

Lutz v. Wangenheim

# **Aktive Filter in RC- und SC-Technik**

**Grundlagen  
Berechnungsverfahren  
Schaltungstechnik**

Hüthig Buch Verlag Heidelberg

# INHALT

<b>VORWORT</b> .....	V
<b>VERWENDETE SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	XII
<b>EINFÜHRUNG</b> .....	1
<b>KAP. 1</b>	
<b>SYSTEMTHEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	3
1.1 Die Übertragungsfunktion .....	3
1.1.1 Die komplexe Frequenz .....	3
1.1.2 Der Übertragungsfaktor .....	6
1.1.3 Die Übertragungsfunktion .....	8
1.1.4 Beschreibung linearer zeitinvarianter Netzwerke .....	9
1.1.5 Polverteilung und Stabilität .....	12
1.2 Filtercharakteristiken zweiten Grades .....	15
1.2.1 Passive RLC-Vierpole zweiten Grades .....	15
1.2.2 Die biquadratische Übertragungsfunktion, Filterklassifikation .....	17
1.2.3 Polkenngrößen .....	19
1.2.4 Übertragungsfunktionen zweiten Grades in Normalform .....	23
1.3 Der Referenztiefpaß .....	26
1.3.1 Der Tiefpaß zweiten Grades .....	26
1.3.2 Das Toleranzschema .....	29
1.3.3 Das Prinzip der Tiefpaß-Approximation .....	30
1.3.4 Der Tiefpaß n-ten Grades .....	31
1.4 Tiefpaß-Approximationen .....	33
1.4.1 Butterworth-Charakteristik .....	33
1.4.2 Tschebyscheff-Charakteristik .....	38
1.4.3 Inverse Tschebyscheff-Charakteristik .....	41
1.4.4 Elliptische Charakteristik .....	46
1.4.5 Thomson-/Bessel-Charakteristik .....	50
1.4.6 Vergleich der Standard-Approximationen .....	58
1.4.7 Andere Approximationsverfahren (Übersicht) .....	62
1.4.8 Zusammenfassung .....	63
1.5 Frequenztransformationen .....	64
1.5.1 Tiefpaß-Tiefpaß-Transformation .....	64
1.5.2 Tiefpaß-Hochpaß-Transformation .....	65
1.5.3 Tiefpaß-Bandpaß-Transformation .....	69
1.5.4 Tiefpaß-Bandsperre-Transformation .....	78
1.6 Strukturen passiver Filter .....	80
1.6.1 Tiefpaß-Abzweigstrukturen (Nullstellen bei $s \rightarrow \infty$ ) .....	80
1.6.2 Tiefpaß-Abzweigstrukturen mit endlichen Nullstellen .....	81
1.6.3 Anwendung der Frequenztransformationen .....	81

**KAP. 2**

<b>STRUKTUREN AKTIVER FILTER</b> .....	85
2.1 Entwurfsverfahren .....	85
2.1.1 Frequenzabhängige Verstärkerrückkopplung .....	86
2.1.1.1 Modell und Übertragungsfunktion .....	86
2.1.1.2 Erzeugung konjugiert-komplexer Pole .....	87
2.1.1.3 Erzeugung endlicher Übertragungsnullstellen .....	90
2.1.2 Technik der Impedanztransformation .....	91
2.1.3 Aktive Simulation passiver Bauelemente .....	94
2.1.3.1 Simulation von Induktivitäten .....	95
2.1.3.2 FDNR-Technik .....	96
2.1.3.3 Einbettungstechnik .....	99
2.1.3.4 Zusammenfassung und Entwurfsrichtlinien .....	102
2.1.4 Mehrfachkopplungstechnik .....	102
2.1.4.1 Modellierung von Strom-/Spannungsbeziehungen .....	103
2.1.4.2 Sonderfall: Zustandsvariablen-Struktur zweiten Grades .....	107
2.1.4.3 Die "follow-the-leader"-Struktur .....	110
2.1.5 Zusammenfassung .....	112
2.2 Aktive Elemente .....	113
2.2.1 Der Operationsverstärker .....	114
2.2.2 Der nichtinvertierende Verstärker .....	119
2.2.3 Der invertierende Verstärker (Inverter) .....	121
2.2.4 Der Summier-/Differenzverstärker .....	122
2.2.5 Der Integrator (invertierend) .....	124
2.2.6 Der Integrator (nichtinvertierend) .....	125
2.2.7 Der gedämpfte Integrator (Tiefpaß ersten Grades) .....	128
2.2.8 Der Negativ-Impedanzkonverter (NIC) .....	129
2.2.9 Der Allgemeine Impedanzkonverter (GIC) .....	131
2.2.9.1 Prinzip und Eigenschaften .....	131
2.2.9.2 Der GIC als Zweipol zur Induktivitätssimulation .....	133
2.2.9.3 Der GIC als Zweipol zur FDNR-Realisierung .....	134
2.2.9.4 Der GIC als Anpassungsvierpol (Einbettungstechnik) .....	135
2.2.9.5 Der GIC als kaskadierbarer Filtervierpol .....	135

