

Konstantin Meskouris | Klaus-G. Hinzen |
Christoph Butenweg | Michael Mistler

Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen – Anwendung – Beispiele

3. Auflage

PRAXIS



**VIEWEG+
TEUBNER**



Konstantin Meskouris | Klaus-G. Hinzen |
Christoph Butenweg | Michael Mistler

Bauwerke und Erdbeben

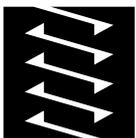
Konstantin Meskouris | Klaus-G. Hinzen |
Christoph Butenweg | Michael Mistler

Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen – Anwendung – Beispiele

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

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.

1. Auflage 2003
2. Auflage 2007
3. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Dipl.-Ing. Ralf Harms | Sabine Koch

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0779-3

Vorwort zur erweiterten dritten Auflage

Dem Ziel der früheren Auflagen folgend orientiert sich die Neuauflage des Buches an dem Wunsch der Leser, die Seismologie, die baulastdynamischen Grundlagen und die Anwendung der Erdbebennormen an einfachen und nachvollziehbaren Berechnungs- und Bemessungsbeispielen zu illustrieren. Es wird versucht, hierbei sowohl den geophysikalischen als auch den ingenieurmäßigen Aspekten des Erdbebeningenieurwesens gerecht zu werden, um die notwendige Zusammenarbeit von Geophysikern mit Bauingenieuren angesichts ständig komplexer werdender gemeinsamer Aufgaben zu fördern. Unter diesem Leitgedanken ist das Buch für den praktisch tätigen Ingenieur und den Studierenden verschiedener Fachrichtungen ein Nachschlagewerk und Lehrbuch.

Gegenüber der letzten Auflage haben sich durch neue Tendenzen in den Rechenverfahren und durch den unmittelbar bevorstehenden Übergang zum europäischen Normenkonzept zahlreiche Änderungen ergeben. Im Kapitel 3 wurde die Beschreibung der statisch nichtlinearen Verfahren ergänzt. Das Kapitel 4 wurde um das Normkonzept der DIN EN 1998-1 und neue Berechnungsbeispiele ergänzt. Das Thema „Untersuchung weiterer Bauwerke und Anlagen“ ist nun in drei eigenständige Kapitel aufgeteilt. Im Kapitel 6 werden die aktuellsten Forschungsergebnisse aus dem Bereich der seismischen Auslegung von Mauerwerksbauten vorgestellt. Das Kapitel 7 beinhaltet die seismische Berechnung von Silos und Tanks und im Kapitel 8 werden Absperrbauwerke am Beispiel von Erddämmen behandelt. Die Kapitel 1, 2, 5 und 7 der letzten Auflage blieben bis auf redaktionelle Änderungen weitestgehend unverändert. Die Rechenprogramme sind nicht wie in den ersten beiden Auflagen als CD-ROM beigelegt, sondern stehen im Internet zum Herunterladen zur Verfügung.

Der Erstautor bedankt sich aufs Herzlichste bei seinen ehemaligen und aktiven Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Diplomandinnen und Diplomanden am Lehrstuhl für Baustatik und Baulastdynamik der RWTH Aachen, die fleißig zu diesem Buch beigetragen haben. Der Dank gilt weiterhin Frau Tatjana Ulke für die Erstellung von Zeichnungen und Herrn Dipl.-Math. (FH) Stephan Dreyer für die programmtechnische Zusammenstellung der Rechenprogramme.

Der Zweitautor bedankt sich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Erdbebenstation Bensberg der Universität zu Köln für die unterstützenden Arbeiten und besonders bei Frau Dr. Sharon Kae Reamer für viele hilfreiche Diskussionen.

Der Drittautor bedankt sich bei Herrn Dipl.-Ing. Philipp Cornelissen für die tatkräftige Unterstützung bei der Fertigstellung von Kapitel 7, bei Herrn Dr.-Ing. Christoph Gellert für die wertvolle Mitarbeit am Kapitel 6, bei Frau Dr.-Ing. Britta Holtschoppen für die umfassenden und grundlegenden Arbeiten zu Kapitel 7, bei Frau Dipl.-Ing. Verena Jungeblut für die Mitarbeit im Kapitel 4, bei Frau Dipl.-Ing. Hannah Norda für die Unterstützung und zahlreichen Diskussionen über die verformungsbasierten Verfahren und bei Herrn Dipl.-Ing. Lukas Reindl für die Zuarbeit zu Teilen des Kapitels 6. Weiterhin gilt der Dank Herrn Dipl.-Ing. Jin Park und Frau Dipl.-Ing. Julia Rosin für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Herrn Dipl.-Math. (FH) Stephan Dreyer und Herrn Dipl.-Inform. Christoph Schulte-Althoff sei schließlich für die Unterstützung bei technischen Fragen und Programmanwendungen gedankt. Der größte Dank geht aber an meine liebe Familie für das Verständnis, die Unterstützung und den gewährten Freiraum an zahlreichen Wochenenden.

Unser Dank geht auch an den Vieweg+Teubner Verlag für die stete Gesprächsbereitschaft, Unterstützung und Geduld und an die Deutsche Forschungsgemeinschaft und weitere Geldgeber für die finanzielle Förderung der Projekte, deren Ergebnisse teilweise in dieses Buch einfließen.

Aachen, Juni 2011

Konstantin Meskouris Klaus-Günter Hinzen Christoph Butenweg Michael Mistler

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage

In diesem Buch wird der Versuch unternommen, eine Einführung in das weite Feld der Erdbebenbeanspruchung von Baukonstruktionen zu präsentieren, die sowohl den geophysikalischen als auch den ingenieurmäßigen Aspekten des Problems gerecht wird. Dass es zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren allgemein zu „Sprachschwierigkeiten“ kommen kann, ist nichts Neues, so auch auf dem Gebiet des Erdbebeningenieurwesens, wo die Zusammenarbeit von Geophysikern mit Bauingenieuren angesichts ständig komplexer werdenden Aufgaben immer wichtiger wird. Nach den in den ersten beiden Kapiteln behandelten Grundlagen der Baudynamik und der Seismologie werden in diesem Buch die gängigen Rechenverfahren für die Ermittlung der seismischen Beanspruchung von Bauwerken erläutert, es wird auf die maßgebenden Normen eingegangen und dazu Themen wie die seismische Vulnerabilität von Gebäuden, seismische Isolierungsmaßnahmen und Methoden zur Untersuchung von Bauteilen und speziellen Bauwerken (Mauerwerksscheiben, Schüttgutsilos, Erddämme) vorgestellt. Getreu der Philosophie des „learning by doing“ enthält das Buch viele durchgerechnete Zahlenbeispiele und dazu die benötigten gebrauchsfertigen Rechenprogramme auf der beiliegenden CD-ROM. Damit wird der Lehrbuchcharakter in Richtung auf die praktische Anwendung erweitert und dem Leser die Möglichkeit gegeben, den Schritt vom Leser zum Anwender im Selbststudium zu vollziehen.

Aus dem Vorwort zur zweiten Auflage

Die durch die erfreulich rege Nachfrage notwendig gewordene Neuauflage des Buches ermöglichte eine wesentlich stärkere Fokussierung auf Belange der Praxis, insbesondere durch die Berücksichtigung des Weißdrucks der DIN 4149 vom April 2005, der zur Zeit bauaufsichtlich eingeführt wird. Dem Wunsch vieler Leser entsprechend wird deshalb in der vorliegenden Ausgabe die Vorgehensweise bei der seismischen Auslegung von Beton-, Stahl- und Mauerwerksbauten anhand ausgearbeiteter Beispiele in allen Einzelheiten erläutert, die so direkt als Hilfe für den praktisch tätigen Ingenieur dienen können.

Die dadurch notwendig gewordene Vergrößerung des Umfangs wurde durch den Verzicht auf das Kapitel über seismische Isolierung zumindest teilweise kompensiert. Weitere Änderungen gegenüber der ersten Auflage betreffen das Kapitel 5, in dem das Konzept der Vulnerabilitätsuntersuchungen für Wohngebäude auf speziellere Bauwerkstypen wie Brücken und Industrieanlagen erweitert wurde. Weiterhin wird in dem Kapitel 6 anstelle der Vorstellung von numerischen Modellen für Mauerwerk ein praxisorientiertes Verfahren für die verformungsbasierte Bemessung von Mauerwerksbauten auf Grundlage der Kapazitätsspektrum-Methode vorgestellt.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT ZUR ERWEITERTEN DRITTEN AUFLAGE.....	V
1 BAUDYNAMISCHE GRUNDLAGEN	1
1.1 Bewegungsdifferentialgleichungen, d'ALEMBERTsches Prinzip	1
1.2 Zeitabhängige Vorgänge und Prozesse	6
1.3 Der Einmassenschwinger	10
1.3.1 Der Einmassenschwinger im Zeitbereich	10
1.3.2 Der Einmassenschwinger im Frequenzbereich	16
1.3.3 Der Einmassenschwinger mit nichtlinearer Rückstellkraft.....	19
1.3.4 Lineare Antwortspektren von Beschleunigungszeitverläufen	23
1.3.5 Nichtlineare (inelastische) Antwortspektren	26
1.3.6 Spektrumkompatible Beschleunigungszeitverläufe.....	27
1.4 Stabtragwerke als diskrete Mehrmassenschwinger	31
1.4.1 Statische Beanspruchung	31
1.4.2 Differentialgleichungssystem des Diskreten Mehrmassenschwingers	36
1.4.3 Wesentliche Freiheitsgrade, statische Kondensation, Eigenwertproblem	37
1.4.4 Modale Analyse.....	41
1.4.5 Viskoser Dämpfungsansatz	45
1.4.6 Direkte Integration.....	46
1.4.7 Berechnung der Schnittkräfte ebener Rahmen aus den Verformungen	48
2 SEISMOLOGISCHE GRUNDLAGEN.....	53
2.1 Wellenausbreitung.....	53
2.1.1 Bewegungsgleichung.....	54
2.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung.....	56
2.1.3 Elastische Konstanten.....	57
2.1.4 Raumwellen.....	58
2.1.5 Raumwellen in geschichteten Medien.....	61
2.1.5.1 FERMATsches Prinzip und SNELLIUSsches Gesetz	61
2.1.5.2 Laufzeit und Laufweg eines Strahls	63
2.1.5.3 Kritische Refraktion.....	64
2.1.5.4 Laufzeitkurven	64
2.1.5.5 Aufteilung der seismischen Energie an Grenzflächen.....	67
2.1.6 Oberflächenwellen.....	70
2.1.6.1 RAYLEIGH-Welle	71
2.1.6.2 LOVE-Welle.....	75
2.1.7 Dämpfung.....	79
2.2 Die Struktur von Seismogrammen.....	80
2.2.1 Strong-motion-Seismogramm.....	81
2.2.2 Seismogramm eines Lokalbebens.....	82
2.2.3 Seismogramm eines Fernbebens.....	84
2.2.4 Parameter zur Beschreibung der Bewegung.....	85

