

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Vorwort zur 2. Auflage</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung in MATLAB</b>	<b>11</b>
2.1 Eingaben.....	12
2.1.1 Direkte Eingabe.....	12
2.1.2 Der MATLAB-Editor.....	12
2.1.3 Indirekte Eingabe über Skript-Dateien.....	12
2.1.4 Indirekte Eingabe über Funktionsdateien.....	13
2.1.5 Kommandos im Zusammenhang mit function.....	14
2.2 Kommandos, Operationen, Werte, Funktionen.....	15
2.2.1 Nützliche Kommandos.....	15
2.2.2 Grundoperationen mit den Variablen a und b.....	16
2.2.3 Spezielle Werte und Variable, Cell Arrays.....	16
2.2.4 Auswahl häufig benötigter Funktionen.....	17
2.2.5 Operationen mit komplexen Zahlen.....	17
2.2.6 Trigonometrische Funktionen.....	18
2.3 Matrizen.....	23
2.3.1 Matrizen und die Eingabe ihrer Elemente.....	24
2.3.2 Eigenschaften einer Matrix.....	25
2.3.3 Spezielle Matrizen.....	30
2.3.4 Operationen mit einer Matrix.....	30
2.3.5 Operationen mit Matrizen.....	31
2.3.6 Bilden erweiterter Matrizen.....	33
2.4 Vektoren.....	35
2.4.1 Skalar und Vektor.....	35
2.4.2 Vektoren und die Eingabe ihrer Elemente.....	35
2.4.3 Operationen mit Vektoren.....	36
2.4.4 Operationen mit Vektoren – Element mit Element.....	45

2.5	Polynome .....	45
2.5.1	Eingabe von Polynomen .....	45
2.5.2	Der Grad eines Polynoms.....	46
2.5.3	Operationen mit Polynomen .....	46
2.6	Graphische Darstellungen .....	50
2.7	Function Handles .....	55
<b>3</b>	<b>Einführung in Simulink</b>	<b>57</b>
3.1	Der Funktionsblock.....	57
3.2	Eingabe- und Ausgabeblocke.....	58
3.2.1	Übergabe von Daten der Eingangssignale an das Modell.....	58
3.2.2	Ergebnisdarstellung und Ausgabe der Simulationsdaten .....	59
3.3	Signalverbindungen – Informationsaustausch.....	61
3.4	Algebraische Schleifen – Algebraic Loops .....	63
3.4.1	Systeme mit proportionalem sprungfähigem Verhalten.....	63
3.4.2	Algebraische Schleifen.....	64
3.4.3	Auflösen einer algebraischen Schleife .....	64
3.4.4	Einfügen eines Algebraic Constraint-Blockes .....	68
3.5	S-Functions .....	70
3.6	Maskieren von Systemen .....	73
3.7	Embedded MATLAB Functions .....	77
<b>4</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>83</b>
4.1	Das mathematische Modell .....	83
4.1.1	Variable.....	83
4.1.2	Gleichungen .....	84
4.1.3	Nebenbedingungen.....	84
4.1.4	Arten der Simulation mit mathematischen Modellen.....	84
4.1.5	Mathematische Modelle und Systeme.....	84
4.1.6	Mathematisches Modell zweier konkreter linearer Systeme.....	85
4.1.7	Signalflussplan eines abstrakten linearen Systems 1. Ordnung .....	89
4.1.8	Mathematisches Modell eines konkreten nichtlinearen Systems .....	89
4.1.9	Die numerische Lösung der Modellgleichungen.....	91
4.2	Prozessanalyse .....	94
4.2.1	Methoden der Prozessanalyse .....	94
4.2.2	Ablauf der Prozessanalyse .....	94
4.3	Erhaltungssatz der Masse.....	95
4.3.1	Massenbilanz.....	95
4.3.2	Energie-Masse-Beziehung .....	96

