

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	1
1 Was ist Strukturdynamik.....	1
2 Für wen ist das Buch geschrieben?.....	1
3 Wie hängt dieses Buch mit den anderen Büchern der Reihe “FEM für Praktiker” zusammen? .....	2
4 Wie sollte dieses Buch verwendet werden? .....	3
<b>Teil I Systeme mit einem Freiheitsgrad - Einmassenschwinger .....</b>	<b>5</b>
Lernziel.....	5
1 Definitionen.....	5
1.1 Freiheitsgrad .....	5
1.2 Schwingung .....	7
1.3 Schwingungsdauer $T$ , Frequenz $f$ , Kreisfrequenz $\omega$ .....	9
1.4 Masse, Trägheitsmoment .....	10
1.5 Dämpfung .....	11
1.6 Steifigkeit .....	12
1.7 Trägheitskraft.....	12
1.8 Dämpfungskraft .....	13
1.9 Federkraft .....	14
2 Herleitung der Bewegungsgleichung .....	15
2.1 Angreifende Kraft $p(t)$ .....	15
2.2 Lagerverschiebungen als Belastung .....	16
2.3 Die Differentialgleichung des Einmassenschwingers.....	17
2.4 Einfluss des Eigengewichts .....	18
3 Belastungsarten.....	20
3.1 Freie Schwingung .....	20
3.2 Periodische Belastung $p(t)$ bzw. $p_{\text{eff}}(t)$ .....	20
3.3 Impulsbelastung.....	21
3.4 Beliebige, länger dauernde Belastungen .....	22
3.5 Zeitbereich - Frequenzbereich .....	22
4 Die freie Schwingung.....	25
4.1 Die freie ungedämpfte Schwingung .....	25
4.2 Die freie gedämpfte Schwingung .....	35
5 Erzwungene Schwingungen mit harmonischer Belastung .....	42
5.1 Ungedämpfte Schwingung unter harmonischer Belastung .....	42
5.2 Gedämpfte Schwingung unter harmonischer Belastung.....	45
6 Erzwungene Schwingung bei periodischer Belastung .....	50
6.1 Fourier-Analyse mit trigonometrischen Funktionen.....	50

6.2	Fourier-Analyse in exponentieller Darstellung.....	51
6.3	Fourier-Analyse in der Darstellung über Amplitude und Phasenwinkel.....	52
7	Erzwungene Schwingung bei Impulslasten .....	52
7.1	Sinus-Impuls .....	53
7.2	Rechteck-Impuls .....	55
7.3	Dreieck-Impuls.....	56
7.4	Näherungsberechnung von Impulslasten kurzer Dauer .....	57
	Literatur zu Teil I .....	59
<b>Teil II</b>	<b>Systeme mit vielen Freiheitsgraden - N-Massenschwinger .....</b>	<b>61</b>
	Lernziel.....	61
1	Grundlagen des N-Massenschwingers.....	61
1.1	Vorbemerkungen .....	61
1.2	Herleitung der Bewegungsgleichung .....	64
1.3	Bewegungsgleichung für den N-Massenschwinger in der Finite-Element-Methode .....	68
2	Berücksichtigung der Dämpfung.....	78
2.1	Allgemeine Grundlagen .....	78
2.2	Experimentelle Bestimmung der Dämpfungswerte .....	83
2.3	Coulomb-Dämpfung.....	86
2.4	Material-Dämpfung (Hysterese-Dämpfung) .....	88
2.5	Rayleigh-Dämpfung .....	89
2.6	Dämpfung im ANSYS/ED-Programm.....	92
3	Reduktion der Bewegungsgleichung .....	95
3.1	Übersicht.....	95
3.2	ANSYS/ED-Eingabe für die Reduktion .....	101
3.3	Wahl der Hauptfreiheitsgrade bei der Guyan-Reduktion.....	103
3.4	Diskussion .....	106
4	Übersicht über die Berechnungsmethoden.....	107
5	Berechnung von Eigenfrequenzen und Eigenformen (Modal Analysis).....	111
5.1	Einleitung .....	111
5.2	Freie ungedämpfte Schwingung .....	111
5.3	Freie gedämpfte Schwingung .....	117
5.4	Bemerkungen zur numerischen Lösung von Eigenwertproblemen.....	120
5.5	Spin Softening.....	122
6	Transiente Analyse - Zeitintegration .....	124
6.1	Einleitung .....	124

