

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung und Zielsetzung..... 1
 - 1.1 Bedeutung numerischer Simulationen 1
 - 1.2 Modellbildung und ihre Herausforderungen..... 2
 - 1.3 Zielsetzung und Lösungsweg 4
- 2 Mechanisches Materialverhalten von Polymerwerkstoffen 7
 - 2.1 Grundlegende Klassifizierung des mechanischen Materialverhaltens 7
 - 2.2 Molekularer Aufbau von Polymerwerkstoffen..... 8
 - 2.3 Charakterisierung des mechanischen Materialverhaltens von Polymeren 9
 - 2.4 Mechanisches Verhalten von Elastomeren..... 11
 - 2.4.1 Nichtlinear-elastisches Materialverhalten..... 12
 - 2.4.2 Hysterese und viskose Effekte..... 12
 - 2.4.3 MULLINS-Effekt und bleibende Verformungen 13
 - 2.5 Mechanisches Verhalten thermoplastischer Elastomere..... 14
 - 2.6 Mechanisches Verhalten von Polymerschäumen..... 16
 - 2.7 Modellbildung des mechanischen Verhaltens von Polymerwerkstoffen 17
- 3 Kontinuumsmechanische Grundlagen 21
 - 3.1 Kinematische Größen 21
 - 3.1.1 Referenz- und Momentankonfiguration..... 21
 - 3.1.2 Verformung und Verzerrungsmaße 22
 - 3.1.3 Volumetrischer und isochorer Verformungsanteil 24
 - 3.2 Kinetische Größen..... 27
 - 3.2.1 Spannungstensoren 27
 - 3.2.2 Volumetrischer und isochorer Spannungsanteil..... 28
 - 3.3 Erhaltungs- und Bilanzgleichungen 29
 - 3.3.1 Massenerhaltung..... 29
 - 3.3.2 Impulserhaltung 29
 - 3.3.3 Energieerhaltung 30
 - 3.3.4 Entropiebilanz 31
 - 3.4 Elastizitätsbegriffe in der Kontinuumsmechanik 32
- 4 Finite Elastizitätstheorie..... 33
 - 4.1 HELMHOLTZsche Freie Energie als elastisches Potential..... 33

4.2	Allgemeine Spannungs-Dehnungs-Relation.....	35
4.3	Spannungs-Dehnungs-Relation für spezielle Belastungsfälle	37
4.4	Materialsteifigkeitstensor	38
4.5	Inkompressibler Grenzfall	39
4.6	Isochor-volumetrisch entkoppelte Formulierung.....	40
5	Experimentelle Charakterisierung hyperelastischen Materialverhaltens	43
5.1	Uniaxialer Zugversuch	45
5.2	Äquibiaxialer Zugversuch.....	45
5.3	Uniaxialer Druckversuch.....	47
5.4	Einfacher Scherversuch	48
5.5	Planarer Zugversuch	49
5.6	Kompressionsversuche.....	51
6	Konstruktion hyperelastischer Materialmodelle.....	53
6.1	Klassifizierung hyperelastischer Materialmodelle.....	53
6.2	Anforderungen an hyperelastische Materialmodelle.....	55
6.2.1	Physikalische Plausibilitätskriterien und Materialstabilität	55
6.2.2	Kontinuumsmechanisch notwendige Bedingungen	57
6.2.3	Empirische Kriterien	58
6.2.4	Mathematisch wünschenswerte Eigenschaften	62
6.3	Inkompressibilität und entkoppelte Formulierung.....	63
7	Approximationsansatzbasierte hyperelastische Materialmodelle.....	65
7.1	Linearisierung des elastischen Potentials.....	65
7.1.1	ST. VENANT-KIRCHHOFF-Materialmodell	65
7.1.2	HENCKY-Materialmodell	67
7.1.3	MOONEY-RIVLIN-Materialmodell	68
7.1.4	Neo-HOOKE-Materialmodell.....	71
7.2	Modellansätze mit entkoppelter Formulierung für quasi-inkompressible Materialien .	73
7.2.1	Modellansätze für den volumetrischen Anteil	74
7.2.2	Invariantenbasierte Modellansätze für den isochoren Anteil	76
7.2.2.1	Allgemeiner RIVLIN-Polynomansatz	76
7.2.2.2	VAN-DER-WAALS-Materialmodell.....	78
7.2.2.3	Kalibrierungshinweise für Erste-Zweite-Invariante-Modelle.....	80
7.2.3	Erste-Invariante-basierte Modellansätze für den isochoren Anteil.....	81

