

# Der Ingenieurbau

- **Baustatik**
- **Baudynamik**

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

## Verzeichnis der Verfasser

## Stabtragwerke

1	Vorbemerkungen . . . . .	1
2	Grundlagen und Elemente . . . . .	2
2.1	Begriffe und Definitionen . . . . .	2
2.1.1	Bezeichnungen . . . . .	2
2.1.2	Idealisierung . . . . .	2
2.1.3	Diskretisierung . . . . .	5
2.1.4	Grundgrößen – Grundgleichungen . . . . .	5
2.1.5	Statische und geometrische Unbestimmtheit . . . . .	8
2.1.6	Flexibilität und Steifigkeit . . . . .	10
2.1.7	Energieprinzipien . . . . .	11
2.2	Elemente . . . . .	13
2.2.1	Einleitung und Bezeichnungen . . . . .	13
2.2.2	Ebene Elemente . . . . .	13
2.2.2.1	Dehnstab . . . . .	13
2.2.2.2	Torsionsstab nach St.-Venant . . . . .	17
2.2.2.3	Torsionsstab mit Wölbkraft . . . . .	23
2.2.2.4	Biegebalken nach Bernoulli in der Ebene . . . . .	31
2.2.2.5	Schubbalken nach Timoshenko in der Ebene . . . . .	43
2.2.2.6	Schubbalken mit Wölbbehinderung in der Ebene nach Hofmann . . . . .	50
2.2.2.7	Biegebalken nach Bernoulli in der Ebene Theorie II. Ordnung . . . . .	61
2.2.2.8	Schubbalken nach Timoshenko linearisierte Theorie II. Ordnung . . . . .	78
2.2.2.9	Schubbalken mit Wölbbehinderung linearisierte Theorie II. Ordnung nach Hofmann . . . . .	89
2.2.2.10	Seil . . . . .	95
2.2.2.11	Dehnstab auf elastischer Bettung . . . . .	103
2.2.2.12	Biegebalken nach Bernoulli auf elastischer Bettung . . . . .	105
2.2.2.13	Schwingung Dehnstab . . . . .	116
2.2.2.14	Schwingung Biegebalken nach Bernoulli . . . . .	120
2.2.2.15	Schwingung Schubbalken nach Timoshenko . . . . .	129
2.2.2.16	Schwingung Schubbalken mit Wölbbehinderung nach Hofmann . . . . .	135
2.2.3	Räumliche Elemente . . . . .	142
2.2.3.1	Stabelement im Raum . . . . .	142
2.2.3.2	Räumlicher Stab Theorie II. Ordnung . . . . .	169
2.2.4	Das Prinzip finiter Stabelemente . . . . .	183
2.2.4.1	FE-Formulierung . . . . .	183
2.2.4.2	Längsbelasteter Stab . . . . .	185

2.2.4.3	Querbelasteter gevouteter Balken . . . . .	192
2.2.4.4	Ansatzfunktionen für Schubalken nach Timoshenko . . . . .	197
2.2.4.5	Gemischte Elemente . . . . .	198
3	Verfahren und Systeme . . . . .	205
3.1	Baustatische Verfahren . . . . .	205
3.1.1	Grundprinzip . . . . .	205
3.1.2	Klassische Darstellung . . . . .	206
3.1.3	Matrizendarstellung . . . . .	222
3.1.4	Verfahren der Übertragungsmatrizen (UV) . . . . .	241
3.2	Direkte Steifigkeitsmethode . . . . .	243
3.2.1	Grundprinzip . . . . .	243
3.2.2	Einzelement . . . . .	245
3.2.3	Zusammenbau . . . . .	247
3.2.4	Lösung und Rückrechnung . . . . .	249
3.2.5	Zusammenfassung . . . . .	251
3.2.6	Ergänzungen . . . . .	251
3.3	Nichtlineare Berechnungen . . . . .	255
3.3.1	Lösungsmethoden . . . . .	255
3.3.2	Geometrische Nichtlinearität . . . . .	256
3.3.3	Stabilität . . . . .	274
3.3.4	Materielle (Physikalische) Nichtlinearität . . . . .	280
3.3.5	Geometrische und materielle Nichtlinearität . . . . .	304
3.4	Dynamische Berechnungen . . . . .	307
3.4.1	System mit einem Freiheitsgrad . . . . .	307
3.4.2	System mit mehreren Freiheitsgraden . . . . .	316
4	Ausblick . . . . .	340
5	Literatur . . . . .	340
6	Anhang . . . . .	343

