

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fragen, Fragen und nochmals Fragen	1
1.2	Blick über den Tellerrand	3
1.3	Weiterführende Literatur	4
1.3.1	Matrizenschreibweise	5
1.3.2	Tensorschreibweise	7
1.4	Software-Anbieter	8
1.5	Nichtlinearitäten	9
1.5.1	Gleichgewichtspunkte	9
1.5.2	Ursachen nichtlinearen Verhaltens	10
2	Herleitung der FEM	13
2.1	Lineare FEM	13
2.1.1	Direkte Methode/Freischneiden	14
2.1.2	Galerkin Methode/Differentialgleichung	14
2.1.3	Stationarität des Gesamtpotentials	15
2.1.4	Prinzip der virtuellen Arbeit	16
2.2	Nichtlineare FEM	17
2.2.1	Impulsbilanz	17
2.2.2	Prinzip der virtuellen Arbeit	17
2.2.3	Konsistente Linearisierung	18
2.2.4	Raumdiskretisierung	20
2.2.5	Zeitdiskretisierung	26
3	Statische Analysen	27
3.1	Lösungsverfahren für nichtlineare Gleichungssysteme	27
3.2	Klassifizierung singulärer Punkte	30
3.3	Stabilitätsanalyse	31
3.3.1	Lineare Stabilitätsanalyse	31
3.3.2	Nichtlineare Stabilitätsanalyse	33
3.3.3	Beispiel: Stabilitätsversagen einer Pendelstütze	34
3.4	Dämpfung/Stabilisierung	40
3.4.1	Ungedämpfte statische Analyse	40
3.4.2	Ein kleiner Exkurs in die Welt der Dynamik	41
3.4.3	Lokale Stabilisierung	42
3.4.4	Globale Stabilisierung	44
3.4.5	Stabilisierungsenergie und Stabilisierungsleistung	45

4	Dynamische Analysen	47
4.1	Lineare Dynamik	48
4.1.1	Berechnungsebenen	48
4.1.2	Eigenfrequenzanalyse	49
4.1.3	Transiente Analyse	56
4.1.4	Stationäre Analyse	63
4.1.5	Dämpfung	65
4.1.6	Geometrische Nichtlinearitäten bei transienter Analyse	80
4.1.7	Fußpunktanregung	92
4.1.8	Antwortspektrum-Analyse	96
4.1.9	Zufallsantwort-Analyse	101
4.1.10	Komplexe Eigenfrequenzanalyse	107
4.2	Nichtlineare Dynamik mit impliziter Zeitintegration	113
4.2.1	Newmark-Verfahren	113
4.2.2	HHT-Verfahren	115
4.2.3	Euler-Rückwärts-Verfahren	117
4.3	Nichtlineare Dynamik mit expliziter Zeitintegration	118
4.3.1	Explizite Mittelpunktsregel	118
4.3.2	Stabiles Zeitinkrement	120
4.3.3	Massenskalierung	124
4.3.4	Filtern bei expliziter Analyse	125
4.3.5	Verallgemeinerte Rayleigh-Dämpfung	134
5	Elemente	137
5.1	Klassifizierung	137
5.2	Formulierungen	139
5.2.1	Verschiebungselemente	139
5.2.2	B-bar-Elemente	140
5.2.3	Gemischte/hybride Elemente	140
5.2.4	Reduziert integrierte Elemente	141
5.2.5	Elemente mit inkompatiblen Moden	143
5.2.6	Korrekturfaktor für transversale Schubsteifigkeit	144
5.3	Balkenelemente	146
5.3.1	Bernoulli-Balken	146
5.3.2	Timoshenko-Balken	149
5.3.3	Balkenelemente mit Verwölbungsfreiheitsgrad	153
5.4	Schalenelemente	158
5.4.1	Übersicht	158
5.4.2	Kirchhoff-Schalenelemente	161
5.4.3	Reissner-Mindlin-Schalenelemente	161
5.4.4	Allzweck-Schalenelemente	163
5.4.5	Komposit-Schalenelemente	164
5.5	Kontinuumsschalenelemente	165
5.5.1	Übersicht	165
5.5.2	Transversale Schubspannungen	167
5.5.3	Vergleich von Komposit- und Kontinuumsschale	168