2.2.4.1	Zeitbereichsgrößen	85
2.2.4.2	Dauer der Bodenbewegung	87
2.2.4.3	Frequenzbereichsgrößen.....	88
2.2.4.4	Beispiel.....	89
2.3	Einfluss des lokalen Untergrundes.....	92
2.3.1	Verstärkungsfunktion eines Schichtpaketes.....	93
2.3.1.1	Homogene Sedimentschicht auf steifer Festgesteinsschicht ohne Dämpfung	94
2.3.1.2	Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf steifer Festgesteinsschicht.....	96
2.3.1.3	Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	97
2.3.1.4	Sedimentschichtpaket mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	99
2.3.2	Beispiele von Standorteffekten	100
2.3.3	Nichtlineares Materialverhalten.....	104
2.3.3.1	Dynamische Setzung	104
2.3.3.2	Bodenverflüssigung.....	104
2.3.4	Einfluss der dreidimensionalen Struktur des Untergrundes.....	106
2.4	Ermittlung ingenieurseismologischer Standortparameter.....	107
2.4.1	Wellengeschwindigkeiten.....	107
2.4.1.1	Refraktionsseismik	107
2.4.1.2	Reflexionsseismik	109
2.4.1.3	Spektrale Analyse von Oberflächenwellen.....	109
2.4.1.4	Bohrlochmessungen	109
2.4.2	Ermittlung der Materialdämpfung	111
2.4.3	Dichte	111
2.4.4	Passive Messungen	111
2.4.5	H/V Methode	111
2.5	Der seismische Herdprozess.....	113
2.5.1	Scherverschiebung.....	114
2.5.2	Punktquellenapproximation und äquivalente Kräfte.....	115
2.5.3	Momententensor	122
2.5.4	Der ausgedehnte seismische Herd	124
2.5.5	Das Herdspektrum	128
2.5.6	Spannungsabfall.....	130
2.5.7	Abschätzung maximaler Bodenbewegungen	130
2.6	Ingenieurseismologische Parameter.....	131
2.6.1	Erdbebenstärke	131
2.6.1.1	Magnitude	131
2.6.1.2	Seismische Energie.....	133
2.6.1.3	Beziehungen zwischen Moment und Magnitude	136
2.6.1.4	Beziehungen zwischen Momentmagnitude und Herddimension	136
2.6.2	Standortbezogene Parameter.....	137
2.6.2.1	Makroseismische Intensität	137
2.6.2.2	Die europäische makroseismische Skala	138
2.6.2.3	Makroseismische Begriffe und Auswerteverfahren.....	142
2.6.2.4	Beziehungen zwischen Intensität und Beschleunigung	145
2.6.2.5	Beziehungen zwischen Magnitude und Beschleunigung.....	146
2.7	Erdbebenstatistik und Erdbebengefährdung.....	149
2.7.1	Rezente, historische und Paläoerdbeben.....	150
2.7.2	Archäoseismologie	151
2.7.3	Charakterisierung der seismischen Quellen.....	154

2.7.3.1 Räumliche Bebenverteilung	154
2.7.3.2 Zeitliche Bebenverteilung	156
2.7.4 Deterministische Verfahren der Gefährdungsanalyse	156
2.7.5 Probabilistische Verfahren	158
2.7.6 Erdbebengefährdungskarten	162
2.8 Seismologische Praxis.....	163
2.8.1 Messtechnik	163
2.8.1.1 Seismometer	163
2.8.1.2 Messstation	168
2.8.2 Lokalisierung.....	172
2.8.3 Bestimmung der Magnitude	174
2.9 Beispiele typischer Erdbebenschäden.....	175
3 SEISMISCHE BEANSPRUCHUNG VON KONSTRUKTIONEN.....	189
3.1 Rechenverfahren.....	189
3.1.1 Modalanalytisches Antwortspektrenverfahren	190
3.1.2 Verfahren mit statischen Ersatzlasten.....	196
3.1.3 Direkte Integrationsverfahren.....	196
3.1.4 Nichtlineare Verfahren	201
3.1.4.1 Inelastische statische Untersuchungen („Pushover-Analysis“)	212
3.1.4.2 Kapazitätsspektrum-Methode.....	216
3.1.4.3 Verformungsbasierter Nachweis nach DIN EN 1998-1 (2010), Anhang B.....	222
3.1.4.3.1 Inelastische Antwortspektren	222
3.1.4.3.2 Berechnungsablauf der N2-Methode.....	224
3.1.4.3.3 Berechnungsbeispiel: N2-Methode nach DIN EN 1998-1, Anhang B.....	231
3.1.4.3.4 Vergleich: N2-Methode und Kapazitätsspektrummethode	237
3.1.4.4 Inelastische dynamische Untersuchungen (Zeitverlaufsmethode).....	239
3.2 Asynchrone multiple seismische Erregung.....	246
3.3 Boden-Bauwerk Interaktion.....	255
3.3.1 Allgemeines zur Boden-Bauwerk Interaktion	255
3.3.2 Untersuchungsmethoden	256
3.3.2.1 Direkte Methode und Substrukturmethode	256
3.3.2.2 Frequenzbereich und Zeitbereich	257
3.3.2.3 Einfache physikalische Modelle und Randelementmethode	258
3.3.3 Berechnungsmodelle	258
3.3.3.1 Bettungszahlmodell nach Winkler	258
3.3.3.2 Kegelstumpfmodell nach Wolf	260
3.3.3.3 Geometrische Dämpfung und Materialdämpfung	262
3.3.3.4 Randelementmethode.....	262
3.3.4 Berechnungsbeispiel	265
3.3.4.1 Problemstellung	265
3.3.4.2 Modellbeschreibung.....	265
3.3.4.3 Brückenpfeiler unter Vertikallast	266
3.3.4.4 Brückenpfeiler unter Horizontallast	267
4 ERDBEBENBEMESSUNG VON BAUWERKEN NACH DIN 4149 UND DIN EN 1998-1.....	273
4.1 Inhaltliche Erläuterung der DIN 4149.....	273

4.1.1 Stand der Erdbebennormung in Deutschland.....	273
4.1.2 Anwendungsbereich und Zielsetzung.....	273
4.1.3 Gliederung der DIN 4149	274
4.1.4 Erdbebengerechter Entwurf.....	275
4.1.4.1 Grundrissgestaltung.....	275
4.1.4.2 Aufrissgestaltung.....	276
4.1.4.3 Ausbildung der Gründung.....	278
4.1.5 Erdbebeneinwirkung.....	278
4.1.5.1 Erdbebenzonenkarte und Untergrundbeschreibung.....	278
4.1.5.2 Elastisches Antwortspektrum.....	281
4.1.5.3 Bemessungsspektrum für lineare Tragwerksberechnungen.....	283
4.1.6 Berechnungsverfahren.....	284
4.1.6.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren.....	285
4.1.6.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren.....	286
4.1.6.2.1 Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen.....	286
4.1.6.2.2 Kombination der modalen Schnittgrößen.....	287
4.1.6.2.3 Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Erdbebenkomponenten.....	287
4.1.7 Berücksichtigung von Torsionswirkungen.....	287
4.1.7.1 Tragwerke mit unsymmetrischer Verteilung von Steifigkeit und Masse.....	288
4.1.8 Nachweis der Standsicherheit.....	291
4.1.8.1 Vereinfachter Nachweis der Standsicherheit.....	291
4.1.8.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	292
4.1.8.3 Nachweis der Duktilität.....	293
4.1.8.4 Nachweis des Gleichgewichts.....	293
4.1.8.5 Nachweis der Tragfähigkeit von Gründungen.....	293
4.1.8.6 Nachweis der erdbebengerechten Ausführung von Fugen.....	293
4.1.9 Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauten.....	294
4.1.9.1 Teilsicherheitsbeiwerte.....	294
4.1.9.2 Duktilitätsklasse 1.....	294
4.1.9.3 Duktilitätsklasse 2.....	296
4.1.9.3.1 Verhaltensbeiwerte.....	296
4.1.9.3.2 Lokale Duktilität.....	297
4.1.9.3.3 Verankerung der Bewehrung.....	298
4.1.9.3.4 Stöße von Bewehrungsstäben.....	298
4.1.9.3.5 Anforderungen an Balken.....	299
4.1.9.3.6 Anforderungen an Stützen.....	299
4.1.9.3.7 Anforderungen an aussteifende Wände.....	300
4.1.10 Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten.....	304
4.1.10.1 Duktilitätsklasse 1.....	304
4.1.10.2 Duktilitätsklassen 2 und 3.....	305
4.1.10.2.1 Kapazitätsbemessung.....	305
4.1.10.2.2 Allgemeine Festlegungen nach DIN 4149 (2005).....	306
4.1.10.2.3 Wahl des Verhaltensbeiwertes q	307
4.1.10.2.4 Rahmenkonstruktionen.....	307
4.1.10.2.5 Rahmen mit konzentrischen Verbänden.....	309
4.1.10.2.6 Rahmen mit exzentrischen Verbänden.....	310
4.1.10.2.7 Eingespannte (Kragarm-)Konstruktionen, Dualtragwerke, Mischtragwerke.....	313
4.1.10.3 Ablaufschema für den Nachweis von Stahlbauten.....	313
4.1.11 Baustoffspezifische Regelungen für Mauerwerksbauten.....	314
4.1.11.1 Anforderungen an Mauerwerksbaustoffe und Konstruktionsregeln.....	314
4.1.11.2 Einhaltung konstruktiver Regeln, DIN 4149, Abschnitt 11.1-11.3.....	315
4.1.11.3 Rechnerischer Nachweis nach DIN 4149, Abschnitt 11.6.....	316
4.1.12 Baustoffspezifische Regelungen für Holzbauten.....	318

