

1	Einleitung	1
1.1	Simulationsvarianten	4
2	Der Simulationsprozess	9
2.1	Modellkonzept und Modellstruktur	10
2.2	Entwicklung des Simulationsmodells	12
2.3	Simulation durchführen	14
2.4	Überprüfen des Simulationsmodells	15
2.5	Dokumentation	16
2.6	Kontrollfragen	18
2.7	Antworten der Kontrollfragen von Kap. 2	18
	Literatur	19
3	Simulationsmodelle	21
3.1	Allgemeiner Aufbau von Simulationsmodellen	24
3.2	Grafische Darstellung als Wirkungsgraph	26
3.3	Verhaltensbeschreibende Modelle	28
3.4	Gleichungsbasierte Modelle und deren Merkmale	30
3.4.1	Gewöhnliche Differenzialgleichungen	31
3.4.2	Partielle Differenzialgleichungen	34
3.4.3	Algebraisch-differenzielle Gleichungen	35
3.5	Lineare Modelle mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße	35
3.5.1	Übertragungsfunktionen	37
3.6	Grafische Darstellung als Blockschaltbild	50
3.7	Standardverfahren zur grafischen Modellierung für Systeme gewöhnlicher Differenzialgleichungen	59
3.8	Zustandsraumdarstellung	64
3.8.1	Regelungsnormalform	66
3.8.2	Anfangswerte der Zustandsgrößen	76
3.8.3	Zustandsraumdarstellung für Systeme mit mehreren Ein- und Ausgängen	79
		VII

3.9	Kontrollfragen	80
3.9.1	Antworten der Kontrollfragen	83
	Literatur	88
4	Numerische Integrationsverfahren	89
4.1	Integrationsverfahren für gewöhnliche Differenzialgleichungen	90
4.1.1	Das Euler-Verfahren	90
4.1.2	Das Runge–Kutta-Verfahren	97
4.1.3	Programmablauf einer numerischen Simulation	98
4.1.4	Weitere Integrationsverfahren	100
4.1.5	Steife Differenzialgleichungen	101
4.2	Integrationsverfahren für partielle Differenzialgleichungen	101
4.2.1	Das Finite-Differenzen-Verfahren	102
4.2.2	Das Finite-Elemente- und das Finite-Volumen-Verfahren	106
4.2.3	Programmablauf einer FEM-Berechnung	106
4.3	Wichtige Anforderungen an Integrationsverfahren	108
4.3.1	Stabilität	109
4.3.2	Genauigkeit	111
4.3.3	Rechenzeit	112
4.4	Kontrollfragen	112
4.5	Antworten der Kontrollfragen	113
	Literatur	113
5	Zeitdiskrete Systembeschreibung	115
5.1	Das Abtasttheorem	121
5.2	Kontrollfragen	122
5.3	Antworten der Kontrollfragen	122
	Literatur	122
6	Modellbildung	123
6.1	Analytische Modellbildung	124
6.2	Experimentelle Modellbildung	126
6.2.1	Die Fourier-Analyse	128
6.2.2	Sprung- und Impulsantwortanalyse	131
6.2.3	Frequenzgangmessung	133
6.2.4	Parameterschätzverfahren	135
6.3	Anfangswerte festlegen	139
6.4	Einheiten und Wertebereiche von Variablen	142
6.4.1	SI-Einheiten	143
6.4.2	Wertebereich von Variablen	144
6.5	Physikalische Modellierung	146
6.6	Modelle vereinfachen	149
6.6.1	Linearisierung von Modellen	149