4.4	Erhaltungssatz der Energie – Energiebilanz .....	96
4.4.1	Potenzielle Energie.....	98
4.4.2	Kinetische Energie .....	99
4.4.3	Dissipation der Energie .....	99
4.4.4	Lagrange'sche Bewegungsgleichung 2. Art.....	100
4.4.5	Wärmeenergie .....	102
4.5	Erhaltungssatz des Impulses – Impulsbilanz .....	105
4.6	Beschreibung im Zustandsraum .....	105
4.6.1	Grundlagen zur Beschreibung konkreter Systeme .....	105
4.6.2	Allgemeine Aussagen zur Zustandsraumbeschreibung .....	106
4.6.3	Geometrische Deutung der Zustandsraumbeschreibung .....	107
4.6.4	Das Zustandsmodell .....	108
4.6.5	Zustandsgrößen .....	109
4.6.6	Systemgleichungen nichtlinearer dynamischer Systeme .....	110
4.7	Linearisierung nichtlinearer zeitinvarianter Systeme .....	112
4.7.1	Ableitung der Matrizen des linearisierten Systems .....	112
4.7.2	Nichtlineare Vektorfunktion $f$ der Differenzialgleichung .....	113
4.7.3	Nichtlineare Vektorfunktion $g$ der Ausgangsgleichung .....	114
4.7.4	Systemmatrix $A$ .....	114
4.7.5	Steuermatrix $B$ .....	115
4.7.6	Störmatrix $B_z$ .....	115
4.7.7	Ausgangsmatrix $C$ .....	116
4.7.8	Durchgangsmatrix $D$ der Steuergrößen .....	116
4.7.9	Durchgangsmatrix $D_z$ der Störgrößen .....	116
4.8	Standardform linearer, zeitinvarianter Systeme .....	117
4.8.1	Mehrgrößensysteme .....	117
4.8.2	Die linearen Systemgleichungen .....	117
4.8.3	Eingößensysteme .....	118
<b>5</b>	<b>Systeme und ihre Modelle</b> .....	<b>119</b>
5.1	Das System Stab-Wagen – stawa .....	119
5.1.1	Verallgemeinerte Koordinaten des Systems Stab-Wagen .....	120
5.1.2	System Stab-Wagen – nichtlineares Modell.....	121
5.1.3	Nichtlineare Differenzialgleichungen .....	124
5.1.4	System Stab-Wagen – linearisiertes Modell.....	127
5.2	Antrieb.....	133
5.2.1	Verallgemeinerte Koordinaten des Antriebs .....	134
5.2.2	Kinetische Energien .....	134
5.2.3	Potenzielle Energien des Antriebs.....	136
5.2.4	Dissipationen der Energie des Antriebs.....	136
5.2.5	Potenziale .....	136
5.2.6	Differenzialgleichung für die Geschwindigkeit .....	137
5.2.7	Differenzialgleichung für den Ankerstrom.....	138