4.2 Inhaltliche Unterschiede zwischen DIN 4149 und DIN EN 1998-1	318
4.2.1 Anwendungsbereich und Zielsetzung	319
4.2.2 Gliederung der DIN EN 1998-1	319
4.2.3 Erdbebengerechter Entwurf	320
4.2.4 Erdbebeneinwirkung	320
4.2.5 Berechnungsverfahren	321
4.2.6 Berücksichtigung von Torsionswirkungen	321
4.2.6.1 Ansatz zufälliger Torsionswirkungen	321
4.2.6.2 Ansatz von Torsionswirkungen im vereinfachten Antwortspektrenverfahren	321
4.2.6.3 Regelmäßige Grundrisse	322
4.2.6.4 Unregelmäßige Grundrisse	322
4.2.6.5 Ansatz von Torsionswirkungen in räumlichen Tragwerksmodellen	323
4.2.6.6 Vergleich mit DIN 4149 und Zusammenfassung	323
4.2.7 Nachweis der Standsicherheit	324
4.2.8 Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauten	324
4.2.9 Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten	325
4.2.10 Baustoffspezifische Regelungen für Mauerwerksbauten	327
4.2.10.1 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln	327
4.2.10.2 Rechnerischer Nachweis	328
4.3 Rechenbeispiele zur DIN 4149 und DIN EN 1998-1	330
4.3.1 Stahlbetontragwerk mit aussteifenden Wandscheiben	330
4.3.1.1 Tragwerksbeschreibung	330
4.3.1.2 Lastannahmen und Bemessungskombination	331
4.3.1.3 Elastische Antwortspektren	332
4.3.1.4 Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung	332
4.3.1.5 Verhaltensbeiwerte	333
4.3.1.6 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung	333
4.3.1.7 Modellbildung	334
4.3.1.8 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	336
4.3.1.8.1 Berechnung der Eigenfrequenzen	336
4.3.1.8.2 Bemessungswerte der Beschleunigungen	338
4.3.1.8.3 Ermittlung der horizontalen Erdbebenersatzkräfte	338
4.3.1.8.4 Berücksichtigung von Torsionswirkungen und Verteilung der Erdbebenersatzkräfte	339
4.3.1.8.5 Bemessungsschnittgrößen der Wände	340
4.3.1.8.6 Verschiebungen / Theorie II. Ordnung	340
4.3.1.9 Multimodales Antwortspektrenverfahren auf Grundlage eines Ersatzstabs	341
4.3.1.9.1 Allgemeines	341
4.3.1.9.2 Eigenfrequenzen und Modalbeiträge	341
4.3.1.9.3 Überlagerung der modalen Schnittkräfte	342
4.3.1.9.4 Berücksichtigung von Torsionswirkungen	342
4.3.1.9.5 Bemessungsschnittkräfte der Wände	342
4.3.1.9.6 Verschiebungen / Theorie II. Ordnung	343
4.3.1.10 Multimodales Antwortspektrenverfahren: Räumliches Tragwerksmodell mit Balkenelementen	343
4.3.1.10.1 Allgemeines	343
4.3.1.10.2 Modellaufbau	343
4.3.1.10.3 Eigenfrequenzen und Modalbeiträge	344
4.3.1.10.4 Torsionswirkungen	345
4.3.1.10.5 Berechnung	346
4.3.1.10.6 Effekte aus Theorie II. Ordnung	350
4.3.1.11 Multimodales Antwortspektrenverfahren: Räumliches Tragwerksmodell mit Schalenelementen	351
4.3.1.11.1 Allgemeines	351

4.3.1.11.2	Modellaufbau.....	351
4.3.1.11.3	Eigenfrequenzen und Modalbeiträge	351
4.3.1.11.4	Torsionswirkungen	352
4.3.1.11.5	Berechnung.....	353
4.3.1.11.6	Theorie II. Ordnung.....	354
4.3.1.12	Ergebnisvergleich der verschiedenen Rechenmodelle.....	354
4.3.1.13	Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 1 (DCL).....	355
4.3.1.13.1	Allgemeine Festlegungen	355
4.3.1.13.2	Bemessungsschnittkräfte	355
4.3.1.13.3	Bemessung auf Querkraft	355
4.3.1.13.4	Bemessung auf Biegung und Längskraft	356
4.3.1.13.5	Bemessungswert der bezogenen Längskraft	356
4.3.1.14	Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 2 (DCM).....	356
4.3.1.14.1	Allgemeine Anforderungen	356
4.3.1.14.2	Bemessungsschnittkräfte	357
4.3.1.14.3	Bemessung auf Querkraft	357
4.3.1.14.4	Bemessung auf Biegung und Längskraft	357
4.3.1.14.5	Maßnahmen zur Sicherstellung der lokalen Duktilität	357
4.3.1.15	Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbetonbauten	361
4.3.2	Stahltragwerk.....	361
4.3.2.1	Nachweis in Duktilitätsklasse 1 (DCL)	366
4.3.2.2	Nachweis in Duktilitätsklasse 2 (DCM)	366
4.3.2.3	Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbauten	369
4.3.3	Reihenhaus aus Mauerwerk	370
4.3.3.1	Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN 4149.....	371
4.3.3.2	Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN EN 1998-1	373
4.3.4	Mehrfamilienhaus aus Kalksandsteinmauerwerk	375
4.3.4.1	Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN 4149.....	377
4.3.4.2	Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN EN 1998-1	380
4.3.4.3	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren am Ersatzstab	382
4.3.4.3.1	Ermittlung der Stockwerksmassen.....	383
4.3.4.3.2	Ermittlung der Systemsteifigkeiten.....	384
4.3.4.3.3	Ermittlung der Erdbebenersatzkräfte in x- und y-Richtung	385
4.3.4.3.4	Verteilung der Erdbebenersatzkräfte auf die Wandscheiben.....	386
4.3.4.4	Standsicherheitsnachweis nach DIN 1053-100 (2006).....	390
4.3.4.4.1	Nachweis der zentrischen und exzentrischen Druckbeanspruchung	391
4.3.4.4.2	Schubnachweis	392
4.3.4.4.3	Ergebnisse der Nachweise	394
4.3.4.4.4	Berechnung unter Berücksichtigung der Rahmentragwirkung.....	396
4.3.4.5	Multimodales Antwortspektrenverfahren mit räumlichem Tragwerksmodell	398
4.3.4.5.1	Modale Analyse.....	398
4.3.4.5.2	Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen.....	405
4.3.4.5.3	Nachweisergebnisse für die Achse $y = 0$, Wände 1-5	406
4.3.4.5.4	Effekte der Wandkopplung.....	407
4.3.4.5.5	Effekte der Wand- Decken Interaktion	408
4.3.4.5.6	Zusammenfassung	409
4.3.4.6	Statisch nichtlinearer Nachweis.....	410
5	SEISMISCHE VULNERABILITÄT BESTEHENDER BAUWERKE.....	417
5.1	Grundlegendes Beurteilungskonzept	417
5.2	Bauwerksschädigung.....	417
5.2.1	Strukturelle Schädigungsindikatoren	418
5.2.1.1	Lokale Schädigungsindikatoren	418

5.2.1.2 Globale Schädigungsindikatoren.....	419
5.2.2 Ökonomische Schädigungsindikatoren	419
5.2.3 Bewertung der Schädigung.....	420
5.3 Seismische Gefährdung.....	421
5.3.1 Klassifizierungsparameter	421
5.3.2 Seismische Gefährdungskurven.....	422
5.4 Methoden zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität	423
5.4.1 Vereinfachte Methoden (Untersuchungsstufe I).....	423
5.4.1.1 Vulnerabilitätskurven.....	423
5.4.1.2 Empirische Formeln.....	426
5.4.2 Methoden in Untersuchungsstufe II.....	426
5.4.3 Methoden in Untersuchungsstufe III	430
5.5 Integriertes Gesamtkonzept.....	432
5.5.1 Bauwerksklassifizierung.....	432
5.5.2 Spezifikation für Hochbauten	432
5.5.2.1 Untersuchungsstufe I.....	432
5.5.2.1.1 Berechnungsgrundlagen	433
5.5.2.1.2 Bauwerkseigenschaften und Geländedaten	436
5.5.2.1.3 Resultate in Untersuchungsstufe I.....	439
5.5.2.2 Untersuchungsstufe II	440
5.5.2.2.1 Berechnung der Erdbebenersatzkräfte und Kontrolle der Kippsicherheit.....	440
5.5.2.2.2 Verformungskontrolle für Rahmentragwerke.....	440
5.5.2.2.3 Schubspannungskontrolle bei Stahlbetonrahmenstützen	440
5.5.2.2.4 Schubspannungskontrolle in den Schubwänden.....	441
5.5.2.2.5 Kontrolle der Diagonalaussteifungen	441
5.5.2.2.6 Bauwerk/Baugrund Frequenzkontrolle.....	441
5.5.2.2.7 Resultate in Untersuchungsstufe II.....	443
5.5.2.3 Untersuchungsstufe III.....	443
5.5.2.3.1 Grundlagen der probabilistischen Schädigung	443
5.5.2.3.2 Korrelation zwischen Erdbebenintensität und Schädigungswerten	444
5.5.2.4 Beispiel 1: Verwaltungsgebäude in Istanbul: Untersuchungsstufen I und II.....	445
5.5.2.5 Beispiel 2: Bürogebäude in Istanbul: Untersuchungsstufe III	447
5.5.2.5.1 Modellbeschreibung.....	447
5.5.2.5.2 Eigenfrequenzen des Gebäudes	447
5.5.2.5.3 Rayleigh-Dämpfung.....	447
5.5.2.5.4 Seismische Gefährdungskurve von Istanbul, Türkei	448
5.5.2.5.5 Wahl der Beschleunigungszeitverläufe	449
5.5.2.5.6 Jährliche Schädigungskurve.....	449
5.5.3 Spezifikation für Brückenbauwerke	450
5.5.3.1 Programmsystem SVBS.....	451
5.5.3.2 Untersuchungsstufe I.....	452
5.5.3.3 Untersuchungsstufe II	452
5.5.3.4 Untersuchungsstufe III.....	452
5.5.3.5 Beispiel: Rheinbrücke Emmerich: Untersuchungsstufen I, II und III	453
5.5.3.5.1 Erdbebengefährdung am Brückenstandort.....	453
5.5.3.5.2 Rechenmodelle.....	454
5.5.3.5.3 Schwingungsmessungen.....	455
5.5.3.5.4 Modellkalibrierung.....	457
5.5.3.5.5 Lastfallkombinationen.....	457
5.5.3.5.6 Ergebnisse in den drei Untersuchungsstufen	458
5.5.4 Spezifikation für Industrieanlagen.....	460