**KAP. 3**

<b>FILTERSTUFEN ZWEITEN GRADES .....</b>	<b>137</b>
3.1 Filterstufen mit Einfachrückkopplung .....	137
3.1.1 Allgemeine Filterstruktur .....	137
3.1.1.1 Grundschtaltung .....	138
3.1.1.2 Schaltung mit zwei Verstärkern .....	139
3.1.1.3 Dimensionierungs-Philosophie .....	140
3.1.2 Tiefpaßfilter .....	141
3.1.2.1 Mitkopplungsgrundschtaltung .....	141
3.1.2.2 Zweiverstärker-Mitkopplungsschtaltung .....	145
3.1.2.3 Gegenkopplungsgrundschtaltung .....	146
3.1.2.4 Zweiverstärker-Gegenkopplungsschtaltung .....	147
3.1.3 Hochpaßfilter .....	148
3.1.3.1 Mitkopplungsgrundschtaltung .....	149
3.1.3.2 Zweiverstärker-Mitkopplungsschtaltung .....	152
3.1.3.3 Gegenkopplungsgrundschtaltung .....	152
3.1.3.4 Zweiverstärker-Gegenkopplungsschtaltung .....	154
3.1.4 Bandpaßfilter .....	154
3.1.4.1 Mitkopplungsgrundschtaltung .....	154
3.1.4.2 Zweiverstärker-Mitkopplungsschtaltung .....	158
3.1.4.3 Gegenkopplungsgrundschtaltung .....	159
3.1.4.4 Zweiverstärker-Gegenkopplungsschtaltung .....	162
3.2 Filterstufen mit Zweifachgegenkopplung .....	163
3.2.1 Allgemeine Filterstruktur .....	163
3.2.1.1 Grundschtaltung .....	164
3.2.1.2 Schaltung mit zwei Verstärkern .....	165
3.2.2 Tiefpaßfilter .....	166
3.2.2.1 Grundschtaltung .....	166
3.2.2.2 Schaltung mit zwei Verstärkern .....	168
3.2.3 Hochpaßfilter .....	169
3.2.3.1 Grundschtaltung .....	169
3.2.3.2 Schaltung mit zwei Verstärkern .....	170
3.2.4 Bandpaßfilter .....	171
3.2.4.1 Grundschtaltung .....	171
3.2.4.2 Schaltung mit zwei Verstärkern .....	175
3.3 Filterstufen mit Impedanzkonverter .....	177
3.3.1 Bandpaß .....	177
3.3.2 Hochpaß .....	179
3.3.3 Tiefpaß .....	179

3.4	Filterstufen mit Übertragungsnullstellen .....	181
3.4.1	Allgemeine Übertragungsfunktion .....	182
3.4.2	Filterstufen mit Doppel-T-Netzwerk .....	182
3.4.2.1	Das Doppel-T-Glied als passive Bandsperre .....	182
3.4.2.2	Elliptisches Grundglied (Schaltung A) .....	183
3.4.2.3	Elliptisches Grundglied (Schaltung B) .....	187
3.4.3	Bandsperren .....	189
3.4.3.1	Doppel-T-Bandsperre mit Einsverstärker .....	189
3.4.3.2	Differenzbildung mit Bandpaß .....	190
3.4.3.3	Schaltung mit einem Verstärker .....	191
3.5	Zusammenfassung und Vergleich .....	193
 <b>KAP. 4</b>		
<b>DIREKTE FILTERSYNTHESE .....</b>		<b>197</b>
4.1	Aktive Simulation passiver Bauelemente .....	197
4.1.1	Tiefpaßfilter .....	197
4.1.2	Hochpaßfilter .....	200
4.1.3	Bandpaßfilter .....	201
4.2	Filterstrukturen mit Mehrfachkopplungen .....	204
4.2.1	Die "Leapfrog"-Struktur .....	204
4.2.1.1	"Leapfrog"-Tiefpaßfilter .....	204
4.2.1.2	"Leapfrog"-Bandpaßfilter .....	206
4.2.2	Die "follow-the-leader"-Struktur .....	209
4.3	Biquadratische Filterstufen .....	214
4.3.1	Realisierung mit nichtinvertierenden Integratoren .....	215
4.3.2	Realisierung mit invertierenden Integratoren .....	217
4.3.3	Realisierung mit gedämpftem Integrator .....	220
4.3.4	Filterstufen mit Vorwärtskopplung .....	225
 <b>KAP. 5</b>		
<b>AKTIVE FILTER IN SC-TECHNIK .....</b>		<b>229</b>
5.1	Zeitdiskrete Signalverarbeitung, Grundlagen .....	230
5.1.1	Die Systemfunktion .....	230
5.1.2	Transformation der Frequenzvariablen .....	234
5.1.2.1	"Euler-Rückwärts"-Näherung (ER) .....	234
5.1.2.2	"Euler-Vorwärts"-Näherung (EV) .....	235
5.1.2.3	Bilineare Näherung .....	236
5.1.2.4	LDI-Transformation .....	236
5.1.2.5	Eigenschaften der Approximationen .....	237

---

5.2	SC-Grundglieder .....	241
5.2.1	EV-Integrator .....	241
5.2.2	ER-Integrator .....	244
5.2.3	Der bilineare Integrator .....	244
5.2.4	Der Differenzintegrator .....	245
5.2.5	Der nichtinvertierende Integrator .....	245
5.2.6	Der gedämpfte Integrator (Tiefpaß ersten Grades) .....	246
5.3	Entwurf und Betrieb von SC-Filtern .....	247
5.3.1	Entwurfsverfahren .....	247
5.3.1.1	Filterstufen zweiten Grades .....	247
5.3.1.2	Filter höheren Grades .....	250
5.3.2	Betrieb von SC-Filtern .....	251
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>		<b>257</b>
<b>STICHWORTVERZEICHNIS .....</b>		<b>263</b>