

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Einführung in MATLAB</b>	<b>7</b>
2.1 Eingaben	7
2.1.1 Direkte Eingabe	7
2.1.2 Der MATLAB Editor	8
2.1.3 Indirekte Eingabe über Skrip-Dateien	8
2.1.4 Indirekte Eingabe über Funktionsdateien	8
2.2 Kommandos, Operationen, Werte und Funktionen	9
2.2.1 Nützliche Kommandos	9
2.2.2 Grundoperationen mit den Variablen a und b	10
2.2.3 Spezielle Werte	11
2.2.4 Auswahl häufig benötigter Funktionen	11
2.2.5 Operationen mit komplexen Zahlen	12
2.3 Matrizen	12
2.3.1 Matrizen und die Eingabe ihrer Elemente	13
2.3.2 Information über eine Matrix	14
2.3.2.1 Der Typ einer Matrix	14
2.3.2.2 Quadratische Matrizen	14
2.3.2.3 Die mögliche Anzahl quadratischer Untermatrizen einer Matrix	15
2.3.2.4 Die Determinante einer quadratischen Matrix	15
2.3.2.5 Singuläre und nichtsinguläre quadratische Matrizen	15
2.3.2.6 Der Rang einer Matrix	16
2.3.2.7 Die Transponierte einer Matrix	17
2.3.2.8 Die Inverse einer quadratischen Matrix	17
2.3.2.9 Die Werte der Diagonalelemente einer Matrix	18
2.3.2.10 Die Spur einer Matrix	18
2.3.3 Spezielle Matrizen	18
2.3.4 Operationen mit einer Matrix	19
2.3.5 Operationen mit Matrizen	20
2.3.5.1 Matrixoperationen	21
2.3.5.2 Matrixoperationen – Element mit Element	21
2.3.6 Bilden erweiterter Matrizen	22
2.3.6.1 Stapeln von Matrizen	22
2.3.6.2 Aneinanderreihen von Matrizen	23
2.4 Vektoren	23
2.4.1 Skalar und Vektor	23
2.4.2 Vektoren und die Eingabe ihrer Elemente	24
2.4.3 Operationen mit Vektoren	24
2.4.3.1 Betrag eines Vektors	25

X Inhaltsverzeichnis

2.4.3.2	Abstand zwischen zwei Punkten im dreidimensionalen Raum.....	25
2.4.3.3	Skalarprodukt.....	28
2.4.3.4	Winkel zwischen zwei Vektoren .....	29
2.4.3.5	Vektorprodukt.....	29
2.4.4	Operationen mit Vektoren - Element mit Element.....	31
2.5	Polynome.....	32
2.5.1	Eingabe von Polynomen.....	32
2.5.2	Der Grad eines Polynoms.....	33
2.5.3	Operationen mit Polynomen.....	33
2.5.3.1	Multiplikation von Polynomen .....	33
2.5.3.2	Division von Polynomen .....	33
2.5.3.3	Addition und Subtraktion von Polynomen .....	34
2.5.3.4	Nullstellen bzw. Wurzeln eines Polynoms .....	35
2.5.3.5	Berechnung des zu seinen Nullstellen gehörenden Polynoms.....	35
2.5.3.6	Wert eines Polynoms an einer vorgegebenen Stelle .....	36
2.5.3.7	Ableitung eines Polynoms .....	36
2.6	Graphische Darstellungen.....	37
<b>3.</b>	<b>Einführung in Simulink</b> .....	<b>41</b>
3.1	Der Funktionsblock .....	41
3.2	Eingabe- und Ausgabeblocke .....	42
3.2.1	Übergabe von Daten der Eingangssignale an das Modell .....	42
3.2.2	Darstellung der Ergebnisse oder Ausgabe der Daten der Simulation.....	43
3.3	Signalverbindungen – Informationsaustausch .....	44
3.4	Algebraische Schleifen – Algebraic Loops.....	47
3.4.1	Systeme mit proportionalem sprungfähigem Verhalten.....	47
3.4.2	Algebraische Schleifen.....	47