6 MAUERWERKSBAUTEN.....	469
6.1 Verhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung	469
6.1.1 Versagensformen von Mauerwerksscheiben unter seismischer Belastung	469
6.1.2 Wand-Decken und Wand-Wand Interaktion	472
6.1.3 Zusammenwirken der Schubwände	477
6.2 Rechenverfahren für Mauerwerksbauten	478
6.3 Berechnungsmodelle für Mauerwerksbauten	479
6.3.1 Ersatzstab.....	479
6.3.2 Ebenes Rahmenmodell	480
6.3.3 Pseudo 3D-Modelle mit äquivalenten Rahmenmodellen.....	482
6.3.4 Räumliche Modelle.....	483
6.4 Beanspruchungen senkrecht zur Wandebene	484
6.4.1 Problemstellung	484
6.4.2 Normative Nachweise.....	485
6.4.2.1 Tragende Schubwände	485
6.4.2.2 Nicht tragende Trennwände	486
6.4.3 Verformungsbasierte Nachweiskonzepte.....	487
6.4.3.1 Seismische Belastung der Wände.....	487
6.4.3.2 Verformungsbasierte Nachweise	487
6.4.4 Numerische Simulationen.....	491
6.4.5 Forschungsbedarf.....	492
6.5 Ermittlung von Last-Verformungskurven für Schubwände	493
6.5.1 Zyklische Schubwandversuche.....	493
6.5.2 Nichtlineare Berechnungen.....	496
6.5.3 Analytische Ansätze der FEMA-Richtlinien	497
6.5.3.1 Berechnung der horizontalen Tragfähigkeiten.....	497
6.5.3.2 Ermittlung der Verformungsfähigkeiten der Versagensformen.....	498
6.5.4 Analytische Ansätze nach DIN EN 1996-1-1 und DIN EN 1998-3	499
6.5.4.1 Horizontale Tragfähigkeiten der Versagensformen.....	500
6.5.4.2 Verformungsfähigkeiten der Versagensformen.....	501
6.5.5 Analytischer Ansatz auf Grundlage der Versuchsdaten aus ESECMaSE.....	501
6.5.6 Datenbankansatz auf Grundlage experimenteller Kurven	503
6.6 Verformungsbasierte Bemessung von Mauerwerksbauten	504
6.6.1 Berechnung des Gebäude-Kapazitätsspektrums	505
6.6.1.1 Vereinfachter Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das Erdgeschoss	505
Berechnungsalgorithmus	505
6.6.1.2 Genauerer Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das oberste Geschoss.....	508
6.6.2 Iterative Ermittlung des Performance Point.....	509
6.6.3 Berücksichtigung der normativen Anforderungen.....	512
6.7 Berechnungsbeispiele für den statisch nichtlinearen Nachweis.....	513
6.7.1 Beispiel 1: Dreistöckiges Reihenhäuser.....	513
6.7.2 Beispiel 2: Einfluss der Torsion am Beispiel eines freistehenden Gebäudes.....	517
6.7.3 Beispiel 3: Doppelhaushälfte aus Ziegelmauerwerk.....	518
6.7.4 Nachweis mit experimentell ermittelten Last-Verformungskurven.....	519
6.7.5 Nachweis mit approximierten Last-Verformungskurven.....	523
6.7.6 Nachweis der Einspannungswirkung der Deckenplatte	525

7 BAUWERKE UND KOMPONENTEN IM ANLAGENBAU	531
7.1 Einführung	531
7.2 Sicherheitskonzept auf Grundlage von Bedeutungsbeiwerten	532
7.3 Auslegung der Primärstruktur.....	534
7.4 Sekundärstrukturen	538
7.4.1 Berechnungsansätze	538
7.4.2 Berechnungsbeispiel für einen Behälter in einer fünfstöckigen Anlage.....	546
7.5 Silobauwerke.....	553
7.5.1 Ersatzlastverfahren nach DIN EN 1998-4 (2007).....	555
7.5.2 Berechnung der Eigenfrequenzen von Silos	560
7.5.2.1 Silos mit direkter Lagerung auf einem Gründungskörper	560
7.5.2.2 Silos mit Unterkonstruktion	563
7.5.2.3 Silos in Silobatterien	565
7.5.3 Ansatz der Dämpfung für Silos	567
7.5.3.1 Strukturdämpfung	567
7.5.3.2 Dämpfung des Untergrunds	567
7.5.3.3 Dämpfung des Schüttguts	567
7.5.3.4 Ansatz einer gewichteten Dämpfung	567
7.5.4 Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion	568
7.5.5 Berechnungsbeispiel: Schlankes Silo	568
7.5.5.1 Beanspruchungen infolge Fülllasten	569
7.5.5.1 Beanspruchung infolge Erdbeben für konstanten Beschleunigungsverlauf.....	571
7.5.5.2 Beanspruchung infolge Erdbeben für veränderlichen Beschleunigungsverlauf	573
7.5.5.3 Beanspruchung infolge Erdbeben mit vereinfachtem Berechnungsansatz	576
7.5.6 Berechnungsbeispiel: Gedrungenes Silo	578
7.5.7 Numerische Simulation	584
7.5.8 Vergleich der Verfahren	587
7.6 Tankbauwerke	589
7.6.1 Einleitung	589
7.6.2 Grundlagen: Zylindrische Tankbauwerke unter Erdbebenbelastung	590
7.6.3 Eindimensionale horizontale Erdbebeneinwirkung	594
7.6.3.1 Konvektiver Druckanteil (Schwappen)	594
7.6.3.2 Impulsiv starrer Druckanteil (Starrkörperverschiebung).....	596
7.6.3.3 Impulsiv flexibler Druckanteil (Biegeschwingung)	598
7.6.3.4 Praxisbezogene Vereinfachung der Druckanteile durch tabellierte Faktoren.....	604
7.6.3.5 Überlagerung der Druckanteile für eindimensionale horizontale Anregung	609
7.6.4 Vertikale Erdbebeneinwirkung	610
7.6.4.1 Impulsiv starrer Druckanteil infolge vertikaler Erdbebenanregung	610
7.6.4.2 Impulsiv flexibler Druckanteil infolge vertikaler Erdbebenanregung	611
7.6.4.3 Überlagerung der Druckanteile für vertikale Erdbebenanregung.....	615
7.6.5 Überlagerung der Anteile für die dreidimensionale Erdbebenanregung.....	615
7.6.6 Aufstellung der Spektren für das Antwortspektrenverfahren	617
7.6.7 Fundamentalschub und Umsturzmomente	618
7.6.7.1 Berechnung durch Integration der Druckfunktionen.....	618
7.6.7.2 Vereinfachter Ansatz nach DIN EN 1998-4 (2007), Anhang A.3.2.2	622
7.6.7.3 Näherungsverfahren nach Housner	624
7.6.8 Weitere Lastfälle zur Bemessung von Tanks	629
7.6.8.1 Lasten aus Eigengewicht.....	629
7.6.8.2 Hydrostatischer Druck	629

7.6.8.3 Wind.....	629
7.6.8.4 Schnee	630
7.6.8.5 Lasten aus Setzungen	630
7.6.8.6 Temperaturbelastung	630
7.6.8.7 Vorspannung	630
7.6.8.8 (Gas-) Innendruck	630
7.6.8.9 Überlagerung der einzelnen Lastfälle.....	630
7.6.9 Berechnungsbeispiel 1: Schlanker Tank.....	630
7.6.9.1 Objektbeschreibung.....	631
7.6.9.2 FE-Modellierung des Tanks	632
7.6.9.3 Berechnung der Druckkurven.....	632
7.6.9.4 Fundamentschub und Umsturzmomente mit genauen Druckkurven	636
7.6.9.5 Fundamentschub und Umsturzmomente mit tabellierten Druckkurven.....	636
7.6.9.6 Fundamentschub und Umsturzmomente nach Housner.....	637
7.6.9.7 Fundamentschub und Umsturzmomente nach Gehrig (2004)	640
7.6.9.8 Ergebnisvergleich der Verfahren für Fundamentschub und Umsturzmomente	641
7.6.9.9 Beurteilung der Spannungen in der Tankschale	642
7.6.10 Berechnungsbeispiel 2: Tank mittlerer Schlankheit	644
7.6.10.1 Objektbeschreibung.....	644
7.6.10.2 FE-Modellierung des Tanks	645
7.6.10.3 Fundamentschub und Umsturzmomente mit tabellierten Vorfaktoren	645
7.6.10.4 Fundamentschub und Umsturzmomente nach DIN EN 1998-4 (2007)	648
7.6.10.5 Ergebnisvergleich und Diskussion	649
7.6.11 Fazit	651
7.6.12 Anhang: Tabellen der einzelnen Druckanteile.....	652
8 ABSPERRBAUWERKE.....	661
8.1 Standsicherheitsnachweise für Erddämme	661
8.1.1 Standsicherheitsnachweise.....	661
8.1.1.1 Pseudostatisches Verfahren	663
8.1.1.2 Dynamische Verfahren.....	664
8.1.2 Berechnung der Gleitsicherheit mit Hilfe der Finite-Elemente Methode	665
8.1.2.1 Berechnung des Sicherheitsfaktors.....	665
8.1.2.2 Gleitkreis der geringsten Sicherheit.....	666
8.1.3 Berechnungsbeispiel.....	670
8.1.3.1 Modellbildung.....	670
8.1.3.2 Lastfall Eigengewicht.....	672
8.1.3.3 Lastfall Wassereinstau.....	673
8.1.3.4 Nachweis der Böschungsbruchsicherheit für den Lastfall Wassereinstau	673
8.1.3.5 Lastfall Erdbeben	674
9 ANHANG - PROGRAMMBESCHREIBUNGEN.....	679
9.1 Übersicht	679
9.2 Programmbeschreibungen.....	682
SACHWORTVERZEICHNIS.....	713

