

FE–Umsetzung von nichtlinearem Materialverhalten mit ABAQUS

TU Darmstadt — FB 13 / Festkörpermechanik
Sommersemester 2011

apl. Prof. Dr.–Ing. HERBERT BAASER
Herbert@BaaserWeb.de

Stand: 2. April 2011
Bingen & Darmstadt

— *Arbeitsversion – nicht korrigierte Fassung* —

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Struktur der Lehrveranstaltung	5
2.1	Ablauf & Bewertung	5
2.2	Zeitplan & Themen	5
3	Verwendung von ABAQUS	7
3.1	Login und Verzeichnisse	7
3.2	Struktur von ABAQUS	7
3.2.1	Kurz-Tutorium am Beispiel eines O-Rings	7
3.2.2	Direkter Aufruf von der Konsole	12
I	Theorie — Grundlagen	13
4	Mathematische Grundlagen	14
4.1	Skalare, Vektoren und Tensoren	14
4.2	Hauptachsentransformation	17
4.3	Notation, Matrix-Darstellung	17
4.4	Polare Zerlegung	17
5	Elemente der Kontinuumsmechanik — Grundlagen der Festkörpermechanik	18
5.1	Deformationsgradient und Verzerrungsmaße	18
5.1.1	Beispiele	20
5.2	Verzerrungsraten	22
5.3	Deformationsinvarianten	22
5.4	Mechanische Spannung — Konjugierte Spannungstensoren	24
5.4.1	VOIGT-Notation	24
5.4.2	Konjugierte Spannungstensoren	26
5.4.3	Vorgehen in FEM-Programmsystemen	26

5.4.4	Spannungsleistung	27
5.4.5	Spannungsraten	28
5.5	Verknüpfung von Spannung und Dehnung — Materialmodul	28
6	Elastisches Materialverhalten	29
6.1	Linear-elastisches Materialverhalten — HOOKEsches Gesetz	29
6.2	Hyperelastizität	30
6.2.1	Quasi-inkompressible Darstellung	31
7	Inelastisches Materialverhalten	34
7.1	Motivation. 1-D Reibmodell	34
7.2	Plastisches Materialverhalten	35
7.2.1	Integrationsalgorithmus für ratenunabhängige Plastizität	35
7.2.2	Return-Mapping-Algorithmus	36
7.3	Klassische J_2 -Plastizität	40
7.3.1	Exakte Linearisierung des Algorithmus	43
7.4	Modellierung duktiler Schädigung	44
7.4.1	Phänomene von Schädigung in metallischen Werkstoffen	44
7.4.2	Kontinuumsschädigungsmodell	44
7.4.3	Konstitutivgleichungen nach GURSON und TVERGAARD	45
7.4.4	Numerische Umsetzung nach ARAVAS	47
7.5	Behandlung finiter Inelastizität	48
8	Grundlagen der Methode der finiten Elemente	53
8.1	Schwache Form	53
8.2	Diskretisierung	53
8.3	Linearisierung und Diskretisierung	54
8.4	Iteratives Vorgehen	56
8.4.1	Globales NEWTON-Verfahren	56
8.4.2	Behandlung großer, linearer Gleichungssysteme	57
8.4.3	Iterative Lösung des globalen Gleichungssystems	58
II	Anwendungen	61
9	Parameter-Identifikation	62
9.1	Beispiel: Hyperelastische Werkstoffe	62
9.1.1	Einaxiale Darstellung des neo-HOOKE-Modells	62
9.1.2	YEOH-Modell	62
9.2	Versuchsanordnungen	63
9.3	Fehler-Quadrat-Minimierung	64

10 Implementierung von Materialmodellen	65
10.1 Hyperelastische Modelle über UHYPER	65
10.1.1 Schnittstelle	65
10.1.2 Zwangsbedingung InkompRESSibilität	66
10.1.3 Aktivieren / Ansprechen in ABAQUS	66
10.2 Allgemeine Material-Schnittstelle UMAT	66
10.2.1 Schnittstelle	66
10.2.2 Bestimmung des Moduls \mathbf{D}	66
III Übungsaufgaben	69
11 Übungsaufgaben	70
11.1 Berechnung von Deformationsmaßen	70
11.1.1 Hauptachsenzerlegung für <i>simple shear</i>	70
11.2 Einaxiale Darstellung und Ableitung des YEOH-Modells	71
11.3 Parameter-Anpassung — <i>Fehler-Quadrat-Minimierung</i>	72
11.4 Anwendung von ABAQUS CAE	73
11.4.1 Simulation einer axialsymmetrischen Struktur	73
11.4.2 HERTZsche Pressung — Linienkontakt — $a = l$	74
11.4.3 Drei-Punkt-Biegung — Plastische Zone	75
11.5 Programmierbeispiel	76
11.5.1 YEOH in UHYPER	76
Anhang	76
A Fortran77-Beispiel	77
B Aufstellung einiger Linux-/Unix-Befehle	78
Literatur	78

Kapitel 1

Einleitung

Die „Methode der finiten Elemente“ (FEM) ist in der zweiten Hälfte des 20. Jhdt. entwickelt worden und hat seitdem parallel mit den Innovationsschüben im *Hardware*-Bereich der Computer-Technologie eine rasante Weiterentwicklung erfahren.

