer ist, in sein Programm aufzunehmen. Der Verlag leistet damit einen dankenswerten Beitrag zur Tragwerksplanung, die sich immer intensiver um die Vermeidung schwingungsbedingter Schäden zu kümmern hat.

Hamburg, September 2006

Helmut Kramer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
1 Gliederung und Formelzeichen	1
2 Besonderheiten der Baudynamik	5
2.1 Baustatik und Baudynamik	5
2.2 Die „sichere Seite“	6
2.3 Schwingungsmessungen	6
2.4 Fernwirkung	7
2.5 Dämpfung und Duktilität	7
2.6 Die statische Ersatzlast	7
2.7 Maschinendynamik	8
2.8 Schäden	8
3 Technische Regeln in der Baudynamik	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Hamburgische Bauordnung (Auszug)	9
3.3 Bundes-Immissionsschutzgesetz (Auszug)	10
3.4 Technische Baubestimmungen	10
3.5 Normen	11
3.6 Richtlinien und Empfehlungen	11
3.7 Internationale technische Regeln	12
3.8 Allgemein anerkannte Regeln der Technik	13
4 Begriffe und Kenngrößen	15
4.1 Allgemeines	15
4.2 Zeitabhängigkeit	15
4.2.1 Periodische Einwirkungen	15
4.2.2 Harmonische Einwirkungen	16
4.2.3 Nichtharmonische Einwirkungen	20
4.2.4 Nichtperiodische Einwirkungen	24

4.3	Masse	25
4.3.1	Schwere Masse	25
4.3.2	Träge Masse	27
4.3.3	Allgemeines Gravitationsgesetz	28
4.4	Steifigkeit	31
4.4.1	Allgemeines	31
4.4.2	Stahlfedern	33
4.4.3	Stützen, Pfähle	34
4.4.4	Statisch bestimmter Balken	35
4.4.5	Elastische Matten	36
4.4.6	Luftfedern	38
4.4.7	Federkombinationen	40
4.4.8	Vorgespannte Schrauben	42
4.5	Anwendungsbeispiele	43
4.5.1	Pfahlbock aus zwei Pfählen mit gleicher Neigung	43
4.5.2	Pfahlbock aus einem geneigten und einem lotrechten Pfahl	44
5	Bewegungen starrer Körper	47
5.1	Allgemeines	47
5.2	Reine Translation	47
5.2.1	Schwerpunktsatz	47
5.2.2	Impulssatz	48
5.2.3	Impulserhaltungssatz	49
5.3	Reine Rotation	49
5.3.1	Drallsatz	49
5.3.2	Drallerhaltungssatz	51
5.4	Massenträgheitsmoment	51
5.5	Wuchtgüte von Maschinen	54
5.6	Anwendungsbeispiele	57
5.6.1	Krängungswinkel bei seitlicher Schiffsanfahrung	57
5.6.2	Stabilität eines schwimmenden Körpers	60
6	Stoßvorgänge	61
6.1	Der harte Stoß	61
6.1.1	Allgemeines	61
6.1.2	Aufprall	61
6.1.3	Anprall	66
6.1.4	Zusammenstoß zweier Körper	69
6.2	Der weiche Stoß	75
6.3	Anwendungsbeispiele	76
6.3.1	Elastischer Einfahldalben	76
6.3.2	Plastischer Anfahrpoller	82
6.3.3	Bungee-Springen	87

