

# Der Ingenieurbau

- **Tragwerkszuverlässigkeit**
- **Einwirkungen**

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

## Verzeichnis der Verfasser

## Tragwerkszuverlässigkeit

1	Einführung . . . . .	1
2	Grundlagen . . . . .	6
2.1	Einführung . . . . .	6
2.2	Modellierung der Eingangsgrößen . . . . .	7
2.2.1	Belastungen und ihre Kombination . . . . .	7
2.2.2	Festigkeit von Werkstoffen . . . . .	11
2.2.2.1	Wahrscheinlichkeitsverteilung von Festigkeitseigenschaften . . . . .	11
2.2.2.2	Räumliche Korrelation . . . . .	14
2.3	Modellierung der Struktur . . . . .	14
2.4	Strukturanalyse . . . . .	15
2.4.1	Allgemeines . . . . .	15
2.4.2	Statische Analyse . . . . .	16
2.4.3	Dynamische Analyse . . . . .	16
2.4.3.1	Allgemeines . . . . .	16
2.4.3.2	Stochastische Prozesse . . . . .	16
2.4.3.3	Monte-Carlo-Simulation von Zufallsprozessen . . . . .	21
2.4.3.3.1	Allgemeines . . . . .	21
2.4.3.3.2	Lineare Analyse . . . . .	24
2.4.3.4	Nichtlineare Analyse . . . . .	27
2.4.4	Stochastische Finite Elemente . . . . .	31
2.4.4.1	Allgemeines . . . . .	31
2.4.4.2	Eigenschaften von Zufallsfeldern . . . . .	32
2.4.4.3	Diskretisierung von Zufallsfeldern . . . . .	33
2.4.4.4	Simulation von Zufallsfeldern . . . . .	34
2.4.4.5	Stochastische Finite Elemente Matrizen . . . . .	34
2.4.4.6	Lösung von SFE-Problemen . . . . .	35
2.5	Methoden zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. der Zuverlässigkeit . . . . .	36
2.5.1	Allgemeines . . . . .	36
2.5.2	Die Berechnung der Grenzzustandsfunktion . . . . .	37
2.5.2.1	Allgemeines . . . . .	37
2.5.2.2	Analytische Bestimmung . . . . .	37
2.5.2.3	Numerische Verfahren . . . . .	37
2.5.2.4	Die Antwortfläche . . . . .	39
2.5.3	Verfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit . . . . .	41
2.5.3.1	Allgemeines . . . . .	41

2.5.3.2	Numerische Integration . . . . .	41
2.5.3.3	Approximationsverfahren . . . . .	42
2.5.3.4	Monte-Carlo-Simulationsverfahren . . . . .	43
2.6	Zuverlässigkeit von Tragsystemen unter statischer und dynamischer Beanspruchung . . . . .	45
2.6.1	Allgemeines . . . . .	45
2.6.2	Statische Belastung . . . . .	46
2.6.2.1	Statisch bestimmte Tragwerke . . . . .	46
2.6.2.2	Statisch unbestimmte Tragwerke . . . . .	46
2.6.3	Dynamische Belastung . . . . .	52
2.7	Berücksichtigung zeitabhängiger Systemeigenschaften . . . . .	55
2.7.1	Allgemeines . . . . .	55
2.7.2	Zeitabhängige Zuverlässigkeitsbestimmung . . . . .	55
2.7.3	Werkstoffermüdung und Rißfortschritt . . . . .	56
2.7.4	Versagenskriterien der Komponenten . . . . .	57
2.8	Software-Entwicklung . . . . .	59
2.8.1	Voraussetzungen und Planung . . . . .	59
2.8.2	Aufgaben der Strukturzuverlässigkeitsanalyse . . . . .	59
2.8.3	ISPUD (Importance Sampling Using Design Points) . . . . .	60
2.8.4	COSSAN (COmputational Stochastic Structural ANalysis) . . . . .	61
3	Anwendung . . . . .	63
3.1	Einführung . . . . .	63
3.2	Umsetzung der Verfahren in Richtlinien bzw. Normen . . . . .	64
3.2.1	Allgemeines . . . . .	64
3.2.2	Grundzüge des Semi-Probabilistischen Sicherheitskonzeptes . . . . .	64
3.2.3	Anwendungen des Semi-Probabilistischen Sicherheitskonzeptes . . . . .	68
3.2.4	Aspekte der Zuverlässigkeitsbeurteilung bereits bestehender Tragwerke . . . . .	69
3.3	Zuverlässigkeitsbeurteilung von Sondertragwerken . . . . .	70
3.3.1	Allgemeines . . . . .	70
3.3.2	Vorgehensweise . . . . .	70
4	Literatur . . . . .	71

