

# Inhalt

<b>Einführung</b> .....	1
<b>1 Systemtheoretische Grundlagen</b> .....	3
1.1 Lineare Vierpole .....	3
1.1.1 Die komplexe Frequenz .....	3
1.1.2 Die Übertragungsfunktion .....	6
1.1.3 Die Systemfunktion .....	9
1.1.4 Lineare Netzwerke im Zeit- und Frequenzbereich .....	10
1.1.5 Polverteilung und Stabilität .....	13
1.2 Filtercharakteristiken zweiten Grades .....	16
1.2.1 Die biquadratische Systemfunktion .....	17
1.2.2 Filterklassifikation .....	18
1.2.3 Polkenngößen .....	19
1.3 Der Referenz Tiefpass .....	24
1.3.1 Der Tiefpass zweiten Grades .....	24
1.3.2 Das Toleranzschema .....	27
1.3.3 Das Prinzip der Tiefpass-Approximation .....	28
1.3.4 Der Tiefpass $n$ -ten Grades .....	29
1.4 Tiefpass-Approximationen .....	31
1.4.1 Butterworth-Charakteristik .....	32
1.4.2 Tschebyscheff-Charakteristik .....	36
1.4.3 Inverse Tschebyscheff-Charakteristik .....	39
1.4.4 Elliptische Charakteristik .....	44
1.4.5 Thomson-Bessel-Charakteristik .....	47
1.4.6 Vergleich der Standard-Approximationen .....	57
1.4.7 Andere Approximationsverfahren .....	60
1.4.8 Zusammenfassung .....	64
1.5 Frequenztransformationen .....	64
1.5.1 Tiefpass-Tiefpass-Transformation .....	65
1.5.2 Tiefpass-Hochpass-Transformation .....	66
1.5.3 Tiefpass-Bandpass-Transformation .....	68
1.5.4 Tiefpass-Bandsperre-Transformation .....	77
1.5.5 Tiefpass-Allpass-Transformation .....	77
1.5.6 Transformation normierter Tiefpasselemente .....	79

---

<b>2 Grundstrukturen aktiver Filter</b> .....	85
2.1 Kaskadentechnik .....	86
2.1.1 Rückkopplungsmodell und Übertragungsfunktion .....	86
2.1.2 Erzeugung konjugiert-komplexer Pole .....	88
2.1.3 Erzeugung endlicher Übertragungsnullstellen .....	91
2.1.4 GIC-Stufen .....	92
2.1.5 Parallelstrukturen .....	92
2.2 Zweipolnachbildung mit Impedanzkonvertern .....	93
2.2.1 Impedanzkonverter .....	93
2.2.2 Elektronische Nachbildung von Induktivitäten .....	94
2.2.3 FDNR-Technik .....	95
2.2.4 Einbettungstechnik .....	99
2.2.5 Entwurfsrichtlinien für die GIC-Technik .....	101
2.3 Mehrfachkopplungstechnik .....	102
2.3.1 Die Leapfrog-Synthese .....	102
2.3.2 Die Zustandsvariablen-Struktur zweiten Grades .....	107
2.3.3 Die FLF-Struktur .....	110
2.4 Zusammenfassung .....	112
<b>3 Aktive Grundelemente</b> .....	115
3.1 Operationsverstärker .....	116
3.1.1 Eigenschaften und Kenndaten .....	116
3.1.2 Der nicht-invertierende Verstärker .....	125
3.1.3 Der invertierende Verstärker .....	126
3.1.4 Der Addierverstärker .....	128
3.1.5 Der invertierende Integrator .....	129
3.1.6 Der nicht-invertierende Integrator .....	131
3.1.7 Der Tiefpass ersten Grades (gedämpfter Integrator) .....	134
3.1.8 Der Negativ-Impedanzkonverter (NIC) .....	135
3.2 Der Allgemeine Impedanzkonverter (GIC) .....	138
3.2.1 Prinzip und Eigenschaften .....	138
3.2.2 Der GIC als Zweipol zur Induktivitätsnachbildung .....	140
3.2.3 Der GIC als Zweipol zur FDNR-Realisierung .....	141
3.2.4 Der GIC als Anpassungsvierpol (Einbettungstechnik) .....	142
3.2.5 Der GIC als kaskadierbarer Filtervierpol .....	143
3.3 Transimpedanzverstärker .....	144
3.3.1 Eigenschaften und Kenndaten .....	144
3.3.2 Grundschaltungen .....	149
3.4 Transkonduktanzverstärker .....	150
3.4.1 Eigenschaften und Kenndaten .....	150
3.4.2 OTA-Schaltungstechnik .....	152
3.5 Stromkonverter (Current Conveyor) .....	156
3.5.1 Prinzip und Eigenschaften .....	156
3.5.2 Grundschaltungen .....	157