3.4.3	Auflösen einer algebraischen Schleife .....	47
3.4.4	Einfügen eines <i>Algebraic Constraint</i> -Blockes .....	51
3.5	S-Functions.....	53
3.6	Maskieren von Systemen.....	53
3.7	Embedded MATLAB Functions.....	56
<b>4.</b>	<b>Modellbildung</b> .....	<b>59</b>
4.1	Das mathematische Modell.....	59
4.1.1	Variable .....	59
4.1.1.1	Unabhängige Variable .....	59
4.1.1.2	Abhängige Variable .....	59
4.1.1.3	Konstruktive und technologische Größen.....	59
4.1.2	Gleichungen .....	59
4.1.3	Nebenbedingungen.....	60
4.1.4	Arten der Simulation mit mathematischen Modellen .....	60
4.1.5	Mathematische Modelle und Systeme.....	60
4.1.5.1	Auslegungsmodelle .....	60
4.1.5.2	Betriebsmodelle .....	60
4.1.5.3	Automatisierungsanlage .....	60

4.1.5.4	Automatisierungssystem .....	60
4.1.5.5	Konkrete und abstrakte Systeme.....	61
4.1.6	Mathematisches Modell zweier konkreter linearer Systeme .....	61
4.1.6.1	Mathematische Modelle der beiden konkreten linearen Systeme .....	61
4.1.6.2	Abstraktes System – mathematisches Modell der linearen Systeme .....	62
4.1.6.3	Abstraktes System – Lösung der linearen Differenzialgleichung 1. Ord.....	62
4.1.6.4	Gesamtbewegung in allgemeiner Form .....	64
4.1.6.5	Symbolische Lösung mit der M-function <i>dsolve</i> .....	64
4.1.7	Signalflussplan eines abstrakten linearen Systems 1. Ord.....	65
4.1.8	Mathematisches Modell eines konkreten nichtlinearen Systems .....	65
4.1.8.1	Aufgabenstellung.....	65
4.1.8.2	Modellbildung .....	66
4.1.8.3	Differenzialgleichung des Füllstandes .....	66
4.1.8.4	Signalflussplan des nichtlinearen Systems .....	66
4.1.9	Die numerische Lösung der Modellgleichungen.....	67
4.2	Prozessanalyse .....	68
4.2.1	Methoden der Prozessanalyse .....	68
4.2.2	Ablauf der Prozessanalyse.....	69
4.3	Erhaltungssatz der Masse.....	69
4.3.1	Massenbilanz.....	69
4.3.2	Energie-Masse-Beziehung.....	70
4.4	Erhaltungssatz der Energie – Energiebilanz .....	70
4.4.1	Potentielle Energie .....	71
4.4.1.1	Masse, in der Höhe $h$ ruhend .....	71
4.4.1.2	Kondensator.....	71
4.4.1.3	Feder – Schraubenfeder .....	72
4.4.1.4	Torsionsstab – Torsionsbeanspruchte Feder.....	72
4.4.2	Kinetische Energie .....	73
4.4.2.1	Masse, reibungsfrei geradlinig bewegt – Translation .....	73
4.4.2.2	Masse, reibungsfrei drehend – Rotation .....	73
4.4.2.3	Spule.....	74
4.4.3	Dissipation der Energie .....	75
4.4.3.1	Kolben, geschwindigkeitsproportional gedämpft – Translation .....	75
4.4.3.2	Rotierende Scheibe, geschwindigkeitsproportional gedämpft.....	75
4.4.3.3	Ohmscher Widerstand .....	76
4.4.4	Lagrange'sche Bewegungsgleichung 2. Art .....	76
4.4.4.1	Die Bewegungsgleichungen .....	77
4.4.4.2	Verallgemeinerte Koordinaten.....	77
4.4.4.3	Verallgemeinerte Geschwindigkeiten.....	77
4.4.5	Wärmeenergie .....	78
4.4.5.1	Innere Energie – thermodynamisches System .....	78
