

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
Teil I Systeme mit einem Freiheitsgrad - Einmassenschwinger.....	5
Lernziel.....	5
1 Definitionen.....	5
1.1 Freiheitsgrad.....	5
1.2 Schwingung.....	7
1.3 Schwingungsdauer T , Frequenz f , Kreisfrequenz ω	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	53
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
Teil II	Systeme mit vielen Freiheitsgraden - N-Massenschwinger	61
	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
	Teil III Handhabung des ANSYS/ED-Programms	155
	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
1.5	Berücksichtigung von Vorspannungen.....	175
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
Teil IV Beispiele		257
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) .	337
Beispiel 4 Flügelprofil, Frequenzganganalyse		340
Lernziel.....		340
1	Aufgabenstellung	340
2	Variante 1: Frequenzganganalyse mit vollständigen Systemmatrizen (FULL).....	340
3	Variante 2: Reduzierte Frequenzganganalyse (REDUC).....	348
4	Variante 3: Frequenzganganalyse mit modaler Superposition (MSUP).....	354

Beispiel 5	Flügelprofil, Spektrumanalyse	357
	Lernziel	357
1	Aufgabenstellung	357
2	Ablauf der Berechnung	357
Beispiel 6	Rotor-Idealisierung, Modalanalyse	363
	Lernziel	363
1	Aufgabenstellung	363
2	Variante 1: Vollwelle mit 2-D-Balkenelementen (BEAM3)	364
2.1	Preprocessing	364
2.2	Lösungsabschnitt	366
2.3	Postprocessing	367
3	Variante 2: Vollwelle mit 3-D-Balkenelementen (BEAM4)	368
4	Variante 3: Vollwelle mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45)	370
5	Variante 4: Vollwelle mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45)	373
6	Variante 5: Vollwelle mit harmonischen 2-D-Flächenelementen (PLANE25)	375
7	Trommelrotor	378
8	Variante 6: Trommelrotor mit 2-D-Balkenelementen (BEAM3)	379
9	Variante 7: Trommelrotor mit 3-D-Balkenelementen (BEAM4)	381
10	Variante 8: Trommelrotor mit 3-D-Volumenelementen (SOLID45)	384
11	Variante 9: Trommelrotor mit harmonischen 2-D-Flächenelementen (PLANE25)	386
12	Variante 10: Trommelrotor mit 3-D-Rohrelementen (PIPE16)	387
13	Variante 11: Trommelrotor mit 3-D-Rohrelementen (PIPE16) mit Kreiselwirkung	389
Beispiel 7	Lagergestell, Lineare Transiente	393
	Lernziel	393
1	Aufgabenstellung	393
2	Idealisierung	393
3	Preprocessing	394
4	Modalanalyse	396
5	Lineare Transiente	398
5.1	Die Kontaktbedingungen (gap condition)	398
5.2	Lastschritt 1	399
5.3	Lastschritt 2	400
5.4	Lastschritt 3	400
6	Das Postprocessing	401
Beispiel 8	Schiffsdeck, Frequenzgang-Analyse	405
	Lernziel	405
1	Aufgabenstellung	405
2	Idealisierung	405
3	Preprocessing	405
4	Modalanalyse	408
5	Postprocessing der Modalanalyse	410

6	Frequenzgang-Analyse.....	410
7	Postprocessing der Frequenzgang-Analyse	411
8	Varianten zum Selbststudium	413
Beispiel 9 Maschinenrahmen, Nichtlineare Transiente.....		414
Lernziel.....		414
1	Aufgabenstellung	414
2	Idealisierung	414
3	Preprocessing.....	415
4	Modalanalyse.....	419
5	Transiente Analyse	420
6	Postprocessing	421
6.1	Zeitverlauf-Postprocessor POST26	421
6.2	Allgemeiner Postprocessor POST1	423
Beispiel 10 Trommel, Modalanalyse.....		426
Lernziel.....		426
1	Aufgabenstellung	426
2	Modellerstellung (preprocessing).....	429
2.1	Erstellen der Geometrie	431
2.2	Vernetzung der Geometrie.....	431
2.3	Randbedingungen.....	431
3	Berechnung der Vorspannung	432
4	Durchführung der Modalanalyse.....	433
5	Auswertung der Ergebnisse.....	434
6	Varianten zum Selbststudium	435
Beispiel 11 Baukran, Modalanalyse, Transiente.....		436
Lernziel.....		436
1	Aufgabenstellung	436
2	Idealisierung	437
3	Modalanalyse.....	438
4	Zeitverlaufs-Berechnungen.....	440
4.1	Variante 1: vergleichbar zur Modalanalyse	440
4.2	Variante 2: mit Erdbeschleunigung	442
4.3	Variante 3: mit Dichte 20000.....	442
4.4	Variante 4: mit Dichte 100000.....	443
5	Varianten zum Selbststudium	443
5.1	Grenzfall.....	443
5.2	Modalanalyse mit Vorspannung.....	443
Sachregister.....		444