7	Freie Schwingungen	91
7.1	Allgemeines	91
7.2	Systeme mit einem Freiheitsgrad	91
7.2.1	Der Einmassenschwinger	91
7.2.2	Differentialgleichung	91
7.2.3	Eigenfrequenz der freien ungedämpften Schwingung	92
7.2.4	Reduzierte Massen	96
7.3	Systeme mit mehreren Freiheitsgraden	98
7.3.1	Der ungedämpfte Zweimassenschwinger	98
7.3.2	Elastisch gestützte starre Scheibe	100
7.4	Homogene Systeme endlicher Länge	104
7.4.1	Allgemeines	104
7.4.2	Eigenfrequenzen für ungedämpfte Systeme	104
7.4.3	Näherungsverfahren	106
7.4.4	Biegeeigenfrequenz mit Normalkraft	107
7.5	Anwendungsbeispiele	109
7.5.1	Maschinenfundament auf einzelnen Federn	109
7.5.2	Nichtlinearität bei Stahlbetontragwerken	117
8	Erzwungene Schwingungen	123
8.1	Allgemeines	123
8.2	Systeme mit einem Freiheitsgrad	125
8.2.1	Direkte konstante Anregung – kraftgesteuerte Vorgänge	125
8.2.2	Direkte konstante Anregung – weggesteuerte Vorgänge	133
8.2.3	Impedanzen	133
8.2.4	Direkte quadratische Anregung – Fliehkräfte	134
8.2.5	Selbstzentrierung im überkritischen Bereich	136
8.2.6	Passive Schwingungsisolierung – indirekte Anregung	137
8.2.7	Aktive Schwingungsisolierung – direkte Anregung	141
8.2.8	Aktive Schwingungsisolierung – indirekte Anregung	142
8.2.9	Isolierwirkungsgrad	144
8.2.10	Resonanzüberhöhung in dB	145
8.3	Der Zweimassenschwinger	147
8.3.1	Allgemeines	147
8.3.2	Der Zweimassenschwinger als Schwingungstilger/-dämpfer	148
8.3.3	Der Zweimassenschwinger als Maschinenfundament	152
8.4	Lösungswege der Baudynamik bei periodischer Anregung	160
8.5	Anwendungsbeispiele	160
8.5.1	Schwingungsdämpfer für eine Fußgängerbrücke	160
8.5.2	Ermüdungsfestigkeit bei Schmelzofenschwingungen	163

9	Amplitudenreduktion	171
9.1	Allgemeines	171
9.2	Amplitudenreduktion an der Quelle	171
9.3	Amplitudenreduktion auf der Übertragungsstrecke	171
9.4	Amplitudenreduktion am Empfänger	171
9.4.1	Amplitudenreduktion im resonanzfernen Bereich	172
9.4.2	Amplitudenreduktion im resonanznahen Bereich	172
9.5	Dissipative Dämpfung	172
9.5.1	Überblick	172
9.5.2	Rheologische Modelle	173
9.5.3	Ausschwingversuch	175
9.5.4	Resonanzversuch	178
9.5.5	Hysterese-Kurve	179
9.5.6	Fluidreibung	183
9.6	Anwendungsbeispiele	184
9.6.1	Dämpfungsberechnung aus einem Ausschwingversuch	184
9.6.2	Dämpfungsberechnung aus einer Hysterese-Kurve	187
10	Menscheninduzierte Schwingungen	189
10.1	Allgemeines	189
10.2	Anregungsspektrum	189
10.3	Dimensionierungsfälle	191
10.4	Erzwungene Schwingungen	195
10.5	Zumutbare Amplituden	197
11	Einführung in die Baugruddynamik	199
11.1	Allgemeines	199
11.2	Elastodynamik	200
11.2.1	Allgemeines	200
11.2.2	Ausbreitungsgeschwindigkeiten	201
11.2.3	Wellenarten	203
11.2.4	Wellengleichung	206
11.2.5	Energietransport	207
11.2.6	Abschirmwirkung einer Schlitzwand	208
11.2.7	Ausbreitung von Rammerschütterungen	210
11.3	Boden-Bauwerk Wechselwirkung	212
11.3.1	Modellbildung	212
11.3.2	Federsteifigkeiten und Dämpfungen starrer Fundamente	212
11.3.3	Indirekte Anregung durch Bodenwellen	214
11.3.4	Abstimmungsregel für Fundamente	217

11.4	Plastodynamik	219
11.5	Anwendungsbeispiele	220
11.5.1	Auswirkung einer Sprengung auf eine verankerte Spundwand	220
11.5.2	Auswirkung einer Sprengung auf eine Windkraftanlage	224
12	Anforderungen an den Erschütterungsschutz	229
12.1	Allgemeines	229
12.2	Einwirkungen auf bauliche Anlagen	230
12.3	Einwirkungen auf Menschen	231
12.3.1	Allgemeines	231
12.3.2	Menschen in Gebäuden	232
12.3.3	Menschen am Arbeitsplatz	235
12.3.4	Schädliche und heilende Humanschwingungen	236
12.4	Einwirkungen auf empfindliche Geräte	237
13	Schwingungsmessungen	241
13.1	Motivation	241
13.2	Einleitung	242
13.3	Anregung von Schwingungen	242
13.3.1	Anregung von Schwingungen für Schwingungsmessungen	242
13.3.2	Aktive Schwingungsbeeinflussung (Aktuatoren)	245
13.4	Aufbau einer Messkette	246
13.5	Schwingungsaufnehmer	247
13.5.1	Allgemeines	247
13.5.2	Zweck	247
13.5.3	Mechanisches Grundprinzip	247
13.5.4	Arbeitsweise	251
13.6	Durchführung von normgerechten Schwingungsmessungen	256
13.7	Beispiele für gemessene Freifeldschwingungen	259
Fazit	262
Literaturverzeichnis	263
Stichwortverzeichnis	267

DVD – Baudynamik erlebbar machen

Filmausschnitte aus den Experimenten in der Versuchshalle des Instituts für Massivbau, TU Hamburg-Harburg, zu den im Buch behandelten Beispielen.

