
Rolf Steinbuch

Simulation

im konstruktiven Maschinenbau

Anwendung von FEM- und verwandten Systemen in
der Konstruktion

Mit 190 Bildern



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	17
1.1	Erscheinungsformen der Simulation	18
1.2	Ziel der Simulation	25
1.3	Ökonomische Bedeutung der Simulation	28
1.4	Diskrete und kontinuierliche Probleme	30
1.5	Kontinuumsmechanische Modelle	32
1.6	Ziel des Buchs	33
2	Simulation in der Entwicklung	35
2.1	Der Produktentwicklungsprozess	35
2.2	Frontloading	38
2.3	Simulation im CAE-Prozess	40
2.4	Möglichkeiten und Grenzen	41
2.5	Merkmenswertes	48
3	Simulationswerkzeuge	49
3.1	Klassische Werkzeuge	49
3.2	Rechensysteme	50
3.3	CAD-Systeme	52
3.4	Pre- und Postprozessoren	55
3.5	Kontinuumsmechanische Programme	56
3.6	Andere Simulationssysteme	57
3.7	Einsatz der Systeme	58
3.8	Merkmenswertes	60
4	Modellbildung	61
4.1	Klassifizierung der Simulationsaufgaben	61
4.1.1	Symmetrien: eben, axialsymmetrisch oder räumlich	62
4.1.2	Stäbe, Balken und Schalen	65
4.1.3	Stationär, statisch oder transient, dynamisch	69
4.1.4	Linear oder nichtlinear	72
4.1.5	Ein oder mehrere physikalische Problemkreise	75
4.2	Drei Bestandteile eines Simulationsmodells	76
4.2.1	Geometrie	77

	4.2.2	Werkstoff.....	83
	4.2.3	Randbedingungen.....	90
4.3		Daten und Unschärfen.....	95
4.4		Merksenswertes.....	96
5		Ergebnisinterpretation.....	97
5.1		Welche Ergebnisse fallen an?.....	97
	5.1.1	Lösung des Gleichungssystems.....	98
	5.1.2	Dehnungen und Spannungen.....	100
	5.1.3	Numerische Konvergenz.....	101
	5.1.4	Technische Konvergenz.....	107
5.2		Zulässige Spannungen.....	110
	5.2.1	Versagensarten.....	110
	5.2.2	Statische Festigkeit.....	111
	5.2.3	Schwingende Beanspruchung.....	112
	5.2.4	Sicherheit und Ausfallwahrscheinlichkeit.....	114
	5.2.5	Bruchmechanische Kennwerte.....	116
	5.2.6	Kriechen und Relaxation.....	118
	5.2.7	Kombinierte Beanspruchung.....	118
	5.2.8	Weitere Einflussgrößen auf die zulässige Spannung.....	119
5.3		Berechnete und zulässige Beanspruchung.....	120
	5.3.1	Ein pragmatischer Ansatz.....	120
	5.3.2	Automatisierte Auswertung.....	121
5.4		Typische Fehlinterpretationen.....	122
	5.4.1	Klassifikation der Fehlinterpretationen.....	124
	5.4.2	Vermeiden von Fehlinterpretationen.....	124
5.5		Nichtstrukturmechanische Probleme.....	126
	5.5.1	Konvergenzbetrachtungen.....	126
	5.5.2	Bewertung der Ergebnisse.....	130
5.6		Merksenswertes.....	135
6		Einige Simulationsanwendungen.....	137
6.1		Festigkeitsanalyse.....	138
	6.1.1	Lineare Elastostatik.....	138
	6.1.2	Dynamik.....	141
	6.1.3	Modellaufbereitung.....	144
6.2		Potentialprobleme.....	145
	6.2.1	Geometrie.....	146
	6.2.2	Werkstoff.....	146
	6.2.3	Randbedingungen.....	147
6.3		Fluidmechanik.....	147
	6.3.1	Geometrie.....	148
	6.3.2	Werkstoff.....	148
	6.3.3	Randbedingungen.....	149
6.4		Elektrodynamik.....	150