7.2.3.1	Motivation und Eigenschaften von Erste-Invariante-Modellen	81
7.2.3.2	Reduzierter RIVLIN-Polynomansatz	84
7.2.3.3	ARRUDA-BOYCE-Materialmodell	86
7.2.4	Hauptstreckungsbasierte Modellansätze für den isochoren Anteil	88
7.2.4.1	VALANIS-LANDEL-Hypothese	88
7.2.4.2	OGDEN-Materialmodell	90
7.3	Modellansätze mit gekoppelter Formulierung für kompressible Materialien	92
7.3.1	Modifiziertes OGDEN-Modell für kompressible Materialien	92
7.3.2	BLATZ-KO-Materialmodell für kompressible Materialien	95
7.4	Parameteridentifikation mittels Ausgleichsrechnung	96
7.4.1	Lineare und nichtlineare Ausgleichsrechnung	97
7.4.2	Kalibrierung von Materialmodellen mit entkoppelter Formulierung	100
7.4.3	Überprüfung der Materialstabilität	101
7.4.4	Wahl der Messdaten für die Kalibrierung	102
7.5	Hinweise zur Auswahl hyperelastischer Materialmodelle	104
7.6	Anisotrope hyperelastische Materialmodelle	105
8	Interpolationsansatzbasierte hyperelastische Materialmodelle	109
8.1	Diskussion interpolationsansatzbasierter Modellansätze	109
8.1.1	Hauptstreckungsbasierte Modellansätze	110
8.1.2	Invariantenbasierte Modellansätze	113
8.1.3	Allgemeines Erste-Invariante-Modell bei Inkompressibilität	115
8.1.4	Allgemeines Erste-Zweite-Invariante-Modell bei Inkompressibilität	117
8.2	Entwicklung eines allgemeinen Erste-Invariante-Modells	118
8.2.1	Modellansatz zur Berücksichtigung schwacher Kompressibilität	118
8.2.2	Wahl des Interpolationsansatzes	120
8.2.3	Ansätze zur Kurvenglättung	123
8.2.4	Wahl des Extrapolationsansatzes	124
8.2.5	Untersuchung und Bewertung der Modellvorhersage	126
8.3	Entwicklung eines allgemeinen Erste-Zweite-Invariante-Modells	128
8.3.1	Erweiterter Ansatz zur Berücksichtigung der zweiten Invariante	128
8.3.2	Entwicklung einer Kalibrierungsvorschrift	129
8.3.3	Wahl des Interpolations- und Extrapolationsansatzes	132
8.3.4	Diskussion der Materialstabilität	133

