

Universität Rostock
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
Institut für Nachrichtentechnik
Albert-Einstein-Straße 26
D 18059 Rostock

Versuchsanleitung

Lineare Mehrpole

Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Weber

27. April 2023

Zusammenfassung

Im vorliegenden Versuch soll eine eigene Schaltung entworfen und aufgebaut werden. Als Beispiel wird ein Filter betrachtet. Der Entwurf umfasst die rechnerische Synthese der Schaltung und deren simulative Überprüfung mit LTspice. Anschließend wird die Schaltung aufgebaut und mit dem Vektornetzwerkanalysator messtechnisch überprüft. Eine wesentliche Herausforderung sind Bauelementetoleranzen, deren Einflüsse auch simulativ untersucht werden.

1. Theorie

1.1. Verwenden von Filterprototypen

Im Folgenden werden verlustfreie aus konzentrierten Bauelementen, das heißt aus Kapazitäten und Induktivitäten aufgebaute Filter betrachtet. Aus als Filterprototypen bezeichneten normierten Filtern kann man durch Entnormieren Filter für beliebige Frequenzbereiche und Bezugswiderstände R_B berechnen. Weiterhin kann man aus einem einmal entworfenen Filter durch Schaltungstransformationen weitere Filter gewinnen. Insbesondere kann man durch Transformation von Tiefpassprototypen Hochpassprototypen, Bandpassprototypen und Bandsperreprototypen gewinnen. Tiefpassprototypen bilden daher die Basis des Filterentwurfs.

1.2. Normierung

Die Impedanzen normiert man gemäß

$$\underline{z} = r + jx = \frac{\underline{Z}}{R_B} = \frac{R}{R_B} + j\frac{X}{R_B} \quad (1)$$

auf einen reellen positiven Bezugswiderstand R_B . Entsprechend normiert man die Admittanzen

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}} \quad (2)$$

gemäß

$$\underline{y} = g + jb = \frac{\underline{y}}{G_B} = \frac{G}{G_B} + j\frac{B}{G_B} \quad (3)$$

auf den reellen positiven Bezugsleitwert

$$G_B = \frac{1}{R_B}. \quad (4)$$

Weiterhin normiert man die Frequenz gemäß

$$\nu = \frac{f}{f_B} \quad (5)$$

auf die reelle positive Bezugsfrequenz f_B .

Für den normierten Blindwiderstand einer Induktivität L folgt

$$x = \frac{2\pi fL}{R_B} = \nu \underbrace{\frac{2\pi f_B L}{R_B}}_l, \quad (6)$$

das heißt Induktivitäten werden auf die Bezugsinduktivität

$$L_B = \frac{R_B}{2\pi f_B} \quad (7)$$

normiert.

Für den normierten Blindleitwert einer Kapazität C folgt

$$b = \frac{2\pi fC}{G_B} = \nu \underbrace{\frac{2\pi f_B C}{G_B}}_c, \quad (8)$$

das heißt Kapazitäten werden auf die Bezugskapazität

$$C_B = \frac{G_B}{2\pi f_B} \quad (9)$$

normiert.

1.3. Tiefpassprototypen

Der Betrag der Übertragungsfunktion $\underline{S}_{2,1}(\nu)$ eines idealen normierten Tiefpasses wäre bei niedrigen normierten Frequenzen ν im Durchlassbereich eins und bei hohen normierten Frequenzen ν im Sperrbereich Null mit einem abrupten Übergang von Durchlassbereich zu Sperrbereich bei der normierten Frequenz $\nu = 1$. Derartige ideale normierte Tiefpässe sind jedoch nicht realisierbar.

In der Realität begnügt man sich mit einer für den jeweiligen Anwendungsfall hinreichend genauen Approximation des idealen normierten Tiefpasses. Hierbei gilt es einen Kompromiss zwischen der Approximationsgüte und dem Schaltungsaufwand zu finden. Üblicherweise beschreibt man die Anforderungen an den normierten Tiefpass durch ein Toleranzschema und sucht dann einen Tiefpassprototypen kleinstmöglichen Aufwands, der diesen Anforderungen genügt, siehe Abbildung 1.