4.4.5.2	Energieänderung durch Wärmeübergang .....	78
4.4.5.3	Volumenänderungsarbeit.....	79
4.4.5.4	Enthalpie.....	79
4.4.5.5	Enthalpieanteile .....	79
4.4.5.6	Wärmeanteile.....	80

XII Inhaltsverzeichnis

4.4.5.7 Technische Arbeit.....	80
4.5 Erhaltungssatz des Impulses – Impulsbilanz .....	81
4.6 Beschreibung im Zustandsraum.....	81
4.6.1 Grundlagen zur Beschreibung konkreter Systeme .....	81
4.6.2 Allgemeine Aussagen zur Beschreibung im Zustandsraum .....	82
4.6.3 Geometrische Deutung der Beschreibung im Zustandsraum .....	83
4.6.4 Das Zustandsmodell .....	83
4.6.5 Zustandsgrößen .....	84
4.6.6 Systemgleichungen nichtlinearer dynamischer Systeme .....	85
4.6.6.1 Nichtlinear zeitvariables System .....	85
4.6.6.2 Nichtlinear zeitinvariantes Systems.....	85
4.7 Linearisierung nichtlinearer zeitinvarianter Systeme.....	87
4.7.1 Ableitung der Matrizen des linearisierten Systems .....	87
4.7.2 Die nichtlineare Vektorfunktion $f$ der Differenzialgleichung.....	88
4.7.3 Die nichtlineare Vektorfunktion $g$ der Ausgangsgleichung .....	89
4.7.4 Systemmatrix $A$ .....	89
4.7.5 Steuermatrix $B$ .....	90
4.7.6 Störmatrix $B_z$ .....	90
4.7.7 Ausgangsmatrix $C$ .....	90
4.7.8 Durchgangsmatrix $D$ der Steuergröße.....	91
4.7.9 Durchgangsmatrix $D_z$ der Störgröße .....	91
4.8 Linear zeitinvariante Systeme in der Standardform.....	92
4.8.1 Mehrgrößensysteme .....	92
4.8.2 Die linearen Systemgleichungen .....	92
4.8.3 Eingrößensysteme .....	93
4.8.4 Lineare Zustandsmodelle mit der M-function $ss$ .....	94
<b>5. Systeme und ihre mathematischen Modelle</b> .....	<b>95</b>
5.1 Das System Stab-Wagen.....	95
5.1.1 Verallgemeinerte Koordinaten des Systems Stab-Wagen .....	96
5.1.1.1 Schwerpunkt des Stabes .....	96
5.1.1.2 Symbolische Berechnung der Schwerpunktkoordinaten .....	97
5.1.1.3 Schwerpunkt des Wagens .....	97
5.1.2 System Stab-Wagen - Nichtlineares Modell .....	97
5.1.2.1 Verallgemeinerte Koordinaten.....	97
5.1.2.2 Kinetische Energien.....	97
5.1.2.3 Potentielle Energie.....	98
5.1.2.4 Dissipation der Energie.....	98
5.1.2.5 Potentiale .....	98
5.1.2.6 Nichtlineare Differenzialgleichung des Winkels .....	98
5.1.2.7 Nichtlineare Differenzialgleichung des Weges.....	99
5.1.3 Die nichtlinearen Differenzialgleichungen des Systems Stab-Wagen .....	100
5.1.4 System Stab-Wagen – linearisiertes Modell.....	102
5.1.4.1 Linearitätsbereich .....	102
5.1.4.2 Vektor-Matrix-Differenzialgleichung für den Linearitätsbereich.....	103
5.1.4.3 Arbeitspunkt .....	103

5.1.4.4	Vektor-Matrix-Differenzialgleichung des linearisierten Modells.....	103
5.1.4.5	Vektor-Matrix-Ausgangsgleichung des linearisierten Modells .....	104
5.1.4.6	Eigenwerte des Systems Stab-Wagen mit den M-functions <i>eig</i> und <i>esort</i> ....	104
5.1.5	Signalflussplan des linearisierten Stab-Wagen-Modells .....	105
