

Ingenieur - Büro - Rohm

*Entwicklungen in der HF-, Analog- und Steuerungstechnik
Beratung und Betreuung rund um den Personal Computer*

*Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Rohm
Am schwarzen Berg 15
64521 Gross-Gerau / Dornheim
Tel. & Fax +49 {06152} 54963
EPost : Gerhard-Rohm@gmx.de
Heimatseite : www.gerhard-rohm.de*

Dornheim, 14.12.1999

Dieses Dokument enthält den :

Aufsatz zur Tiefpassfilter - Dimensionierung

Dieses Dokument darf für nicht kommerzielle Zwecke, für Forschung und Lehre frei, aber nur unverändert weitergegeben und benutzt werden. Ich übernehme keinerlei Haftung für Schäden, die durch die Verwendung dieses Dokumentes direkt oder indirekt entstehen.

Aufsatz zur Tiefpassfilter - Dimensionierung

Von Dipl.- Ing. (FH) Gerhard Rohm
Am schwarzen Berg 15
64521 Groß- Gerau / Dornheim

Dornheim, 24.05.1997

Projekt- Kurzbeschreibung

Das Ausgangssignal eines mit 50 MHz getakteten DDS- Synthesizer soll so gefiltert werden, daß die Taktfrequenz mit mindestens 60 dB Dämpfung im sinusförmigen Ausgangssignal unterdrückt wird. Das Ausgangssignal soll dabei einen Frequenzbereich von 0 ... 15 MHz überstreichen können. Die Systemimpedanz beträgt 50Ω und die verwendeten Filterbauteile sollen aus der industriellen Normreihe zu entnehmen sein.

Einführung in die Tiefpass- Dimensionierung

Am Beispiel eines Tiefpasses 5. Ordnung, ohne Widerstandstransformation ($\rightarrow R1 = R2 = Z_{\text{System}}$), wird der Rechenweg erläutert.

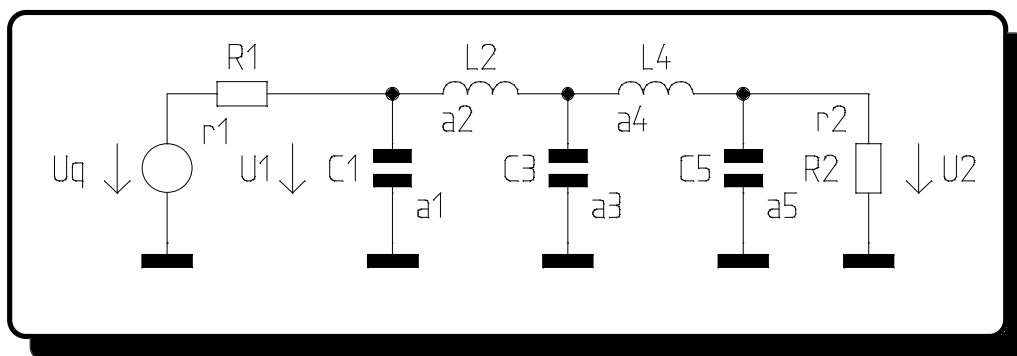


Abb. 1 : Tiefpass 5. Ordnung mit der Quellenimpedanz $R1$ und der Senkenimpedanz $R2$ die beide gleich der Systemimpedanz sind. $R1 = R2 = Z_{\text{System}}$. Die kleingeschriebenen Bezeichner $\{r1, r2, a1 \dots a5\}$ sind die normierten Bauteilwerte.

Der erste Wert der Filterdimensionierung wird die Systemimpedanz sein, da er meist vor der Schaltungsdimensionierung { schon vor der Erstellung des Blockschaltbildes } festgelegt wird.

Für dieses Dokument ist er immer :

$$Z_{System} = 50 \Omega$$

Als nächstes wird der Durchlaß- und Sperrbereich des Tiefpasses festgelegt :

