

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungsweise	XII
1 Lösung der nichtlinearen Gleichungen	1
1.1 Newton-Raphson-Verfahren	1
1.2 Andere Lösungsverfahren	3
1.3 Schrittweitensteuerung	4
1.4 Eindimensionale Minimum-Suche (<i>line search</i>)	4
1.5 Konvergenzkriterien	6
Hauptabschnitt I: Geometrische Nichtlinearitäten	
2 Geometrisch nichtlineares Verhalten	8
2.1 Grundbegriffe der geometrischen Nichtlinearitäten	8
2.2 Theorie 2. Ordnung, Gleichgewicht am verformten System	9
2.2.1 Motivation und FE-Umsetzung	9
2.2.2 Warum Theorie 2. Ordnung?	11
2.2.3 Lineares Beulen	13
2.2.4 Korrekte Spannungsversteifungs-Matrix für den Balken	18
2.3 Große Drehungen (Rotationen)	21
2.3.1 Geeignetes Dehnungsmaß: Green-Lagrange-Dehnungen	21
2.3.2 Das Prinzip der virtuellen Arbeiten bei geometrisch nichtlinearen Problemstellungen	25
2.3.3 Lösung der nichtlinearen Gleichungen mit dem Newton-Raphson-Verfahren	26
2.3.4 Testproblem Zweibock	29
2.3.5 Mitdrehende Formulierung (Co-rotational formulation)	33
2.4 Große Dehnungen	49
2.4.1 Eindimensionale Betrachtungen	49
2.4.2 Zugehörige Spannungen	51
2.4.3 Übergang ins Zwei- und Dreidimensionale	56
2.4.4 Hencky-Dehnungen in Symbolen der Kontinuumsmechanik	58
2.4.5 Klassische Updated-Lagrange-Formulierung	58
2.4.6 Logarithmische Dehnungen und mitdrehende Formulierung	62
3 Stabilitätsprobleme	64
3.1 Phänomene	64
3.2 Bedingungen für kritische Punkte, Indifferenzkriterium	68
3.2.1 Allgemeines	68
3.2.2 Formulierungen der Instabilitätsbedingung	70
3.2.3 Modalanalyse (Eigenfrequenzanalyse) und Stabilitätsprobleme	72
3.2.4 Direkte Identifikation kritischer Punkte durch ein erweitertes System ..	76
3.3 Bedeutung des Eigenvektors	77
3.4 Imperfektionen	78

3.4.1	Imperfektion durch Kräfte	79
3.4.2	Imperfektion durch geometrische Vorgaben.....	79
3.4.3	Imperfektion durch eine lineare Beulanalyse.....	79
3.4.4	Begleitende Eigenwert-Analyse.....	80
3.4.5	Imperfektionsempfindlichkeit.....	82
3.4.6	Größe der Imperfektion.....	84
4	Lastinkrementierung in einer nichtlinearen Berechnung	86
4.1	Kraftsteuerung	86
4.2	Einfache Verschiebungssteuerung.....	86
4.3	Verschiebungssteuerung mit Kraftgrößen	88
4.4	Bogenlängenverfahren (arc-length method)	89
4.4.1	Suche senkrecht zur letzten Sekante	90
4.4.2	Modellproblem.....	91
4.4.3	Suche senkrecht zur ersten Tangente	93
4.4.4	Suche senkrecht zur aktuellen Tangente	94
4.4.5	Suche auf einem Kreis bzw. einer Hyperkugel	97
4.4.6	Anfangswerte und Bogenlänge	103
4.4.7	Lösung des erweiterten Systems	105
Hauptabschnitt II: Nichtlineares Materialverhalten		
5	Grundzüge der Materialmodelle	108
5.1	Repräsentative eindimensionale Grundelemente.....	108
5.1.1	Elastizität (Hooke-Element).....	108
5.1.2	Plastizität (St.-Venant-Element)	109
5.1.3	Zeitabhängiges Verhalten (Newton-Element).....	109
5.2	Aus Grundelementen zusammengesetzte Modelle	110
5.2.1	Elasto-Plastizität (Prandtl-Element).....	110
5.2.2	Maxwell-Element für Kriechen	112
5.2.3	Kelvin-Voigt-Element für Visko-Elastizität	114
5.2.4	Erweitertes Viskoelastizitätsmodell	117
5.2.5	Bingham-Modell als Beispiel für Visko-Plastizität	117
5.2.6	Burghers-Modell	118
5.3	Tensor- und Vektorschreibweise, Tensor- und Ingenieurnotation.....	120
5.4	Aufspaltung und Darstellung räumlicher Spannungszustände	121
5.4.1	Hauptspannungen.....	121
5.4.2	Kugeltensor und Deviator	122
5.4.3	Hauptspannungsraum.....	123
5.5	Berücksichtigung des Materialverhaltens in der FEM.....	124
6	Theorie und Numerik der linearen Visko-Elastizität	126
6.1	Grundformeln für den eindimensionalen Fall.....	126
6.2	Einführung von Zeitschritten.....	128
6.3	Numerik.....	129
6.4	Werkstofftangente	131
6.5	Algorithmus.....	132