5.2	Antrieb – Gleichstrom-Scheibenläufer-Motor .....	105
5.2.1	Grundgleichungen – elektrische Seite .....	105
5.2.1.1	Spannungsbilanz.....	105
5.2.1.2	Geschwindigkeit eines Seilpunktes .....	106
5.2.1.3	Im Motor induzierte Spannung.....	107
5.2.1.4	Differenzialgleichung für den Ankerstrom.....	107
5.2.2	Grundgleichungen – mechanische Seite.....	107
5.2.2.1	Mechanisch-elektrische Kopplung des Motors.....	107
5.2.2.2	Beschleunigungsmoment.....	107
5.2.2.3	Lastmoment .....	108
5.2.2.4	Gesamtmoment des Motors .....	108
5.2.2.5	Differenzialgleichung für die Geschwindigkeit eines Seilpunktes .....	108
5.2.3	Zustandsbeschreibung des Antriebs .....	108
5.2.3.1	Vektor-Matrix-Differenzialgleichung.....	108
5.2.3.2	Vektor-Matrix-Ausgangsgleichung .....	108
5.2.3.3	Signalflussplan des Antriebs.....	109
5.2.3.4	Eigenwerte des Antriebs .....	109
5.2.4	Vereinfachtes Modell des Gleichstrom-Scheibenläufer-Motors .....	110
5.2.4.1	Mechanische und elektrische Zeitkonstante .....	110
5.2.4.2	Grundgleichungen – elektrische Seite .....	110
5.2.4.3	Differenzialgleichung des reduzierten Antriebsmodells.....	111
5.2.4.4	Eigenwert des reduzierten Gleichstrom-Scheibenläufer-Motors .....	111
5.2.4.5	Reduzieren der Modellordnung mit den M-functions <i>modred</i> und <i>ssdelete</i> ..	111
5.2.4.6	Signalflussplan des reduzierten Modells .....	112
5.2.4.7	Funktion zur Berechnung der Modellgleichungen.....	112
5.3	Inverses Pendel .....	113
5.3.1	Die Seilkraft als Koppelgröße zwischen den Teilsystemen.....	113
5.3.2	Vektor-Matrix-Differenzialgleichung .....	114
5.3.3	Vektor-Matrix-Ausgangsgleichung.....	115
5.3.4	Eigenwerte des Inversen Pendels, die M-functions <i>eig</i> und <i>esort</i> .....	115
5.3.5	Funktion zur Berechnung der Modellgleichungen .....	115
5.3.6	Signalflussplan des Inversen Pendels.....	116
5.4	Modellregelkreis .....	116
5.4.1	Die Regelstrecke .....	117
5.4.1.1	Die Systemgrößen.....	117
5.4.1.2	Die Zustandsgleichungen.....	118
5.4.1.3	Die Ausgangsgleichungen .....	119
5.4.1.4	Das mathematische Modell im Zustandsraum.....	119
5.4.1.5	Ausgangsgleichung und Matrixübertragungsfunktion.....	119
5.4.1.6	Ausgangsgröße Kondensatorspannung über $C_2$ .....	120
5.4.1.7	Ausgangsgröße Gesamtstrom der Regelstrecke.....	121
5.4.2	Soll-Istwert-Vergleicher .....	121

XIV Inhaltsverzeichnis

5.4.3	PI-Regler .....	122
5.4.4	Stellglied .....	123
5.4.5	Signalflussplan des Modellregelkreises in der Standardform .....	124
5.4.5.1	Übertragungsfunktionen der offenen Kette .....	124
5.4.5.2	Gleichungen des Regelkreises .....	125
5.4.5.3	Führungsübertragungsfunktion .....	125
5.4.5.4	Störübertragungsfunktion .....	125
5.4.6	Fehlerfunktionen des geschlossenen Systems .....	126
5.4.6.1	Allgemeine Beziehung .....	126
5.4.6.2	Fehlerfunktion bei Änderung der Führungsgröße .....	126
