

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Grundbegriffe der Signalverarbeitung	11
1.1 Signal und Signaldarstellung	13
1.1.1 Der Begriff des Signals	13
1.1.2 Darstellung digitaler Signale	13
1.2 Der Begriff des Systems	16
1.2.1 Definition und grundlegende Eigenschaften	16
1.2.2 Grundsätzlicher Aufbau eines Systems der digitalen Signalverarbeitung	18
1.3 Grundstruktur und Zustandsgleichung linearer digitaler Filter	20
1.3.1 Elemente digitaler Filter	20
1.3.2 Grundstruktur, Zustandsgleichung, Systemeigen- schaften	22
1.3.3 Die wichtigsten Filtertypen	23
2. Beschreibung digitaler Filter in Zeit- und Frequenzbereich.....	26
2.1 Die z-Transformation	26
2.1.1 Die einseitige z-Transformation	26
2.1.2 Die zweiseitige z-Transformation	31
<i>Übungsaufgaben</i>	32
2.2 Übertragungsfunktion und Grundstruktur des digitalen Filters k-ten Grades	33
2.2.1 Die direkte Struktur. Übertragungsfunktion	33
2.2.2 Kanonische Direktstrukturen	35
2.2.3 Kaskaden- und Parallelstruktur	38
2.2.4 Prädiktorfilter und Transversalfilter	40
2.3 Übergang zu zeitkontinuierlichen Systemen; Abtastung	42
2.3.1 Frequenzdarstellung in der z-Ebene und für konti- nuierliche Signale	42
2.3.2 Abtastung und Abtasttheorem	43
2.3.3 Beziehung zwischen der analogen und der digitalen Darstellung im Frequenzbereich	47
<i>Übungsaufgaben</i>	49

2.4	Diskrete Fouriertransformation und inverse z-Transformation	50
2.4.1	Die diskrete Fouriertransformation als Sonderfall der z-Transformation	50
2.4.2	Inverse z-Transformation	52
2.5	Frequenzgang, Gruppenlaufzeit, Impulsantwort	53
2.5.1	Frequenzgang und Gruppenlaufzeit	53
2.5.2	Impulsantwort	58
2.5.3	Stabilität, Pseudoleistung und Pseudoenergie	59
	<i>Übungsaufgaben</i>	63
2.6	Signalflußgraph und Signalflußmatrix	64
2.6.1	Darstellung digitaler Filter mit Hilfe von Signalflußgraph und -matrix	64
2.6.2	Berechnung der Übertragungsfunktion	69
2.6.3	Strukturumwandlung durch Äquivalenztransformation	71
2.6.4	Erweiterung der Zahl der Knoten; nichtkanonische Strukturen	74
2.6.5	Teil- und Restübertragungsfunktionen; transponierte Struktur	76
	<i>Übungsaufgabe</i>	77
2.7	Praktische Berechnung von Signalen und Systemfunktionen ...	78
2.7.1	Realisierung und Realisierbarkeit einer gegebenen Filterstruktur	78
2.7.2	Praktische Berechnung von Übertragungsfunktionen	81
3.	Spezielle Systeme: Digitale Filter 1. und 2. Grades; Allpässe; minimalphasige und linearphasige Filter	83
3.1	Das digitale Filter 1. Grades	83
3.1.1	Zustandsgleichung und Struktur	83
3.1.2	Das rein rekursive Filter 1. Grades	84
3.1.3	Das nichtrekursive Filter 1. Grades	84
3.2	Das digitale Filter 2. Grades	86
3.2.1	Rein rekursives digitales Filter 2. Grades mit komplexen Polen	87
3.2.2	Spezielle Strukturen für rein rekursive digitale Filter 2. Grades	93
3.2.3	Das nichtrekursive digitale Filter 2. Grades	100
	<i>Übungsaufgaben</i>	102
3.3	Allpaßfilter	102
3.3.1	Übertragungsfunktion und Struktur	102
3.3.2	Laufzeitausgleich, Notch-Filter, Komplementärfilter	106
3.4	Minimalphasige Filter	110