## Modellstatik

1	Einführung . . . . .	351
2	Modellgesetze . . . . .	352
3	Maßstäbe für vollkommene Ähnlichkeit . . . . .	353
4	Erweiterte Ähnlichkeit . . . . .	354
5	Angenäherte Ähnlichkeit . . . . .	354
6	Maßstäbe bei erweiterter Ähnlichkeit . . . . .	355
6.1	Dehnungsübertreibung . . . . .	355
6.2	Seiltragwerke . . . . .	355
6.3	Vernachlässigung des Poissonschen Modellgesetzes . . . . .	356
6.4	Erweiterung der geometrischen Ähnlichkeit . . . . .	356
7	Berücksichtigung der Schwerkraft und dynamische Modellversuche . . . . .	356
7.1	Messung von Eigengewichtsspannungen . . . . .	356
7.2	Belastung durch Flüssigkeitsdruck . . . . .	357
7.3	Schwingungsmessungen und aeroelastische Modellversuche . . . . .	357
7.4	Stoßuntersuchungen . . . . .	358
8	Modellversuche im elastisch-plastischen Bereich . . . . .	360

9	Modellwerkstoffe . . . . .	360
9.1	Werkstoffe für elastische Modelle . . . . .	360
9.2	Werkstoffe für Realmodelle . . . . .	362
10	Literatur . . . . .	364

## Baudynamik und Systemidentifikation

1	Allgemeines . . . . .	365
1.1	Einführung . . . . .	365
1.1.1	Aufgabenstellungen . . . . .	365
1.1.2	Grundbegriffe . . . . .	365
1.1.3	Größen und Einheiten . . . . .	368
1.2	Dynamik und Baudynamik . . . . .	369
1.2.1	Dynamische Systeme . . . . .	369
2	Einmassenschwinger . . . . .	370
2.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	370
2.1.1	Grundlagen der Mechanik . . . . .	370
2.1.2	Gleichgewichtsformulierung . . . . .	371
2.1.3	Einfluß zeitinvarianter Grundbelastungen . . . . .	373
2.1.4	Fußpunkterregungen . . . . .	374
2.1.5	Steifigkeiten, Massen, Massenträgheitsmomente . . . . .	374
2.1.6	Beispiele . . . . .	376
2.2	Der ungedämpfte Einmassenschwinger . . . . .	377
2.2.1	Eigenschwingungen . . . . .	377
2.2.2	Harmonische Erregung . . . . .	378
2.2.3	Allgemeine Erregung . . . . .	379
2.3	Der gedämpfte Einmassenschwinger . . . . .	380
2.3.1	Allgemeines zur Dämpfung . . . . .	380
2.3.2	Eigenschwingungen . . . . .	383
2.3.3	Harmonische Erregung . . . . .	385
2.3.4	Allgemeine Erregung . . . . .	388
2.4	Numerische Integration . . . . .	388
2.5	Integraltransformationmethoden . . . . .	390
2.6	Nichtlineare Einmassenschwinger . . . . .	393
2.7	Beispiele . . . . .	395
3	Mehrmassenschwinger . . . . .	398
3.1	Vom Kontinuum zum Diskontinuum . . . . .	398
3.1.1	Grundgleichungen viskoelastischer Kontinua . . . . .	398
3.1.2	Beispiele zweier Festkörpermodelle . . . . .	399
3.1.3	Variationsprinzip der Kontinuumsdynamik . . . . .	401
3.1.4	Weggrößendiskretisierung . . . . .	403
3.2	Die Bewegungsgleichung . . . . .	407
3.2.1	Eigenschaften der Systemmatrizen . . . . .	407
3.2.2	Kondensationstechniken . . . . .	407
3.2.3	Dämpfungsfragen . . . . .	409
3.3	Lösungsmethoden im Zeitbereich . . . . .	411
3.3.1	Erregungsfreie, ungedämpfte Systeme . . . . .	411
3.3.2	Inhomogene, ungedämpfte Systeme . . . . .	413
3.3.3	Gedämpfte Systeme . . . . .	413