6.2	Das zentrale Differenzenverfahren .....	124
6.3	Das Houbolt-Verfahren .....	127
6.4	Das Newmark-Verfahren .....	129
6.5	Zeitschrittweite .....	132
6.6	Grundlagen der automatischen Zeitschrittsteuerung im ANSYS/ED- Programm .....	134
6.7	Reduzierte lineare transiente Analyse .....	137
7	Frequenzganganalyse (Harmonic Frequency Analysis) .....	139
8	Modale Superposition .....	141
8.1	Grundlagen .....	141
8.2	Charakterisierung der modalen Superposition .....	144
8.3	Vorteile und Nachteile der modalen Superposition .....	144
8.4	Wegerregung bei der modalen Superposition .....	145
8.5	Materialabhängige Dämpfungsgrade .....	146
8.6	Modale Reduktion bei nichtproportionaler Dämpfung (QRDAMP) .....	147
9	Antwortspektrum-Methode .....	149
9.1	Ziel der Antwortspektrum-Methode .....	149
9.2	Grundlagen .....	149
	Literatur zu Teil II .....	153
	<b>Teil III Handhabung des ANSYS/ED-Programms .....</b>	<b>155</b>
	Lernziel .....	155
	Zur Schreibweise in diesem Teil des Buches .....	155
	Zu den Beispielen in diesem Teil des Buches .....	156
1	Modalanalyse (modal analysis) .....	157
1.1	Was ist eine Modalanalyse? .....	157
1.2	Wie eine Modalanalyse durchgeführt wird .....	157
1.3	Beispiel .....	169
1.4	Kurzdarstellung der ANSYS/ED-Programmeingaben .....	170
2	Transiente dynamische Analyse (transient analysis) .....	177
2.1	Was ist eine transiente dynamische Analyse? .....	177
2.2	Vorüberlegungen .....	177
2.3	Die drei Wege der Berechnung .....	178
2.4	Wie eine transiente dynamische Analyse durchgeführt wird .....	182
2.5	Beispiele .....	207
2.6	Kurzdarstellung der ANSYS/ED-Programmeingaben .....	209
3	Frequenzganganalyse (harmonic frequency analysis) .....	218
3.1	Was ist eine Frequenzganganalyse? .....	218
3.2	Die drei Methoden der Frequenzganganalyse .....	219