3.5	Linearphasige Filter	115
3.5.1	Grundeigenschaften	115
3.5.2	Nichtkausaler Ansatz	116
3.5.3	Die vier Grundformen	118
4.	Verhalten realer digitaler Filter; Realisierungsmöglichkeiten	122
4.1	Verhalten realer digitaler Filter bei Quantisierung; Fehleranalyse	124
4.1.1	Verhalten linearer digitaler Systeme bei endlicher Wortlänge der Koeffizienten	126
4.1.2	Verhalten digitaler Filter bei Beschränkung des Wertevorrats der Zustandsvariablen	134
4.1.3	Verhalten digitaler Filter bei Vorhandensein von Rundungsfehlern (endliche Wortlänge der Zustandsvariablen)	138
4.1.4	Quantisierungs- und Rundungsrauschen	148
	<i>Übungsaufgaben</i>	153
4.2	Beispiele für die arithmetische Realisierung digitaler Filter ...	154
4.2.1	Konzentrierte Arithmetik	154
	<i>Übungsaufgabe</i>	157
4.2.2	Verteilte Arithmetik	158
4.2.3	Multipliziererfreie Strukturen	161
4.3	Realisierung nichtrekursiver Filter hohen Grades durch segmentweise schnelle Faltung	165
4.3.1	Diskrete Faltung mit Hilfe der Fouriertransformation	165
4.3.2	Segmentweise diskrete Faltung	169
5.	Ausgewählte Entwurfsverfahren für digitale Filter bei Entwurfsvorschriften im Frequenzbereich	174
5.1	Frequenztransformationen	175
5.1.1	Toleranzschema und normierter Tiefpaß	175
5.1.2	Allpaßtransformationen	177
5.1.3	Die Bilineartransformation	180
5.1.4	Reaktanztransformationen	182
5.2	Durchführung des Filterentwurfs mit Hilfe des Filterkataloges sowie der Frequenztransformationen	183
5.2.1	Transformation der Entwurfsvorschrift in den normierten digitalen Tiefpaß	184
5.2.2	Ablauf des Filterentwurfs mit Hilfe des Filterkatalogs	187
5.2.3	<i>Beispiel für den Entwurf eines frequenzselektiven Filters</i>	187
5.3	Entwurf frequenzselektiver rekursiver digitaler Filter ohne Zuhilfenahme des Filterkatalogs	188
5.3.1	Entwurf in der w -Ebene. Die charakteristische Funktion	188

5.3.2	Einige Standardlösungen	194
5.3.3	Ausblick auf einige weitere Entwurfsverfahren	196
5.4	Entwurf nichtrekursiver Filter - Wunschfunktion, Toleranzschema, Frequenztransformationen	197
5.4.1	Kurzer Überblick über die diskutierten Verfahren	197
5.4.2	Frequenztransformationen für nichtrekursive Filter	198
5.5	Fourierapproximation, modifizierte Fourierapproximation, Frequenzabtastverfahren	200
5.5.1	Approximation mit abgebrochener Fourierreihe	200
5.5.2	Modifizierte Fourierapproximation	201
5.5.3	Frequenzabtastverfahren	205
5.6	Tschebyscheffapproximation für linearphasige Filter	210
5.6.1	Optimale Approximation im Tschebyscheffschen Sinn	210
5.6.2	Der Algorithmus von McClellan und Parks	211
5.6.3	Varianten	217
5.7	Entwurf frequenzselektiver minimalphasiger Filter mit Tschebyscheffverhalten	221
5.7.1	Umwandlung eines linearphasigen Filters in ein Minimalphasenfilter unter Berechnung der Nullstellen	222
5.7.2	Entwurf von Minimalphasenfiltern mit teilweiser Berechnung der Nullstellen	226
5.7.3	Entwurf ohne Bestimmung der Nullstellen	228
6.	Das Prinzip der linearen Prädiktion - oder der Entwurf eines (rekursiven) Digitalfilters im Zeitbereich durch optimale Annäherung der Impulsantwort	239
6.1	Das Prinzip der linearen Prädiktion	239
6.2	Lineare Prädiktion nach der Methode des kleinsten Fehlerquadrats	242
6.2.1	Bemerkungen zur Kurzzeitanalyse	244
6.2.2	Kovarianzmethode (nichtstationärer Ansatz)	246
6.2.3	Autokorrelationsmethode (stationärer Ansatz)	247
6.2.4	Betrachtung im Frequenzbereich	248
6.3	Rekursive Berechnung der Prädiktorkoeffizienten. Partielle Korrelation	249
6.3.1	Die Orthogonalitätsbeziehung	251
6.3.2	Rekursive Berechnung der Prädiktorkoeffizienten	256
6.4	Stabilitätsprüfung. Kreuzglied- und Leiterstrukturen	261
6.4.1	Stabilitätsprüfung	261
6.4.2	Kreuzglied- und Leiterstrukturen	263
6.4.3	Einbinden des nichtrekursiven Teils in die rekursive Kreuzgliedstruktur	268
6.5	Allpässe und linearphasige Filter in Kreuzgliedstruktur	270
	<i>Übungsaufgaben</i>	275