1. Titel
2. Aufprall
3. Anprall
4. Eigenfrequenzen
5. Harmonische Anregung
6. Selbstzentrierung
7. Transiente Wellen
8. Rayleighwellen
9. Passive Isolierung
10. Anhang

1 Gliederung und Formelzeichen

Es sei darauf hingewiesen, dass in der Baudynamik, um Fehler zu vermeiden, besonders auf die Formelzeichen und Begriffe zu achten ist, da diese zum Teil nicht so geläufig und einheitlich sind, wie in der Baustatik. Mehrfachbedeutungen eines Formelzeichens lassen sich nicht immer vermeiden, sind aber aus dem Zusammenhang zu erkennen. Wer sich mit Baudynamik beschäftigt, wird nicht umhin kommen, mit deutsch- und englischsprachigen Veröffentlichungen zu arbeiten, die sich zum Teil erheblich in der Verwendung von Formelzeichen und Begriffen für dieselben physikalischen Kenngrößen unterscheiden. Erschwerend kommt hinzu, dass die in der Maschinendynamik, Akustik und Elektrotechnik üblichen Formelzeichen und Begriffe zum Teil auch in der Baudynamik Verwendung finden. Deshalb ist der Leser gut beraten, sich beim Studium der Baudynamik nicht an Formelzeichen und Begriffe festzuklammern, sondern sich stets ihrer physikalischen Bedeutung bewusst zu sein. Beachtet man die Dimension eines Formelzeichens, sind Missverständnisse kaum möglich.

Das Buch gliedert sich in drei Teile, die, je nach Kenntnisstand und Interesse des Lesers, in beliebiger Reihenfolge gelesen werden können. Die Kapitel 2 bis 5 beschreiben die Besonderheiten, die technischen Regeln und die Grundbegriffe der Baudynamik sowie die aus der technischen Mechanik bekannten Gesetze der Bewegungen starrer Körper. Die Kapitel 6 bis 9 umfassen den Hauptteil mit Stoßvorgängen, freien und erzwungenen Schwingungen und Maßnahmen zur Amplitudenreduktion durch Frequenzabstimmung und Dämpfung. Die Kapitel 10 bis 13 behandeln schließlich Sonderfragen wie menscheninduzierte Schwingungen, Baugrunddynamik mit Boden-Bauwerk-Wechselwirkung und Wellenausbreitung, Anforderungen an den Erschütterungsschutz und Schwingungsmessungen. In allen Abschnitten sind Rechenbeispiele enthalten, die für das Verständnis des Stoffes – vor allem, wenn der Leser versucht, sie zunächst selbstständig zu lösen – unerlässlich sind.

Die häufig benutzten Formelzeichen werden im Folgenden aufgelistet.

