

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil I</b>	<b>Anwendung der Finite-Element-Methode (FEM) in der Praxis</b>	<b>1</b>
	Lernziel	1
<b>1</b>	<b>Die Erfolgs-Story der Finite-Element-Methode</b>	<b>2</b>
1.1	Situation der Produktentwicklung	2
1.2	Methoden der Produktentwicklung	3
1.3	Vor 1960: Entstehung der Idee der Finite-Element-Methode	4
1.4	1960... Die ersten elektronischen Rechenhilfen	5
1.5	1970... FEM-Simulationen für sicherheitsrelevante Bauteile	6
1.6	1980... Verbreitung der FEM in ausgewählten Bereichen	6
1.7	1990... Rasante Verbreitung der Anwendungsgebiete	7
1.8	2000... Simulation von Prozessketten	20
1.9	2010... Trends der Finite-Element-Methode	25
<b>2</b>	<b>Grundidee der Finite-Element-Methode</b>	<b>26</b>
2.1	Rechnerische Simulation	26
2.2	Die Finite-Element-Methode (FEM)	27
2.3	Berechnung komplexer Geometrien mit FEM	36
2.4	Weitere Anwendungsmöglichkeiten der FEM	37
2.5	Entwicklungstrends	43
<b>3</b>	<b>Einführung der FEM im Betrieb</b>	<b>46</b>
3.1	Vorgehensweise, Anforderungen, Kosten	46
3.2	Anforderungen an den Anwender	47
3.3	Anforderungen an Software, Kosten	47
3.4	Anforderungen an Hardware, Kosten	48
3.5	Auswahlkriterien für ein FEM-Programm	49
3.6	Endauswahl	51
3.7	Übersicht über FEM-Programme	51
3.8	Qualitätsmanagement und FEM-Berechnungen	53
	Literaturangaben	56

<b>Teil II</b>	<b>Einführung in die Theorie der FEM</b>	<b>59</b>
Lernziel		59
<b>1</b>	<b>Ausführliche Beschreibung der Methode anhand eines einfachen nachvollziehbaren Beispiels</b>	<b>60</b>
1.1	Beschreibung des Beispiels	60
1.2	Analytische Lösung	61
1.3	Lösung nach der Finite-Element-Methode	64
1.4	Steigerung der Genauigkeit der Ergebnisse	76
1.5	Konvergenzbetrachtung	97
<b>2</b>	<b>Ergänzende Betrachtungen</b>	<b>102</b>
2.1	Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie	102
2.2	Ingenieurmäßige Deutung der Elementsteifigkeitsmatrix und der Gesamtsteifigkeitsmatrix	103
2.3	Berücksichtigung von Elementbelastungen	109
2.4	Beliebige Lage der Elemente	114
<b>3</b>	<b>Die Steifigkeitsmatrix des Balkenelementes</b>	<b>122</b>
<b>4</b>	<b>Die Steifigkeitsmatrix des Scheibenelementes</b>	<b>127</b>
4.1	Herleitung der Steifigkeitsmatrix für ein Element, das parallel zu den globalen Achsen ausgerichtet ist	127
4.2	Allgemeines (isoparametrisches) Scheibenelement	130
4.3	Lösung des Beispiels aus 1.3 mit zwei Scheibenelementen	135
<b>5</b>	<b>Einige Standardelemente für die Strukturmechanik</b>	<b>139</b>
5.1	Fachwerkelement in der Ebene x,y ANSYS LINK1 (truss)	140
5.2	Balkenelement in der Ebene x,y ANSYS BEAM3 (beam)	141
5.3	Schalenelement im Raum ANSYS SHELL63 (shell)	142
5.4	Membranelement im Raum ANSYS SHELL63 Keyopt(1)=1 (shell, membrane option)	144
5.5	Plattenelement im Raum ANSYS SHELL63 Keyopt(1)=2 (shell, plate option)	145
5.6	Scheibenelement in der Ebene x,y ANSYS PLANE42 ebener Spannungszustand Keyopt(3)=0 oder 3 (2-d solid, plane stress option)	146
5.7	Rotationssymmetrisches Element ANSYS PLANE42 Keyopt(3)=1 (2-d solid, axisymmetric option)	148
5.8	Scheibenelement in der Ebene x,y ANSYS PLANE42 ebener Dehnungszustand Keyopt(3)=2 (2-d solid, plain strain option)	149
5.9	Volumenelement ANSYS SOLID45 (3-D solid)	150
5.10	Dreieck-, Tetraeder-, Prismaelemente	151
5.11	Elemente mit Zwischenknoten	152
5.12	Verbesserte Elemente ohne Zwischenknoten	152
<b>6</b>	<b>FEM für nichtlineare Statik, Strukturmechanik, Temperaturfelder, elektrostatische Felder, Magnetfelder, Fluidmechanik</b>	<b>153</b>
6.1	Nichtlineare Statik	153
6.2	Strukturmechanik	154
6.3	Temperaturfelder	156
6.4	Analoge Feldprobleme	157
6.5	Magnetfeld	158
6.6	Fluidmechanik	159
6.7	Gekoppelte Felder (Multiphysik)	159
<b>7</b>	<b>Gleichungsauflösung</b>	<b>160</b>
7.1	Direkte Verfahren	160
7.2	Iterative Verfahren	165
7.3	Reduktionsverfahren	166
Literaturangaben		168