7. Filter mit reduziertem Aufwand unter Veränderung der Abtastfrequenz	277
7.1 Prinzip der Erhöhung und Erniedrigung der Abtastfrequenz um einen ganzzahligen Faktor ("decimation" und "interpolation")	279
7.1.1 Erhöhung um einen ganzzahligen Faktor	279
7.1.2 Erniedrigung um einen ganzzahligen Faktor	281
7.1.3 Veränderung der Abtastfrequenz um einen Faktor $q = q_A / q_E$	282
7.2 Entwurf von Interpolationsfiltern	282
7.2.1 Idealer Interpolator	283
7.2.2 Lagrangeinterpolation	284
7.2.3 Entwurf von Interpolatorfiltern mit Hilfe einer modifizierten Tschebyscheffapproximation	288
7.2.4 Weitere Entwurfsverfahren	291
7.2.5 Realisierung des Tiefpaßfilters bei der Erhöhung der Abtastfrequenz in zyklisch zeitvarianter Form	293
7.3 Mehrstufige Anordnungen zur Veränderung der Abtastfrequenz. Das Halbbandfilter	296
7.3.1 Das Halbbandfilter	296
7.3.2 Realisierung mehrstufiger Anordnungen zur Erhöhung und Erniedrigung der Abtastfrequenz mit Halbbandfiltern	299
7.3.2 <i>Beispiel: Entwurf eines mehrstufigen Tiefpaßfilters und Aufwandsvergleich verschiedener Entwurfslösungen</i>	301
7.4 Nochmals zur Wahl der Abtastfrequenz	305
8. Komplexe Signale und Filter	310
8.1 Komplexe Filter für reelle Signale	311
8.1.1 Das Filter 1. Grades mit komplexen Koeffizienten	311
8.1.2 Einsatz von Filtern mit komplexen Koeffizienten bei reellwertigen Ein- und Ausgangssignalen	318
8.1.3 Komplexe Allpaßfilter	321
8.2 Das analytische Signal	323
8.2.1 Definition	323
8.2.2 Berechnung des analytischen Signals. Das Hilbert-Filter	323
8.2.3 Veränderung der Abtastfrequenz beim analytischen Signal	326
8.3 Konsequenz des Modulationssatzes der z-Transformation; spektrale Rotation	327

9. Wellendigitalfilter	330
9.1 Grundsätzlicher Aufbau eines Wellendigitalfilters	331
9.2 Bauelemente von Wellendigitalfiltern	333
9.2.1 Elementare Eintorschaltungen (Zweipole)	333
9.2.2 Elementare Zweitorschaltungen	335
9.3 Adaptoren	337
9.3.1 Mehrtorparalleladaptor	337
9.3.2 Mehrtorreihenadaptor	340
9.3.3 Reflexionsfreie Adaptoren	343
9.3.4 Zweitoradaptor. Änderung des Bezugswiderstandes bei gleichem U und I	346
9.3.5 Äquivalenzen zwischen Adaptoren	347
9.4 Aufbau und Struktur von Wellendigitalfiltern	349
9.4.1 Zusammenbau von Wellendigitalfiltern aus den Bau- steinen	349
9.4.2 Berechnung der Übertragungsfunktion	351
9.4.3 Brückenwellendigitalfilter	357
9.4.4 <i>Beispiel: Implementierung eines Tiefpasses als Wellendigitalfilter</i>	358
Ausgewählte Literatur	361
Namen- und Sachregister	380