5.4.6.3	Fehlerfunktion bei Änderung der Störgröße .....	127
5.4.6.4	Funktion zur Berechnung des Modellregelkreises .....	127
5.5	Elektrisches Netzwerk – sprungfähiges System .....	127
5.5.1	Das mathematische Modell .....	128
5.5.2	Lineare, zeitinvariante Differenzialgleichung 2. Ordnung .....	129
5.5.3	Übertragungsfunktion des sprungfähigen Netzwerkes .....	129
5.5.4	Zustandsraummodell .....	129
5.5.5	Funktion zur Berechnung der Matrizen des Netzwerkes .....	131
5.6	RLC-Netzwerk als Brückenschaltung .....	131
5.6.1	Mathematisches Modell .....	132
5.6.1.1	Maschengleichungen .....	132
5.6.1.2	Zustandsgrößen .....	133
5.6.1.3	Differenzialgleichungen der Zustandsgrößen .....	133
5.6.1.4	Ausgangsgleichung .....	133
5.6.2	Vektor-Matrix-Gleichungen des Zustandsmodells .....	134
5.6.3	Signalflussplan der Brückenschaltung .....	134
5.6.4	Funktion zur Berechnung der Modellgleichungen .....	135
5.6.5	Übertragungsfunktion der Brückenschaltung .....	135
5.6.6	Parameterproportionen der Brückenschaltung .....	135
<b>6.</b>	<b>Mathematische Beschreibung linearer, zeitinvarianter Systeme</b> .....	<b>137</b>
6.1	Lineare Übertragungsglieder .....	137
6.1.1	Eindeutigkeit und Linearität .....	137
6.1.1.1	Eindeutigkeit .....	138
6.1.1.2	Linearität .....	138
6.1.2	Aktive und passive Übertragungsglieder .....	138
6.1.2.1	Aktive Übertragungsglieder .....	138
6.1.2.2	Passive Übertragungsglieder .....	139
6.1.3	Speichervermögen von Übertragungsgliedern .....	139
6.1.4	Prinzipien linearer Übertragungsglieder .....	139
6.1.4.1	Prinzip der Zeitinvarianz .....	139
6.1.4.2	Prinzip der Homogenität .....	139
6.1.4.3	Prinzip der Superposition .....	139
6.1.4.4	Prinzip der Rückwirkungsfreiheit .....	140
6.1.4.5	Prinzip der Linearität .....	140
6.1.4.6	Prinzip der Ortsunabhängigkeit der Systemparameter .....	140

6.1.4.7	Grundeigenschaften eines Systems.....	140
6.2	Lineare Differenzialgleichungen und ihre Lösung .....	141
6.2.1	Grundlagen .....	141
6.2.2	Numerische Lösung von Differenzialgleichungen .....	141
6.2.2.1	Zustandsgleichungen für sprungfähige Eingrößensysteme.....	143
6.2.2.2	Lösung der Dgl. eines Eingrößensystems mit der M-function <i>ode45</i> .....	143
6.3	Die Laplacetransformation .....	144
6.3.1	Definition der Laplacetransformation .....	145
6.3.2	Die M-functions <i>laplace</i> und <i>ilaplace</i> .....	146
6.3.3	Regeln für das Rechnen mit der Laplacetransformation .....	147
6.3.3.1	Additionssatz .....	147
6.3.3.2	Ähnlichkeitssatz.....	148
6.3.3.3	Dämpfungssatz .....	149
6.3.3.4	Verschiebungssatz .....	149
6.3.3.5	Differenziationssatz .....	150
6.3.3.6	Integralsatz .....	151
6.3.3.7	Anfangswertsatz .....	152
6.3.3.8	Endwertsatz .....	152
6.3.4	Lösen von linearen, zeitinvarianten Differenzialgleichungen .....	153