5.2.8	Zustandsmodell des Antriebs .....	139
5.2.9	Vereinfachtes Modell des Antriebs .....	141
5.3	Inverses Pendel – ipendel .....	147
5.3.1	Bewegungsgleichungen des Systems 5. Ordnung .....	147
5.3.2	Linearisiertes Modell 5. Ordnung .....	150
5.3.3	Linearisiertes Zustandsmodell 5. Ordnung .....	151
5.3.4	Linearisiertes Modell 4. Ordnung .....	152
5.3.5	Linearisiertes Zustandsmodell 4. Ordnung .....	153
5.3.6	Eigenwerte des Inversen Pendels .....	154
5.3.7	Funktion zur Berechnung der Modellgleichungen .....	154
5.3.8	Signalflussplan des Inversen Pendels .....	157
5.4	Regelkreis .....	157
5.4.1	Regelstrecke – Inverses Pendel .....	157
5.4.2	Regeleinrichtung .....	167
5.4.3	Übertragungsfunktion der offenen Kette .....	172
5.4.4	Regelkreis .....	173
5.4.5	Simulation .....	176
5.5	Elektrisches Netzwerk – sprungfähiges System .....	179
5.5.1	Das mathematische Modell .....	180
5.5.2	Berechnung der Systemgleichungen mit nw_spf .....	184
5.5.3	Übertragungsfunktion .....	184
5.5.4	Signalflussplan .....	185
5.6	RLC-Netzwerk als Brückenschaltung .....	186
5.6.1	Mathematisches Modell .....	186
5.6.2	Vektor-Matrix-Gleichungen des Zustandsmodells .....	189
5.6.3	Berechnung der Systemgleichungen mit bruecke .....	189
5.6.4	Signalflussplan der Brückenschaltung .....	191
5.6.5	Übertragungsfunktion der Brückenschaltung .....	191
5.6.6	Parameterproportionen der Brückenschaltung .....	192
<b>6</b>	<b>Mathematische Beschreibung linearer, zeitinvarianter Systeme</b> .....	<b>195</b>
6.1	Lineare Übertragungsglieder .....	196
6.1.1	Eindeutigkeit und Linearität .....	196
6.1.2	Aktive und passive Übertragungsglieder .....	197
6.1.3	Speichervermögen von Übertragungsgliedern .....	197
6.1.4	Prinzipien linearer Übertragungsglieder .....	197
6.2	Lineare Differenzialgleichungen und ihre Lösung .....	199
6.2.1	Grundlagen .....	199
6.2.2	Numerische Lösung von Differenzialgleichungen .....	200
6.3	Die Laplacetransformation .....	204
6.3.1	Definition der Laplacetransformation .....	204
6.3.2	Die M-functions laplace und ilaplace .....	205

6.3.3	Regeln für das Rechnen mit der Laplacetransformation .....	207
6.3.4	Lösen linearer, zeitinvarianter Differenzialgleichungen .....	213
6.4	Die Übertragungsfunktion .....	222
6.4.1	Übertragungsfunktion in der Polynomform .....	223
6.4.2	Übertragungsfunktion in der Pol-Nullstellen-Form.....	226
6.4.3	Übertragungsfunktion in der Zeitkonstantenform .....	228
6.5	Der Frequenzgang .....	229
6.5.1	Antwort auf ein komplexes Eingangssignal .....	229
6.5.2	Die Ortskurve des Frequenzganges .....	230
6.5.3	Berechnung der Ortskurve mit der M-function nyquist.....	232
6.5.4	Spezielle Punkte der Ortskurve .....	232
6.6	Das Frequenzkennlinien-Diagramm.....	238
6.6.1	Systeme minimaler Phase und Allpassglieder.....	239
6.6.2	Logarithmischer Amplituden- und Phasengang .....	240
6.6.3	Amplituden- und Phasengänge mit der M-function bode.....	241
6.6.4	Bode-Diagramme typischer Grundglieder.....	242
6.6.5	Bode-Diagramme von Systemen nichtminimaler Phase .....	252
6.7	Das Wurzelortverfahren .....	261
6.7.1	Einführung.....	261
6.7.2	Die Methode der Wurzelortskurve nach Evans .....	263
6.7.3	Die Wurzelortskurve mit der M-function rtool .....	273
6.7.4	Das Wurzelortverfahren für beliebige Parameter .....	275
<b>7</b>	<b>Testsignale und Zeitantworten</b> .....	<b>283</b>
7.1	Anfangswertantwort mit der M-function initial .....	283
7.2	Sprungantwort – Übergangsfunktion .....	285
7.2.1	Einheitssprung .....	285
7.2.2	Sprungantwort .....	286
7.2.3	Übergangsfunktion .....	286
7.2.4	Die Übergangsfunktion mit der M-function step.....	286
7.3	Impulsantwort – Gewichtsfunktion .....	288
7.3.1	Die Impulsfunktion .....	288
7.3.2	Die Stoßfunktion .....	289
7.3.3	Die Gewichtsfunktion.....	290
7.3.4	Die Gewichtsfunktion mit der M-function impulse.....	291
7.4	Antwort auf beliebige Signale mit der M-function lsim.....	293
7.5	Zwei interactive graphical user interfaces (GUI) .....	297
7.5.1	Der LTI Viewer mit der M-function ltiview .....	297
7.5.2	Der SISO Design Tool mit der M-function sisotool.....	297