<b>Teil III</b>	<b>Handhabung des ANSYS/ED-Programms</b> .....	<b>169</b>
	Lernziel .....	169
<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>169</b>
<b>2</b>	<b>Fallbeispiele der Idealisierung</b> .....	<b>171</b>
<b>3</b>	<b>Möglichkeiten des ANSYS/ED-Programms</b> .....	<b>181</b>
3.1	Das ANSYS/ED-Programm .....	182
3.2	Das ANSYS/ED/WORKBENCH-Programm .....	185
3.3	Hardware-Voraussetzungen .....	187
3.4	Begrenzungen des ANSYS/ED-Programms .....	188
<b>4</b>	<b>Ablauf einer ANSYS/ED-Analyse</b> .....	<b>190</b>
4.1	Installation des ANSYS/ED-Programms .....	190
4.2	Aufruf des ANSYS/ED-Programms .....	190
4.3	Arbeitsschritte bei der Anwendung des FEM-Programms .....	190
4.4	Sonstige Hinweise zur Idealisierung .....	209
<b>5</b>	<b>Anwendungsgebiete des ANSYS/ED-Programms</b> .....	<b>212</b>
5.1	Strukturanalysen .....	212
5.2	Temperaturfeldanalysen .....	226
5.3	Magnetfeldberechnungen .....	229
5.4	Berechnung elektrischer Felder .....	230
5.5	Fluidanalysen .....	231
5.6	Analyse gekoppelter Felder .....	233
<b>6</b>	<b>Modellgenerierung</b> .....	<b>236</b>
6.1	Überblick über die Modellgenerierung .....	236
6.2	Planung der Vorgehensweise .....	238
6.3	Koordinatensysteme .....	244
6.4	Die Arbeitsebene (working plane) .....	251
6.5	Solid-Modeling .....	253
<b>7</b>	<b>Die Vernetzung des Geometriemodells</b> .....	<b>277</b>
7.1	Wie Sie Ihr Geometriemodell vernetzen .....	277
7.2	Verändern des Netzes .....	287
7.3	Einige Hinweise und Warnungen .....	287
7.4	Verändern des Geometriemodells .....	288
7.5	Das Cross-Reference-Checking des Geometriemodells .....	292
7.6	Direkte Modellgenerierung .....	294
7.7	Modelle für Rohrleitungssysteme .....	297
7.8	Steuerung der automatischen Nummernzuweisung .....	302
7.9	Koppelung von Freiheitsgraden (coupling) und Bindungsgleichungen (constraint equations) .....	303
7.10	Das Archivieren des Modells .....	305
<b>8</b>	<b>Belastung und Lösungsphase (solution)</b> .....	<b>307</b>
8.1	Belastung des Modells .....	307
8.2	Lösungsphase (solution) .....	324
<b>9</b>	<b>Postprocessing</b> .....	<b>329</b>
9.1	Was ist Postprocessing .....	329
9.2	Die Ergebnisdateien .....	330
9.3	Arten von Daten, die für das Postprocessing verfügbar sind .....	330
9.4	Der allgemeine Postprocessor (Main Menu> General Postproc, [/POST1]) .....	331
9.5	Der Postprocessor für den Zeitbereich (POST26) .....	343