Formelzeichen	Dimension	Begriff
<i>a</i>	[m/s ²]	Beschleunigung
<i>c</i>	[m/s]	Wellengeschwindigkeit, Lichtgeschwindigkeit
<i>c</i>	[kNs/m]	Dämpfungskonstante
<i>d</i>	[m]	Dicke
<i>d</i>	[-]	Verlustfaktor
<i>e</i>	[m]	Exzentrizität
<i>f</i>	[Hz]	Frequenz
<i>f</i>	[m]	Durchbiegung
<i>g</i>	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
<i>h, H</i>	[m]	Fallhöhe
<i>k</i>	[kN/m]	Federkonstante
<i>k</i>	[1/m]	Krümmung
<i>l</i>	[m]	Länge
<i>m, M</i>	[kg, t]	Masse
<i>n</i>	[1/min]	Maschinendrehzahl
<i>p</i>	[kN/m ² , bar]	Druck
<i>q</i>	[kN/m]	Streckenlast
<i>r, R</i>	[m]	Radius
<i>s</i>	[m]	Weg, Verschiebung
<i>t</i>	[s]	Zeit
<i>u, v</i>	[m/s]	Geschwindigkeit
<i>A</i>	[m ²]	Fläche
<i>D</i>	[-]	Lehrsches Dämpfungsmaß, Dämpfungsgrad
<i>D</i>	[tm ² /s]	Drall, Drehimpuls
<i>E</i>	[kNm]	Energie
<i>E</i>	[kN/m ²]	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	[kN]	Kraft
<i>G</i>	[kN]	Eigengewicht
<i>G</i>	[kN/m ²]	Schubmodul
<i>I</i>	[tm/s]	Impuls
<i>I</i>	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
<i>I</i>	[%]	Isolierwirkungsgrad
<i>I</i>	[A]	Stromstärke
<i>L_v</i>	[dB]	Pegel der Schallschnelle
<i>M</i>	[kNm]	Moment
<i>N</i>	[kN]	Normalkraft
<i>Q</i>	[m/s]	Wuchtgüte
<i>Q</i>	[Grad/s]	Anregungskreisfrequenz, Anregungswinkelgeschwindigkeit
<i>Q</i>	[kcal]	Wärmemenge, Wärmeäquivalent
<i>R</i>	[kN]	Reibungskraft
<i>T</i>	[s]	Periodendauer
<i>U</i>	[tm]	Unwucht

Formelzeichen	Dimension	Begriff
V	[-]	Vergrößerungsfunktion, Übertragungsfunktion, dynamische Überhöhung
V	[m ³]	Volumen
W	[m ³]	Widerstandsmoment
W	[kNm]	Arbeit
Z	[kN]	Zentrifugalkraft
β	[rad, Grad]	Phasenwinkel
γ	[rad, Grad]	Scherwinkel
γ	[cm ³ /kg s]	Gravitationskonstante
γ'	[kN/m ³]	Wichte
δ	[-]	Abklingkoeffizient
ε	[-]	Dehnung
ε	[-]	Newtonsche Stoßzahl
η	[kNs/m ²]	Viskosität
η	[-]	Frequenzverhältnis
φ	[rad, Grad]	Nullphasenwinkel
φ	[rad, Grad]	Drehwinkel
φ'	[Grad]	Reibungswinkel
κ	[-]	Massenverhältnis
λ	[m]	Wellenlänge
μ	[-]	Reibungsbeiwert
μ	[t/m]	Streckenmasse
ν	[-]	Querdehnzahl
ν	[-]	Verhältnis der Federsteifigkeiten
ρ	[t/m ³]	Dichte
σ	[kN/m ²]	Spannung
ω	[rad/s]	Eigenkreisfrequenz, Eigenwinkelgeschwindigkeit
Ω	[rad/s]	Anregungskreisfrequenz Anregungswinkelgeschwindigkeit
ψ	[rad, Grad]	Drehwinkel
ψ	[-]	spezifische hysteretische Dämpfung
ϑ	[-]	logarithmisches Dekrement
Θ	[tm ² , kN m s ²]	Massenträgheitsmoment

2 Besonderheiten der Baudynamik

2.1 Baustatik und Baudynamik

In der Baudynamik geht es um zeitabhängige Einwirkungen und Systemantworten. Die Baustatik ist ein Sonderfall der Baudynamik, wenn Einwirkungen „unendlich langsam“ auftreten. Deshalb können in der Baustatik die Massenkräfte (Trägheitskräfte) vernachlässigt werden. Ein Beispiel, das jeder mit einer Küchenwaage nachvollziehen kann, soll diesen Zusammenhang verdeutlichen.

In der unten dargestellten Versuchsanordnung (Bild 2.1) rieselt Sand unendlich langsam aus einer Fallhöhe, die nahezu Null beträgt, in ein Gefäß der Masse m auf der Feder k . In jedem Zeitpunkt folgt die Stauchung der Feder der Lastzunahme durch den Sand. Infolge der Erhöhung des Gewichtes durch die zusätzliche Masse Δm des Sandes erfährt die Feder k eine Stauchung um s_{stat} und am freigeschnittenen System stellt sich zu jedem Zeitpunkt der statische Gleichgewichtszustand ein:

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &\Rightarrow F_R = F_A \\ F_R = ks_{\text{stat}} \quad \text{und} \quad F_A = \Delta m g &\Rightarrow s_{\text{stat}} = \frac{\Delta m g}{k} \end{aligned} \quad (2.1)$$