1 Baudynamische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten baulynamischen Werkzeuge bereitgestellt, die in den weiteren Kapiteln dieses Buches benötigt werden. Die theoretischen Herleitungen werden durchwegs auf ein Minimum beschränkt, dafür werden die praktischen Anwendungen in den Vordergrund gerückt. Für die meisten Algorithmen werden Rechenprogramme bereitgestellt, deren Gebrauch anhand von ausgeführten Beispielen illustriert wird.

1.1 Bewegungsdifferentialgleichungen, d'ALEMBERTsches Prinzip

Die Wahl eines konsistenten Einheitensystems ist in der Baulynamik besonders wichtig, da in den auftretenden Beziehungen in der Regel sowohl Kräfte als auch Massen vorkommen, womit sich leicht Fehler einschleichen können, die auf die Wahl inkompatibler Einheiten zurückzuführen sind. Um solche Fehler zu vermeiden, wird in diesem Buch das Internationale Einheitensystem („Système International“, SI) mit den in Tabelle 1-1 angegebenen Einheiten (und nur mit diesen!) allen Berechnungen zugrunde gelegt:

Tabelle 1-1 In diesem Buch ausschließlich verwendete Einheiten

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
Länge	l, ℓ	Meter, m
Masse	M, m	Tonnen, t
Kraft	F, P	Kilonewton, kN
Zeit	t	Sekunde, s
Druck, Spannung	σ	Kilopascal, 1 kPA = 1 kN/m ²

Beim konsequenten, ausschließlichen Gebrauch dieser Einheiten entfällt jede Kraft/Masse-Umrechnung, da eine Masse von einer Tonne (entsprechend z.B. einem Wasserwürfel mit 1 m Kantenlänge) im Erdschwerefeld rund 10 kN wiegt, wodurch der Faktor g im zweiten NEWTONschen Gesetz $F = mg$ zahlenmäßig bereits berücksichtigt ist (definitionsgemäß ist $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$ und damit gilt auch $10 \text{ kN} = 1 \text{ t} \cdot 10 \text{ m/s}^2$).

Bei der mathematischen Beschreibung von Schwingungsproblemen wird häufig das Prinzip von d'ALEMBERT benutzt, wonach bei formaler Einführung der Trägheitskraft \underline{F}_I gemäß

$$\underline{F}_I = -m \cdot \underline{a}, \quad (1.1)$$

mit der Masse m und der Beschleunigung \underline{a} als weitere Kraftwirkung zusätzlich zu den sonstigen Kräften \underline{F} das Kräftegleichgewicht wie in der Statik üblich angeschrieben werden kann:

$$\Sigma \underline{F} = \underline{F} + \underline{F}_I = 0. \quad (1.2)$$

Vektoren und Matrizen werden hier wie im Folgenden durch Unterstreichung kenntlich gemacht. Als erstes Beispiel für die Aufstellung der Bewegungsdifferentialgleichungen eines Systems sei der in Bild 1-1 skizzierte Einmassenschwinger betrachtet, bei dem sich die Masse

m unter der Einwirkung der zeitabhängigen Last $F(t)$ um den Betrag $u(t)$ verschiebt. Dabei ist die Trägheitskraft gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung:

$$F_I = m \cdot \ddot{u}(t). \quad (1.3)$$

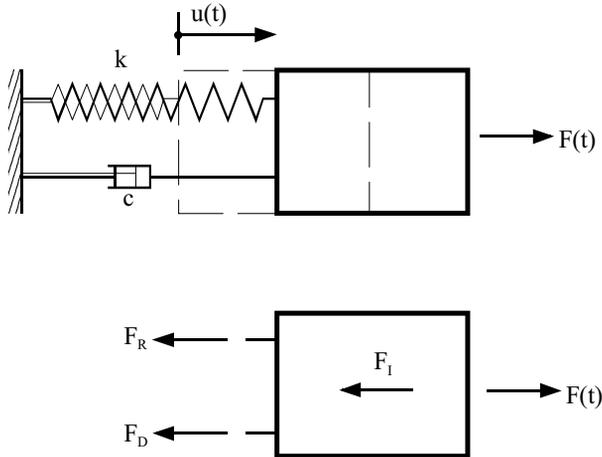


Bild 1-1 Einmassenschwinger und freigeschnittene Masse

Freischnitten der Masse und Formulierung des Kräftegleichgewichts in horizontaler Richtung ergibt die Gleichung

$$F_I + F_D + F_R = F \quad (1.4)$$

mit der Trägheitskraft F_I , der Dämpfungskraft F_D und der Rückstellkraft F_R , die mit der äußeren Last F in Gleichgewicht stehen. Die Rückstellkraft ergibt sich als

$$F_R = k \cdot u \quad (1.5)$$

mit der Federsteifigkeit k in kN/m und der Verschiebung u in m. Der einfache linear-viskose Dämpfungsansatz setzt die Dämpfungskraft proportional zur 1. Potenz der Geschwindigkeit an, gemäß

$$F_D = c \cdot \dot{u} \quad (1.6)$$

mit der Dämpfungskonstante c in kNs/m und der Geschwindigkeit \dot{u} in m/s. Somit ergibt sich die Bewegungsdifferentialgleichung des Einmassenschwingers in der Form

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = F(t). \quad (1.7)$$

Als weiteres Beispiel sei der vierstöckige Rahmen des Bildes 1-2 betrachtet. Die Masse der Stützen wird gegenüber den Massen der Decken vernachlässigt, darüber hinaus werden die Riegel als starr angenommen (Scherbalkenmodell). Der Rahmen wird durch die horizontale Bodenbeschleunigung \ddot{u}_g beansprucht; gesucht sind die Bewegungsdifferentialgleichungen in den Freiheitsgraden u_1 , u_2 , u_3 und u_4 , die als horizontale Relativverschiebungen der jeweiligen Stockwerksdecke in Bezug auf den Fußpunkt definiert sind. Bei der Biegesteifigkeit EI der Einzelstütze in kNm^2 und einer Stockwerkshöhe von h in m (in diesem Beispiel wurden EI und

h für alle Stützen und Stockwerke gleich gewählt), beträgt die horizontale Federsteifigkeit k eines Stockwerks mit zwei Stützen in kN/m:

$$k = 2 \cdot \frac{12 \cdot EI}{h^3} \tag{1.8}$$

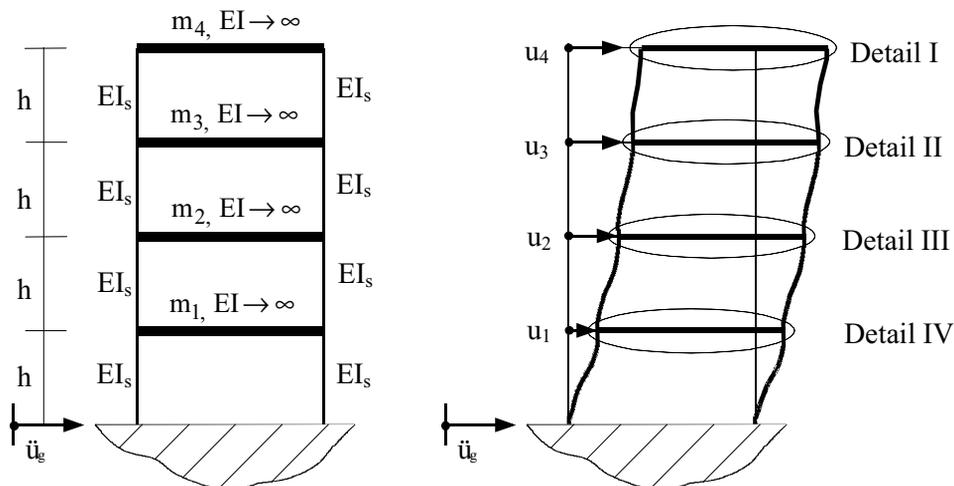


Bild 1-2 Stockwerkrahmen mit starren Riegeln

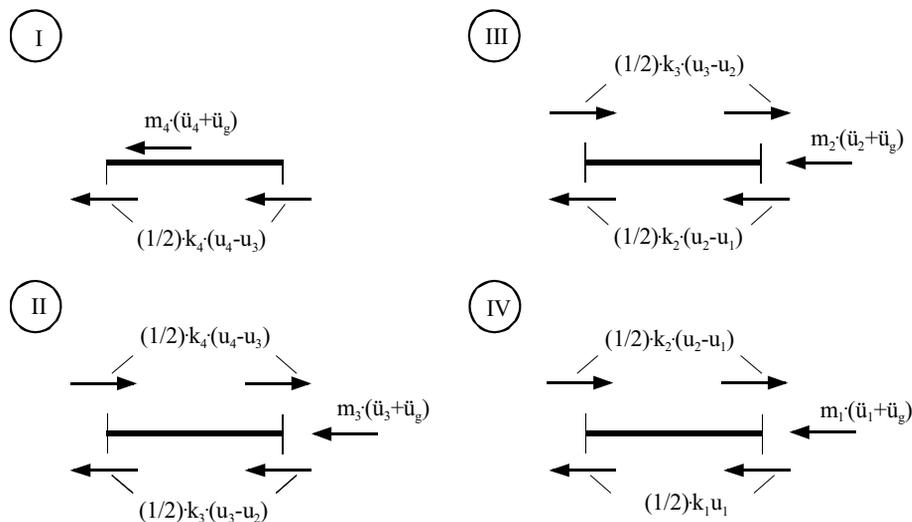


Bild 1-3 Freigeschnittene Decken

Die Trägheitskräfte ergeben sich als Produkte der Stockwerkmassen mit der jeweiligen Decken-Absolutbeschleunigung, wobei sich letztere als Summe der Fußpunktbeschleunigung \ddot{u}_g und