## Einwirkungen auf Bauwerke

	Vorbemerkung . . . . .	73
1	Grundsätze der Modellierung und Festlegung von Lasten . . . . .	74
1.1	Allgemeines . . . . .	74
1.2	Stochastische Modelle . . . . .	78
1.3	Filterung beim Übergang von Last zu Lastwirkung . . . . .	86
1.4	Lastkombination . . . . .	90
1.5	Lastannahmen und Lastkombinationsregeln für die praktische	
2	Eigenlasten, Lagerstoffe und Bodeneigenschaften . . . . .	96
2.1	Grundlagen der Modellierung für Eigenlasten . . . . .	96
2.2	Statistische Angaben für Eigenlasten . . . . .	98
2.3	Lagerstoffe . . . . .	100
2.4	Bodenkennwerte . . . . .	102
3	Verkehrslasten im Hochbau . . . . .	105
3.1	Allgemeines . . . . .	105

3.2	Erfassung der räumlichen Verteilung . . . . .	105
3.3	Zeitliche Änderungen der Verkehrslast . . . . .	108
3.4	Lastkombination . . . . .	109
3.5	Lastbeobachtungen . . . . .	109
3.6	Belastungen in Parkhäusern und auf Hofkellerdecken . . . . .	112
3.7	Lastannahmen in Regelwerken . . . . .	115
4	Lasten infolge Straßenverkehr auf Brücken . . . . .	117
4.1	Allgemeines . . . . .	117
4.2	Fahrzeugmodelle . . . . .	118
4.3	Verkehrszusammensetzung . . . . .	121
4.4	Verkehrsflußmodell . . . . .	122
4.5	Statische Belastung unmittelbar befahrener Bauteile . . . . .	127
4.6	Dynamische Zusatzlasten aus Fahrbahnunebenheiten . . . . .	128
4.7	Darstellung der Verkehrslasten durch Mittelwert und Spektrum . . . . .	133
4.8	Lasten und Lastwirkungen . . . . .	135
4.9	Ableitung eines äquivalenten Lastbildes . . . . .	148
4.10	Außergewöhnliche Schwertransporte . . . . .	150
4.11	Schlußbemerkung . . . . .	152
5	Lasten in Silos . . . . .	152
5.1	Allgemeines . . . . .	152
5.2	Elementare Silotheorie . . . . .	154
5.3	Moderne Betrachtungsweisen . . . . .	158
5.4	Berücksichtigung ungleichmäßiger Silodrücke, Auslauftrichter . . . . .	164
5.5	Bewertung der Unsicherheiten in den Lastannahmen für Silos . . . . .	165
6	Windlasten . . . . .	165
6.1	Allgemeines . . . . .	165
6.2	Strömungsmechanische Grundlagen, Theorie der atmosphärischen Grenzschicht . . . . .	169
6.3	Klimatologische Grundlagen . . . . .	185
6.4	Charakteristika des natürlichen Windes in der praktischen Bauwerksaerodynamik . . . . .	192
6.5	Allgemeines zu Windwirkungen auf Gebäude . . . . .	205
6.6	Berechnung statischer Windwirkungen – Aerodynamische Widerstandskoeffizienten . . . . .	211
6.7	Windlasten bei statisch und dynamisch reagierenden Bauwerken . . . . .	217
6.8	Quasi-statische und dynamische Böenreaktionsfaktoren für vereinfachte Untersuchungen von schwingungsanfälligen Hochhäusern, Türmen und Schornsteinen . . . . .	224
6.9	Karmansche Wirbelstraßenanregung . . . . .	228
6.10	Galloping, Flattern und andere aeroelastische Erscheinungen . . . . .	233
6.11	Aeroelastische Interferenzerscheinungen . . . . .	242
6.12	Schlußbemerkung . . . . .	242
7	Beanspruchung durch Fluide, Meereswellen und Meeresströmung . . . . .	242
7.1	Allgemeines . . . . .	242
7.2	Hydrostatik . . . . .	243
7.3	Lineare Wellentheorie . . . . .	246
7.4	Beschreibung des natürlichen Seegangs . . . . .	252
7.5	Spektren der Wasserpartikelbewegung im natürlichen Seegang . . . . .	269
7.6	Strömungen . . . . .	271