5.6	Kontinuumselemente	171
5.6.1	3D-Volumenelemente	171
5.6.2	2D-Volumenelemente	172
5.6.3	Axialsymmetrische Volumenelemente	173
5.6.4	Halbunendliche Elemente	175
5.7	Konnektor-Elemente	176
5.7.1	2-Knoten-Elemente	176
5.7.2	Relative Freiheitsgrade	176
5.7.3	Eigenschaften	176
5.8	Spezielle Elemente	177
6	Materialmodelle	181
6.1	Rheologische Modelle	181
6.1.1	Grundelemente	181
6.1.2	Kombination der Grundelemente	182
6.1.3	Zwei-Elemente-Modelle	183
6.1.4	Drei-Elemente-Modelle	185
6.2	Lineare Elastizität	189
6.2.1	Isotropes Material	189
6.2.2	Transversal isotropes Material	189
6.2.3	Orthotropes Material	190
6.2.4	Anisotropes Material	191
6.2.5	Volumetrische und isochore Anteile bei isotroper Elastizität	191
6.3	Hyperelastizität	192
6.3.1	Volumetrischer Anteil	193
6.3.2	Hyperelastizität formuliert in Invarianten	194
6.3.3	Hyperelastizität formuliert in Hauptstreckungen	195
6.3.4	Einaxialer Zugversuch	196
6.3.5	Invariantenebene	197
6.3.6	Versuchstechnische Realisierung der reinen Scherung	200
6.3.7	Druckversuche	203
6.4	Lineare Viskoelastizität	206
6.4.1	Charakteristische Differentialgleichung	206
6.4.2	Relaxationssteifigkeitsmodul	206
6.4.3	Dynamische Steifigkeiten	207
6.4.4	Fouriertransformation	208
6.5	Plastizität	210
6.5.1	Fließkriterien	212
6.5.2	Fließregel	216
6.5.3	Verfestigungsgesetze	217
6.6	Schädigung und Versagen	220
6.7	Viskoelastoplastisches Softeningmodell	221
6.7.1	Schädigung	221
6.7.2	Viskoelastizität mit Schädigung	222
6.7.3	Elastoplastizität mit Schädigung	222
6.7.4	Viskoelastoplastisches Schädigungsmodell	225

7	Kontakt	227
7.1	Optimierungsproblem mit Nebenbedingung	227
7.2	Kontaktformulierungen	228
7.2.1	Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren	228
7.2.2	Penalty-Methode	230
7.2.3	Augmented Lagrange-Verfahren	232
7.2.4	Kombinierte Kontaktformulierungen	233
7.2.5	Reibkontakt	234
7.3	Kontaktdiskretisierung	235
7.3.1	Reines Master-Slave-Konzept	235
7.3.2	Symmetrisches Master-Slave-Konzept	236
7.3.3	Flächenbasiertes Master-Slave-Konzept	238
7.3.4	Schalendicke	238
7.3.5	Geometrie- und Kontaktkorrektur	239
7.3.6	Presspassungen	240
7.3.7	Quadratische Elemente	241
7.3.8	Kleine Gleitwege	241
7.4	Dynamischer Kontakt	242
7.4.1	Lineare Dynamik	242
7.4.2	Implizite Zeitintegration	242
7.4.3	Explizite Zeitintegration	244
8	Tipps und Tricks	245
8.1	Es muss doch noch schneller gehen	245
8.1.1	Die Hardware-Keule	245
8.1.2	Gleichzeitige Analyse verschiedener Lastfälle	246
8.1.3	Substrukturtechnik	247
8.1.4	Submodelltechnik	250
8.1.5	Adaptive Vernetzungstechniken	251
8.1.6	Starrkörper	254
8.1.7	Symmetrien	255
8.1.8	Reduktion der Ausgabedatenmenge	256
8.2	Daran scheiden sich die Geister	257
8.2.1	Lineare oder quadratische Elemente	257
8.2.2	Tetraeder oder Hexaeder	258
8.2.3	Kleine oder große Dehnungen	259
8.3	Wie man richtig belastet	261
8.3.1	Einleitung von Einzellasten	261
8.3.2	Schraubenvorspannung	261
8.3.3	Trägheitsrandbedingungen	261
8.4	Nur nicht die Kontrolle verlieren	262
8.5	Top 10 der beliebtesten Fehler	263
	Literaturverzeichnis	265
	Sachverzeichnis	267