der Deckenbeschleunigung relativ zum Fundament ergibt. Andererseits sind die Rückstellkräfte gleich den Produkten der Stockwerkssteifigkeiten k nach (1.8) mit den jeweiligen Decken-Relativverschiebungen u_i . Durch das Freischneiden der einzelnen Decken und Ansetzen der wirkenden Trägheits- und Rückstellkräfte, wie in Bild 1-3 skizziert, ergeben sich folgende Beziehungen aus der Gleichgewichtsbetrachtung $\Sigma H = 0$ (Kräftegleichgewicht in Horizontalrichtung):

4. OG (Detail I):

$$m_4 \cdot (\ddot{u}_4 + \ddot{u}_g) + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot k_4 \cdot (u_4 - u_3) = 0$$

$$m_4 \cdot \ddot{u}_4 + k_4 \cdot (u_4 - u_3) = -m_4 \cdot \ddot{u}_g \quad (1.9)$$

3. OG (Detail II):

$$m_3 \cdot (\ddot{u}_3 + \ddot{u}_g) + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot k_3 \cdot (u_3 - u_2) - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot k_4 \cdot (u_4 - u_3) = 0$$

$$m_3 \cdot \ddot{u}_3 + u_2 \cdot (-k_3) + u_3 \cdot (k_3 + k_4) + u_4 \cdot (-k_4) = -m_3 \cdot \ddot{u}_g \quad (1.10)$$

2. OG (Detail III):

$$m_2 \cdot \ddot{u}_2 + u_1 \cdot (-k_2) + u_2 \cdot (k_2 + k_3) + u_3 \cdot (-k_3) = -m_2 \cdot \ddot{u}_g \quad (1.11)$$

1. OG (Detail IV):

$$m_1 \cdot \ddot{u}_1 + u_1 \cdot (k_1 + k_2) + u_2 \cdot (-k_2) = -m_1 \cdot \ddot{u}_g \quad (1.12)$$

Die Zusammenfassung der vier Gleichungen (1.9) bis (1.12) liefert folgendes Differentialgleichungssystem für das (ungedämpfte) Scherbalkenmodell eines biegesteifen Stockwerkrahmens:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = -\ddot{u}_g \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

oder kürzer

$$\underline{\underline{M}} \cdot \ddot{\underline{\underline{V}}} + \underline{\underline{K}} \cdot \underline{\underline{V}} = -\ddot{u}_g \cdot \underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{r}} \quad (1.14)$$

mit der Diagonalmassenmatrix $\underline{\underline{M}}$, der symmetrischen Steifigkeitsmatrix $\underline{\underline{K}}$, den Beschleunigungs-, bzw. Verschiebungsvektoren $\ddot{\underline{\underline{V}}}$ und $\underline{\underline{V}}$ und dem Vektor $\underline{\underline{r}}$, der die Verschiebungen in den einzelnen Freiheitsgraden infolge einer Einheitsverschiebung des seismisch erregten Fußpunktes angibt. Im vorliegenden Fall ist

$$\underline{r} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

Bei zusätzlicher Berücksichtigung einer linear-viskosen Dämpfung erhält Gleichung (1.14) die Form

$$\underline{M} \cdot \ddot{\underline{V}} + \underline{C} \cdot \dot{\underline{V}} + \underline{K} \cdot \underline{V} = -\ddot{u}_g \cdot \underline{M} \cdot \underline{r}. \quad (1.16)$$

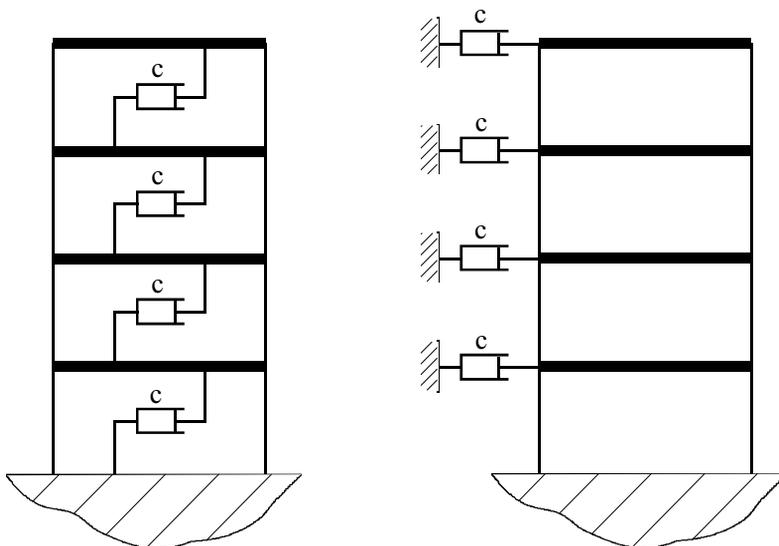


Bild 1-4 Viskose Dämpfung bezogen auf die Relativ- oder Absolutgeschwindigkeiten

Der Ansatz der viskosen Dämpfer kann bei diesem Beispiel entweder nach Bild 1-4 links oder nach Bild 1-4 rechts erfolgen. Im ersten Fall ergibt sich die Dämpfungsmatrix analog zur Steifigkeitsmatrix in der Form

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 \end{bmatrix}, \quad (1.17)$$

während die Annahme nach Bild 1-4 rechts zu folgendem Differentialgleichungssystem führt:

$$\underline{M} \cdot \ddot{\underline{V}} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \end{bmatrix} + \underline{K} \cdot \underline{V} = -\ddot{u}_g \cdot \underline{M} \cdot \underline{r} - \ddot{u}_g \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

Ein Nachteil dieser letzten Idealisierung ist, dass hierbei auch der zeitliche Verlauf der Bodengeschwindigkeit $\dot{u}_g(t)$ benötigt wird.

1.2 Zeitabhängige Vorgänge und Prozesse

Bei zeitabhängigen Prozessen spielen Variablen in Raum und Zeit eine Rolle, wobei eine Reihe von Begriffen zur geeigneten Beschreibung solcher Vorgänge eingeführt werden muss. Einige davon lassen sich anhand der stationären harmonischen Schwingung erläutern. So zeigt Bild 1-5 die graphische Darstellung der Funktion

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.19)$$

für die konkreten Werte $A = 10$ Einheiten, $\omega = \pi \text{ rad/s}$, entsprechend 180° (Altgrad) pro Sekunde und $\varphi = 45^\circ$ oder $\pi/4$ im Bogenmaß (rad). A ist die Amplitude der Schwingung, ω ihre Kreisfrequenz, d.h. die Anzahl von Schwingungszyklen in 2π Sekunden (Einheit rad/s), und φ ist der Anfangsphasenwinkel. Wie Bild 1-5 zu entnehmen ist, liegt der dem Koordinatenursprung nächstgelegene positive (d.h. mit $\dot{x} > 0$) Nulldurchgang von $x(t)$ im Abstand $t = -\varphi/\omega$ von ihm entfernt; hier beträgt dieser Abstand $-0,25$ s. Die Anzahl der Schwingungszyklen in einer Sekunde wird als Frequenz f (Einheit: 1/s oder Hertz, Hz) bezeichnet und ihr Kehrwert, d.h. die Dauer eines Schwingungszyklus, als Periode T (Einheit: s). Es gilt:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.20)$$

Im Beispiel von Bild 1-5 beträgt die Frequenz $f = \omega/\pi = 0,5$ Hz und die Periode $T = 2$ s.

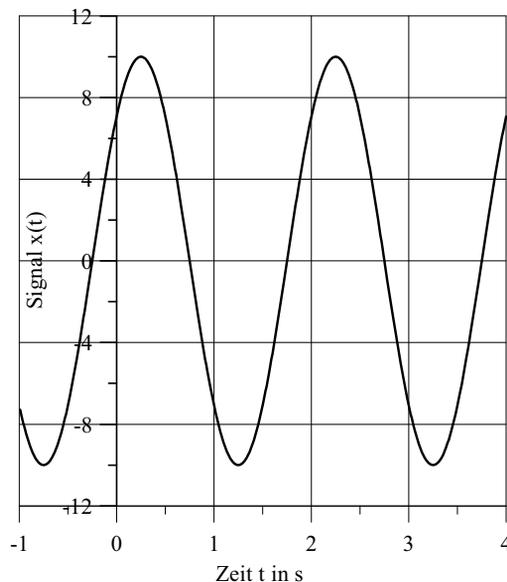


Bild 1-5 Stationäre Sinusschwingung

Zeitabhängige Prozesse sind deterministisch oder stochastisch. Während bei deterministischen Prozessen die entsprechenden Variablen als Funktionen von Zeit (und Raum) prinzipiell berechenbar sind, lassen sich bei stochastischen oder zufälligen Prozessen nur einige ihrer statistischen Erwartungswerte angeben, allerdings lassen sich bei entsprechender numerischer oder experimenteller Modellierung beliebig viele passende Realisationen oder Musterfunktionen generieren. Beispiele für deterministische Prozesse in der Baudynamik sind Maschinenkräfte und Auflagerkräfte von Glocken, dagegen lassen sich die meisten Belastungen natürlichen Ursprungs wie Wind und Erdbeben nur als stochastische Prozesse adäquat beschreiben. Selbstverständlich lassen sich auch zu stochastischen Prozessen deterministische Modelle als erste (z.T. recht genaue) Näherungen konstruieren.