3.3	Wie eine Frequenzganganalyse durchgeführt wird .....	223
3.4	Beispiele .....	239
3.5	Kurzdarstellung der ANSYS/ED-Programmeingaben .....	242
4	Antwortspektrum-Analyse .....	248
4.1	Was ist eine Antwortspektrum-Analyse? .....	248
4.2	Wie eine Spektrumanalyse durchgeführt wird .....	248
4.3	Vorbereitende Arbeitsschritte .....	249
4.4	Durchführung der Single-Point Response Analyse (SPRS) .....	251
4.5	Beispiel .....	254
4.6	Kurzdarstellung der ANSYS/ED-Programmeingaben .....	255
<b>Teil IV Beispiele .....</b>		<b>257</b>
Lernziel .....		257
1	Die Benutzeroberfläche des ANSYS/ED-Programms .....	257
1.1	Das Dienstmenü (ANSYS Utility Menu) .....	259
1.2	Das Hauptmenü (ANSYS Main Menu) .....	260
1.3	Das Eingabefenster (ANSYS Input) .....	260
1.4	Das Grafikfenster (ANSYS Graphics) .....	261
1.5	Das Druckknopffeld (ANSYS Toolbar) .....	262
1.6	Das Ausgabefenster (ANSYS Output) .....	263
1.7	Das Speichern der aktuellen Fensteranordnung .....	263
1.8	Hilfe-Texte (Help) .....	263
2	Die Benutzeroberfläche des ANSYS/Workbench-Programms .....	264
2.1	Die Funktionsleisten .....	264
2.2	Der Strukturbaum .....	265
2.3	Das Grafikfenster .....	266
2.4	Das Detailsfenster .....	267
2.5	Selektion von Flächen, Kanten, Ecken oder Bauteilen .....	268
2.6	Messfunktionen .....	269
2.7	Einheitensystem .....	269
2.8	Erstellen von Komponenten .....	270
2.9	Bildschirm teilen und Kantendarstellung (wireframe) .....	270
2.10	Screenshots .....	271
2.11	Der Simulationsassistent .....	272
Beispiel 1 Flügelprofil, Modalanalyse .....		273
Lernziel .....		273
1	Aufgabenstellung .....	273
2	Idealisierung .....	274
3	Preprocessing .....	274
4	Variante 1: Modalanalyse (LANB) .....	277
5	Variante 2: Modalanalyse (REDUC) .....	279
6	Variante 3: Modalanalyse (SUBSP) .....	281

7	Variante 4: Modalanalyse (SUBSP) mit Vorspannung.....	281
8	Variante 5: Modalanalyse mit Dämpfung (DAMP) .....	283
9	Modalanalyse mit ANSYS/Workbench .....	287
9.1	Start von ANSYS/Workbench .....	287
9.2	Modellierung .....	287
9.3	Simulation .....	293
9.4	Ergebnisse.....	295
Beispiel 2 Lineal, Modalanalyse, Transiente .....		297
Lernziel.....		297
1	Aufgabenstellung.....	297
2	Idealisierung .....	297
2.1	Geometrie .....	297
2.2	Materialwerte .....	299
2.3	Sonstige Annahmen.....	300
3	Modellerstellung (preprocessing).....	301
4	Aufbringen der Lasten und Starten der Lösung (solution) .....	302
5	Auswertung der Ergebnisse (postprocessing) .....	304
6	Zeitverlaufs-Berechnungen.....	306
6.1	Variante 1: Last am Ende .....	307
6.2	Variante 2: Last bei 1/3 der Länge.....	309
6.3	Variante 3: Last an der Kante .....	311
6.4	Variante 4: Last an beiden Kanten.....	312
7	Varianten zum Selbststudium .....	313
7.1	Masseverteilung.....	313
7.2	Variation der Eingabedaten .....	314
7.3	Variation des Elementtyps .....	314
8	Modalanalyse mit ANSYS/Workbench .....	316
8.1	Modellerstellung.....	316
8.2	Simulation .....	319
8.3	Auswertung der Ergebnisse.....	323
Beispiel 3 Flügelprofil, Transiente dynamische Analyse.....		325
Lernziel.....		325
1	Aufgabenstellung.....	325
2	Variante 1: Reduzierte transiente Analyse (REDUC) .....	326
3	Variante 2: Reduzierte transiente Analyse (REDUC) mit Lasttabelle .....	331
4	Variante 3: Transiente Analyse mit modaler Superposition (MSUP) .....	334
5	Variante 4: Transiente Analyse mit vollständigen Systemmatrizen (FULL) .	336
Beispiel 4 Flügelprofil, Frequenzganganalyse .....		339
Lernziel.....		339
1	Aufgabenstellung.....	339
2	Variante 1: Frequenzganganalyse mit vollständigen Systemmatrizen (FULL).....	339
3	Variante 2: Reduzierte Frequenzganganalyse (REDUC).....	345
4	Variante 3: Frequenzganganalyse mit modaler Superposition (MSUP).....	350