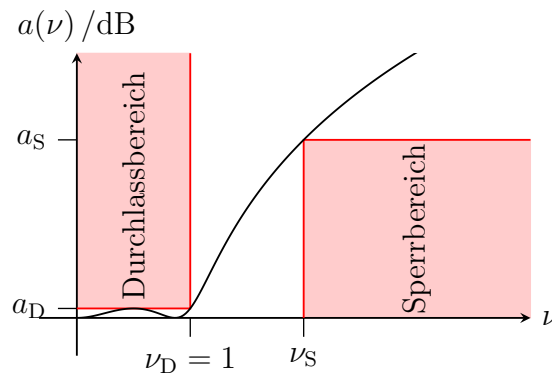


Abbildung 1: Toleranzschema eines Tiefpasses

Im Durchlassbereich bis zu der normierten Durchlassgrenze $\nu_D = 1$ ist die Dämpfung

$$a(\nu) = -20 \log\left(\left|\underline{S}_{2,1}(\nu)\right|\right) \quad (10)$$

kleiner als die maximal zulässige Durchlassdämpfung a_D . Im Sperrbereich ab der normierten Sperrgrenze ν_S ist die Dämpfung $a(\nu)$ größer als die mindestens erforderliche Sperrdämpfung a_S . Es entsteht ein Toleranzschlauch, in dem der Dämpfungsverlauf $a(\nu)$ des Filterprototypen liegen muss. Im Sinne eines niedrigen Schaltungsaufwands gilt es diese zulässigen Toleranzen auszunutzen.

Abbildung 2 zeigt eine typische Schaltung eines Tiefpassprototypen dritter Ordnung. Die Schaltung besteht aus einer wechselweisen Parallelschaltung einer Kapazität und Serienschaltung einer Induktivität. Derartige Schaltungen bezeichnet man als Abzweigschaltungen.

Abbildung 3 zeigt die vier möglichen Topologien von Abzweigschaltungen aus konzentrierten verlustfreien Bauelementen für Tiefpassprototypen. Die Ordnung N bezeichnet die Anzahl der Elemente, wobei Parallelschaltungen oder Serien-

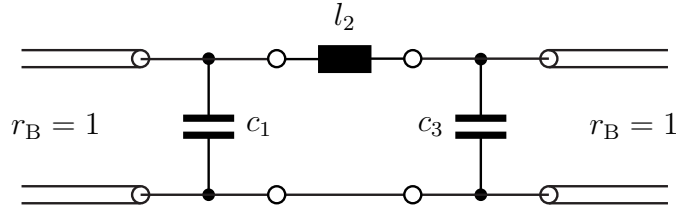


Abbildung 2: Schaltung eines Tiefpassprototypen

schaltungen mehrerer konzentrierter Bauelemente als ein Element gezählt würden. Die normierte Eingangsimpedanz $z_1(\nu)$ bei reflexionsfreiem Abschluss mit dem normierten Bezugswiderstand $r_B = 1$ ergibt sich aus der Schaltung zunächst als Kettenbruch. Durch Erweitern kann man diesen Kettenbruch in eine gebrochene rationale Funktion der normierten Frequenz ν umformen.

Der Reflexionsfaktor an Tor 1 bei Abschluss mit dem normierten Bezugswiderstand $r_B = 1$ an Tor 2 ergibt sich zu

$$\underline{S}_{1,1}(\nu) = \frac{z_1(\nu) - 1}{z_1(\nu) + 1}. \quad (11)$$

Dieser Reflexionsfaktor $\underline{S}_{1,1}(\nu)$ ist ebenfalls eine gebrochene rationale Funktion der normierten Frequenz ν . Aus der Verlustfreiheit folgt

$$|\underline{S}_{2,1}(\nu)|^2 = 1 - |\underline{S}_{1,1}(\nu)|^2. \quad (12)$$

Auch dies ist wieder eine gebrochene rationale Funktion der normierten Frequenz ν .

Die skizzierten einzelnen Schritte der Analyse sind leider zwecks Synthese einer Abzweigschaltung bei gegebenem Dämpfungsverlauf $a(\nu)$ nicht eindeutig umkehrbar [Mil92; Rup72; Vie74]. Auch ist nicht jeder beliebige gegebene Dämpfungsverlauf $a(\nu)$ realisierbar. In der Praxis verwendet man Kataloge vorab berechneter Tiefpassprototypen [MYJ80; Zve67].

