

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>1 Zustandsraumdarstellung digitaler Systeme</b> .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Zustandsgrößen und Zustandsraumdarstellung .....	2
1.2.1 Systeme 2. Ordnung.....	2
1.2.2 Systeme höherer Ordnungen.....	7
1.3 Übertragungsfunktion .....	9
1.4 Eigenwert, Eigenvektor und charakteristisches Polynom .....	10
<b>2 Diagonalform und Normalform</b> .....	14
2.1 Einführung .....	14
2.2 Modalmatrix und Diagonalform.....	14
2.3 Ähnlichkeitstransformation.....	16
2.4 Normalform.....	19
<b>3 Skalierung und Koeffizientenquantisierung</b> .....	25
3.1 Einführung .....	25
3.2 Skalierung der Systeme.....	25
3.2.1 Ziele der Skalierung.....	25
3.2.2 Überlaufwahrscheinlichkeit.....	27
3.2.3 Vorbereitende Aufgaben.....	27
3.2.4 Versuchsdurchführung.....	28
3.3 Koeffizientenquantisierung .....	28
3.3.1 Zahlendarstellung im Zweierkomplement-Format .....	28
3.3.2 Vorbereitende Aufgaben.....	29
3.3.3 Versuchsdurchführung.....	30
3.4 Fallbeispiel: Cauer-Tiefpass 6. Ordnung.....	30
3.4.1 Filterentwurf, Kaskadenform und Pol-Nullstellenaufteilung.....	30
3.4.2 Versuchsdurchführung.....	31
<b>4 Skalierung der Zustandsvariablen</b> .....	35
4.1 Einführung .....	35
4.2 Impulsantworten.....	35
4.2.1 Impulsantwort des Systems.....	35
4.2.2 Teilimpulsantworten der Zustandsvariablen .....	36
4.2.3 Skalierung der Zustandsvariablen nach der $l_2$ -Norm .....	38
4.2.4 Versuchsdurchführung.....	38
4.3 Kovarianzmatrix der Zustandsvariablen.....	41
4.3.1 Definition der Kovarianzmatrix $\mathbf{K}$ .....	41
4.3.2 Berechnung der Kovarianzmatrix $\mathbf{K}$ .....	42
4.3.3 Vorbereitende Aufgaben.....	44
4.3.4 Versuchsdurchführung.....	44

<b>5</b>	<b>Quantisierte Arithmetik und inneres Rauschen</b> .....	46
5.1	Einführung .....	46
5.2	Quantisierte Arithmetik .....	46
5.3	Inneres Rauschen .....	48
5.3.1	Lineares Ersatzsystem mit Akkumulatoren .....	48
5.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	49
5.3.3	Versuchsdurchführung .....	51
5.4	Rauschzahl .....	53
5.4.1	Leistung des inneren Rauschens .....	53
5.4.2	Berechnung der Leistungsübertragungsfaktoren .....	54
5.4.3	Vorbereitende Aufgaben .....	55
5.4.4	Versuchsdurchführung .....	55
<b>6</b>	<b>Rauschminimale Normalform</b> .....	56
6.1	Einführung .....	56
6.2	Rauschzahl und Ähnlichkeitstransformation .....	56
6.3	Systeme 2. Ordnung in rauschminimaler Normalform .....	58
6.3.1	Konstruktion der rauschminimalen Normalform .....	58
6.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	59
6.3.3	Versuchsdurchführung .....	60
6.4	Abhängigkeit der Rauschzahl von der Lage der Pole .....	60
6.4.1	Einführung .....	60
6.4.2	Vorbereitende Aufgaben .....	61
6.4.3	Versuchsdurchführung .....	62
<b>7</b>	<b>Fallbeispiel: Cauer-Tiefpass</b> .....	64
7.1	Einführung .....	64
7.2	Versuchsdurchführung: Ideales System .....	64
7.3	Versuchsdurchführung: Reales System .....	65
7.4	Versuchsdurchführung: Kanonische Direktform II und DGL .....	66
<b>8</b>	<b>Lattice-Strukturen für FIR- und All-pole-Systeme</b> .....	68
8.1	Einführung .....	68
8.2	FIR-Systeme in Lattice-Struktur .....	68
8.2.1	Grundlagen .....	68
8.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	72
8.2.3	Versuchsdurchführung .....	72
8.3	All-pole-Systeme in Lattice-Struktur .....	73
8.3.1	Grundlagen .....	73
8.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	76
8.3.3	Versuchsdurchführung .....	76
<b>9</b>	<b>Lattice-Strukturen für IIR-Systeme</b> .....	77
9.1	Einführung .....	77
9.2	Modifizierte Lattice-Strukturen .....	77
9.2.1	Grundlagen .....	77
9.2.2	Versuchsdurchführung .....	79
9.3	IIR-Systeme in Lattice-Struktur .....	79
9.3.1	Grundlagen .....	79
9.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	82
9.3.3	Versuchsdurchführung .....	82