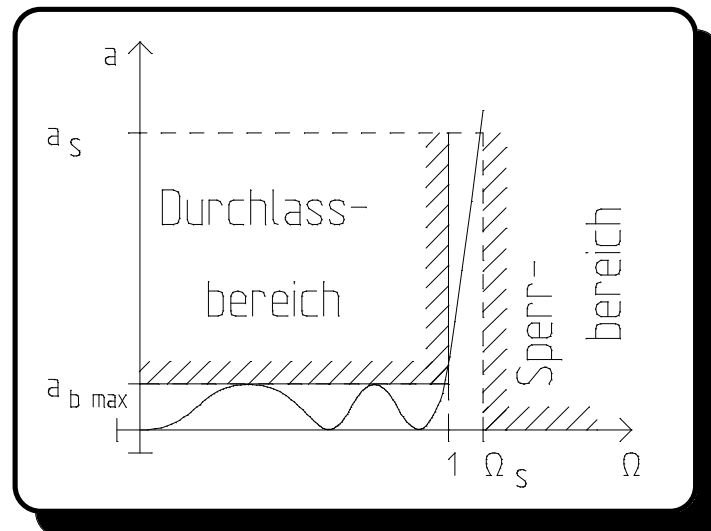


Abb. 2 : Durchlaß und Sperrbereich eines Tschebyscheff- Tiefpasses 5. Ordnung. Bei $\Omega = 1$ ist die Normierungs- {Bezugs-} Frequenz $\{f_B\}$ gegeben. Ω_s ist die normierte Frequenz, für die die Sperrdämpfung a_s gilt. Die maximale Betriebsdämpfung $a_{b \max}$ gilt bis $\Omega = 1$.

Für dieses Beispiel wird angenommen, daß das Tiefpassfilter einen Reflexionsfaktor von :

$$r \leq 10\%$$

haben soll, der einer maximalen Betriebsdämpfung von :

$$a_{b \max} = 0,0436 \text{ dB}$$

entspricht. {Äquivalenter VSWR $\approx 1,20$ }

Diese Werte sind " handelsüblich " wenn das Filter keine besonderen Anforderungen zu erfüllen hat.

Die Filterordnung $\{ = 5 \}$ für dieses Beispiel ist auch schon vorgegeben, und so kann nur noch zwischen Bezugsfrequenz f_B oder Sperrfrequenz f_s unabhängig entschieden werden.

Hier soll mit der Wahl der Bezugsfrequenz als Unabhängige begonnen werden, um die Normierungskette ohne Unterbrechung darzustellen !

Das Filter soll bis

$$1 \text{ MHz}$$

alle Frequenzen nur mit der maximalen Betriebsdämpfung $a_{b \max}$ bedämpfen. Somit wird nach Abb. 2 die Bezugsfrequenz $f_B \geq 1 \text{ MHz}$ gewählt. Für dieses Beispiel wird :

$$f_B = 1 \text{ MHz}$$

Aus der Bezugsfrequenz und der Systemimpedanz $\{ Z_{\text{System}} = R_B \}$ lassen sich die Bezugskapazität und die Bezugsinduktivität leicht errechnen :

$$L_B = \frac{R_B}{2\pi f_B} \qquad L_B = \frac{50\Omega}{2\pi \cdot 1 \text{ MHz}} = 7,958 \mu\text{H} \qquad (1)$$

$$C_B = \frac{1}{2\pi f_B R_B} \qquad C_B = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ MHz} \cdot 50\Omega} = 3,183 \text{ nF} \qquad (2)$$

Die Widerstände R1 und R2 werden durch Normierung mit $Z_{\text{System}} = R_B$ zu :

$$r1 = r2 = \frac{R1}{R_B} = \frac{R2}{R_B} = 1 \qquad (3)$$

Die passende Filtertabelle zu den Randbedingungen des Filtertyps $\{ r = 10 \% , 5. \text{ Ordnung und Tschebyscheff} \}$ ergibt einen T5 / 20 $\{ \text{Tschebyscheff, 5. Ordnung, 20 dB Echodämpfung [entspricht einem Reflexionsfaktor von 10 \%]} \}$

Dieses Tabellenblatt enthält folgende Filterkoeffizienten :

Bezeichner		Wert
a1	a5	0,973209
a2	a4	1,372275
	a3	1,803171

Tab. 1 : Tabelle der Tiefpasskoeffizienten des T5 / 20

Um nun auf die realen Bauteile zurückzurechnen werden die normierten Tiefpasskoeffizienten mit den Normierungsgrößen multipliziert :

$$C1 = C5 = a1 \cdot C_B = a5 \cdot C_B \qquad (4)$$

$$L2 = L4 = a2 \cdot L_B = a4 \cdot L_B \qquad (5)$$

$$C3 = a3 \cdot C_B \qquad (6)$$

Die Werte für C1, L2, C3, L4, C5 sind dann :

$$C1 = C5 = 0,973209 \cdot 3,183 \text{ nF} = 3,098 \text{ nF}$$

$$L2 = L4 = 1,372275 \cdot 7,958 \mu\text{H} = 10,92 \mu\text{H}$$

$$C3 = 1,803171 \cdot 3,183 \text{ nF} = 5,739 \text{ nF}$$

$$R1 = R2 = 1 \cdot R_B = 50 \Omega$$

Die Bauteilwerte sind nun bekannt, aber so schief und unschön, daß sie nicht in die Normreihen der von der Industrie gelieferten Werte passen. Kompromißlösungen sind zu suchen, und bei der Dimensionierung des gewünschten Filters des DDS werde ich versuchen solch einen hier aufzuzeigen.