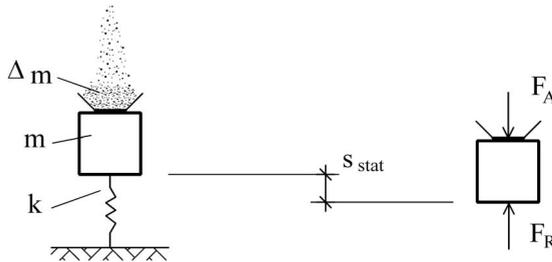


Bild 2.1 Statische Einwirkung

Bei der dynamischen Einwirkung rieselt Sand während des endlichen Zeitabschnittes T_F in ein Gefäß mit derselben Versuchsanordnung (Bild 2.2). Die Stauchung der Feder kann infolge der Trägheit der Masse m der Lastzunahme durch den Sand Δm nicht unmittelbar folgen. Infolge der trägen Masse m ist die schwere Masse Δm wirksam, bevor die Reaktionskraft der Feder voll mobilisiert wurde, also ist $F_A \neq F_R$. Die Differenz der Kräfte $F_A - F_R = F_T$ führt zu einer Beschleunigung der Masse m :

$$\begin{aligned} \sum F = 0 &\Rightarrow \\ F_T(t) + F_R(t) = F_A(t) &\Rightarrow m\ddot{s}_{\text{dyn}}(t) + ks_{\text{dyn}}(t) = F_A(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$s_{\text{stat}} \leq s_{\text{dyn}} \leq 2s_{\text{stat}} \quad (\text{siehe Abschnitt 6.2})$$

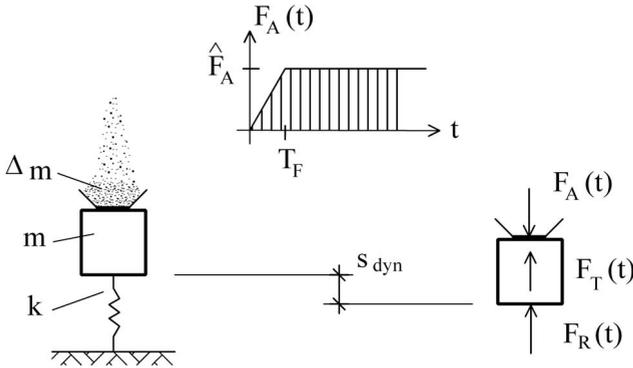


Bild 2.2 Dynamische Einwirkung

Zwischen dynamischen und statischen Einwirkungen liegen noch die zyklischen Einwirkungen, bei denen die Zeitabhängigkeit erhalten bleibt, aber die Trägheitskräfte F_T vernachlässigt werden. Ob die Trägheitskräfte zu berücksichtigen sind oder vernachlässigt werden können, muss im Einzelfall entschieden werden. Auf eventuell unterschiedliche Materialkennwerte und Festigkeitseigenschaften bei zeitabhängigen und zeitunabhängigen Einwirkungen ist zu achten.

2.2 Die „sichere Seite“

Das Abschätzen nach der „sicheren Seite“ ist in der Baustatik eine wichtige Methode, um Unsicherheiten bei der Abbildung der Wirklichkeit in einem Rechenmodell unkritisch zu machen. („Ein Profil größer kann nicht schaden.“) In der Baudynamik ist die „sichere Seite“ nicht a priori gegeben. Eine größere statische Sicherheit kann durchaus zu größerer dynamischer Beanspruchung führen. Je nachdem, ob die Erregerfrequenz unterhalb oder oberhalb der Eigenfrequenz liegt, sind zum Abschätzen nach der „sicheren Seite“ entgegengesetzte Maßnahmen erforderlich. Beim Auftreten mehrerer Anregungs- und/oder Eigenfrequenzen, gibt es keine „sichere Seite.“ Deshalb ist die Modellierung in der Baudynamik viel sorgfältiger durchzuführen als in der Baustatik üblich. Ist die Bestimmung der Eingangsparameter unsicher, sind Variationsrechnungen beziehungsweise Messungen unerlässlich.