6.3.4.1	Die Laplacetransformierte einer Differenzialgleichung .....	153
6.3.4.2	Partialbruchzerlegung.....	156
6.4	Die Übertragungsfunktion .....	160
6.4.1	Übertragungsfunktion in der Polynomform .....	160
6.4.1.1	Polynomform mit der M-function <i>tf</i> .....	161
6.4.1.2	Systemparameter mit den M-functions <i>tfdata</i> und <i>celldisp</i> .....	162
6.4.1.3	Pole und Nullstellen mit der M-function <i>pzmap</i> .....	163
6.4.2	Übertragungsfunktion in der Pol-Nullstellen-Form .....	164
6.4.2.1	Pol-Nullstellen-Form mit der M-function <i>zpk</i> .....	165
6.4.2.2	Systemparameter mit der M-function <i>zpkdata</i> .....	166
6.4.3	Übertragungsfunktion in der Zeitkonstantenform .....	167
6.5	Der Frequenzgang.....	168
6.5.1	Die Antwort auf ein komplexes harmonisches Eingangssignal.....	168
6.5.2	Die Ortskurve als graphische Darstellung des Frequenzganges .....	169
6.5.3	Berechnung der Ortskurve mit der M-function <i>nyquist</i> .....	170
6.5.4	Spezielle Punkte der Ortskurve .....	171
6.5.4.1	$\omega = 0$ bei Übertragungsgliedern mit Ausgleich .....	171
6.5.4.2	$\omega = 0$ bei Übertragungsgliedern ohne Ausgleich.....	171
6.5.4.3	$\omega \rightarrow \infty$ bei Übertragungsgliedern mit oder ohne Ausgleich .....	172
6.6	Das Frequenzkennlinien-Diagramm .....	174
6.6.1	Systeme minimaler Phase und Allpassglieder .....	174
6.6.2	Logarithmischer Amplituden- und Phasengang .....	175
6.6.2.1	Zerlegung des Frequenzganges in seinen Real- und Imaginärteil.....	175
6.6.2.2	Zerlegung des Frequenzganges in seine Amplitude und Phase .....	175
6.6.3	Amplituden- und Phasengänge mit der M-function <i>bode</i> .....	176
6.6.4	Bode-Diagramme typischer Grundglieder.....	177
6.6.4.1	Das Proportionalglied, <i>P</i> -Glied .....	177

6.6.4.2	Verzögerungsglied 1. Ordnung, $T_1$ -Glied .....	177
6.6.4.3	Das Integrierglied, $I$ -Glied.....	180
6.6.4.4	Vorhaltglied 1. Ordnung, $T_{D1}$ -Glied .....	181
6.6.4.5	Differenzierglied, ideales $D$ -Glied.....	182
6.6.4.6	Schwingungsglied, $T_{2d}$ -Glied.....	182
6.6.5	Bode-Diagramme von Systemen nichtminimaler Phase .....	185
6.6.5.1	Das Allpassglied .....	185
6.6.5.2	Das Totzeitglied - $T_r$ -Glied .....	186
6.7	Das Wurzelortverfahren.....	188
6.7.1	Einführung.....	188
6.7.2	Die Methode der Wurzelortskurve nach Evans.....	191
6.7.2.1	Die Wurzelortskurve mit den M-functions <i>rlocus</i> und <i>rlocfind</i> .....	191
6.7.2.2	Grundlegende Regeln des Wurzelortverfahrens.....	192
6.7.3	Die Wurzelortskurve mit der M-function <i>rltool</i> .....	198
6.7.4	Das Wurzelortverfahren für beliebige Parameter .....	199
<b>7.</b>	<b>Testsignale und Zeitantworten</b> .....	<b>205</b>
7.1	Anfangswertantwort mit der M-function <i>initial</i> .....	205
7.2	Sprungantwort - Übergangsfunktion.....	207
7.2.1	Einheitssprung.....	207
7.2.2	Sprungantwort .....	207
7.2.3	Übergangsfunktion .....	207