<b>8</b>	<b>Systemeigenschaften</b>	<b>299</b>
8.1	Das Schwingungsglied .....	299
8.1.1	Differenzialgleichung eines Schwingungsgliedes .....	299
8.1.2	Übertragungsfunktion eines Schwingungsgliedes .....	300
8.1.3	Kenngrößen eines Schwingungsgliedes .....	300
8.1.4	Die Gewichtsfunktion eines Schwingungsgliedes .....	301
8.1.5	Die Übergangsfunktion eines Schwingungsgliedes .....	302
8.1.6	Die Einhüllenden der Übergangsfunktion .....	302
8.1.7	Eigenschaften eines Übertragungsgliedes mit der M-function damp .....	302
8.2	Stationäre Verstärkung mit der M-function dcgain .....	305
8.3	Eigenschaften der Systemmatrix A .....	307
8.3.1	Lösungsansatz für die Eigenbewegung des Systems .....	308
8.3.2	Poly, roots und eig zur Berechnung von Systemgrößen .....	310
8.4	Stabilität linearer Systeme .....	312
8.4.1	Lösungen der charakteristischen Gleichung .....	313
8.4.2	Das Hurwitz-Kriterium .....	315
8.4.3	Von der offenen Kette zum geschlossenen Kreis .....	315
8.4.4	Das Nyquist-Kriterium .....	317
8.4.5	Das allgemeine Nyquist-Kriterium .....	318
8.4.6	Stabilitätswerte mit der M-function margin .....	319
8.4.7	Stabile offene Systeme mit Totzeit .....	322
8.5	Normalformen der Systemmatrix .....	326
8.5.1	Die Diagonalform der Zustandsgleichungen .....	327
8.5.2	Regelungsnormalform für Eingößensysteme .....	330
8.5.3	Beobachtungsnormalform für Eingößensysteme .....	336
8.5.4	Regelungs- und Beobachtungsnormalform mit der M-function ss2ss .....	341
8.6	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	341
8.6.1	Steuerbarkeit .....	341
8.6.2	Kriterium der Steuerbarkeit nach Kalman .....	344
8.6.3	Beobachtbarkeit .....	346
8.6.4	Kriterium der Beobachtbarkeit nach Kalman .....	348
8.6.5	Kanonische Zerlegung eines Systems .....	350
8.6.6	Minimalkonfiguration eines Systems .....	357
8.7	Transformationen .....	361
8.7.1	Zustandsmodelle .....	361
8.7.2	Übertragungsfunktion in Polynomform .....	368
8.7.3	Übertragungsfunktion in Pol-Nullstellen-Form .....	371
8.7.4	Signalflussplan .....	371

---

<b>9</b>	<b>Kopplung von Systemen</b>	<b>375</b>
9.1	Beschreibung durch Übertragungsfunktionen .....	375
9.1.1	Reihenschaltung mit der M-function series.....	375
9.1.2	Parallelschaltung mit der M-function parallel .....	377
9.1.3	Rückführschaltung mit der M-function feedback.....	378
9.2	Beschreibung durch Zustandsgleichungen .....	381
9.2.1	Vereinigung nicht gekoppelter Systeme mit der M-function append.....	381
9.2.2	Reihenschaltung mit der M-function series.....	382
9.2.3	Parallelschaltung mit der M-function parallel .....	386
9.2.4	Rückführschaltung mit der M-function feedback.....	391
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>397</b>
<b>Index</b>		<b>407</b>