3.3.4	Lösungsstrategien des Eigenwertproblems . . . . .	415
3.3.4.1	Das ungedämpfte System . . . . .	415
3.3.4.2	Das gedämpfte System . . . . .	416
3.3.5	Direkte numerische Integrationsverfahren . . . . .	422
3.4	Lösungsmethoden im Frequenzbereich . . . . .	422
3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	435
4	Systeme mit verteilter Masse und Steifigkeit . . . . .	441
4.1	Allgemeines . . . . .	441
4.2	Längs- und Torsionsschwingung gerader Stäbe . . . . .	442
4.3	Biegeschwingung von Euler/Bernoulli-Balken . . . . .	444
4.4	Biegeschwingung von Timoshenko-Balken . . . . .	447
4.5	Steifigkeitsmatrizen im globalen Koordinatensystem . . . . .	448
4.6	Eigenschwingung dünner Platten . . . . .	449
4.7	Beispiele . . . . .	450
5	Systemidentifikation – Bestimmung von Tragwerksparametern aus Schwingungsversuchen . . . . .	452
5.1	Einleitung . . . . .	452
5.2	Versuchstechnik und Signalanalyse . . . . .	454
5.2.1	Schwingungserregung . . . . .	455
5.2.2	Meßaufnehmer und Meßdatenerfassung . . . . .	457
5.2.3	Digitale Signalanalyse und Frequenzgangsschätzung . . . . .	459
5.3	Mathematische Grundlagen der Parameteridentifikation . . . . .	468
5.4	Identifikation modaler Parameter . . . . .	471
5.4.1	Einfreiheitsgradverfahren . . . . .	471
5.4.2	Das Phasenresonanzverfahren . . . . .	475
5.4.3	Phasentrennungverfahren . . . . .	476
5.4.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	486
5.5	Identifikation physikalischer Parameter . . . . .	489
5.5.1	Voraussetzungen . . . . .	489
5.5.2	Vergleichsgrößen für Berechnungs- und Versuchsdaten . . . . .	491
5.5.3	Verfahren zur Korrektur physikalischer Modellparameter . . . . .	493
5.5.3.1	Gleichungsresiduen des Eigenwertproblems . . . . .	493
5.5.3.2	Eigenwertresiduen . . . . .	495
5.5.3.3	Eigenformresiduen . . . . .	496
5.5.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	497
6	Literatur . . . . .	505
7	Anhang . . . . .	508

## Stabilitätstheorie

1	Einführung . . . . .	519
1.1	Grenzlasten gedrückter Stäbe . . . . .	522
1.1.1	Elastische Instabilität . . . . .	522
1.1.2	Grenzlasten infolge eines Fließgelenks . . . . .	523
1.1.3	Elastisches Knicken mit Fließgelenk . . . . .	523
2	Stabilitätsphänomene . . . . .	524
2.1	Stäbe . . . . .	524
2.2	Das Tragverhalten von Platten . . . . .	525
2.3	Das Tragverhalten von Schalen . . . . .	528

2.4	Ausgesteifte Tragwerke . . . . .	531
2.5	Bemessung nach Richtlinien . . . . .	532
3	Berechnungsgrundlagen für elastische Tragwerke . . . . .	534
3.1	Theorie mäßig großer Verdrehungen für Stab- und Flächentragwerke . . . . .	534
3.1.1	Stabknicken . . . . .	535
3.1.2	Plattenbeulen . . . . .	539
3.1.3	Schalenbeulen . . . . .	542
3.2	Das elastische Potential . . . . .	547
3.2.1	Weggrößenformulierung . . . . .	548
3.2.2	Gemischte Formulierung . . . . .	549
3.3	Berechnungsverfahren . . . . .	551
4	Grundlagen zur Beurteilung der Stabilität elastischer Tragwerke . . . . .	552
4.1	Arten des Stabilitätsverlustes . . . . .	553
4.2	Definition der Stabilität einer Gleichgewichtslage . . . . .	554
4.3	Kriterien für die Stabilität bei infinitesimalen Störungen . . . . .	555
4.4	Kriterien für die Stabilität bei endlichen Störungen . . . . .	556
4.5	Kritische Störenergie und Stabilitätsgrad . . . . .	557
5	Abschätzung von Indifferenzzuständen und Grenzlasten . . . . .	558
5.1	Die klassische Stabilitätslast . . . . .	559
5.2	Linearisierte Abschätzung des Indifferenzzustandes . . . . .	561
5.3	Ein einfaches Iterationsverfahren zur Ermittlung von Eigenwerten . . . . .	561
5.4	Abschätzung der Indifferenzzustände mit der Weggrößenformulierung . . . . .	563
6	Abschätzung des Nachbeulbereichs . . . . .	564
6.1	Anfangs-Nachbeulanalyse . . . . .	564
6.2	Das Konzept der richtungsorientiert reduzierten Membranbeulung . . . . .	566
6.3	Direkte Berechnung benachbarter Gleichgewichtslagen . . . . .	568
7	Instabilität bei Schalenträgwerken . . . . .	569
7.1	Lösungspfade und Verzweigungen . . . . .	569
7.2	Imperfektionsempfindlichkeit bei Schalenträgwerken . . . . .	571
7.2.1	Perfekte Zylinderschale mit $R/t = 100$ . . . . .	572
7.2.2	Einfluß von Imperfektionen . . . . .	574
7.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	576
7.3	Einfluß der Auflagerbedingungen bei Schalenträgwerken . . . . .	577
7.3.1	Axialbelastete Kegelschalen . . . . .	577
7.3.2	Zusammengesetzte Zylinder-Kegel-Schalen . . . . .	578
8	Ausblick . . . . .	580
9	Literatur . . . . .	580
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>		<b>583</b>