7.2.4	Die Übergangsfunktion mit der M-function <i>step</i> .....	208
7.3	Impulsantwort - Gewichtsfunktion .....	209
7.3.1	Die Impulsfunktion .....	209
7.3.2	Die Stoßfunktion .....	210
7.3.3	Die Gewichtsfunktion .....	211
7.3.4	Die Gewichtsfunktion mit der M-function <i>impulse</i> .....	212
7.4	Antwort mit der M-function <i>lsim</i> auf beliebige Signale .....	213
7.5	Der <i>LTI Viewer</i> mit der M-function <i>ltiview</i> .....	216
<b>8.</b>	<b>Systemeigenschaften</b> .....	<b>217</b>
8.1	Das Schwingungsglied.....	217
8.1.1	Differenzialgleichung eines Schwingungsgliedes .....	217
8.1.2	Übertragungsfunktion eines Schwingungsgliedes.....	217
8.1.3	Kenngrößen eines Schwingungsgliedes .....	218
8.1.4	Die Gewichtsfunktion eines Schwingungsgliedes.....	219
8.1.5	Die Übergangsfunktion eines Schwingungsgliedes .....	219
8.1.6	Die Einhüllenden der Übergangsfunktion .....	219
8.1.7	Eigenschaften eines Übertragungsgliedes mit der M-function <i>damp</i> .....	220
8.2	Stationäre Verstärkung mit der M-function <i>dcgain</i> .....	221
8.3	Eigenschaften der Systemmatrix $A$ .....	223
8.3.1	Lösungsansatz für die Eigenbewegung des Systems.....	224
8.3.2	M-functions <i>poly</i> , <i>roots</i> und <i>eig</i> zur Berechnung von Systemgrößen .....	226
8.4	Stabilität linearer Systeme .....	227
8.4.1	Lösungen der charakteristischen Gleichung.....	228



8.4.2	Das Hurwitz-Kriterium .....	230
8.4.3	Von der offenen Kette zum geschlossenen Kreis .....	231
8.4.4	Das Nyquist-Kriterium .....	232
8.4.5	Das allgemeine Nyquist-Kriterium.....	233
8.4.6	Berechnung von Stabilitätswerten mit der M-function <i>margin</i> .....	234
8.4.7	Stabile offene Systeme mit Totzeit.....	236
8.5	Normalformen der Systemmatrix .....	239
8.5.1	Transformation der Zustandsgleichungen in die Diagonalfom .....	239
8.5.1.1	Die Systemmatrix A .....	239
8.5.1.2	Transformation der Standardform in die Diagonalfom .....	240
8.5.1.3	Von der Standard- in die Diagonalfom mit der M-function <i>canon</i> .....	241
8.5.2	Regelungsnormalform für Eingrößensysteme .....	243
8.5.2.1	Regelungsnormalform aus der Standardform .....	243
8.5.2.2	Regelungsnormalform aus der Übertragungsfunktion .....	244
8.5.2.3	Regelungsnormalform mit der function <i>rn_form.m</i> .....	246
8.5.3	Beobachtungsnormalform für Eingrößensysteme .....	248
8.5.3.1	Analogien zwischen der Beobachtungs- und Regelungsnormalform .....	248
8.5.3.2	Beobachtungsnormalform mit der function <i>bn_form</i> .....	249
8.5.4	Regelungs- und Beobachtungsnormalform mit der M-function <i>ss2ss</i> .....	250
8.6	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	251
8.6.1	Steuerbarkeit .....	251
8.6.2	Kriterium der Steuerbarkeit nach Kalman .....	253
8.6.2.1	Die Steuerbarkeitsmatrix und ihr Rang.....	253
8.6.2.2	Steuerbarkeitstest mit der M-function <i>ctrb</i> und anderen M-functions .....	253
