

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Simulationsvarianten	3
2	Der Simulationsprozess	9
2.1	Modellkonzept und Modellstruktur	10
2.2	Entwicklung des Simulationsmodells	11
2.3	Simulation durchführen	13
2.4	Überprüfen des Simulationsmodells	14
2.5	Dokumentation	16
2.6	Kontrollfragen	17
2.7	Antworten der Kontrollfragen von Kap. 2	17
	Literatur	18
3	Simulationsmodelle	19
3.1	Allgemeiner Aufbau von Simulationsmodellen	21
3.2	Grafische Darstellung als Wirkungsgraph	23
3.3	Verhaltensbeschreibende Modelle	25
3.4	Gleichungsbasierte Modelle und deren Merkmale	27
3.4.1	Gewöhnliche Differenzialgleichungen	28
3.4.2	Partielle Differenzialgleichungen	31
3.4.3	Algebraisch-differenzielle Gleichungen	32
3.5	Lineare Modelle mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße	33
3.5.1	Übertragungsfunktionen	34
3.6	Grafische Darstellung als Blockschaltbild	47
3.7	Standardverfahren zur grafischen Modellierung für Systeme gewöhnlicher Differenzialgleichungen	55
3.8	Zustandsraumdarstellung	60
3.8.1	Regelungsnormalform	62
3.8.2	Anfangswerte der Zustandsgrößen	72
3.8.3	Zustandsraumdarstellung für Systeme mit mehreren Ein- und Ausgängen	75

3.9	Kontrollfragen	76
3.10	Antworten der Kontrollfragen	79
	Literatur	83
4	Numerische Integrationsverfahren	85
4.1	Integrationsverfahren für gewöhnliche Differenzialgleichungen	85
4.1.1	Das Euler-Verfahren	85
4.1.2	Das Runge-Kutta-Verfahren	93
4.1.3	Programmablauf einer numerischen Simulation	93
4.1.4	Weitere Integrationsverfahren	96
4.1.5	Steife Differenzialgleichungen	96
4.2	Integrationsverfahren für partielle Differenzialgleichungen	97
4.2.1	Das Finite-Differenzen-Verfahren	97
4.2.2	Das Finite-Elemente- und das Finite-Volumen-Verfahren	101
4.2.3	Programmablauf einer FEM-Berechnung	102
4.3	Wichtige Anforderungen an Integrationsverfahren	104
4.3.1	Stabilität	104
4.3.2	Genauigkeit	106
4.3.3	Rechenzeit	107
4.4	Kontrollfragen	108
4.5	Antworten der Kontrollfragen	108
	Literatur	108
5	Zeitdiskrete Systembeschreibung	109
5.1	Das Abtasttheorem	114
5.2	Kontrollfragen	115
5.3	Antworten der Kontrollfragen	115
	Literatur	115
6	Modellbildung	117
6.1	Analytische Modellbildung	118
6.2	Experimentelle Modellbildung	119
6.2.1	Die Fourier-Analyse	121
6.2.2	Sprung- und Impulsantwortanalyse	124
6.2.3	Frequenzgangmessung	126
6.2.4	Parameterschätzverfahren	128
6.3	Anfangswerte festlegen	133
6.4	Einheiten und Wertebereiche von Variablen	135
6.4.1	SI-Einheiten	135
6.4.2	Wertebereich von Variablen	136
6.5	Physikalische Modellierung	138
6.6	Modelle vereinfachen	141

6.6.1	Linearisierung von Modellen	142
6.6.2	Ordnungsreduktion	144
6.6.3	Diskretisierung	151
6.7	Kontrollfragen	154
6.8	Antworten der Kontrollfragen	155
	Literatur	155
7	Einführende Beispiele zur Modellbildung	157
7.1	Exponentieller Wachstums- oder Zerfallsprozess	158
7.1.1	Modellkonzept und Modellstruktur	159
7.1.2	Entwicklung des Simulationsmodells	159
7.1.3	Simulation durchführen	160
7.1.4	Überprüfen des Simulationsmodells	160
7.2	Das Punktpendel, ein einfaches nichtlineares Modell	161
7.2.1	Modellkonzept und Modellstruktur	162
7.2.2	Entwicklung des Simulationsmodells	162
7.2.3	Simulation durchführen	163
7.2.4	Überprüfen des Simulationsmodells	164
7.3	Hydraulisches Ventil als Beispiel eines verhaltensbeschreibenden Modells	166
7.3.1	Modellkonzept und Modellstruktur	167
7.3.2	Entwicklung des Simulationsmodells	168
7.3.3	Simulation durchführen	170
7.3.4	Überprüfen des Simulationsmodells	170
7.4	Flugbahn eines Balls beim schiefen Wurf	172
7.4.1	Modellkonzept und Modellstruktur	174
7.4.2	Entwicklung des Simulationsmodells	174
7.4.3	Simulation durchführen	177
7.4.4	Überprüfen des Simulationsmodells	178
8	Weiterführende Beispiele aus dem Bereich der Mechatronik	181
8.1	Mechanik	181
8.1.1	Mehrmassenschwinger	182
8.1.2	Reibung und Dämpfung	184
8.1.3	Kontaktprobleme und Kontaktsteifigkeit	188
8.1.4	Mechanischer Festanschlag	194
8.2	Hydraulik	196
8.2.1	Hydraulikzylinder	198
8.2.2	Proportionalventil	207
8.2.3	Hydraulischer Antrieb	213
8.2.4	Hydraulischer Antrieb mit Physikalischer Modellierung	214
8.3	Digitale und zeitdiskrete Systeme	217
8.3.1	Zeitquantisierung und Totzeiten	217

8.3.2	Amplitudenquantisierung	222
8.4	Elektrische Antriebe	223
8.4.1	Ungeregelter Gleichstromantrieb	223
8.4.2	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb	226
8.4.3	Ungeregelter Gleichstromantrieb mit Physikalischer Modellierung	230
8.4.4	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb mit Physikalischer Modellierung	232
8.5	Elektrik	236
8.5.1	Dehnungsmessung mit DMS mit Physikalischer Modellierung	236
8.6	Tipps und Tricks	238
8.6.1	Verwendung differenzierender Bausteine	238
8.6.2	Algebraische Schleifen	242
8.6.3	Umgang mit Einheiten	244
8.6.4	Störgrößen	246
8.6.5	Sonderfunktionen in Simulink-Modellen	246
	Literatur	249
9	Simulation als Teil moderner Entwicklungsprozesse	251
9.1	Modellgestützte Softwareentwicklung	251
9.1.1	Rapid Controller Prototyping	255
9.1.2	Hardware-in-the-Loop	256
9.2	Gekoppelte Simulationen	258
	Literatur	261
10	Anhang	263
10.1	Einführung in MATLAB und Simulink	263
10.1.1	Numerische Berechnungen mit MATLAB	264
10.1.2	Simulink, ein graphischer Editor zur Aufstellung der Systemgleichungen	280
10.2	Übertragungsfunktionen im Zeit- und Laplace-Bereich	285
10.3	Elementare Übertragungsglieder	285
10.3.1	PT ₁ -Glieder	285
10.3.2	PT ₂ -Glieder	286
10.4	Korrespondenzen der Laplace-Transformation	286
10.5	Sprungantwort eines PT ₁ -Gliedes	287
10.6	Bode-Diagramm für PT ₂ -Glieder	288
10.7	Wichtige Regelkreisglieder und deren Eigenschaften	289
10.8	Diskrete Zustandsraumdarstellung	290
	Literatur	292
	Sachverzeichnis	293