

Martin Werner

# **Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB**

**Intensivkurs mit 16 Versuchen**

2., verbesserte und erweiterte Auflage

Mit 129 Abbildungen und 51 Tabellen

Studium Technik



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Erste Schritte in MATLAB</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Zeitdiskrete Signale</b> .....	15
2.1	Elementare zeitdiskrete Signale .....	15
2.1.1	Einführung .....	15
2.1.2	Vorbereitende Aufgaben.....	18
2.1.3	Versuchsdurchführung.....	20
2.2	Audiosignale .....	20
2.2.1	Einführung .....	20
2.2.2	Vorbereitende Aufgaben.....	24
2.2.3	Versuchsdurchführung.....	24
<b>3</b>	<b>Faltung und Differenzgleichung</b> .....	26
3.1	Faltung.....	26
3.1.1	Einführung .....	26
3.1.2	Vorbereitende Aufgaben.....	28
3.1.3	Versuchsdurchführung .....	31
3.2	Differenzgleichung.....	31
3.2.1	Einführung .....	31
3.2.2	Vorbereitende Aufgaben.....	32
3.2.3	Versuchsdurchführung .....	33
<b>4</b>	<b>Diskrete Fouriertransformation (DFT)</b> .....	34
4.1	Einführung in die Grundlagen.....	34
4.1.1	Diskrete Fouriertransformation.....	34
4.1.2	Eigenschaften der diskreten Fouriertransformation .....	39
4.2	Vorbereitende Aufgaben.....	40
4.3	Versuchsdurchführung .....	43
<b>5</b>	<b>Schnelle Fouriertransformation (FFT)</b> .....	47
5.1	Einführung .....	47
5.2	Radix-2-FFT-Algorithmus .....	48
5.3	Programmierung der DIT-Radix-2-FFT .....	52
5.3.1	Ordnen der Eingangsfolge (Bit-reversed Ordering).....	52
5.3.2	Signalverarbeitung im Signalflussgraphen.....	55
5.4	Vorbereitende Aufgaben.....	58
5.5	Versuchsdurchführung .....	60
<b>6</b>	<b>Kurzzeit-Spektralanalyse: Grundlagen</b> .....	61
6.1	Einführung in die Grundlagen.....	61
6.1.1	Abtastung.....	62
6.1.2	Spektrum des zeitdiskreten Signals.....	63
6.1.3	Fensterung .....	64
6.1.4	Diskrete Fouriertransformation.....	66
6.1.5	Zero-padding .....	67
6.1.5	Leakage-Effekt.....	68

6.2	Fensterfolgen .....	69
6.2.1	Einführung .....	69
6.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	69
6.2.3	Versuchsdurchführung .....	69
<b>7</b>	<b>Kurzzeit-Spektralanalyse: Beispiele .....</b>	<b>75</b>
7.1	Beispiel Mehrtonsignal .....	75
7.1.1	Einführung .....	75
7.1.2	Vorbereitende Aufgaben .....	75
7.1.3	Versuchsdurchführung .....	77
7.2	Audiosignal .....	78
7.2.1	Einführung .....	78
7.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	80
7.2.3	Versuchsdurchführung .....	83
<b>8</b>	<b>Lineare zeitinvariante Systeme: FIR-Systeme .....</b>	<b>85</b>
8.1	Einführung in die Grundlagen .....	85
8.2	FIR-Systeme .....	93
8.2.1	Einführung .....	93
8.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	93
8.2.3	Versuchsdurchführung .....	99
<b>9</b>	<b>Lineare zeitinvariante Systeme: IIR-Systeme .....</b>	<b>101</b>
9.1	Einfluss der Pole auf den Frequenzgang .....	101
9.2	Blockdiagramm .....	102
9.3	Impulsantwort .....	103
9.4	Partialbruchzerlegung mit MATLAB .....	104
9.5	Allpässe .....	106
9.6	Vorbereitende Aufgaben .....	106
9.7	Versuchsdurchführung .....	115
<b>10</b>	<b>Entwurf digitaler FIR-Filter .....</b>	<b>117</b>
10.1	Einführung .....	117
10.2	Toleranzschema .....	118
10.2.1	Entwurfsvorschrift .....	118
10.2.2	Vorbereitende Aufgaben .....	119
10.3	Fourier-Approximation .....	120
10.3.1	Einführung .....	120
10.3.2	Vorbereitende Aufgaben .....	120
10.3.3	Versuchsdurchführung .....	121
10.4	Fourier-Approximation mit Fensterung .....	122
10.4.1	Einführung .....	122
10.4.2	Vorbereitende Aufgaben .....	123
10.4.3	Versuchsdurchführung .....	124
10.5	Chebyshev-Approximation .....	124
10.5.1	Einführung .....	124
10.5.2	Vorbereitende Aufgaben .....	125
10.5.3	Versuchsdurchführung .....	126