2.3 Schwingungsmessungen

Um ein möglichst wirklichkeitsnahes Modell des Schwingungssystems zu erhalten, kommt der Messtechnik in der Baudynamik eine entscheidende Rolle zu. Schwingungstechnische Experimente geben einen Einblick in die Messtechnik und zeigen die Unschärfe der üblichen Rechenmodelle. Merke: Der Computer rechnet nur an Modellen, aber nicht an der Wirklichkeit. Bei bestehenden Gebäuden dienen Messungen der Systemidentifikation. Außerdem sollte das Rechenmodell wenn irgend möglich an Messungen justiert

werden. Bei Neubauten kann durch Messungen während der Bauphasen das Modell überprüft und eventuell korrigiert werden. In der Baudynamik bleibt bei Prognosen immer ein Rest an Unsicherheit. Deshalb sind Abnahmemessungen an fertigen Bauwerken empfehlenswert. Schließlich können Schwingungsmessungen zur Bauwerksüberwachung herangezogen werden (Monitoring), da durch Veränderungen der Eigenfrequenzen und Eigenformen Schäden rechtzeitig erkannt werden können. Je nach Aufgabenstellung werden weg-, geschwindigkeits- oder beschleunigungsproportionale Sensoren eingesetzt.

2.4 Fernwirkung

Die Fortpflanzung von Erschütterungen durch Wellenausbreitung im Boden, in der Luft, im Wasser und in Baukonstruktionen führt zu einer „Fernwirkung“, die in der Baustatik unbekannt ist (siehe Bild 11.1). Amplituden, die längs der Übertragungsstrecke unerheblich sind, können auch noch in großer Entfernung durch Resonanz zu erheblichen Amplituden anwachsen. Auf Fährschiffen beispielsweise lässt sich auf dem obersten Deck fast immer ein Geländerabschnitt finden, der in Resonanz mit der tief unten liegenden Schiffsmaschine deutlich spürbar schwingt, während andere Abschnitte des Geländers in Ruhe sind.

2.5 Dämpfung und Duktilität

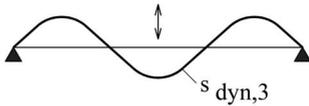
Dynamische Probleme sind unabhängig vom Baustoff. Allerdings sind die Abweichungen der dynamischen von den statischen Stoffparametern bei den verschiedenen Baustoffen unterschiedlich groß. Dämpfung und Duktilität der Baustoffe sind in der Baudynamik von besonderer Bedeutung. Die Möglichkeit, durch Dämpfung (Dissipation) Verformungen und damit Beanspruchungen zu reduzieren, ist in der Baustatik nicht gegeben. Dämpfung braucht Bewegung und Bewegung ist in der Baustatik unerwünscht. Bei großen Verformungen ist die Duktilität (plastische Verformungsfähigkeit) des Materials von besonderer Wichtigkeit, um kinetische Energie in Verformungsarbeit umzuwandeln. Allerdings muss duktilitätsgerecht konstruiert werden. Hugo Bachmann: „*Die Duktilität überbrückt unsere Unwissenheit.*“

2.6 Die statische Ersatzlast

In der Baudynamik werden zuerst Verformungen und dann Kräfte berechnet. Eine statische Kraft, die erforderlich wäre, um die maximale dynamische Verformung zu bewirken, wird als „statische Ersatzlast“ bezeichnet und in der Praxis gerne angewandt (Bild 2.3). Um statische Ersatzlasten angeben zu können, muss allerdings das dynamische Problem gelöst sein. Das Rechnen mit statischen Ersatzlasten setzt voraus, dass die dynamische Biegelinie in etwa mit der statischen Biegelinie übereinstimmt, was i. Allg. nur für die Grundeigenform (ω_1 in Bild 7.11) einer Baukonstruktion zutrifft. Mit statischen Ersatzlasten können dann die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Konstruktionen ermittelt werden. Schäden, die von der Anzahl der Lastwechsel oder der Frequenz abhängen, können mit statischen Ersatzlasten nicht beurteilt werden!



Grundeigenform



F_{ers} nicht möglich

3. Eigenform

Bild 2.3 Statische Ersatzlast für die Grundeigenform (oben) und die 3. Eigenform (unten)

2.7 Maschinendynamik

Der Tragwerksplaner ist verantwortlich für die Dimensionierung von Baukonstruktionen. Die Ursachen dynamischer Einwirkungen sind häufig Maschinen. Ohne deren Wirkungsweise verstanden zu haben, ist eine zuverlässige Dimensionierung der Baukonstruktion nicht möglich. Oft ist hartnäckiges Fragen erforderlich, um die nötigen Maschinenkennwerte zu erhalten. Manchmal hilft nur weiter, die Maschine im Betrieb selbst zu studieren. Wer darauf verzichtet, bekommt im Schadensfall vor Gericht eine Mitschuld. Korrekturen an der Maschinendynamik (Quelle) sind zuweilen ökonomischer als Änderungen an der Baukonstruktion (Empfänger).