<b>10</b>	<b>Grafik</b> .....	350
10.1	Ein Überblick über Grafik.....	350
10.2	Erzeugen von Geometriedarstellungen.....	351
10.3	Generieren von geometrischen Ergebnisdarstellungen.....	355
10.4	Erzeugen von Diagrammen.....	360
10.5	Allgemeine Eingaben zum Steuern und Ausführen von Grafik.....	363
10.6	Externe Grafik.....	367
<b>11</b>	<b>Selektieren</b> .....	370
<b>12</b>	<b>ANSYS Parametersprache (Parametric Design Language, APDL)</b> .....	374
12.1	Was ist APDL?.....	374
12.2	Parameter.....	374
12.3	Macros.....	378
12.4	Wiederholungen, Verzweigungen, Schleifen.....	380
<b>13</b>	<b>Aus der Erfahrung</b> .....	384
13.1	Positiv definite Materialdaten.....	384
13.2	Schraubenmodellierung und Schraubenvorspannung.....	385
13.3	Inhomogenitäten, Fügstellen.....	389
13.4	Nichtlineare Berechnungen.....	393
13.5	Spannungsbewertung.....	394
13.6	Grafische Ergebnisdarstellung.....	397
13.7	Mittlung der Spannungsdarstellung.....	398
<b>14</b>	<b>ANSYS/WORKBENCH</b> .....	400
14.1	Modellerstellung.....	401
14.2	Lastaufbringung.....	402
14.3	Vernetzung.....	402
14.4	Lösung.....	403
	Literaturangaben.....	404

<b>Teil IV Beispiele</b> .....	405
Lernziel .....	405
<b>1 Die Benutzeroberfläche des ANSYS/ED-Programms</b> .....	405
<b>2 Die Benutzeroberfläche des ANSYS/Workbench-Programms</b> .....	412
<b>Einführungsbeispiele</b>	
Beispiel 1 2-D Einarbeitung (Strukturmechanik) .....	420
Beispiel 2 3-D Einarbeitung (Strukturmechanik) .....	445
<b>Grundlagenbeispiele</b>	
Beispiel 3 Zugstab aus Teil II (Theorie der Strukturmechanik) .....	476
Beispiel 4 Scheibe mit Loch (Vernetzungstechnik) .....	494
Beispiel 5 Kragbalken (Elementauswahl in der Strukturmechanik).....	520
Beispiel 6 Winkelhalterung (Geometriemodellierung).....	533
Beispiel 7 Schalentragswerk (Postprocessing).....	543
<b>Beispiele zu besonderen Möglichkeiten des ANSYS/ED-Programms</b>	
Beispiel 8 Submodelltechnik (Gekerbter Zugstab) .....	553
Beispiel 9 Kontaktelemente, Hyperelastizität, Plastizität (Gummidichtung, Umformung) .....	563
Beispiel 10 Viskoelastizität (Pendelstütze aus Kunststoff).....	583
Beispiel 11 Modalanalyse (Stimmgabel) .....	593
Beispiel 12 Schwingung einer Fahrzeugachse (Reduzierte Transiente Dynamik, Frequenzganganalyse).....	611
Beispiel 13 Temperaturfeld (3-D Einarbeitung).....	622
Beispiel 14 Magnetfeld (3-D Einarbeitung).....	635
Beispiel 15 Fluidodynamik (3-D Einarbeitung) .....	649
Beispiel 16 Elektrisches Feld (Koaxialkabel).....	666
Beispiel 17 Temperatur-Struktur-Kontakt (Rohr auf ebener Unterlage).....	680
<b>Beispiele aus der Technik</b>	
Beispiel 18 Tellerfeder (Geometrische Nichtlinearität).....	687
Beispiel 19 Dickwandiger Druckbehälter (Rotationssymmetrie, Plastizität).....	699
Beispiel 20 Betonträger (Betonmaterial) .....	719
Beispiel 21 Rotorwelle mit Zahnrad (Modalanalyse mit Kreiselwirkung).....	729
Beispiel 22 Seilbruch an einer Schrägseilbrücke (Transiente Dynamik).....	735
Beispiel 23 Plattenfedermembran (Optimierung) .....	745
Beispiel 24 Kühlturm (Schalenelemente, APDL, Koordinatensysteme).....	756
Beispiel 25 Lötlüge (Multiphysik, Kopplung von elektrischem Feld, Wärmeübertragung und Strukturmechanik).....	767
Literaturangaben.....	776
<b>Anhänge</b>	
Anhang A Maßeinheiten und Umrechnungsfaktoren.....	777
Anhang B Englisch-deutsche Fachbegriffe .....	784
Anhang C Kommandoliste .....	796
<b>Sachregister</b> .....	803