Als Nächstes muß hier aber noch die Ermittlung der Sperrdämpfung a_s beschrieben werden. Dazu wird die folgende Tabelle, als Auszug des Datenblatt zum T5 / 20, unten aufgelistet :

Sperrdämpfung a_s in dB	Normierte Sperr- frequenz Ω_s
3,00	1,183900
6,00	1,260600
8,00	1,307100
10,00	1,353400
20,00	1,613400
30,00	1,952000
40,00	2,393600
50,00	2,962600
60,00	3,689300
70,00	4,612400

Tab. 2 : Auszug aus dem Datenblatt des T5 / 20 über dessen Sperrdämpfung. Die Entnormierung der realen Frequenz wird wie folgt errechnet : $f_s = \Omega_s f_B$

Aus Tab. 2 kann somit z.B. die 3 dB Grenzfrequenz ermittelt werden :

$$f_{s3dB} = \Omega_{s3dB} \cdot f_B = 1,1839 \cdot 1 \text{ MHz} = 1,1839 \text{ MHz} \quad (7)$$

Dimensionierung des DDS-Ausgangs-Tiefpass

Zur Abschätzung des Filteraufwandes wird aus den Tabellenblättern folgende Tabelle zusammengestellt :

f_B / MHz	Sperrdämpfung a_s / dB bei 50 MHz für Filtertyp :		
	T5 / 20	T7 / 20	T9 / 20
15,00	55,00	87,00	> 100,00
17,50	48,00	78,00	> 100,00
20,00	42,00	69,00	97,00
22,50	36,00	61,00	86,00
25,00	31,00	55,00	78,00
27,50	26,00	47,00	68,00

Tab. 3 : Die sinnvollsten Filter für das Bedämpfen der DDS- Taktfrequenz, ausgewählt nach Aufwand und Reflexionsfaktor.

Um den Aufwand an Bauteilen klein zu halten, aber auch die gewünschte Sperrdämpfung noch erreichen zu können, wird aus Tab. 3 der T7 / 20 mit $f_B = 17,50$ MHz als Startkombination gewählt.

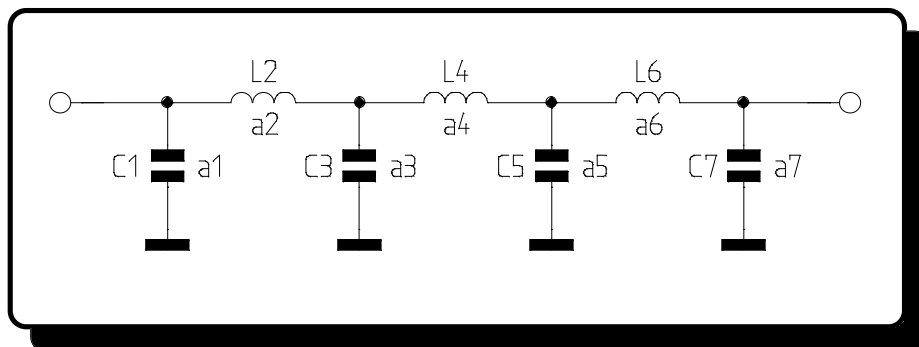


Abb. 3 : Ein Tiefpass 7. Ordnung mit realen und normierten Bauteilen.