<b>4 Kaskadentechnik</b>	159
4.1 Überblick	159
4.2 Filterstufen mit Einfach-Rückkopplung	160
4.2.1 Allgemeine Filterstruktur	160
4.2.2 Tiefpassfilter	164
4.2.3 Hochpassfilter	174
4.2.4 Bandpassfilter	180
4.3 Filterstufen mit Zweifach-Gegenkopplung	189
4.3.1 Allgemeine Filterstruktur	189
4.3.2 Tiefpassfilter	192
4.3.3 Hochpassfilter	195
4.3.4 Bandpassfilter	197
4.4 Filterstufen mit Impedanzkonverter	203
4.4.1 Tiefpass	204
4.4.2 Hochpass	205
4.4.3 Bandpass	205
4.4.4 Einfluss realer Verstärkereigenschaften	207
4.5 Filterstufen mit endlichen Nullstellen	208
4.5.1 Allpassfilter	208
4.5.2 Filterstufen mit Sperrcharakteristik	215
4.5.3 Elliptische Tiefpässe	219
4.6 Biquadratische Filterstufen und Universalfilter	225
4.6.1 Grundstruktur für Zustandsvariablentechnik	225
4.6.2 Schaltung mit invertierenden Integratoren	226
4.6.3 Schaltung mit gedämpftem Integrator	230
4.6.4 Struktur mit Vorkopplung	235
4.6.5 Parallelstruktur	237
4.7 OTA- und CC-Filterstufen	239
4.7.1 OTA-Filterstufen	239
4.7.2 OTA-C-Strukturen	242
4.7.3 CC-Filterstufen	246
4.8 Zusammenfassung und Empfehlungen	249
4.8.1 Entscheidungskriterien zur Schaltungswahl	250
4.8.2 Vergleichende Übersicht	255
<b>5 Direkte Filtersynthese</b>	259
5.1 Aktive Komponentennachbildung	259
5.1.1 Tiefpassfilter	259
5.1.2 Hochpassfilter	263
5.1.3 Bandpassfilter	264
5.2 Filterstrukturen mit Mehrfachkopplungen	266
5.2.1 Die Leapfrog-Struktur	266
5.2.2 Die FLF-Struktur	270

<b>6 Aktive Filter in SC-Technik</b> .....	277
6.1 Einführung in die zeitdiskrete Signalverarbeitung .....	278
6.1.1 Systemfunktion und $z$ -Transformation .....	278
6.1.2 Transformation der Frequenzvariablen .....	282
6.2 SC-Grundelemente .....	287
6.2.1 Der invertierende EV-Integrator .....	288
6.2.2 Der invertierende ER-Integrator .....	291
6.2.3 Der invertierende Bilinear-Integrator .....	292
6.2.4 Der Differenz-Integrator .....	293
6.2.5 Der Tiefpass ersten Grades .....	294
6.3 Entwurf und Betrieb von SC-Filtern .....	294
6.3.1 Entwurfsverfahren .....	294
6.3.2 Verstärkertechnik .....	299
6.3.3 Betrieb von integrierten Filterbausteinen .....	300
6.4 Simulation von SC-Filtern im Frequenzbereich .....	304
6.4.1 Zeitkontinuierliche Modelle der SC-Kombinationen .....	304
6.4.2 Simulationsbeispiel: SC-Tiefpass ersten Grades .....	310
<b>7 Rechnergestützter Filterentwurf</b> .....	315
7.1 Allgemeines .....	315
7.2 PC-Programme zum Filterentwurf .....	315
7.2.1 Systematische Übersicht .....	315
7.2.2 Beispiel zum PC-gestützten Filterentwurf .....	321
7.2.3 Zusammenfassung, Einschränkungen und Bewertung .....	323
7.3 PC-gestützte Filteroptimierung .....	325
7.3.1 Problemstellung .....	325
7.3.2 Filteroptimierung durch Polanpassung .....	327
7.3.3 Beispiel zur Filteroptimierung durch Polanpassung .....	328
7.3.4 Zusammenfassung .....	333
<b>8 Lineare Oszillatoren</b> .....	335
8.1 Grundlagen .....	335
8.1.1 Das Oszillatorprinzip .....	335
8.1.2 Die Schwingbedingung .....	337
8.2 Oszillatorstrukturen .....	344
8.2.1 Vierpoloszillatoren .....	344
8.2.2 Zweipoloszillatoren .....	345
8.2.3 Auswahlkriterien .....	345
8.3 Vierpol-Oszillatorschaltungen .....	346
8.3.1 RC-Bandpass-Oszillator .....	346
8.3.2 RC-Tiefpass-Oszillator .....	348
8.3.3 Allpass-Oszillator .....	349
8.3.4 Quadratur-Oszillatoren .....	351

8.4 Zweipol-Oszillatorschaltungen.....	354
8.4.1 Resonanzkreisendämpfung mit NIC.....	354
8.4.2 GIC-Resonator .....	358
8.5 Zusammenfassung .....	362
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>365</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>369</b>