

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Historischer Überblick	1
1.2 Generelle Vorgehensweise	4
1.3 Aussagesicherheit einer FE-Analyse	8
1.4 Qualitätsstandards	10
2 Anwendungsfelder und Software	11
2.1 Problemklassen	11
2.2 Kommerzielle Software	12
3 Grundgleichungen der linearen Finite-Element- Methode	16
3.1 Matrizenrechnung	16
3.2 Gleichungen der Elastostatik	19
3.3 Grundgleichungen der Elastodynamik	26
3.4 Finites Grundgleichungssystem	27
3.4.1 Variationsprinzip	27
3.4.2 Methode von Galerkin	31
4 Die Matrix-Steifigkeitsmethode	34
5 Das Konzept der Finite-Element-Methode	41
5.1 Allgemeine Vorgehensweise	41
5.2 FE-Programmsystem	44
5.3 Mathematische Formulierung	45
5.3.1 Ebenes Stab-Element	45
5.3.2 Ebenes Drehstab-Element	50
5.3.3 Ebenes Balken-Element	53
5.4 Prinzipieller Verfahrensablauf	62
5.4.1 Steifigkeitstransformation	62
5.4.2 Äquivalente Knotenkräfte	65
5.4.3 Zusammenbau und Randbedingungen	68
5.4.4 Sonderrandbedingungen	72
5.4.5 Lösung des Gleichungssystems	74
5.4.6 Berechnung der Spannungen	81
5.4.7 Systematische Problembehandlung	83
6 Wahl der Ansatzfunktionen	89
7 Elementkatalog für elastostatische Probleme	93
7.1 3-D-Balken-Element	93
7.2 Scheiben-Elemente	97
7.2.1 Belastungs- und Beanspruchungszustand	97
7.2.2 Dreieck-Element	98
7.2.3 Flächenkoordinaten	105
7.2.4 Erweiterungen des Dreieck-Elements	110
7.2.5 Rechteck-Element	111

7.2.6	Konvergenz Balken-Scheiben-Elemente	119
7.2.7	Berücksichtigung der Schubverformung	120
7.2.8	Viereck-Element	125
7.2.9	Isoparametrische Elemente	129
7.2.10	Numerische Integration	134
7.3	Platten-Elemente	139
7.3.1	Belastungs- und Beanspruchungszustand	139
7.3.2	Problematik der Platten-Elemente	143
7.3.3	Rechteck-Platten-Element	146
7.3.4	Dreieck-Platten-Element	152
7.3.5	Konvergenz	153
7.3.6	Schubverformung am Plattenstreifen	155
7.3.7	Beulproblematik	156
7.4	Schalen-Elemente	165
7.5	Volumen-Elemente	170
7.6	Kreisring-Element	175
8	Kontaktprobleme	182
8.1	Problembeschreibung	182
8.2	Einfache Lösungsmethode für Kontaktprobleme	184
8.3	Lösung zweidimensionaler Kontaktprobleme	188
8.3.1	Iterative Lösung nichtlinearer Probleme ohne Kontakt	188
8.3.2	Iterative Lösung mit Kontakt	189
9	FEM-Ansatz für dynamische Probleme	202
9.1	Virtuelle Arbeit in der Dynamik	202
9.2	Elementmassenmatrizen	204
9.2.1	3-D-Balken-Element	205
9.2.2	Endmassenwirkung	207
9.2.3	Dreieck-Scheiben-Element	209
9.3	Dämpfungsmaatrizen	212
9.4	Eigenschwingungen ungedämpfter System	213
9.4.1	Gleichungssystem	213
9.4.2	Numerische Ermittlung der Eigenwerte	221
9.4.3	Statische Reduktion nach Guyan	222
9.5	Freie Schwingungen	226
9.6	Erzwungene Schwingungen	228
9.7	Beliebige Anregungsfunktion	237
9.8	Lösung der Bewegungsgleichung	238
10	Grundgleichungen der nichtlinearen Finite-Element-Methode	247
10.1	Lösungsprinzipien für nichtlineare Aufgaben	247
10.2	Nichtlineares Elastizitätsverhalten	250
10.3	Plastizität	253
10.4	Geometrische Nichtlinearität	257
10.5	Instabilitätsprobleme	259

