
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	116
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	163
7.3	Hydraulisches Ventil als Beispiel eines verhaltensbeschreibenden Modells	166
7.3.1	Modellkonzept und Modellstruktur	167
7.3.2	Entwicklung des Simulationsmodells	169
7.3.3	Simulation durchführen	170
7.3.4	Überprüfen des Simulationsmodells	171
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	177
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	193
8.2	Hydraulik	195
8.2.1	Hydraulikzylinder	197
8.2.2	Proportionalventil	206
8.2.3	Hydraulischer Antrieb	213

8.3	Digitale und zeitdiskrete Systeme	214
8.3.1	Zeitquantisierung und Totzeiten	214
8.3.2	Amplitudenquantisierung	218
8.4	Elektrische Antriebe	220
8.4.1	Ungeregelter Gleichstromantrieb	220
8.4.2	Strom- und drehzahl geregelter Servoantrieb	223
8.5	Tipps und Tricks	226
8.5.1	Verwendung differenzierender Bausteine	226
8.5.2	Algebraische Schleifen	229
8.5.3	Umgang mit Einheiten	232
8.5.4	Störgrößen	234
8.5.5	Sonderfunktionen in Simulink-Modellen	235
	Literatur	237
9	Simulation als Teil moderner Entwicklungsprozesse	239
9.1	Modellgestützte Softwareentwicklung	239
9.1.1	Rapid Controller Prototyping	243
9.1.2	Hardware-in-the-Loop	244
9.2	Gekoppelte Simulationen	246
	Literatur	249
10	Anhang	251
10.1	Einführung in MATLAB und Simulink	251
10.1.1	Numerische Berechnungen mit MATLAB	252
10.1.2	Simulink, ein graphischer Editor zur Aufstellung der Systemgleichungen	272
10.2	Übertragungsfunktionen im Zeit- und Laplace-Bereich	277
10.3	Elementare Übertragungsglieder	278
10.3.1	PT ₁ -Glieder	278
10.3.2	PT ₂ -Glieder	278
10.4	Korrespondenzen der Laplace-Transformation	278
10.5	Sprungantwort eines PT ₁ -Gliedes	278
10.6	Bode-Diagramm für PT ₂ -Glieder	280
10.7	Wichtige Regelkreisglieder und deren Eigenschaften	281
10.8	Diskrete Zustandsraumdarstellung	282
	Literatur	284
	Sachverzeichnis	285