Die Möglichkeiten einer allgemeinen Betrachtungsweise verschiedenster mechanischer Problemstellungen auf der Grundlage moderner mathematischer Werkzeuge (Matrixoperationen, Variationsformulierung, ...) haben die FEM neben anderen numerischen Verfahren (Differenzen-Schemata, Randelement-Methode/BEM, ...) zu dem bedeutendsten computergestützten Berechnungsverfahren gemacht. Der aktuelle Stand der *Hard*- und *Software*-Technologie ermöglicht heute jedem Entwicklungsingenieur und Wissenschaftler an einem Einzelarbeitsplatz auch schon größere (Anfangs-) Randwertprobleme zu lösen, wo vor mehreren Jahren noch Großrechenanlagen vonnöten waren. Die Anbindung und Anpassung eines jeden mechanisch-mathematischen Simulationsmodells findet mit der Auswahl eines geeigneten Materialmodells über die Materialparameter statt.

Die Materialmodellierung stellt somit das Bindeglied zwischen Modell und praktischer Anwendung dar. Dabei müssen die Materialparameter in eindeutiger Weise durch Experimente und entsprechende Modellrechnungen bestimmbar sein.

Eine zunehmende Verfeinerung und Präzisierung der Materialmodellierung setzt ein tieferes Verständnis der Materialtheorie und der algorithmischen Umsetzung dieser Modelle voraus, um möglichst alle wesentlichen Effekte des Materialverhaltens berücksichtigen zu können. Das Anliegen dieser Vorlesung zielt genau in diese Richtung, wobei hier ein besonderes Augenmerk auf einer korrekten und effizienten numerischen Umsetzung der angesprochenen Materialmodelle liegt.

Kapitel 2

Struktur der Lehrveranstaltung

2.1 Ablauf & Bewertung

In diesem Jahr finden die Lehrveranstaltungen donnerstags 8:00 Uhr – 10:30 Uhr in Raum S1/03/272 statt. Folgende Termine sind vorgesehen: 21.04.2011, 05.05., 19.05., 27.05., 09.06., 16.06. und 30.06..

Während der Veranstaltungen werden 2–3 Übungsaufgaben ausgegeben, die anschließend zu bearbeiten sind. Eine entsprechend ausführliche Dokumentation der Ausarbeitung wird bis zum Beginn des kommenden Wintersemesters bewertet und ergibt – wenn gewünscht – die Note für den Kurs.

2.2 Zeitplan & Themen

Unter <http://www.baaserweb.de/TUDarmstadt/SoSe11> werden zusätzliche Informationen zur Verfügung gestellt.

Folgende Themen und Inhalte sind in diesem Jahr vorgesehen und können bei Bedarf / Wunsch modifiziert und erweitert werden:

- 21.04.2011
 - Begrüßung, Teilnehmer–Liste
 - Abklären der Erwartungen
 - Kurzvorstellung FEM
 - * Wie funktioniert FEM ? Was ist FEM ?
 - * Ablauf einer FEM–Analyse
 - Vorbereitung („preprocessing“)
 - (möglicherweise iterative) Lösung („solver“ / „solution“)

- Nachbereitung („postprocessing“)
 - * Wir behandeln Themen der Festkörper- bzw. Strukturmechanik.
 - * FEM *heute*: Nichtlinearitäten in (1.) Geometrie (große Deformationen, exakte Kinematik) und (2.) Kontakt- und sonstige Restriktionen (Koppelungen, Kinematiken, ...)
- Überblick ABAQUS-CAE
- Beispiel RWDR, siehe Abschn. 11.4.1.
- Kinematik großer Deformationen – siehe Abschn. 5.1–5.3
- 05.05.
 - Spannungskonzept, siehe Abschn. 5.4
 - Übungen mit/an ABAQUS-CAE
- 19.05.
 - Parameteranpassung
- 26.05.
 - Übung zu Parameteranpassung, siehe Kap. 9
- 09.06.
 - HERTZsche Pressung — Linienkontakt, siehe Abschn. 11.4.2
 - Vergleich mit Literaturwerten
- 16.06.
 - FEM als (Entwicklungs-)Werkzeug des Ingenieurs
 - * Kundenbeziehung
 - * Anfrage – Angebot – Auftrag – Bearbeitung – Dokumentation
 - Nachbearbeitung/-betrachtung – Controlling – Kommunikation
- 30.06.
 - FEM als Forschungsgegenstand, aktuelle Herausforderungen
 - * Elementformulierungen, *Locking*-Phänome
 - * Effizienz, Parallelisierung
 - * V&V, Aussagequalität, Fehlerquellen
 - * Materialmodellierung