6.4.1	Geometrie.....	150
6.4.2	Werkstoff.....	150
6.4.3	Randbedingungen.....	151
6.5	Akustik.....	151
6.5.1	Geometrie.....	152
6.5.2	Werkstoff.....	152
6.5.3	Randbedingungen.....	152
6.6	Gekoppelte Analysen.....	153
6.7	Merksenswertes.....	154
7	Nichtlineare Fragen	155
7.1	Lineare und nichtlineare Probleme.....	155
7.2	Klassifizierung nichtlinearer Fragen.....	157
7.3	Handlungsansätze.....	163
7.3.1	Netzqualität.....	164
7.3.2	Elementtypen.....	164
7.3.3	Integrationsverfahren.....	165
7.3.4	Lösungsansätze für einige nichtlineare Beispiele.....	171
7.4	Mehrdeutige Probleme.....	175
7.5	Nichtstruktur- und fluidmechanische Probleme.....	177
7.6	Erfahrungen mit nichtlinearen Fragen.....	180
7.7	Merksenswertes.....	181
8	Fortschrittliche Anwendungen	183
8.1	Appetit kommt beim Essen.....	183
8.2	Gekoppelte nichtlineare Analysen.....	185
8.3	Optimierung.....	188
8.3.1	Begriffsbildung.....	189
8.3.2	Lineare und nichtlineare Optimierung.....	192
8.3.3	Formoptimierung.....	194
8.3.4	Topologieoptimierung.....	198
8.3.5	Genetische Optimierung.....	201
8.4	Robustheit.....	207
8.5	Merksenswertes.....	209
9	Der Simulationsprozess	211
9.1	Der Auftrag, Auftraggeber und -nehmer.....	211
9.1.1	Pflichtenheft.....	212
9.1.2	Daten.....	214
9.1.3	Dokumentation.....	217
9.2	Qualität und Zuverlässigkeit in der Simulation.....	218
9.2.1	Warum Qualitätssicherung in der Simulation?.....	218
9.2.2	Begriffsbildung.....	220
9.2.3	Ursachen der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprobleme.....	223
9.2.4	Lösungsansätze.....	226

9.3	Menschen im Simulationsprozess.....	238
9.3.1	Wer simuliert wie und in welcher Funktion?	238
9.3.2	Probleme im Arbeitsalltag.....	240
9.3.3	Maßnahmen zur sozialen Qualitätssicherung	241
9.4	Merkenswertes.....	244
10	Ausblick	245
10.1	Prognosefähigkeit	245
10.2	Technische Entwicklungen	246
10.2.1	Hardware.....	246
10.2.2	Software	247
10.2.3	Kopplung CAD-Simulation.....	248
10.2.4	Virtual Reality	249
10.2.5	Deterministische oder stochastische Interpretation	249
10.2.6	Computergläubigkeit	250
10.2.7	Bathes Aufgabenstellungen.....	251
10.3	Wissenschaftlich-technische Implikationen	252
10.4	Soziale Implikationen	252
10.5	Bedenkenswertes	253
A1	Simulieren heißt Rechnen	255
A1.1	Konvergenz	255
A1.2	Nullstellen und Extremwerte	259
A1.2.1	Nullstellen.....	259
A1.2.2	Extremwerte.....	265
A1.3	Lineare Gleichungssysteme	68
A1.3.1	Direkte Lösungsverfahren.....	269
A1.3.2	Iterative Lösungsverfahren	270
A1.3.3	Nichtlineare Gleichungssysteme.....	271
A1.3.4	Eigenwertberechnung	272
A1.4	Numerische Integration	274
A1.4.1	Polynomintegration.....	274
A1.4.2	Gaußverfahren	276
A1.5	Gewöhnliche Differentialgleichungen (DGL).....	278
A1.5.1	Anfangswertaufgaben.....	279
A1.5.2	Randwertaufgaben (RWA).....	285
A1.5.3	Anfangs-Randwertaufgaben (ARWA)	287
A1.5.4	Fehlerfortpflanzung	287
A2	Numerik der Kontinuumsmechanik	289
A2.1	DGL der Erhaltungssätze.....	291
A2.1.1	Potentialmechanik.....	291
A2.1.2	Elastomechanik.....	295
A2.1.3	Akustik.....	298
A2.1.5	Magnetostatik	300

A2.1.6 Elektrodynamik.....	301
A2.1.7 Fluidmechanik	302
A2.2 Diskretisieren der PDGL	303
A2.2.1 Finite Differenzen Methode (FDM).....	303
A2.2.2 Finite Elemente Methode (FEM).....	305
A2.2.3 Finite Volumen Methode (FVM).....	306
A2.2.4 Boundary Element Methode (BEM).....	308
A2.3 Lösungen der diskreten Systeme	309
A2.3.1 Stationäre Probleme.....	309
A2.3.2 DGL 1. Ordnung in der Zeit	310
A2.3.3 DGL 2. Ordnung in der Zeit	310
A2.4 Zur Finite-Elemente-Methode	311
A2.4.1 Ansatzfunktionen und Elemente.....	311
A2.4.2 Konvergenz.....	317
A2.4.3 Sonderelemente.....	318
A2.4.4 Element und System	320
A2.5 Nicht-Kontinuumsmechanische Probleme	321
A2.6 Merkwürdiges.....	322
Literatur	323
Stichwortverzeichnis	325