2.8 Schäden

Dynamische Probleme können zur Gefährdung der Standsicherheit, zur Minderung der Gebrauchstauglichkeit (Risse, Verformungen) und zu unerwünschter Beeinträchtigung von Menschen und Präzisionsgeräten führen. Folgende Schäden durch dynamische Lasten, die aus der Baustatik nicht bekannt sind, sollten besonders beachtet werden:

- Setzungen durch Sackungen,
- Bodenverflüssigung,
- sekundärer Luftschall,
- Ermüdungsfestigkeit.

3 Technische Regeln in der Baudynamik

3.1 Allgemeines

Für die Baudynamik gibt es ein umfangreiches technisches Regelwerk, deren Beachtung entweder gesetzlich vorgeschrieben ist (öffentliches Recht) oder vertraglich vereinbart werden muss (Zivilrecht). Ohne baurechtliche Genehmigung ist der beste Entwurf unbrauchbar! Im Schadensfall liegt immer dann ein Verschulden vor, wenn die allgemein anerkannten Regeln der Technik (hier der Baudynamik) nicht beachtet wurden und der Bauherr auf mögliche Risiken nicht hingewiesen wurde. Daher sind die wichtigsten zurzeit gültigen technischen Regeln im Folgenden zusammengestellt:

- Bauordnungen, zum Beispiel die Hamburgische BO (Ländersache)
- Immissionsschutzgesetze (Bundessache)
- Technische Baubestimmungen (Ländersache)
- Normen (Deutsches Institut für Normung)
- Richtlinien und Empfehlungen (nationale Fachverbände)
- Internationale technische Regeln (internationale Fachverbände)
- allgemein anerkannte Regeln der Technik (Gerichtsbearbeitung)

3.2 Hamburgische Bauordnung (Auszug)

§ 3 Allgemeine Anforderungen

(1) Bauliche Anlagen sowie Anlagen und Einrichtungen im Sinne von § 1 Absatz 1 Satz 2 sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit sowie die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden *und keine unzumutbaren Belästigungen* entstehen können. Sie müssen ihrem Zweck entsprechend ohne Missstände zu benutzen sein.

(2) Bauprodukte dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Vorschriften erfüllen und gebrauchstauglich sind.

(3) Die *allgemein anerkannten Regeln der Technik sind zu beachten*. Bei Bauausführungen, die den von der Bauaufsichtsbehörde eingeführten Technischen Baubestimmungen entsprechen, gilt diese Voraussetzung als erfüllt. Die Einführung *Technischer Baubestimmungen* ist im Amtlichen Anzeiger bekanntzumachen. Bei der Bekanntmachung kann hinsichtlich des Inhalts der Baubestimmungen auf die Fundstelle verwiesen werden. Von allgemein anerkannten Regeln der Technik kann abgewichen werden, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen des Absatzes 1 erfüllt werden; § 20 Absatz 3 und § 21 bleiben unberührt.

3.3 Bundes-Immissionsschutzgesetz (Auszug)

6. Immissionsschutz

(Luftreinhaltung, Lärmbekämpfung)

6.1. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundesimmissionsschutzgesetz – BImSchG)

In der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990
(BGBl. I S. 880, zuletzt geändert durch G v. 17. 3. 1998, BGBl. I S. 502)

§ 3 Begriffsbestimmungen

(1) Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne dieses Gesetzes sind Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeiführen.

(2) Immissionen im Sinne dieses Gesetzes sind auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, *Erschütterungen*, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen.

§ 18 Wärmeschutz, Schallschutz und Erschütterungsschutz

(1) Gebäude müssen einen ihrer Nutzung und den klimatischen Verhältnissen entsprechenden Wärmeschutz haben.

(2) Gebäude müssen einen ihrer Nutzung entsprechenden Schallschutz gegen Innen- und Außenlärm haben.

(3) Lärm, *Erschütterungen* und Schwingungen, die von *ortsfesten Anlagen* oder Einrichtungen in baulichen Anlagen oder auf bebauten Grundstücken ausgehen, sind so zu dämmen, dass *Gefahren oder unzumutbare Belästigungen* nicht entstehen.