7.7	Kräfte auf Körper im Wasser . . . . .	274
7.8	Wirbelstraßen- und Selbsterregung . . . . .	293
7.9	Schlußbemerkung . . . . .	293
8	Schneelasten . . . . .	293
8.1	Allgemeines . . . . .	293
8.2	Schneehöhen in Abhängigkeit von der Höhe über N. N. und Klimazonen	297
8.3	Schneedichte . . . . .	299
8.4	Charakteristischer Wert der Grundschneelast . . . . .	301
8.5	Dachschneelasten . . . . .	301
8.6	Schlußbemerkung . . . . .	303
9	Klimatische Temperatureinwirkungen . . . . .	304
9.1	Allgemeines . . . . .	304
9.2	Beschreibung des atmosphärischen Temperaturverlaufs und von Innentemperaturen . . . . .	305
9.3	Wärmeübertragung und Wärmedurchgang . . . . .	307
9.4	Wirkungen der Temperatur . . . . .	330
9.5	Bemessungstemperaturen in Baubestimmungen . . . . .	334
9.6	Schlußbemerkung . . . . .	335
10	Erdbebeneinwirkungen . . . . .	335
10.1	Einleitende Bemerkungen – Begriffe, physikalische und geologische Grundtatsachen . . . . .	335
10.2	Analyse von Erdbebenwellen . . . . .	339
10.3	Herdspektren . . . . .	355
10.4	Seismologisch begründete Freifeldspektren . . . . .	361
10.5	Quantifizierung der regionalen Seismizität . . . . .	361
10.6	Erdbebenbeschleunigungen als stochastischer Prozeß – Leistungsspektrum des Freifelds . . . . .	372
10.7	Antwortspektrum des Freifelds . . . . .	384
10.8	Überblick über Berechnungsverfahren bei Beanspruchung durch Erdbeben	387
10.9	Lastannahmen in modernen Erdbebenvorschriften . . . . .	391
10.10	Schlußbemerkung . . . . .	395
11	Stoß- und Anpralllasten . . . . .	395
11.1	Allgemeines . . . . .	395
11.2	Mechanische Grundlagen . . . . .	396
11.3	Wahrscheinlichkeit des Anpralls von Fahrzeugen gegen Strukturen . . . . .	404
11.4	Praktische Hinweise . . . . .	405
12	Literatur . . . . .	408

## **Erdbebensicherung der Bauwerke**

1	Einleitung . . . . .	417
1.1	Zum Nutzen des Erdbebeningenieurwesens . . . . .	417
1.2	Historische Erdbeben . . . . .	418
1.3	Auswirkungen von Erdbeben . . . . .	421
2	Seismologische Grundlagen . . . . .	423
2.1	Arten und Merkmale von Erdbeben . . . . .	423
2.2	Erdbebenskalen . . . . .	426
2.2.1	Magnitudenskala (Richterskala) . . . . .	426