Um die Größenordnung der Induktivitäten abzuschätzen, werden diese vorläufig bestimmt :

$$L_B = \frac{R_B}{2\pi f_B} = \frac{50\Omega}{2\pi \cdot 17,50 \text{ MHz}} = 454,7 \text{ nH} \quad (1)$$

Die Filterkoeffizienten für den T7 / 20 sind :

Bezeichner		Wert
a1	a7	1,009729
a2	a6	1,436820
a3	a5	1,941413
	a4	1,621592

Tab. 4 : Filterkoeffizienten des T7 / 20

Im Vergleich mit Abb. 3 sieht man, daß die Koeffizienten $a_2 = a_6$ und a_4 für die Induktivitäten zuständig sind. Der reale Wert der Bauteile ergibt sich mit den Entnormungsgleichungen nach (4) ... (6) :

$$L_2 = L_6 = 1,436820 \cdot 454,7 \text{ nH} = 653,3 \text{ nH}$$

$$L_4 = 1,621592 \cdot 454,7 \text{ nH} = 737,3 \text{ nH}$$

Nun werden aus der Bauteilwertreihe {470 ; 560 ; 680 ; 820} die ähnlichsten Werte ausgewählt. Gewählt :

$$L_2 = L_6 \stackrel{!}{=} 560 \text{ nH}$$

$$L_4 \stackrel{!}{=} 680 \text{ nH}$$

Man kann sich auch anders entscheiden, muß aber jedesmal neu durchrechnen, und wenn möglich simulieren, es sei denn, die Bauteilwerte treffen zufälligerweise recht genau !

Das Bestimmen der Induktivitäten als erstes, hat den Grund, daß sie meist nicht so fein gestuft sind und nicht so einfach parallel oder seriell zu schalten sind {→ magnetische Kopplung der Spulen}.

Nun wird auf die neue Bezugsinduktivität zurückgerechnet, wieder eine Kompromißlösung :

$$L_{Ba} = \frac{L_2}{a_2} = \frac{560 \text{ nH}}{1,436820} = 389,7 \text{ nH}$$

und

$$L_{Bb} = \frac{L_4}{a_4} = \frac{680 \text{ nH}}{1,621592} = 419,3 \text{ nH}$$

Als Bezugsinduktivität wird dann der Mittelwert gewählt :

$$L_B \stackrel{!}{=} 400,0 \text{ nH}$$

Daraus läßt sich die Bezugsfrequenz und die Bezugskapazität errechnen, der Bezugswiderstand ist immer noch gleich der Systemimpedanz.

$$R_B = Z_{System} = 50 \Omega$$

Die Bezugsfrequenz wird aus umgestellter (1) errechnet :

$$f_B = \frac{R_B}{2\pi L_B} = \frac{50\Omega}{2\pi 400,0nH} = 19,89 MHz \quad (1a)$$

und die Bezugskapazität errechnet sich mit Gleichung (2) zu :

$$C_B = \frac{1}{2\pi f_B R_B} = \frac{1}{2\pi 19,89MHz 50\Omega} = 160pF$$

So, nun können die restlichen Bauteile berechnet werden :

$$C1 = C7 = C_B \cdot a1 = 160pF \cdot 1,009729 = 161,5pF$$

$$C3 = C5 = C_B \cdot a3 = 160pF \cdot 1,941413 = 310,6pF$$

Die Wertereihe für Kondensatoren ist 100 ; 120 ; 150 ; 180 ; 220 ; 270 ; 330 ; 390 ; 470, und daraus wird folgendes ausgesucht :

$$C1 = C7 \stackrel{!}{=} 150pF$$

$$C3 = C5 \stackrel{!}{=} 330pF$$

Nun geht es in die Simulation, ich stücke die Bauteile nicht gerne zusammen, wenn das Ergebnis langt: Aber vorerst noch mal alle Bauteile zusammen in einer Tabelle :

Bauteil	Wert	RS-Best. # {Empfehlung}
R1	51,00 Ω	Widerstand am DDS-out
C1	150,00 pF	126-174
L2	560,00 nH	191-0857
C3	330,00 pF	126-708
L4	680,00 nH	191-0863
C5	330,00 pF	126-708
L6	560,00 nH	191-0857
C7	150,00 pF	126-174
R2	51,00 Ω	Abschlußwiderstand

Tab. 5 : Alle Bauteile des dimensionierten Filters. Die RS- Components Bestellnummern dienen der Empfehlung. R2 ist nicht auf der Platine, sondern stellt die angeschlossene Last dar. R1 sollte der Widerstand am Ausgang des DDS- IC's sein.