6.6	Mehrdimensionaler Fall	132
6.6.1	Spannungsberechnung	132
6.6.2	Werkstofftangente	133
6.6.3	Algorithmus	135
6.7	Temperaturabhängigkeit	136
6.7.1	Grundlagen thermo-rheologisch einfacher Materialien, Pseudo-Zeit...	137
6.7.2	Zeitintegration	139
6.7.3	Shift-Funktionen	141
6.7.4	Spannungen	143
6.7.5	Tangente	144
6.7.6	Algorithmus	144
6.8	Ebener Spannungs- und Verzerrungszustand	145
6.8.1	Ebener Verzerrungszustand	145
6.8.2	Ebener Spannungszustand	145
6.9	Beispielrechnungen	147
6.9.1	Zu Kapitel 6.1	147
6.9.2	Zu Kapitel 6.2	148
6.9.3	Zu Kapitel 6.3	150
7	Theorie und Numerik des Kriechens	151
7.1	Grundsätzliches	151
7.2	Zeitintegration beim Kriechen	155
7.2.1	Differenzenquotienten	155
7.2.2	Kriechbeispiel	155
7.2.3	Explizite Zeitintegration	156
7.2.4	Variable Zeitschritt	160
7.2.5	Implizite Zeitintegration	161
7.2.6	Zusammenfassung Kriechbeispiel	166
7.2.7	Zusammenwirken mit anderen Materialnichtlinearitäten	166
7.3	Konsistente Tangente für implizites Kriechen	167
7.3.1	Herleitung	167
7.3.2	Beispiele	170
7.4	Allgemeine Form für lokale und globale Iteration	175
8	Theorie und Numerik der Elasto-Plastizität	179
8.1	Grundbegriffe eindimensionalen Verhaltens	179
8.2	Bausteine einer mehrdimensionalen Elasto-Plastizitätstheorie	181
8.3	Fließregeln	182
8.4	Klassische Fließbedingungen	183
8.4.1	Gestaltänderungsenergie-Hypothese (nach von Mises)	183
8.4.2	Schubspannungs-Hypothese (Tresca)	185
8.4.3	Mohr-Coulomb-Bedingung	188
8.4.4	Drucker-Prager-Bedingung	190
8.5	Verfestigungsregeln	192
8.5.1	Einachsige Spannungs-Dehnungs-Beziehungen	192
8.5.2	Mehrdimensionales Verfestigungsverhalten	193
8.6	Erfüllung der Stoffgleichungen in der FEM, lokale Iteration	199

8.6.1	Allgemeine Darstellung	199
8.6.2	Beispiel lineare Verfestigung.....	202
8.7	Konsistente Tangente	205
8.7.1	Allgemeine Darstellung	205
8.7.2	Beispiel lineare Verfestigung.....	208
8.8	Beispielprogrammierung in USERPL von ANSYS	208
8.9	Modelle für kinematische Verfestigung	214
8.9.1	Besseling-Modell (Overlay-Modell).....	214
8.9.2	Armstrong-Frederik- bzw. Chaboche-Modell.....	219
8.10	Einspielen (Shakedown) und Ratcheting.....	221
8.10.1	Begriffe	221
8.10.2	Melan-Theorem	222
8.10.3	Struktur-Ratcheting.....	224
8.10.4	Material-Ratcheting	227
8.10.5	Thermisches Ratcheting.....	231
8.10.6	Numerisches Ratcheting bei Temperaturzyklen	232
Hauptabschnitt III: Kontakt		
9	Kontaktberechnungen: Einführung, Kinematik.....	235
9.1	Was bedeutet Kontakt?.....	235
9.2	Modellierung von Kontakt.....	236
9.2.1	Punkt-zu-Punkt- bzw. Knoten-zu-Knoten-Kontakt.....	236
9.2.2	Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt	236
9.2.3	Punkt-zu-Oberfläche-Kontakt.....	237
9.2.4	Oberfläche-zu-Oberfläche-Kontakt.....	238
9.3	Kontakt-Kinematik	238
10	Erfüllung der Kontaktbedingung.....	242
10.1	Direkte Einführung der Nebenbedingung.....	243
10.2	Penalty-Methode.....	244
10.3	Lagrange-Multiplikator-Methode	246
10.4	Finite-Elemente-Testproblem	247
10.4.1	Direkte Einführung der Nebenbedingung in das Gleichungssystem.....	249
10.4.2	Penalty-Verfahren.....	253
10.4.3	Methode der Lagrange'schen Multiplikatoren	256
10.4.4	Perturbed-Lagrange-Methode	257
10.4.5	Augmented-Lagrange-Verfahren	260
10.5	Überbestimmtheit durch Kontakt (Overconstraining)	262
10.6	Reibung	263
11	Aspekte der Kontaktmodellierung	265
11.1	Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt	265
11.2	Punkt-zu-Oberfläche-Kontakt	267
11.2.1	Integrationspunkt-Kontakt	267
11.2.2	Knoten als Integrationspunkte	273
11.3	Konvergenz-Erzielung.....	274

11.3.1	Penalty-Verfahren.....	274
11.3.2	Lagrange-Verfahren und direkte Einbringung.....	279
11.3.3	Geeignete Vernetzung und Lastaufbringung	279
11.4	Systemmatrizen	279
12	Kontaktfeststellung	281
12.1	Suchstrategien	281
12.1.1	Bucket Sort.....	281
12.1.2	Pinball-Algorithmus	282
12.1.3	Topologie-Suche.....	284
12.2	Auswahl von Master- und Slave-Seite	285
12.3	Nahbereichs-Kontaktberechnungen	286
12.3.1	Ebene Flächen	287
12.3.2	Pseudoelement-Algorithmus	287
12.3.3	Normalensuche	289
12.4	Konkave Knicke und Ecken.....	292
13	Kontakt mit Schalen- und Balkenelementen.....	294
13.1	Dickenberücksichtigung.....	294
13.2	Momente aus Exzentrizitäten.....	295
Literaturhinweise	297	
Stichwortverzeichnis	299	