8.6.3	Beobachtbarkeit.....	254
8.6.4	Kriterium der Beobachtbarkeit nach Kalman .....	256
8.6.4.1	Die Beobachtbarkeitsmatrix und ihr Rang.....	256
8.6.4.2	Beobachtbarkeitstest mit der M-function <i>obsv</i> und anderen M-functions .....	256
8.6.5	Kanonische Zerlegung eines Systems .....	257
8.6.5.1	Zerlegung nach seiner Steuerbarkeit mit der M-function <i>ctrbf</i> .....	257
8.6.5.2	Zerlegung nach seiner Beobachtbarkeit mit der M-function <i>obsvf</i> .....	259
8.6.6	Minimalkonfiguration eines Systems .....	261
8.6.6.1	Die Matrixübertragungsfunktion und die Ausgangsgleichungen.....	261
8.6.6.2	Die M-function <i>minreal</i> zur Bestimmung der Minimalkonfiguration .....	262
8.7	Transformationen.....	265
8.7.1	Zustandsmodelle.....	265
8.7.1.1	Transformation in die Polynomform mit der M-function <i>ss2tf</i> .....	266
8.7.1.2	Transformation in die Polynomform mit der M-function <i>tf</i> .....	267
8.7.1.3	Transformation in die Pol-Nullstellen-Form mit der M-function <i>ss2zp</i> .....	268
8.7.2	Übertragungsfunktion in Polynomform .....	269
8.7.2.1	Transformation in ein Zustandsraummodell mit der M-function <i>tf2ss</i> .....	269
8.7.2.2	Transformation in die Pol-Nullstellen-Form mit der M-function <i>tf2zp</i> .....	270
8.7.2.3	Transformation in Partialbrüche mit der M-function <i>residue</i> .....	270
8.7.3	Übertragungsfunktion in Pol-Nullstellen-Form.....	271
8.7.3.1	Transformation in ein Zustandsmodell mit M-function <i>zp2ss</i> .....	271
8.7.3.2	Transformation in die Polynomform mit M-function <i>zp2tf</i> .....	271

XVIII Inhaltsverzeichnis

8.7.4	Signalflussplan .....	272
8.7.4.1	Linearisierung mit der M-function <i>linmod</i> .....	272
8.7.4.2	Mit der M-function <i>linmod</i> in den Zeit- oder Frequenzbereich .....	273
8.7.4.3	Mit den M-functions <i>blkbuild</i> , <i>connect</i> in ein Zustandsmodell .....	274
<b>9.</b>	<b>Zusammenschalten von Systemen</b> .....	<b>275</b>
9.1	Beschreibung durch Übertragungsfunktionen .....	275
9.1.1	Reihenschaltung mit der M-function <i>series</i> .....	275
9.1.2	Parallelschaltung mit der M-function <i>parallel</i> .....	276
9.1.3	Rückführschaltung mit der M-function <i>feedback</i> .....	277
9.2	Beschreibung durch Zustandsgleichungen.....	279
9.2.1	Vereinigung nicht gekoppelter Systeme mit der M-function <i>append</i> .....	280
9.2.2	Reihenschaltung mit der M-function <i>series</i> .....	280
9.2.3	Parallelschaltung mit der M-function <i>parallel</i> .....	283
9.2.4	Rückführschaltung mit der M-function <i>feedback</i> .....	286
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>291</b>
<b>Verzeichnisse</b>		<b>295</b>
Stichwörter .....		295
Namen .....		300
M-functions.....		301
Beispiele und Gleichungen .....		303
Eigene functions und Signalflusspläne .....		304