

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 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 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>firl</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>firlpnorm</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>iirlpnorm</b> und <b>iirlpnormc</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 skalierter und verschobener Festkomma-Codierung . . . . .	143
3.2.4    Schlussfolgerungen . . . . .	149
3.3    Funktionen der <i>Fixed-Point Toolbox</i> . . . . .	149
3.3.1    Erzeugung von <b>numerictype</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 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-Filttern .....	289
Experiment 4.10: CIC-Dezimierung und FIR-Kompensationsfilter .....	293
4.10.3    Die Interpolierung mit CIC-Filttern .....	296
4.10.4    Implementierungsdetails .....	297
Experiment 4.11: Simulation mit CIC-Filterblöcken .....	302
4.11    Entwurf der <i>Interpolated-FIR</i> Filter .....	304
Experiment 4.12: Dezimierung und Interpolierung mit IFIR-Filttern .....	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 Multiraten-Objekt <b>mfilt.fftfirinterp</b> .....	315
4.12.3    Anmerkungen zum <i>Solver</i> .....	317

<b>5 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 <code>adaptfilt</code> -Objekte .....	342
5.5 Anmerkungen .....	343
<b>6 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>