Beim stationären stochastischen Prozess ändern sich die statistischen Kennwerte mit der Zeit nicht, beim so genannten ergodischen Prozess kann darüber hinaus davon ausgegangen werden, dass jede Musterfunktion für sich betrachtet imstande ist, diese statistischen Werte zu liefern. Damit lassen sich statistische Untersuchungen „quer durch das Ensemble“, das ist die Gesamtheit aller möglichen Prozessrealisationen, durch Untersuchungen einer einzigen ausreichend langen Musterfunktion ersetzen. Im Folgenden werden die wichtigsten Kennfunktionen zur Beschreibung einer Musterfunktion $x(t)$ des gleichnamigen Prozesses zusammengefasst.

1. Der Mittelwert (mean value) wird definiert als

$$\bar{x} = m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.21)$$

bei ausreichend langem T . Liegt die Funktion $x(t)$ als Zeitreihe $\{x_r\}$, $r=1, 2, \dots, N$ von Funktionsordinaten im konstanten Abstand (Abtastintervall) Δt vor, so lautet der Mittelwert

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1.22)$$

2. Das quadratische Mittel (mean square), also der Mittelwert der quadrierten Musterfunktion über T , wird definiert als

$$\bar{x}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (1.23)$$

bzw. bei einer diskreten Zeitreihe

$$\bar{x}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (1.24)$$

3. Die Varianz (variance) σ^2 als Quadrat der Standardabweichung (standard deviation) σ ergibt sich zu

$$\sigma^2 = \bar{x}^2 - m^2 \quad (1.25)$$

Durch eine Koordinatentransformation kann das Mittel m immer zu Null gemacht werden, womit die Varianz gleich dem quadratischen Mittel wird.

4. Die Autokorrelationsfunktion (auto correlation function)

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1.26)$$

bzw. für eine Zeitreihe

$$R_{xx}(\tau = (k-1) \cdot \Delta t) = \frac{1}{N-(k-1)} \sum_{i=1}^{N-(k-1)} x_i \cdot x_{i+(k-1)}, \quad k=1, 2, \dots \quad (1.27)$$

ist eine gerade Funktion, $R_{xx}(\tau) = R_{xx}(-\tau)$ mit Werten zwischen $(\sigma^2 + m^2)$ und $(-\sigma^2 + m^2)$. Es gilt weiter

$$R_{xx}(0) = \sigma^2 + m^2 \quad (1.28)$$

Auch Kreuzkorrelationsfunktionen (cross correlation functions) zwischen zwei verschiedenen Schrieben $x(t)$ und $y(t)$ lassen sich analog definieren:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt \quad (1.29)$$

Haben beide Prozesse $x(t)$ und $y(t)$ den Mittelwert Null, so gilt

$$-\sigma_x \sigma_y \leq R_{xy}(\tau) \leq \sigma_x \sigma_y \quad (1.30)$$

5. Die Leistungsspektraldichte eines Prozesses wird als FOURIER-Transformierte seiner Autokorrelationsfunktion definiert, bzw. die Autokorrelationsfunktion ist die inverse FOURIER-Transformierte der Leistungsspektraldichte (WIENER-KHINTCHINE-Beziehung):

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.31)$$

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (1.32)$$

Da $R_{xx}(\tau)$ eine gerade Funktion ist, lautet ihre FOURIER-Transformierte:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \cos \omega\tau d\tau = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau) \cos \omega\tau d\tau \quad (1.33)$$

$S_{xx}(\omega)$ ist wie R_{xx} reell und gerade. Für $\tau=0$ gilt:

$$R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega = \bar{x}^2 \quad (1.34)$$

Das bedeutet, dass die Fläche unterhalb der Spektraldichtefunktion gleich dem quadratischen Mittel des Prozesses ist.

Kreuzspektraldichten werden analog eingeführt:

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = A(\omega) - iB(\omega) \quad (1.35)$$

Im Gegensatz zu Autosppektraldichten sind sie im Allgemeinen komplex. Mit der zu $S_{xy}(\omega)$ konjugiert komplexen Kreuzspektraldichte $S_{xy}^*(\omega)$ gilt:

$$S_{xy}^*(\omega) = S_{yx}(\omega) \quad (1.36)$$

Die Leistungsspektraldichten von abgeleiteten Prozessen \dot{x} , \ddot{x} etc. ergeben sich zu:

$$S_{\dot{x}\dot{x}}(\omega) = \omega^2 S_{xx}(\omega) \quad (1.37)$$

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(\omega) = \omega^4 S_{xx}(\omega) \quad (1.38)$$

Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, bei Kenntnis der Leistungsspektraldichte einer Verschiebung auch für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung Kennwerte wie etwa das quadratische Mittel zu bestimmen.

Maßeinheit der Leistungsspektraldichte $S_{xx}(\omega)$ ist das Quadrat der Einheit von x pro Einheit der Kreisfrequenz (rad/s). Oft wird anstelle von $S_{xx}(\omega)$ die einseitige Leistungsdichte $G_{xx}(\omega)$ betrachtet, die nur positive Frequenzanteile enthält. Es ist

$$G_{xx}(\omega) = 2 S_{xx}(\omega) \quad (1.39)$$

Wird anstelle der Kreisfrequenz ω in rad/s die Frequenz f in 1/s verwendet, so hängen die Ordinaten der zugehörigen Leistungsspektraldichte $W_{xx}(f)$ wie folgt mit denjenigen von $S_{xx}(\omega)$ zusammen:

$$W_{xx}(f) = 4\pi S_{xx}(\omega) \quad (1.40)$$

Als Grenzfall eines Breitbandprozesses ergibt sich der als „weißes Rauschen“ (white noise) bezeichnete stationäre Prozess, bei dem alle Frequenzanteile gleichmäßig zur (unendlich großen) Varianz beitragen. Seine Autokorrelationsfunktion ist eine DIRACsche Delta-Funktion, d.h. die Ordinaten der Musterfunktionen sind vollkommen unkorreliert. Da sich der Prozess durch einen einzigen Parameter, nämlich die konstante Leistungsspektraldichte S_0 beschreiben lässt, stellt er das einfachste Modell für stationäre stochastische Prozesse dar. Der zugehörige allgemeinere instationäre Prozess wird als Stoßrauschen (shot noise) bezeichnet. Er kann unter anderem als Produkt von „weißem Rauschen“ mit einer deterministischen Zeitfunktion realisiert werden. In Bild 1-6 sind einige Autokorrelationsfunktionen und Leistungsspektraldichten typischer Prozesse gegenübergestellt.

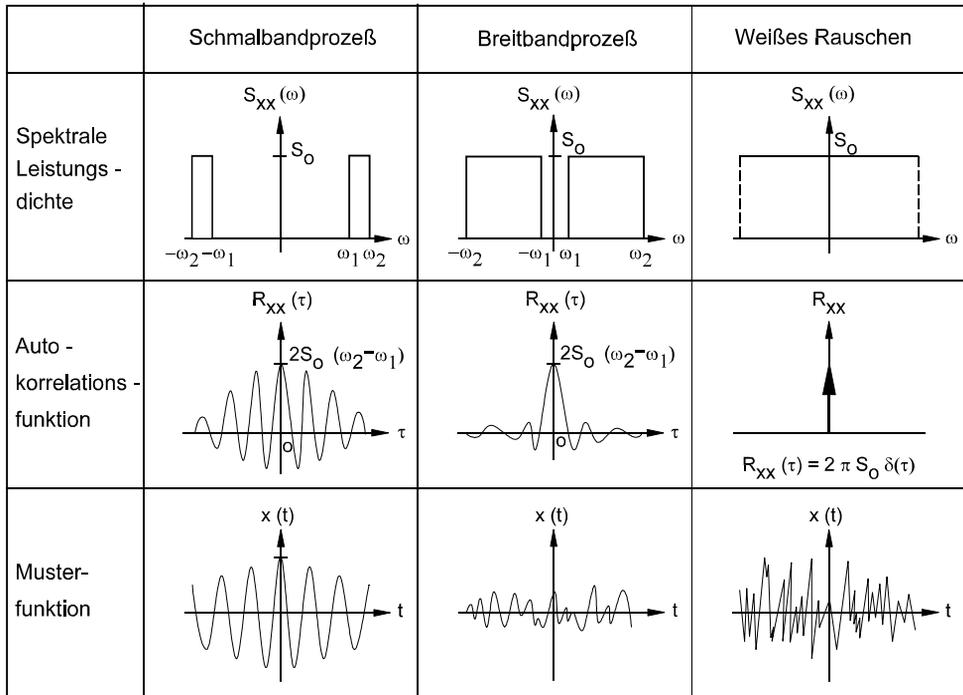


Bild 1-6 Autokorrelationsfunktionen, zugehörige Spektraldichten und Musterfunktionen

1.3 Der Einmassenschwinger

Der viskos gedämpfte Einmassenschwinger, dessen Differentialgleichung gemäß (1.7) bereits vorliegt, stellt ein für viele baodynamischen Anwendungen sehr nützlich Modell dar und hat zudem den Vorzug der einfachen mathematisch-numerischen Handhabung. In diesem Abschnitt werden Lösungsverfahren für lineare und nichtlineare Einmassenschwinger diskutiert und anhand von Beispielen erläutert. Die praktische Durchführung der Berechnungen erfolgt mit Hilfe der angegebenen Computerprogramme, deren Ein- und Ausgabe im Einzelnen erläutert wird.