8.3.5	Untersuchung und Bewertung der Modellvorhersage	133
9	Variationsformulierung des Deformationsproblems	139
9.1	Prinzipien von D'ALEMBERT und der virtuellen Arbeit	140
9.2	Nebenbedingungen	141
9.2.1	Kontaktbedingungen	141
9.2.2	Konstitutive Materialgleichungen	145
9.2.3	DIRICHLET-Randbedingungen	146
10	Finite-Elemente-Analyse des Deformationsproblems	147
10.1	Netzgenerierung	147
10.2	Diskretisierung der Variationsformulierung	148
10.2.1	Diskretisierungsansatz für die gesuchten Lösungsfelder	148
10.2.2	Diskretisierung der virtuellen inneren und äußeren Arbeit	149
10.2.3	Diskretisierung der Kontaktbedingungen	150
10.2.4	Algebraisches Gesamtgleichungssystem	153
10.3	Linearisierung des algebraischen Gleichungssystems	153
10.4	Iterativer Lösungsalgorithmus	155
10.5	Numerische Integration	157
10.6	Postprocessing	158
10.7	Hinweise zur Kontaktmodellierung	159
10.8	Hinweise zur Elementauswahl	160
11	Finite-Elemente-Analyse quasi-inkompressibler Materialien	161
11.1	Künstliche Elementversteifung und numerische Instabilität	161
11.1.1	Simulationsbeispiel eines dickwandigen Hohlzylinders	161
11.1.2	Künstliche Elementversteifung	163
11.1.3	Numerische Instabilität	164
11.2	Abhilfemaßnahmen für Verschiebungselemente	165
11.2.1	Methoden mit reduzierter Integration	166
11.2.2	Methoden mit elementweise gemittelter Dilatation	169
11.3	Abhilfe durch Verwendung von Hybridelementen	170
11.3.1	Mehrfeldformulierungen im Überblick	171
11.3.2	Modifikation der u-p-Mehrfeldformulierung von DE BORST	172
11.3.3	Korrespondierende Verschiebungselementformulierung	174
11.3.4	Anforderungen an den Diskretisierungsansatz für das Druckfeld	175

11.3.5	Ausgewählte dreidimensionale Hybridelemente.....	176
11.3.6	Probleme bei nicht LBB-konformen Hybridelementen.....	178
11.4	Gegenüberstellung der verschiedenen Abhilfemaßnahmen.....	180
12	FE-Simulation ausgewählter Anwendungsbeispiele	183
12.1	Druckstempelversuch eines PU-Weichschaums	183
12.1.1	Beschreibung des Simulationsmodells.....	183
12.1.2	Diskussion der Simulationsergebnisse	185
12.2	Faltenbalg unter Biegebelastung	186
12.2.1	Beschreibung des Simulationsmodells.....	187
12.2.2	Diskussion der Simulationsergebnisse	189
12.3	Montagesimulation eines Radial-Wellendichtrings	191
12.3.1	Beschreibung des Simulationsmodells.....	193
12.3.2	Diskussion der Simulationsergebnisse	196
12.3.3	Überschlägige Berechnung der Kontakttemperatur	200
13	Zusammenfassung und Ausblick	201
13.1	Zusammenfassung	201
13.2	Ausblick.....	205
14	Conclusion	207
A	Anhang	211
A.1	Polymerklassen und typische Vertreter.....	211
A.2	Aspekte der Materialmodellierung.....	212
A.3	Kinematische Zusammenhänge für spezielle Belastungsfälle.....	213
A.4	Kinetische Zusammenhänge für spezielle Belastungsfälle	214
A.5	Arbeitskonjugierte Spannungs- und Verzerrungsmaße	214
A.6	Spannungs-Dehnungs-Relationen für spezielle Lastfälle	215
A.7	Charakterisierung der Invariantenabhängigkeit typischer Elastomere.....	217
A.8	Konstitutive Gleichungen des HENCKY-Materialmodells.....	217
A.9	Konstitutive Gleichungen für den hydrostatischen Druck	218
A.10	Modellparameter zu den Kalibrierungsbeispielen.....	218
A.11	Hilfestellung bei der Materialmodellauswahl	220
A.12	Kalibrierung des allgemeinen Erste-Invariante-Modells.....	221
A.13	Anwendung der BAKER-ERICKSON-Ungleichung auf das AEZI-Modell	221
A.14	Sanduhr-Basismatrizen des reduziert integrierten linearen Hexaeders	222

A.15 Modellparameter zu den Anwendungsbeispielen..... 223

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis 225

Literaturverzeichnis..... 233

Eigene Veröffentlichungen 259

Danksagung..... 263