

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwurf und Analyse analoger Filter</b>	<b>1</b>
1.1	Entwurf und Analyse mit Funktionen der <i>Signal Processing Toolbox</i> .....	1
1.2	Verzerrungen durch analoge Tiefpassfilter .....	5
	Experiment 1.1: Verzerrungen wegen des Phasengangs .....	9
	Experiment 1.2: Verzerrung von rechteckförmigen Pulsen .....	13
1.3	Verzerrungen durch analoge Hochpassfilter .....	18
1.4	Verzerrungen modulierter Signale durch Bandpassfilter .....	21
	1.4.1 Verzerrung amplitudenmodulierter Signale .....	22
	1.4.2 Verzerrung frequenzmodulierter Signale .....	23
	Experiment 1.3: Frequenzgang und Gruppenlaufzeit von Bandpassfiltern .....	24
1.5	Rekonstruktion zeitkontinuierlicher Signale .....	26
	Experiment 1.4: Tiefpassfilter als Glättungsfilter .....	26
	1.5.1 Welligkeit im Durchlassbereich bei Glättungsfiltern .....	32
1.6	Verstärkung des Rauschens durch Überfaltung .....	35
	Experiment 1.5: Spiegelung von nicht gefiltertem Rauschen .....	36
1.7	Schlussfolgerungen .....	37
<b>2</b>	<b>Entwurf und Analyse digitaler Filter</b>	<b>39</b>
2.1	Einführung .....	40
2.2	Klassischer Entwurf der IIR-Filter .....	46
	Experiment 2.1: Antworten der IIR-Filter auf verschiedene Signale .....	51
	2.2.1 Entwurf der IIR-Filter mit der Funktion <b>yulewalk</b> .....	55
	2.2.2 Entwurf der verallgemeinerten Butterworth-Filter mit der Funktion <b>maxflat</b> .....	56
2.3	Implementierung der IIR-Filter .....	58
2.4	Entwurf und Analyse der FIR-Filter mit linearer Phase .....	61
	2.4.1 Einführung .....	62
	2.4.2 Entwurf der FIR-Filter mit dem Fenster-Verfahren .....	63
	2.4.3 Entwurf der Standard-Filter mit der Funktion <b>fir1</b> .....	70
	2.4.4 Entwurf der Multiband-Filter mit der Funktion <b>fir2</b> .....	70
	Experiment 2.2: Vergleich der mit dem Fensterverfahren entwickelten FIR-Filter .....	71
	2.4.5 Entwurf der FIR-Filter mit den Funktionen <b>firls</b> und <b>firpm</b> .....	75
	2.4.6 Entwurf der Differenzier- und Hilbertfilter .....	79
	Experiment 2.3: Erzeugung analytischer Signale .....	82

Experiment 2.4: Entwurf komplexwertiger Filter mit der Funktion <b>cfirpm</b> ....	85
Experiment 2.5: Einseitenband-Modulation .....	89
2.4.7 Entwurf der FIR-Filter durch Kombination einfacher Filter .....	92
Experiment 2.6: <i>Raised-Cosine</i> -FIR-Filter für die Kommunikationstechnik .....	98
2.5 Entwurf zeitdiskreter Filter mit dem <b>fdesign</b> -Objekt .....	105
2.6 Zusammenfassung .....	109
<b>3 Filterentwurf mit der <i>Filter Design Toolbox</i></b> .....	<b>111</b>
3.1 Optimaler Entwurf digitaler Filter .....	111
3.1.1 Entwurf der FIR-Filter mit der Funktion <b>firgr</b> .....	113
Experiment 3.1: Entwurf und Untersuchung eines Differenzierers .....	117
3.1.2 Die Funktionen <b>firlpnm</b> und <b>firceqrip</b> zum Entwurf von FIR-Filtern.....	121
3.1.3 Entwurf der IIR-Filter mit der Funktion <b>iirgrpdelay</b> .....	124
3.1.4 Die Funktionen <b>iirlpnm</b> und <b>iirlpnmc</b> zum Entwurf von IIR-Filtern .....	126
3.2 Festkomma-Quantisierung .....	128
3.2.1 Einführung in das Festkomma-Format .....	129
3.2.2 Stellenwert-Interpretation .....	130
3.2.3 Skalierte Interpretation .....	132
Experiment 3.2: Umgang mit Variablen im Festkomma-Format .....	135
Experiment 3.3: Addition von Variablen mit skalierten und verschobenen Festkomma-Codierung .....	143
3.2.4 Schlussfolgerungen.....	149
3.3 Funktionen der <i>Fixed-Point Toolbox</i> .....	149
3.3.1 Erzeugung von <b>numeric</b> -Objekten .....	152
3.3.2 Erzeugung von <b>fimath</b> -Objekten .....	152
3.3.3 Einsatz der <b>fimath</b> -Objekte in arithmetischen Operationen .....	153
3.3.4 Erzeugung von <b>quantizer</b> -Objekten .....	155
3.3.5 Einsatz der <b>fi</b> -Objekte in Simulink .....	156
3.4 Gleitkomma-Quantisierung.....	159
3.4.1 Genauigkeit der Zahlen im Gleitkomma-Format .....	160
3.4.2 Dynamischer Bereich des Gleitkomma-Formats.....	161
3.5 Entwurf quantisierter Filter.....	162
3.6 Implementierung zeitdiskreter Filter mit <b>dfilt</b> -Objekten .....	162
3.6.1 Quantisierte FIR-Filter .....	169
3.6.2 Quantisierte IIR-Filter .....	174
3.7 Quantisierte Filter mit <b>fdesign</b> -Filterobjekten.....	181