<b>11 Entwurf digitaler IIR-Filter</b> .....	129
11.1 Einführung .....	129
11.2 Entwurf eines Butterworth-Tiefpasses .....	132
11.2.1 Toleranzschema und Filtertyp.....	132
11.2.2 Zeitkontinuierlicher Butterworth-Tiefpass.....	132
11.2.3 Dimensionierung des zeitkontinuierlichen Butterworth-Tiefpasses.....	133
11.2.4 Vorbereitende Aufgaben.....	134
11.2.5 Bilineare Transformation.....	136
11.2.6 Vorbereitende Aufgaben.....	138
11.3 Entwurf digitaler Tiefpässe nach Standardapproximationen analoger Tiefpässe....	141
11.3.1 Einführung .....	141
11.3.2 Versuchsdurchführung .....	142
11.4 Entwurf von Hochpass- und Bandpassfiltern und Bandsperren .....	146
11.4.1 Einführung .....	146
11.4.2 Versuchsdurchführung.....	148
<b>12 Stochastische Signale: Kenngrößen</b> .....	149
12.1 Einführung .....	149
12.1.1 Experiment und stochastischer Prozess .....	149
12.1.2 Zufallszahlen am Digitalrechner .....	153
12.2 Stochastische Signale.....	154
12.2.1 Vorbereitende Aufgaben.....	154
12.2.2 Versuchsdurchführung.....	157
12.3 Korrelation stochastischer Prozesse.....	158
12.3.1 Korrelation, Korrelationsfunktion und Leistungsdichtespektrum .....	158
12.3.2 Weißes Rauschen.....	159
11.3.3 Schätzung der Autokorrelationsfunktion .....	160
11.3.4 Zeitkorrelation eines Chirp-Signals .....	161
11.3.5 Schätzung des Leistungsdichtespektrums .....	164
11.3.6 Vorbereitende Aufgaben.....	165
11.3.7 Versuchsdurchführung.....	167
<b>13 Stochastische Signale: LTI-Systeme</b> .....	171
13.1 Lineare Abbildung stochastischer Signale .....	171
13.1.1 Einführung .....	171
13.1.2 Vorbereitende Aufgaben.....	174
13.1.3 Versuchsdurchführung.....	174
13.2 Stochastische Signale und LTI-Systeme .....	175
13.2.1 Einführung .....	175
13.2.2 Vorbereitende Aufgaben.....	175
13.2.3 Versuchsdurchführung.....	180
<b>14 Analog-Digital-Umsetzung</b> .....	182
14.1 Einführung .....	182
14.2 Abtastung.....	183
14.2.1 Abtasttheorem.....	183
14.2.2 Vorbereitende Aufgaben.....	183
14.2.3 Versuchsdurchführung.....	184

14.3	Quantisierung.....	185
14.3.1	Quantisierungskennlinie.....	185
14.3.3	Maschinenzahlen.....	185
14.3.3	Quantisierungsfehler.....	189
14.3.4	Vorbereitende Aufgaben.....	191
14.3.5	Versuchsdurchführung.....	193
<b>15</b>	<b>Reale digitale Filter: Koeffizientenquantisierung</b> .....	<b>197</b>
15.1	Einführung.....	197
15.2	FIR-Filter mit quantisierten Koeffizienten.....	198
15.2.1	Fehlermodell und Fehlerfrequenzgang.....	198
15.2.2	Vorbereitende Aufgaben.....	200
15.2.3	Versuchsdurchführung.....	203
15.3	IIR-Filter mit quantisierte Koeffizienten.....	205
15.3.1	Kaskadenform und Polausdünnung.....	205
15.3.2	Vorbereitende Aufgaben.....	208
15.3.3	Versuchsdurchführung.....	215
<b>16</b>	<b>Reale digitale Filter: Quantisierte Arithmetik</b> .....	<b>216</b>
16.1	Quantisierte Arithmetik.....	216
16.1.1	Addition: Überlauf und große Grenzyklen.....	216
16.1.2	Multiplikation: inneres Geräusch und kleine Grenzyklen.....	217
16.1.3	Ersatzschaltbild für einen Block 2. Grades.....	221
16.2	Vorbereitende Aufgaben.....	222
16.3	Versuchsdurchführung.....	232
<b>17</b>	<b>Lösungen zu den Versuchen</b> .....	<b>237</b>
17.1	Vorbemerkungen.....	237
17.2	Lösungen zu Versuch 2: Zeitdiskrete Signale.....	237
17.3	Lösungen zu Versuch 3: Faltung und Differenzgleichung.....	238
17.4	Lösungen zu Versuch 4: Diskrete Fouriertransformation (DFT).....	239
17.5	Lösungen zu Versuch 5: Schnelle Fouriertransformation (FFT).....	241
17.6	Lösungen zu Versuch 6: Kurzzeit-Spektralanalyse: Grundlagen.....	244
17.7	Lösungen zu Versuch 7: Kurzzeit-Spektralanalyse: Beispiele.....	250
17.8	Lösungen zu Versuch 8: Lineare zeitinvariante Systeme: FIR-Systeme.....	254
17.9	Lösungen zu Versuch 9: Lineare zeitinvariante Systeme: IIR-Systeme.....	256
17.10	Lösungen zu Versuch 10: Entwurf digitaler FIR-Filter.....	264
17.11	Lösungen zu Versuch 11: Entwurf digitaler IIR-Filter.....	268
17.12	Lösungen zu Versuch 12: Stochastische Signale: Kenngrößen.....	277
17.13	Lösungen zu Versuch 13: Stochastische Signale: LTI-Systeme.....	284
17.14	Lösungen zu Versuch 14: Analog-Digital-Umsetzung.....	289
17.15	Lösungen zu Versuch 15: Reale digitale Filter: Koeffizientenquantisierung.....	291
17.16	Lösungen zu Versuch 16: Reale digitale Filter: Quantisierte Arithmetik.....	293
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>299</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>301</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>303</b>