

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	v
Einleitung	1
1 Kontinuumsmechanische Grundlagen	3
1.1 Boltzmann-Kontinuum	3
1.2 Kinematik	4
1.2.1 Bewegung der Materie	4
1.2.2 Verformung der Materie	5
1.2.3 Additive Zerlegung der Deformationsgeschwindigkeit	7
1.2.4 Mitrotierende Zeitableitungen	8
1.3 Bilanzgleichungen	9
1.4 Materialgleichungen	11
1.4.1 Dissipationsfunktion	12
1.4.2 Benötigte Materialgleichungen	13
1.5 Vereinfachungen im Rahmen dieser Arbeit	16
2 Modellierung von zeitabhängig plastischem Materialverhalten	19
2.1 Innere Variable	19
2.1.1 Isotrope Verfestigungsgröße	20
2.1.2 Kinematische Verfestigungsgröße	20
2.1.3 Entwicklungsgleichungen	21
2.2 Kinetische Gleichung	21
2.2.1 Fließbedingung und viskoplastisches Potential	21
2.2.2 Assoziierte Fließregel	23
2.3 Thermodynamische Bedingungen	24
2.4 Allgemeine Formulierung vereinheitlichter Modelle	25
2.5 Stochastische Werkstoffmodelle nach Steck	25
2.5.1 Markov-Prozeß und Mittelwertbildung	26
2.5.2 Steck-Modell nach Schettler-Köhler	26
2.5.3 Steck-Modell nach Gerdes	29
3 Die Methode der Finiten Elemente	31
3.1 Theoretische Grundlagen	31

3.2	Weggrößenmethoden für zeitabhängige Materialgleichungen	33
3.2.1	Explizite Ratenformulierung	33
3.2.2	Implizite Formulierung	34
3.2.3	Auswahl der Methode	35
3.3	Behandlung der impliziten Formulierung unter ABAQUS	35
3.3.1	Nichtlineares Gleichungssystem	35
3.3.2	Inkrementelle Vorgehensweise	36
3.3.3	Einbinden von Materialgleichungen	37
3.4	Zeitintegration der Materialgleichungen	40
3.4.1	Integrationsoperator	40
3.4.2	Bildung des Tangentenmoduls	40
3.5	Ausgewählte Elementtypen	42
3.5.1	Dreidimensionale Kontinuumsэлеmente	43
3.5.2	Zweidimensionale Kontinuumsэлеmente	43
3.5.3	Eindimensionale Strukturelemente	43
3.6	Zusammenfassung	44
4	Transformationen für eine einheitliche Modellbehandlung	45
4.1	Eine Basis für die Vektordarstellung von symmetrischen Tensoren	45
4.2	Vereinfachung der dreidimensionalen Modellformulierung	47
4.2.1	Das Unterraum-Konzept	47
4.2.2	Orthonormale Basis des Unterraums	48
4.2.3	Modellgleichungen im Unterraum	49
4.3	Transformationsvorschriften für ebene und eindimensionale Probleme	49
4.3.1	Ebener Formänderungszustand und Axialsymmetrie	49
4.3.2	Ebener Spannungszustand	50
4.3.3	Sonderfälle des ebenen Spannungszustands	54
4.4	Zusammenfassung	54
5	Verfahren zur numerischen Zeitintegration	57
5.1	Grundlagen zur numerischen Integration von Differentialgleichungen	57
5.2	Integrationsverfahren höherer Ordnung	60
5.2.1	Lineare Verfahren	60
5.2.2	Ansatzverfahren	62
5.2.3	Verfahren variabler Ordnung	63
5.2.4	Auswahl geeigneter Verfahrensklassen	64
5.3	Runge-Kutta-Verfahren	65
5.3.1	Grundlagen	65
5.3.2	Fehlerschätzung und Schrittweitensteuerung	70
5.3.3	Interne Numerische Differentiation für Runge-Kutta-Formeln	72

5.3.4	Zwei spezielle Einbettungsformeln	73
5.4	Rosenbrock-Verfahren	75
5.4.1	Grundlagen	75
5.4.2	Interne Numerische Differentiation für Rosenbrock-Formeln	78
5.4.3	Konstruktion einer Rosenbrock-Formel	79
5.5	Vorläufige Bewertung der Verfahren	80
5.5.1	Testproblem	80
5.5.2	Stabilitätsverhalten der expliziten Einbettungsformel	81
5.5.3	Beurteilung von Fehlerschätzung und Schrittweitenkontrolle	84
5.5.4	Effizienz der Verfahren	87
5.6	Diskussion der Ergebnisse	89
6	Modellimplementation	91
6.1	Programmetechnische Umsetzung	91
6.2	Testrechnungen	94
6.2.1	Teststruktur	94
6.2.2	Verifikation der Transformationsvorschriften	95
6.2.3	Bewertung der Integrationsverfahren	99
6.3	Diskussion der Ergebnisse	103
7	Ein Anwendungsbeispiel	105
7.1	Bestimmung der Modellparameter	105
7.2	Simulation eines Relaxationsversuchs	109
7.2.1	Der Probenotyp	109
7.2.2	Das Experiment	110
7.2.3	Auswertung der Ergebnisse	113
7.3	Diskussion der Ergebnisse	121
	Zusammenfassung und Ausblick	123
	Anhang	125
A	Übergang zu einer einachsigen Modellformulierung	127
B	Einfach indizierte Koeffizienten zweistufiger Tensoren	129
B.1	Grundlagen	129
B.2	Basistransformation	130
C	Hypoelastische Matrizen für verschiedene Zustände	131
C.1	Dreidimensionaler Zustand	131
C.2	Ebener Formänderungszustand und Rotationssymmetrie	132
C.3	Ebener Spannungszustand	132

C.4 Einachsiger Spannungszustand	132
D Vereinheitlichte Materialgleichungen für das Modell von Gerdes	133
D.1 Differentialgleichungssystem	133
D.2 Jacobi-Matrix des Differentialgleichungssystems	133
D.3 Ableitung des Differentialgleichungssystems nach dem Dehnikrement	135
Literaturverzeichnis	137