<b>4</b>	<b>Multiraten-Signalverarbeitung</b>	<b>185</b>
4.1	Dezimierung mit einem ganzzahligen Faktor	186
4.2	Interpolierung mit einem ganzzahligen Faktor	191
4.3	Änderung der Abtastrate mit einem rationalen Faktor	196
4.4	Dezimierung und Interpolierung in mehreren Stufen	197
	Experiment 4.1: Entwurf eines Tiefpassfilters mit sehr kleiner Bandbreite	200
	Experiment 4.2: Filterung von Bandpasssignalen mit sehr kleiner Bandbreite	205
4.5	Dezimierung und Interpolierung mit Polyphasenfiltern	209
4.5.1	Dezimierung mit Polyphasenfiltern	212
4.5.2	Interpolierung mit Polyphasenfiltern	216
	Experiment 4.3: Dezimierung mit Polyphasenfiltern im Festkomma-Format	219
4.6	Interpolierung mit der Funktion <b>interpft</b>	222
4.7	Lagrange-Interpolierung mit der Funktion <b>intfilt</b>	225
4.8	Entwurf von <i>Fractional-Delay</i> -Filter	229
4.8.1	Kubische Interpolation	230
	Experiment 4.4: Verzögerung mittels Farrow-Filter	235
	Experiment 4.5: Abtastfrequenzänderung mit dem Farrow-Filter	238
4.9	Multiratenfilterbänke	241
4.9.1	Die DFT als Bank von Bandpassfiltern	242
	Experiment 4.6: Cosinusmodulierte Filterbänke	249
4.9.2	Zweikanal-Analyse- und Synthesefilterbänke	256
	Experiment 4.7: Simulation des Hochpasspfades einer Zweikanal-Filterbank	265
	Experiment 4.8: Simulation der Zweikanal-Filterbank für die Audio-Komprimierung	269
4.9.3	Multikanal-Analyse- und Synthesefilterbänke	272
	Experiment 4.9: Signalkonditionierung mit Filterbänken	281
4.10	CIC-Dezimierungs- und Interpolierungsfilter	287
4.10.1	Das laufende Summierungsfilter	287
4.10.2	Die Dezimierung mit CIC-Filtern	289
	Experiment 4.10: CIC-Dezimierung und FIR-Kompensationsfilter	293
4.10.3	Die Interpolierung mit CIC-Filtern	296
4.10.4	Implementierungsdetails	297
	Experiment 4.11: Simulation mit CIC-Filterblöcken	302
4.11	Entwurf der <i>Interpolated</i> -FIR Filter	304
	Experiment 4.12: Dezimierung und Interpolierung mit IFIR-Filtern	309
4.12	Multiraten-Objekte aus der <i>DSP System Toolbox</i>	311
4.12.1	Die <i>overlap-add</i> Methode zur Filterung einer unendlichen, zeitdiskreten Sequenz	312
4.12.2	Das Mutiraten-Objekt <b>mfilt.fftffirinterp</b>	315
4.12.3	Anmerkungen zum <i>Solver</i>	317

<b>5</b>	<b>Analyse und Synthese adaptiver Filter</b>	<b>319</b>
5.1	LMS-Verfahren .....	320
	Experiment 5.1: Identifikation mit dem LMS-Verfahren .....	323
	Experiment 5.2: Adaptive Störunterdrückung .....	325
5.2	RLS-Verfahren .....	329
5.3	Kalman-Filter .....	334
	Experiment 5.3: Adaptive Störunterdrückung mit einem Kalman-Filter .....	336
	Experiment 5.4: Adaptive Störunterdrückung mit einem Block-LMS-Filter .....	340
5.4	Beispiele für den Einsatz der <b>adaptfilt</b> -Objekte .....	342
5.5	Anmerkungen .....	343
<b>6</b>	<b>Hinweise zu MATLAB und Simulink</b>	<b>345</b>
6.1	Hinweise zu MATLAB .....	345
6.1.1	Mehrdimensionale Felder .....	346
6.1.2	Zell-Felder .....	347
6.1.3	Struktur-Variablen .....	348
6.1.4	Lesen und Schreiben von Audiodaten .....	348
6.1.5	Der Umgang mit den MATLAB-Objekten .....	349
6.2	Hinweise zu Simulink .....	353
6.2.1	Beispiel für ein Simulink-Modell .....	353
	Experiment 6.1: Parameter des Blocks <i>Band-Limited White Noise</i> .....	359
6.2.2	Schnittstellen .....	361
6.3	<i>Sample</i> - und <i>Frame</i> -Daten .....	366
6.4	Spektrale Leistungsdichte und <i>Power Spectrum</i> mit Simulink .....	374
6.5	Aufruf der Simulation aus der MATLAB-Umgebung .....	378
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>383</b>
	<b>Index</b>	<b>389</b>
	<b>Index der MATLAB-Funktionen</b>	<b>393</b>