---

9.4	Durchstimbare rekursive Filter in Lattice-Struktur .....	83
9.4.1	Grundlagen .....	83
9.4.2	Vorbereitende Aufgaben .....	84
9.4.3	Versuchsdurchführung .....	85
<b>10</b>	<b>Lineare Prädiktion .....</b>	<b>86</b>
10.1	Einführung .....	86
10.2	Modellprozess .....	87
10.3	FIR-Systeme zur Prädiktion .....	89
10.3.1	Normalgleichungen .....	89
10.3.2	Orthogonalität .....	91
10.3.3	Prädiktionsgewinn .....	92
10.3.4	Vorbereitende Aufgaben .....	92
10.3.5	Versuchsdurchführung .....	93
<b>11</b>	<b>Levinson-Durbin-Algorithmus und linearer Prädiktor in Lattice-Struktur .....</b>	<b>94</b>
11.1	Einführung .....	94
11.2	Levinson-Durbin-Algorithmus .....	95
11.3	Linearer Prädiktor in Lattice-Struktur .....	99
11.4	Vorbereitende Aufgaben .....	100
11.5	Versuchsdurchführung .....	100
<b>12</b>	<b>Entwurf von nichtrekursiven Entzerrern mit der Fehlerquadratmethode .....</b>	<b>102</b>
12.1	Einführung .....	102
12.2	FIR-Systeme zur Kanalverzerrung .....	102
12.3	Vorbereitende Aufgaben .....	104
12.4	Versuchsdurchführung .....	104
<b>13</b>	<b>Systemidentifikation mit der Fehlerquadratmethode .....</b>	<b>106</b>
13.1	Einführung .....	106
13.2	FIR-Systeme zur Systemidentifikation .....	106
13.2.1	Grundlagen .....	106
13.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	108
13.2.3	Versuchsdurchführung .....	109
13.3	IIR-Systemidentifikation .....	110
13.3.1	Grundlagen .....	110
13.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	112
13.3.3	Versuchsdurchführung .....	113
13.4	Systemidentifikation mit den MATLAB-Funktionen lpc, prony und stmcb .....	113
13.4.1	Grundlagen .....	113
13.4.2	Versuchsdurchführung .....	115
<b>14</b>	<b>Adaptives FIR-System .....</b>	<b>118</b>
14.1	Einführung .....	118
14.2	Grundlagen .....	118
14.2.1	MMSE-Lösung .....	118
14.2.2	Adaptionsalgorithmus .....	119
14.2.3	Konvergenzverhalten und Lernkurve .....	120
14.3	Vorbereitende Aufgaben .....	122
14.4	Versuchsdurchführung .....	122

<b>15 Least-Mean-Square-Algorithmus</b> .....	126
15.1 Einführung .....	126
15.2 Grundlagen .....	127
15.2.1 Hauptachsentransformation und Inverse der Korrelationsmatrix .....	127
15.2.2 Methode des steilsten Abstiegs .....	128
15.2.3 LMS-Algorithmus .....	129
15.2.4 Varianten des LMS-Algorithmus .....	130
15.2.5 Fehlanpassung .....	131
15.3 Versuchsdurchführung .....	133
<b>16 Recursive-Least-Squares-Algorithmus</b> .....	137
16.1 Einführung .....	137
16.2 Grundlagen .....	138
16.3 Vorbereitende Aufgaben .....	140
16.4 Versuchsdurchführung .....	141
<b>17 Lösungen zu den Versuchen</b> .....	146
17.1 Vorbemerkung .....	146
17.2 Lösungen zu den Versuchen 1 und 2 .....	146
17.3 Lösung zu Versuch 3: Skalierung und Koeffizientenquantisierung .....	147
17.4 Lösung zu Versuch 4: Skalierung der Zustandsvariablen .....	154
17.5 Lösung zu Versuch 5: Quantisierte Arithmetik und inneres Rauschen .....	160
17.6 Lösung zu Versuch 6: Rauschminimale Normalform .....	162
17.7 Lösung zu Versuch 7: Fallbeispiel: Cauer-Tiefpass .....	164
17.8 Lösung zu Versuch 8: Lattice-Strukturen für FIR- und All-pole-Systeme .....	171
17.9 Lösung zu Versuch 9: Lattice-Strukturen für IIR-Systeme .....	173
17.10 Lösung zu Versuch 10: Lineare Prädiktion .....	178
17.11 Lösung zu Versuch 11: LD-Algorithmus u. linearer Prädiktor in Lattice-Struktur .....	181
17.12 Lösung zu Versuch 12: Entwurf von nichtrekursiven Entzerrer .....	185
17.13 Lösung zu Versuch 13: Systemidentifikation mit der Fehlerquadratmethode .....	190
17.14 Lösung zu Versuch 14: Adaptives FIR-System .....	194
17.15 Lösung zu Versuch 15: Least-Mean-Square-Algorithmus .....	196
17.16 Lösung zu Versuch 16: Recursive-Least-Squares-Algorithmus .....	199
<b>A Erste Schritte in MATLAB</b> .....	201
A.1 Einführung .....	201
A.2 Programmstart und einfache Befehle .....	201
A.2.1 MATLAB-Entwicklungsumgebung .....	201
A.2.2 Einfache arithmetische Operationen .....	201
A.2.3 Konstanten und Variablen .....	203
A.2.4 MATLAB help-Kommando .....	203
A.2.5 Vektoren und Matrizen .....	204
A.2.6 Vordefinierte MATLAB-Funktionen und einfache Grafiken .....	207
A.2.7 Schreiben eines MATLAB-Programms im Editor/Debugger-Window ..	210
A.2.8 Verkettete Programme und Unterprogramme .....	211
A.2.9 MATLAB Help und MATLAB Demo .....	214
<b>B Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	216
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	219
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	221