11 Wärmeübertragungsprobleme	266
11.1 Physikalische Grundlagen	266
11.2 Diskretisierte Wärmeleitungsgleichung	271
11.3 Lösungsverfahren	273
11.4 Thermisch-stationäre strukturmechanische Berechnung	275
11.5 Thermisch-transiente strukturmechanische Berechnung	276
12 Mehrkörpersysteme	279
12.1 Merkmale eines MKS	279
12.2 Kinematik von MKS	281
12.2.1 Drehmatrix	283
12.2.2 Ebene Bewegung	285
12.3 Kinetik von MKS	287
12.3.1 Grundbeziehungen für den starren Körper	289
12.3.2 Newton-Euler-Methode	291
12.4 Lagrange'sche Methode	293
12.5 Mechanismenstrukturen	295
13 Bauteiloptimierung	297
13.1 Formulierung einer Optimierungsaufgabe	297
13.2 Parameteroptimierung	298
13.3 Bionische Strategie	300
13.4 Selektive Kräftepfadoptimierung	303
14 Grundregeln der FEM-Anwendung	306
14.1 Fehlerquellen	306
14.2 Elementierung und Vernetzung	307
14.3 Netzaufbau	311
14.4 Bandbreiten-Optimierung	314
14.5 Genauigkeit der Ergebnisse	318
14.6 Qualitätssicherung	320
Fallstudie 1: zu Kapitel 4 <i>Matrix-Steifigkeitsmethode</i>	323
Fallstudie 2: zu Kapitel 5 <i>Konzept der FEM / Allgemeine Vorgehensweise</i>	325
Fallstudie 3: zu Kapitel 5 <i>Konzept der FEM / Schiefe Randbedingungen</i>	329
Fallstudie 4: zu Kapitel 5 <i>Konzept der FEM / Durchdringung</i>	330
Fallstudie 5: zu Kapitel 7 <i>Anwendung von Schalen-Elementen</i>	332
Fallstudie 6: zu Kapitel 7.5 <i>Anwendung von Volumen-Elementen / Mapped meshing</i>	335
Fallstudie 7: zu Kapitel 7.5 <i>Anwendung der Volumen-Elemente / Free meshing</i>	337
Fallstudie 8: zu Kapitel 9 <i>Dynamische Probleme</i>	340
Fallstudie 9: zu Kapitel 9.6 <i>Erzwungene Schwingungen</i>	343
Fallstudie 10: zu Kapitel 10 <i>Materialnichtlinearität</i>	347
Fallstudie 11: zu Kapitel 10.4 <i>Geometrische Nichtlinearität</i>	350
Fallstudie 12: zu Kapitel 11 <i>Wärmeleitungsprobleme</i>	353
Übungsaufgabe 4.1	357
Übungsaufgabe 5.1	358
Übungsaufgabe 5.2	359
Übungsaufgabe 5.3	361

Übungsaufgabe 5.4	363
Übungsaufgabe 5.5	365
Übungsaufgabe 5.6	368
Übungsaufgabe 5.7	369
Übungsaufgabe 5.8	370
Übungsaufgabe 5.9	373
Übungsaufgabe 6.1	374
Übungsaufgabe 7.1	375
Übungsaufgabe 7.2	376
Übungsaufgabe 9.1	377
Übungsaufgabe 9.2	378
Übungsaufgabe 9.3	379
Übungsaufgabe 9.5	380
Übungsaufgabe 10.4	381
Übungsaufgabe 11.1	382
Übungsaufgabe 11.2	383
Mathematischer Anhang	384
QM-Checkliste einer FE-Berechnung	400
Literaturverzeichnis	402
Sachwortverzeichnis	407