3.4 Technische Baubestimmungen

DIN 1055	Einwirkungen auf Tragwerke Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen
DIN 1056	Freistehende Schornsteine in Massivbauart
DIN 1072	Straßen- und Wegbrücken
DIN 4109	Schallschutz im Hochbau, auch sekundärer Luftschall
DIN 4131	Antennentragwerke aus Stahl
DIN 4133	Schornsteine aus Stahl
DIN 4149	Bauten in deutschen Erdbebengebieten
DIN 4178	Glockentürme, Berechnung und Ausführung
DIN 4228	Werkmäßig hergestellte Betonmaste
DIN 4420	Arbeits- und Schutzgerüste
ETB-Ri.	Bauteile, die gegen Absturz sichern

3.5 Normen

DIN 1311	Schwingungen und schwingungsfähige Systeme Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung Teil 2: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad Teil 3: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden
DIN 4024	Maschinenfundamente ^{*)}
DIN 4025	Fundamente für Amboss-Hämmer ^{*)}
DIN 4103	Nichttragende innere Trennwände
DIN 4112	Fliegende Bauten
DIN 4150	Erschütterungen im Bauwesen ^{*)} Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen
DIN 4426	Absturzsicherungen
DIN 18041	Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
DIN 45664	Ankoppelung von Schwingungsmessgeräten
DIN 45669	Messung von Schwingungsimmissionen Teil 1: Schwingungsmesser: Anforderungen, Prüfung Teil 2: Messverfahren
DIN 45671	Schwingungsmessungen am Arbeitsplatz
DIN 45672	Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen
DIN 45673-2	Mechanische Schwingungen Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
DIN 45676	Mechanische Eingangsimpedanzen des menschlichen Körpers
DIN 45677	Mechanische Eingangsimpedanzen des Hand-Arm-Systems
DIN 45680	Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen
DIN 53512	Bestimmung der Rückprall-Elastizität
DIN 53513	Bestimmung der visko-elastischen Eigenschaften von Elastomeren
DIN 53535	Grundlagen für dynamische Prüfverfahren
DIN EN V 1995-2	Schwingungen von Holzbrücken

^{*)} Die Anwendung dieser Normen wird in DIN 1055 Teil 3 gefordert.

3.6 Richtlinien und Empfehlungen

Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferfassungen“, EAU

- E135, E136, E159 Wellendruck auf senkrechte Uferwände und Pfahlbauwerke
- E69, E111, E128 Dalbenberechnung

Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“

- E1: Bodendynamische Kennwerte
- E2: Wellenausbreitung im Baugrund
- E3: Dynamisch belastete Gründungen mit Berechnungsbeispielen

VDI 2057	Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen
VDI 2060	Beurteilungsmaßstäbe für den Auswuchtzustand
VDI 2062	Schwingungsisolierung Blatt 1: Begriffe und Methoden Blatt 2: Isolierelemente
VDI 2263	Staubbrände und Staubexplosionen
VDI 2716	Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen
VDI 3673	Druckentlastung von Staubexplosionen
VDI 3831	Schutzmaßnahmen gegen Einwirkungen mechanischer Schwingungen auf den Menschen
KTA 2201	Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen
BGV/R B10	Arbeitsplätze mit Vibrationseinwirkung (Berufsgenossenschaftliche Vorschriften/Regeln)
DIN ISO 10816	Bewertung der Schwingungen von Maschinen, Teil 1–6
Erschütterungs- Richtlinien	Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI)
Explosionsschutz- Regeln	Fachausschuss „Chemie“ (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften)
DIN-Fachbericht 102,	Geh- und Radwegbrücken
Leitfaden für Planer, DB AG	Körperschall- und Erschütterungsschutz

3.7 Internationale technische Regeln

EC 1 Teil 2–4	Dynamische Windlasten
EC 2 Teil 2	Stahlbeton- und Spannbetonbrücken
EC 8	Bemessungsregeln für Erdbebenbeanspruchung
ISO 1940	Anforderungen an die Auswuchtgüte starrer Rotoren
ISO 2631-1	Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration
ISO 2631-2	Mechanical Vibration and Shock, Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration; Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz)
ISO 14837-1	Mechanische Schwingungen durch unterirdische Schienenbahnen
NBC 1985	Menscheninduzierte Schwingungen
BS 5400	Menscheninduzierte Schwingungen
UBC, ICC	Erdbebenberechnungen
SN 640312a	Erschütterungen im Bauwesen
BS 6472	Erschütterungen im Bauwesen
ISO 4866	Mechanical Vibration and Shock Evaluation of their Effects on Buildings
ISO 8727	Mechanische Schwingungen und Stöße; Einwirkungen auf den Menschen