2.2.2	Intensitätsskala . . . . .	426
2.3	Erdbebenwellen . . . . .	427
2.3.1	Wellenarten . . . . .	429
2.3.2	Wellengeschwindigkeit . . . . .	431
2.3.3	Wellenwege . . . . .	431
2.4	Registrierung von Erdbeben . . . . .	433
2.4.1	Geschwindigkeits-Meßgeräte . . . . .	433
2.4.2	Beschleunigungs-Meßgeräte . . . . .	435
2.5	Seismologische Auswertung . . . . .	436
2.5.1	Epizentrum und Herdtiefe . . . . .	436
2.5.2	Magnitude und Intensitäten . . . . .	436
2.6	Ingenieurmäßige Auswertungen . . . . .	437
2.6.1	Physikalische Kenngrößen . . . . .	437
2.6.2	Zeitverläufe der Bodenbewegung . . . . .	439
2.7	Antwortspektren . . . . .	441
2.7.1	Vorgehen zur Ermittlung . . . . .	442
2.7.2	Mathematische Beschreibung . . . . .	443
2.7.3	Merkmale der Antwortspektren . . . . .	447
3	Bemessungsbeben, Tragwiderstand und Duktilität . . . . .	450
3.1	Seismische Gefährdung . . . . .	450
3.1.1	Gefährdungsstudien . . . . .	450
3.1.2	Gefährdungs- und Zonenkarten . . . . .	450
3.2	Bestimmung der Bebenkenngrößen . . . . .	454
3.3	Konstruktion elastischer Bemessungs-Antwortspektren . . . . .	456
3.4	Erzeugung spektrumskonformer Zeitverläufe der Bodenbewegung . . . . .	457
3.5	Tragwiderstand und Duktilität . . . . .	458
3.5.1	Grundlegende Zusammenhänge . . . . .	458
3.5.2	Definition und Arten der Duktilität . . . . .	460
3.5.3	Abminderung des Tragwiderstandes dank Duktilität . . . . .	466
3.6	Konstruktion inelastischer Bemessungs-Antwortspektren der Beschleunigung . . . . .	468
4	Erdbebenberechtigter Entwurf von Hochbauten . . . . .	469
4.1	Tragwerkseigenschaften . . . . .	470
4.2	Tragwerksarten . . . . .	470
4.2.1	Rahmen aus Stahlbeton oder Stahl . . . . .	471
4.2.2	Stahlbetontragwände in Skelettbauten . . . . .	473
4.2.3	Gemischte Systeme aus Stahlbetonrahmen und -tragwänden . . . . .	476
4.2.4	Stahlfachwerke . . . . .	477
4.2.5	Tragwände aus Mauerwerk . . . . .	478
4.2.6	Füllwände aus Mauerwerk . . . . .	479
4.3	Entwurfsgrundsätze . . . . .	480
4.3.1	Allgemeine Grundsätze . . . . .	480
4.3.2	Gestaltung im Grundriß . . . . .	482
4.3.3	Gestaltung im Aufriß . . . . .	482
4.4	Duktilitätsklassen . . . . .	483
4.5	Tragwerksverformungen . . . . .	485
4.5.1	Stockwerksverschiebungen . . . . .	485
4.5.2	Auswirkungen auf nichttragende Elemente . . . . .	486
4.5.3	Fugen zwischen benachbarten Gebäuden . . . . .	487