Beispiel 5	Flügelprofil, Spektrumanalyse.....	354
	Lernziel.....	354
1	Aufgabenstellung.....	354
2	Ablauf der Berechnung.....	354
Beispiel 6	Rotor-Idealisierung, Modalanalyse.....	358
	Lernziel.....	358
1	Aufgabenstellung.....	358
2	Variante 1: Vollwelle mit 2-D-Balkenelementen (BEAM3) .....	359
2.1	Preprocessing.....	359
2.2	Lösungsabschnitt.....	361
2.3	Postprocessing .....	362
3	Variante 2: Vollwelle mit 3-D-Balkenelementen (BEAM4) .....	363
4	Variante 3: Vollwelle mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45).....	365
5	Variante 4: Vollwelle mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45).....	368
6	Variante 5: Vollwelle mit harmonischen 2-D-Flächenelementen (PLANE25) .....	370
7	Trommelrotor .....	373
8	Variante 6:Trommelrotor mit 2-D-Balkenelementen (BEAM3) .....	374
9	Variante 7:Trommelrotor mit 3-D-Balkenelementen (BEAM4).....	376
10	Variante 8:Trommelrotor mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45) .....	379
11	Variante 9:Trommelrotor mit harmonischen 2-D-Flächenelementen (PLANE25) .....	381
12	Variante 10:Trommelrotor mit 3-D-Rohrelementen (PIPE16) .....	382
13	Variante 11:Trommelrotor mit 3-D-Rohrelementen (PIPE16) mit Kreiselwirkung .....	384
Beispiel 7	Lagergestell, Lineare Transiente.....	388
	Lernziel.....	388
1	Aufgabenstellung.....	388
2	Idealisierung .....	388
3	Preprocessing.....	389
4	Modalanalyse .....	391
5	Lineare Transiente.....	393
5.1	Die Kontaktbedingungen (gap condition) .....	393
5.2	Lastschritt 1 .....	394
5.3	Lastschritt 2 .....	395
5.4	Lastschritt 3 .....	395
6	Das Postprocessing.....	396
Beispiel 8	Schiffsdeck, Frequenzgang-Analyse.....	399
	Lernziel.....	399
1	Aufgabenstellung.....	399
2	Idealisierung .....	399
3	Preprocessing.....	399
4	Modalanalyse .....	402
5	Postprocessing der Modalanalyse.....	403
6	Frequenzgang-Analyse .....	404

7	Postprocessing der Frequenzgang-Analyse .....	405
	Beispiel 9 Maschinenrahmen, Nichtlineare Transiente .....	407
	Lernziel .....	407
1	Aufgabenstellung .....	407
2	Idealisierung .....	407
3	Preprocessing .....	408
4	Modalanalyse .....	412
5	Transiente Analyse .....	413
6	Postprocessing .....	414
6.1	Zeitverlauf-Postprocessor POST26 .....	414
6.2	Allgemeiner Postprocessor POST1 .....	415
	Beispiel 10 Trommel, Modalanalyse .....	419
	Lernziel .....	419
1	Aufgabenstellung .....	419
2	Modellerstellung (preprocessing) .....	422
2.1	Erstellen der Geometrie .....	424
2.2	Vernetzung der Geometrie .....	424
2.3	Randbedingungen .....	424
3	Berechnung der Vorspannung .....	425
4	Durchführung der Modalanalyse .....	426
5	Auswertung der Ergebnisse .....	426
	Beispiel 11 Baukran, Modalanalyse, Transiente .....	428
	Lernziel .....	428
1	Aufgabenstellung .....	428
2	Idealisierung .....	429
3	Modalanalyse .....	430
4	Zeitverlaufs-Berechnungen .....	432
4.1	Variante 1: vergleichbar zur Modalanalyse .....	432
4.2	Variante 2: mit Erdbeschleunigung .....	434
4.3	Variante 3: mit Dichte 20000 .....	434
4.4	Variante 4: mit Dichte 100000 .....	435
5	Varianten zum Selbststudium .....	435
5.1	Grenzfall .....	435
5.2	Modalanalyse mit Vorspannung .....	435
	<b>Sachregister .....</b>	<b>436</b>