1.3.1 Der Einmassenschwinger im Zeitbereich

Ausgangspunkt ist die allgemeine Bewegungsdifferentialgleichung des viskos gedämpften linearen Einmassenschwingers gemäß (1.7). Mit der Verschiebung $u(t)$, der Geschwindigkeit $\dot{u}(t)$ und der Beschleunigung $\ddot{u}(t)$ lautet sie

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = F(t) \quad (1.41)$$

bzw. nach Division durch die Masse m

$$\ddot{u} + \frac{c}{m} \dot{u} + \frac{k}{m} u = \frac{F(t)}{m} = f(t) \quad (1.42)$$

Zunächst wird die homogene Differentialgleichung, $F(t)=0$ betrachtet. Mit dem Ansatz

$$u = \exp(\lambda \cdot t) \quad (1.43)$$

ergibt sich die charakteristische Gleichung

$$\lambda^2 + \frac{c}{m} \lambda + \omega_1^2 = 0; \quad \omega_1^2 = \frac{k}{m} \quad (1.44)$$

mit ω_1 als Kreiseigenfrequenz des Einmassenschwingers. Die Lösungen von (1.44) sind

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega_1^2} \quad (1.45)$$

Das Verhalten des Systems hängt vom Vorzeichen des Wurzelausdrucks ab. Für hohe Dämpfungswerte ist der Radikand positiv, die Lösungen λ_1 und λ_2 sind reell und die allgemeine Lösung der Differentialgleichung

$$u = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (1.46)$$

stellt eine asymptotisch gegen Null strebende Funktion dar. Nur für Dämpfungswerte kleiner als

$$c = c_{\text{krit}} = 2 \cdot m \cdot \omega_1 \quad (1.47)$$

tritt eine Schwingung überhaupt auf. Das Verhältnis zwischen dem vorhandenen Dämpfungswert c und c_{krit} wird als LEHRsches Dämpfungsmaß D oder Prozentsatz der kritischen Dämpfung ξ bezeichnet. Es ist

$$D = \xi = \frac{c}{c_{\text{krit}}} = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_1} \quad (1.48)$$

Mit $\frac{c}{m} = 2 \cdot D \cdot \omega_1$ ergibt sich aus der Differentialgleichung (1.42):

$$\ddot{u} + 2 \cdot D \cdot \omega_1 \cdot \dot{u} + \omega_1^2 \cdot u = f(t) \quad (1.49)$$

Für $f(t)=0$ lautet die homogene Lösung

$$u(t) = e^{-D\omega_1 t} \left(C_1 \cos \sqrt{1-D^2} \omega_1 t + C_2 \sin \sqrt{1-D^2} \omega_1 t \right) \quad (1.50)$$

Für den allgemeinen Fall der Anfangsbedingungen $u(0)=u_0$, $\dot{u}(0)=\dot{u}_0$ lautet sie:

$$u(t) = e^{-D\omega_1 t} \left(u_0 \cos \sqrt{1-D^2} \omega_1 t + \frac{(\dot{u}_0 + D\omega_1 u_0)}{\omega_1 \sqrt{1-D^2}} \sin \sqrt{1-D^2} \omega_1 t \right) \quad (1.51)$$

Zu beachten ist dabei die reduzierte Kreiseigenfrequenz ω_D des gedämpften Systems

$$\omega_D = \omega_1 \cdot \sqrt{1-D^2} \quad (1.52)$$

Die allgemeine Lösung der inhomogenen Differentialgleichung (1.49) ergibt sich als Summe von (1.51) und einer partikulären Lösung $u_p(t)$. Letztere kann als DUHAMEL- oder Faltungsintegral wie folgt dargestellt werden:

$$u_p(t) = \frac{1}{\omega_D} \int_0^t f(\tau) e^{-D\omega_1(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (1.53)$$

Zur praktischen Lösungsermittlung empfiehlt sich die direkte numerische Integration der inkrementellen Form (1.54) der Differentialgleichung unter Verwendung eines geeigneten Algorithmus:

$$m \cdot \Delta \ddot{u} + c \cdot \Delta \dot{u} + k \cdot \Delta u = \Delta F \quad (1.54)$$

mit den Inkrementen über den Zeitschritt $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{u} &= \ddot{u}(t_2) - \ddot{u}(t_1) = \ddot{u}_2 - \ddot{u}_1 \\ \Delta \dot{u} &= \dot{u}(t_2) - \dot{u}(t_1) = \dot{u}_2 - \dot{u}_1 \\ \Delta u &= u(t_2) - u(t_1) = u_2 - u_1 \\ \Delta F &= F(t_2) - F(t_1) = F_2 - F_1 \end{aligned} \quad (1.55)$$

In diesem Buch wird ausschließlich der weit verbreitete NEWMARK β - γ - Integrator verwendet. Es wird je nach Wahl der Parameter β und γ ein konstanter ($\beta = 0,25$ und $\gamma = 0,50$) oder ein linearer ($\beta = 1/6$ und $\gamma = 0,50$) Verlauf der Beschleunigung \ddot{u} im Zeitschritt Δt unterstellt. Die Inkremente der Geschwindigkeit und der Beschleunigung über Δt ergeben sich zu

$$\begin{aligned} \Delta \dot{u} &= \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_1 - \Delta t \left[\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right] \ddot{u}_1 \\ \Delta \ddot{u} &= \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_1 - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_1. \end{aligned} \quad (1.56)$$

und das Verschiebungsincrement berechnet sich aus

$$\Delta u = \frac{f^*}{k^*} = \frac{m \frac{1}{\beta \Delta t^2} + c \frac{\gamma}{\beta \Delta t} + k}{\Delta F + m \left(\frac{\dot{u}_1}{\beta \Delta t} + \frac{\ddot{u}_1}{2\beta} \right) + c \left(\frac{\gamma \dot{u}_1}{\beta} + \ddot{u}_1 \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \right)} \quad (1.57)$$

Zur Durchführung dieser Berechnung steht das Programm LEINM zur Verfügung. Es benötigt eine selbst zu erstellende Eingabedatei mit dem Namen RHS.txt, in der die Belastungsfunktion (rechte Seite) $f(t)$ oder $F(t)$ abgelegt ist, und zwar zweiseitig im Format 2E16.7 (zwei Spalten mit je 16 Zeichen), mit den Zeitmarken im konstanten Abstand Δt in der ersten und den Belastungsordinaten in der zweiten Spalte. Alle Kenndaten des Einmassenschwingers werden nach dem Programmstart interaktiv abgefragt, dazu auch der Faktor $(1/m)$ zur Gewinnung von $f(t)$ durch Skalierung von $F(t)$. In der Ausgabedatei TIMHIS.txt stehen in fünf Spalten nebeneinander die Zeitpunkte sowie die berechneten Werte der Auslenkung, der Geschwindigkeit, der Beschleunigung und der Rückstellkraft (Auslenkung mal Federkonstante) des Systems; wegen der Ausgabe der Beschleunigung in g-Einheiten ist es notwendig, den gültigen Umrechnungsfaktor bei der verwendeten Längeneinheit (die Zeit wird stets in s gemessen) interaktiv einzugeben (z.B. mit 9,81 bei Verwendung von m als Längeneinheit). Es werden zusätzlich die er-

reichen Maximalwerte (Absolutwerte) der Auslenkung, der Geschwindigkeit, der Beschleunigung (letztere in g) sowie der Trägheits-, Dämpfungs- und Rückstellkraft mit den zugehörigen Zeiten in der Datei MAXL.txt ausgegeben.

Ist die Belastungsfunktion stückweise linear, kann das Programm LININT herangezogen werden, um mittels linearer Interpolation Funktionswerte im konstanten Abstand Δt zu ermitteln. Das Programm benötigt eine Eingabedatei FKT.txt, in der in zwei Spalten die Zeitpunkte und die Ordinaten an den Knickpunkten des Polygonzuges formatfrei angegeben sind; in der Ausgabedatei RHS.txt stehen dann die Zeitmarken und die interpolierten Funktionswerte im Format 2E16.7.

Beispiel 1-1 (Programme und Daten im Verzeichnis BSP1-1):

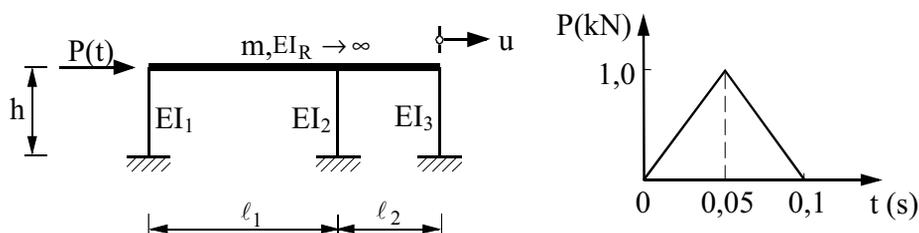


Bild 1-7 Einstöckig-zweifeldriger Rahmen mit starrem Riegel

Als Beispiel wird der in Bild 1-7 dargestellte Rahmen unter der angegebenen Belastung betrachtet, mit folgenden Angaben:

$$\ell_1 = 6,5 \text{ m}, \ell_2 = 4,5 \text{ m}$$

$$h = 4,5 \text{ m}$$

$$m = 7 \text{ t}$$

$$EI_1 = 65.000 \text{ kNm}^2, EI_2 = 80.000 \text{ kNm}^2, EI_3 = 55.000 \text{ kNm}^2$$

Als Dämpfung wird ein LEHRsches Dämpfungsmaß von $D = 1 \%$ angenommen. Beim starren Riegel beträgt die horizontale Steifigkeit des Rahmens

$$k = \frac{12 \cdot EI_1}{h^3} + \frac{12 \cdot EI_2}{h^3} + \frac{12 \cdot EI_3}{h^3} = 26337,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Damit lautet die Kreiseigenfrequenz des Systems

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{26337,45}{7,0}} = 61,34 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

entsprechend einer Periode $T_1 = 2\pi/61,34 = 0,102 \text{ s}$. Für die Lösung der Differentialgleichung durch Direkte Integration empfiehlt sich im Allgemeinen die Wahl eines Zeitschritts Δt von etwa einem Zehntel der Periode des Einmassenschwingers; hier wird jedoch ein halb so großer Zeitschritt mit $\Delta t = 0,005 \text{ s}$ angenommen.