4.6	Zur Wahl des Tragwerks . . . . .	488
4.6.1	Nutzungsfreiheit . . . . .	488
4.6.2	Bemessungsduktilität und Tragwiderstand . . . . .	488
4.6.3	Sicherheits-, Betriebs- und Schadengrenzbeben . . . . .	490
5	Berechnungsverfahren . . . . .	491
5.1	Übersicht . . . . .	491
5.2	Bauwerksschwingungen . . . . .	493
5.2.1	Einmassenschwinger . . . . .	493
5.2.2	Mehrmassenschwinger . . . . .	497
5.3	Ersatzkraftverfahren . . . . .	504
5.3.1	Grundlagen . . . . .	504
5.3.2	Erdbeben-Ersatzkraft . . . . .	505
5.3.3	Berücksichtigung der Torsion . . . . .	513
5.3.4	Beurteilung des Ersatzkraftverfahrens . . . . .	514
5.4	Modales Antwortspektrenverfahren . . . . .	514
5.4.1	Merkmale . . . . .	514
5.4.2	Antwortspektren . . . . .	515
5.4.3	Verfahren beim Einmassenschwinger . . . . .	517
5.4.4	Verfahren beim Mehrmassenschwinger . . . . .	518
5.4.5	Verwendung inelastischer Antwortspektren . . . . .	523
5.4.6	Beurteilung des modalen Antwortspektrenverfahrens . . . . .	523
5.5	Zeitlaufverfahren . . . . .	524
5.5.1	Modale Lösung der Bewegungsgleichung . . . . .	524
5.5.2	Direkte Integration der Bewegungsgleichung . . . . .	525
5.5.3	Beurteilung der Zeitverlaufverfahren . . . . .	526
6	Bemessung und konstruktive Durchbildung von Hochbauten . . . . .	526
6.1	Besonderheiten der Erdbebenbeanspruchung und Merkmale der Bemessungsmethoden . . . . .	526
6.2	Methode der Kapazitätsbemessung . . . . .	529
6.3	Stahlbetontragwände . . . . .	530
6.3.1	Arten und Begriffe . . . . .	530
6.3.2	Querschnittsformen . . . . .	531
6.3.3	Versagensarten . . . . .	532
6.3.4	Geeignete Mechanismen . . . . .	533
6.3.5	Konventionelle Bemessung . . . . .	534
6.3.6	Kapazitätsbemessung schlanker Tragwände . . . . .	534
6.3.7	Besonderheiten bei gedrunenen Tragwänden . . . . .	546
6.4	Stahlbetonrahmen . . . . .	546
6.4.1	Geeignete Mechanismen . . . . .	546
6.4.2	Konventionelle Bemessung . . . . .	547
6.4.3	Kapazitätsbemessung . . . . .	548
6.5	Gemischte Systeme aus Stahlbeton-Tragwänden und -Rahmen . . . . .	548
6.5.1	Geeignete Mechanismen . . . . .	548
6.5.2	Konventionelle Bemessung . . . . .	549
6.5.3	Kapazitätsbemessung . . . . .	549
6.6	Stahlrahmen . . . . .	549
6.6.1	Mechanismen und Bemessung . . . . .	549
6.6.2	Besonderheiten in plastischen Gelenken . . . . .	550
6.7	Stahlfachwerke . . . . .	551

6.7.1	Fachwerke mit zentrischen Anschlüssen . . . . .	551
6.7.2	Fachwerke mit exzentrischen Anschlüssen . . . . .	553
6.8	Mauerwerkstragwände . . . . .	554
6.8.1	Unbewehrte Mauerwerkstragwände . . . . .	554
6.8.2	Bewehrte Mauerwerkstragwände . . . . .	555
6.9	Füllwände aus Mauerwerk . . . . .	557
6.10	Nichttragende Zwischenwände und Fassadenbauteile . . . . .	558
6.10.1	Allgemeines . . . . .	558
6.10.2	Nichttragende Mauerwerkswände ohne Fugen . . . . .	559
6.10.3	Nichttragende Wände mit Fugen . . . . .	560
6.10.4	Fassadenbauteile . . . . .	560
6.11	Anlagen und Einrichtungen . . . . .	561
6.12	Foundationen . . . . .	563
6.12.1	Anforderungen . . . . .	563
6.12.2	Einzel- und Streifenfundamente . . . . .	564
6.12.3	Plattenfundamente und Kastenfundationen . . . . .	565
6.12.4	Pfahlfundationen . . . . .	565
7	Literatur . . . . .	565
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>		<b>569</b>