6.6.2	Ordnungsreduktion.	152
6.6.3	Diskretisierung.	159
6.7	Kontrollfragen	162
6.8	Antworten der Kontrollfragen	163
	Literatur.	164
7	Einführende Beispiele zur Modellbildung	165
7.1	Exponentieller Wachstums- oder Zerfallsprozess	166
7.1.1	Modellkonzept und Modellstruktur	167
7.1.2	Entwicklung des Simulationsmodells	168
7.1.3	Simulation durchführen	168
7.1.4	Überprüfen des Simulationsmodells	168
7.2	Das Punktpendel, ein einfaches nichtlineares Modell	170
7.2.1	Modellkonzept und Modellstruktur	170
7.2.2	Entwicklung des Simulationsmodells	170
7.2.3	Simulation durchführen	171
7.2.4	Überprüfen des Simulationsmodells	171
7.3	Hydraulisches Ventil als Beispiel eines verhaltensbeschreibenden Modells	175
7.3.1	Modellkonzept und Modellstruktur	176
7.3.2	Entwicklung des Simulationsmodells	177
7.3.3	Simulation durchführen	179
7.3.4	Überprüfen des Simulationsmodells	179
7.4	Flugbahn eines Balls beim schiefen Wurf	180
7.4.1	Modellkonzept und Modellstruktur	183
7.4.2	Entwicklung des Simulationsmodells	183
7.4.3	Simulation durchführen	186
7.4.4	Überprüfen des Simulationsmodells	187
8	Weiterführende Beispiele aus dem Bereich der Mechatronik	191
8.1	Mechanik	191
8.1.1	Mehrmassenschwinger.	192
8.1.2	Reibung und Dämpfung.	194
8.1.3	Kontaktprobleme und Kontaktsteifigkeit	199
8.1.4	Mechanischer Festanschlag	204
8.2	Hydraulik	207
8.2.1	Hydraulikzylinder	208
8.2.2	Proportionalventil.	217
8.2.3	Hydraulischer Antrieb	223
8.2.4	Hydraulischer Antrieb mit Physikalischer Modellierung.	224
8.3	Digitale und zeitdiskrete Systeme	227
8.3.1	Zeitquantisierung und Totzeiten.	228
8.3.2	Amplitudenquantisierung.	233

8.4	Elektrische Antriebe	234
8.4.1	Ungeregelter Gleichstromantrieb	234
8.4.2	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb	237
8.4.3	Ungeregelter Gleichstromantrieb mit Physikalischer Modellierung	241
8.4.4	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb mit Physikalischer Modellierung	242
8.5	Elektrik	246
8.5.1	Dehnungsmessung mit DMS mit Physikalischer Modellierung	246
8.6	Tipps und Tricks	249
8.6.1	Verwendung differenzierender Bausteine	249
8.6.2	Algebraische Schleifen	253
8.6.3	Umgang mit Einheiten	256
8.6.4	Störgrößen	257
8.6.5	Sonderfunktionen in Simulink-Modellen	258
	Literatur	261
9	Simulation als Teil moderner Entwicklungsprozesse	263
9.1	Modellgestützte Softwareentwicklung	264
9.1.1	Rapid Controller Prototyping	267
9.1.2	Hardware-in-the-Loop	269
9.2	Gekoppelte Simulationen	271
	Literatur	274
10	Simulation mithilfe von künstlichen Neuronalen Netzen	275
10.1	Grundlagen Neuronaler Netze	275
10.2	Eignung flacher Neuronaler Netze zur Simulation dynamischen Verhaltens	279
10.2.1	Übertragungsfunktion bei einem linearen SISO-Glied	279
10.2.2	Zustandsraumdarstellung	287
10.2.3	Berechnung der Ableitungen der Ausgangsgröße	290
10.3	Standardtopologie Neuronaler Netze von Typ NARX	292
10.3.1	Erweiterung der Standardtopologie von NARX Netzwerken	294
10.3.2	One-Step-Ahead Prediction	301
	Literatur	302
11	Anhang	303
11.1	Einführung in MATLAB und Simulink	303
11.1.1	Numerische Berechnungen mit MATLAB	304
11.1.2	Simulink, ein graphischer Editor zur Aufstellung der Systemgleichungen	320
11.2	Übertragungsfunktionen im Zeit- und Laplace-Bereich	325

Inhaltsverzeichnis		XI
11.3	Elementare Übertragungsglieder	326
11.3.1	PT ₁ -Glieder	326
11.3.2	PT ₂ -Glieder	326
11.4	Korrespondenzen der Laplace-Transformation	326
11.5	Sprungantwort eines PT ₁ -Gliedes	327
11.6	Bode-Diagramm für PT ₂ -Glieder.	328
11.7	Wichtige Regelkreisglieder und deren Eigenschaften	328
11.8	Diskrete Zustandsraumdarstellung.	330
	Literatur.	333
Stichwortverzeichnis.		335