

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 4

Bauingenieurwesen

Daniel Jun,
Wetter

Nr. 187

Adaptive Strategien für nichtlineare Finite- Element-Simulationen von Schalenträgwerken



HLuHB Darmstadt



15463589

Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Stand der Forschung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Gliederung der Arbeit	3
2 Kontinuumsmechanische Grundlagen	5
2.1 Kinematik	5
2.1.1 Lage und Deformation	6
2.1.2 Basisvektoren und Metriktensor	7
2.1.3 Deformationsgradient	8
2.1.4 Verzerrungen	10
2.2 Spannungen	11
2.2.1 CAUCHY'scher Spannungstensor	12
2.2.2 2. PIOLA-KIRCHHOFF Spannungstensor	13
2.3 Materialgesetze	14
2.3.1 Hyperelastisches ST. VENANT-KIRCHHOFF-Materialmodell	14
2.4 Bilanz- und Erhaltungssätze der Kontinuumsmechanik	16
2.4.1 Energieerhaltungssatz	16
2.4.2 Satz von der Erhaltung der Masse	17
2.4.3 Satz von der Erhaltung des Impulses	18
2.4.4 Satz von der Erhaltung des Drehimpulses	19
2.5 Arbeits- und Energieprinzipien	19
2.5.1 Prinzip der virtuellen Verschiebungen	20

2.5.2	Prinzip vom Minimum des Gesamtpotentials	21
2.5.3	Prinzip von HU-WASHIZU	22
3	Kontinuumsbasierte Schalentheorie	24
3.1	Klassische Mittelflächen-Schalentheorien	24
3.2	Ansatz für die Schalenkinematik	26
3.3	Kinematik des Schalenkontinuums	27
3.4	Kinematische und statische Variablen des Schalenkontinuums	29
3.4.1	Kinematische Variablen	29
3.4.2	Statische Variablen	31
3.4.3	Klassifizierung und Interpretation der Schalenvariablen	32
3.5	Mehrschichten-Schalenkinematik	34
3.5.1	Interne Mehrschichten-Schalenkinematik	34
3.5.2	Externe Mehrschichten-Schalenkinematik	37
4	Finite-Element-Diskretisierung	40
4.1	Linearisierung	40
4.2	Isoparametrische Elementformulierung	42
4.3	Lösung des nichtlinearen Randwertproblems	43
4.4	Künstliche Versteifungseffekte – Locking	44
4.4.1	POISSON-Locking	45
4.4.2	Membran-Locking	46
4.4.3	Volumen-Locking	48
4.4.4	Scher-Locking	48
4.4.5	Krümmungs-Locking	49
4.5	Assumed-Strain-Konzepte	50
4.5.1	Enhanced Assumed Strain Methode	51
4.5.2	Assumed Natural Strain Methode	57
5	Fehlerabschätzung und Adaptivität	61
5.1	Vorbemerkungen	61
5.2	Fehlerquellen bei der Anwendung der Methode der finiten Elemente	62
5.3	Fehlerschätzer	63

5.3.1	Fehlerdefinition	64
5.3.2	Fehlernormen	64
5.3.3	Relativer Fehler	65
5.4	A-posteriori Fehlerschätzer für lineare Problemstellungen	66
5.4.1	Residualer Fehlerschätzer	66
5.4.2	Glättungsbasierter Fehlerschätzer	68
5.5	A-posteriori Fehlerschätzer für nichtlineare Problemstellungen	71
5.5.1	Inkrementeller Fehlerschätzer für geometrisch nichtlineare Problemstellungen	72
5.5.2	Inkrementeller Fehlerschätzer für physikalisch nichtlineare Problemstellungen	72
5.5.3	Transfer der Zustands- und Geschichtsvariablen	73
5.6	Adaptive Simulationsstrategie	74
5.6.1	Transformation von Schalenspannungen	74
5.6.2	Adaptionskriterium	75
5.7	Adaptive Strategien	76
6	<i>h</i>-adaptive Simulationsstrategien mit finiten 3D-Schalenelementen	79
6.1	Simulationssystem FEMASORPHEUS	79
6.1.1	Modulares Simulationskonzept	80
6.1.2	Beispiel: L-Scheibe	80
6.1.3	Interaktion zwischen Geometrie und Diskretisierung	82
6.1.4	Hierarchische Netzverwaltung	83
6.2	3-dimensionale, anisotrope <i>h</i> -Verfeinerung	84
6.2.1	Verfeinerung mittels hängender Knoten	85
6.2.2	Anisotrope Elementverfeinerung	87
6.2.3	Übergang/Kopplung Volumenelement-Schalenelement	88
6.3	<i>h</i> -Adaptivität in Dickenrichtung	89
6.3.1	Motivation	90
6.3.2	<i>h</i> -Verfeinerungsstrategien in Dickenrichtung	92
6.3.3	Anwendungsgebiete und numerische Effizienz	94

7 Numerische Beispiele	96
7.1 Vorbemerkungen	96
7.2 Eindimensionales Balkenproblem – h -Adaptivität in Balkenlängsrichtung	97
7.2.1 Eingespannter Balken	97
7.3 Klassische Schalenprobleme – h -Adaptivität in Schalenebene	99
7.3.1 COOK's Membran	100
7.3.2 Ringplatte	102
7.3.3 Halbkugel mit Loch	104
7.4 Schalenprobleme mit POISSON-Locking – h -Adaptivität in Schalendickenrichtung	107
7.4.1 Schale mit geometrischer Diskontinuität	108
7.4.2 Verdrillter Kragarm	109
7.4.3 Platte unter Vollast	114
8 Zusammenfassung und Ausblick	121
8.1 Zusammenfassung	121
8.2 Ausblick	122
A Tensorrechnung	124
B Herleitung der Erhaltungssätze der Kontinuumsmechanik	125
B.1 Massenerhaltungssatz und Impulserhaltungssatz	125
B.2 Drehimpulserhaltungssatz	127
C Variationsprinzip	128
C.1 Variation des Prinzips der virtuellen Verschiebungen	128
C.2 Variation des Prinzips von HU-WASHIZU	129
D Implementierung der SIMPSON-Regel	131
E Normen	134
Literaturverzeichnis	135