Simulationsergebnisse

Die Simulation des Filters nach Abb. 3 und Tab. 5 ergab folgende Diagramme :

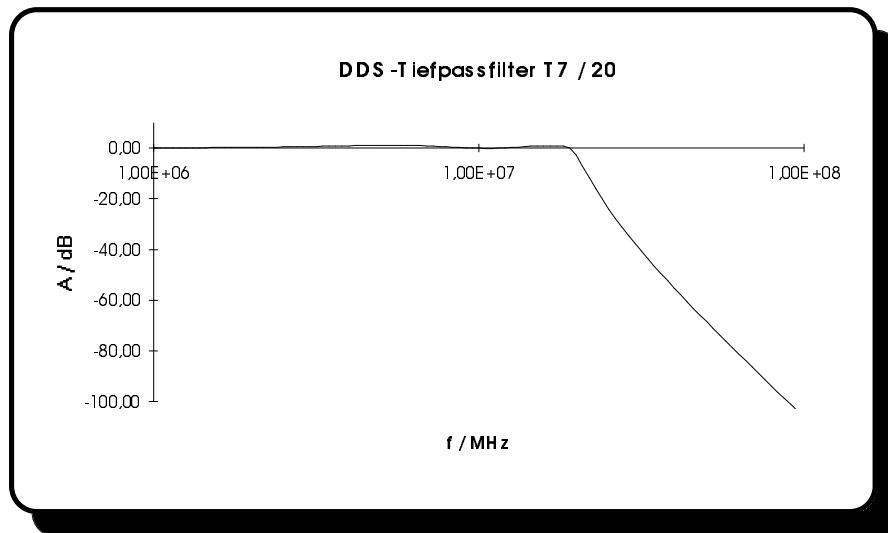


Abb. 4 : Der Amplitudengang des DDS- Tiefpasses

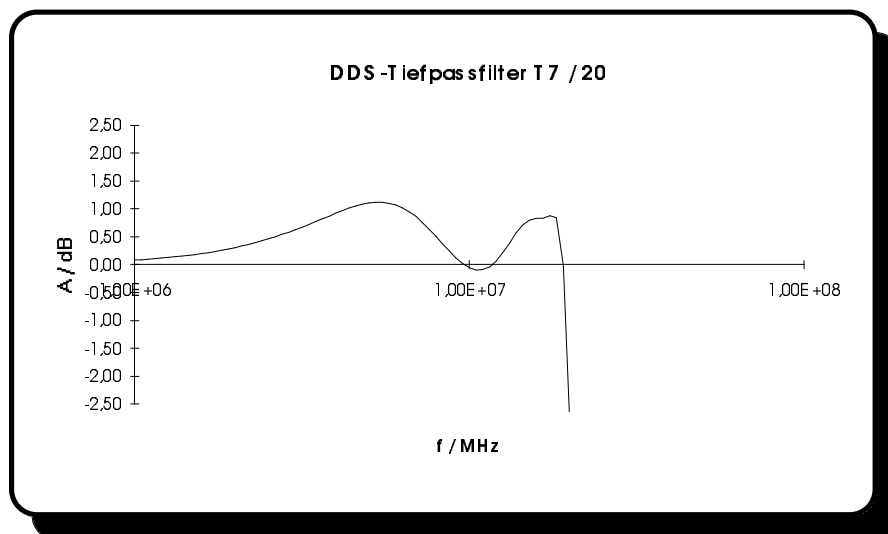


Abb. 5 : Der Amplitudengang des DDS- Tiefpasses in einer Ausschnittvergrößerung der Amplitude.

Die Übersicht über einige konkrete Werte aus den Diagrammen Abb. 4 und Abb. 5 :

f / MHz	A / dB	Bemerkung
1,00	0,08	
2,00	0,31	
5,01	1,10	
5,25	1,12	Lokales Maxima
5,50	1,12	Lokales Maxima
10,00	-0,05	
11,00	-0,09	Lokales Minima
17,40	0,87	Lokales Maxima
20,00	-2,86	
50,10	-68,50	Zu sperrende Frequenz
100,00	-106,00	

Tab. 6 : Ausgewählte Werte aus der Simulation

Anhang : Die Zusammenstellung der Tiefpasskoeffizienten

Hier ist die Auflistung der Tiefpasskoeffizienten für T3 / 20, T5 / 20, T7 / 20 und T9 / 20 :

TP- Koef.	T3 / 20	T5 / 20	T7 / 20	T9 / 20
a1	0,853447	0,973209	1,009729	1,025242
a2	1,103872	1,372275	1,436820	1,461834
a3	= a1	1,803171	1,941413	1,985244
a4		= a2	1,621592	1,677242
a5		= a1	= a3	2,066247
a6			= a2	= a4
a7			= a1	= a3
a8				= a2
a9				= a1

Tab. 7 : Tiefpasskoeffizienten der Tschebyscheff- Tiefpässe T3, T5, T7, T9 mit einer Echodämpfung von 20 dB entsprechend einem Reflexionsfaktor von 10 %