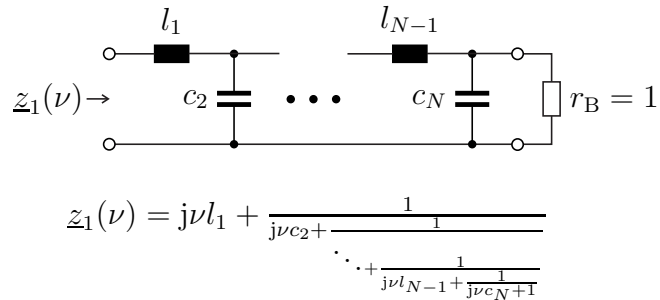
1.4. Schaltungstransformationen

1.4.1. Tiefpass-Hochpass-Transformation

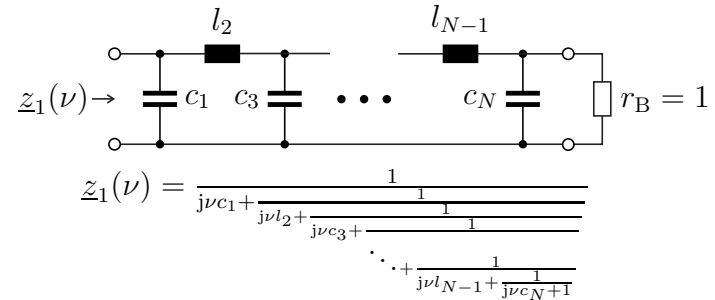
Aus einem Tiefpassprototypen kann man durch Transformation der normierten Frequenz gemäß

$$\nu = -\frac{1}{\nu'}$$

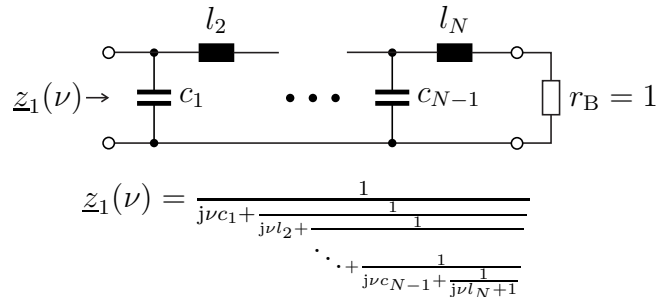
einen Hochpassprototypen gewinnen. Die Impedanzwerte und Admittanzwerte an sich bleiben durch die Transformation unverändert, nur treten sie bei anderen normierten Frequenzen ν' auf, siehe Tabelle 1. Abbildung 4 zeigt das entsprechende Toleranzschema eines Hochpasses.



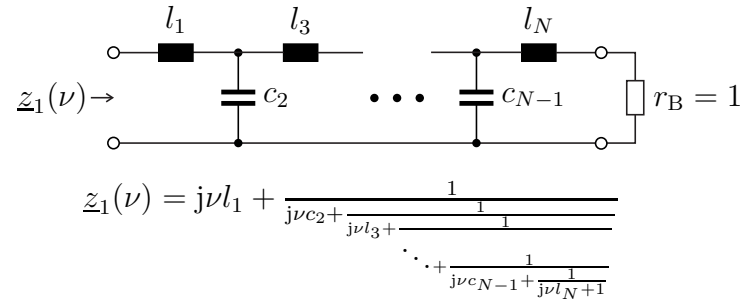
(a) Gerade Ordnung N . Die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_1(\nu)$ ist eine gebrochen rationale Funktion der normierten Frequenz ν mit Zählergrad N und Nennergrad $N - 1$



(b) Ungerade Ordnung N . Die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_1(\nu)$ ist eine gebrochen rationale Funktion der normierten Frequenz ν mit Zählergrad $N - 1$ und Nennergrad N



(c) Gerade Ordnung N . Die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_1(\nu)$ ist eine gebrochen rationale Funktion der normierten Frequenz ν mit Zählergrad $N - 1$ und Nennergrad N



(d) Ungerade Ordnung N . Die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_1(\nu)$ ist eine gebrochen rationale Funktion der normierten Frequenz ν mit Zählergrad N und Nennergrad $N - 1$

Abbildung 3: Abzweigschaltungen

Tabelle 1: Tiefpass-Hochpass-Transformation

| Hochpass | Tiefpass | |
|-----------|-------------|------------------|
| ν' | ν | |
| $-\infty$ | 0 | Durchlassbereich |
| -1 | +1 | |
| 0 | $\pm\infty$ | Sperrbereich |
| +1 | -1 | |
| $+\infty$ | 0 | Durchlassbereich |

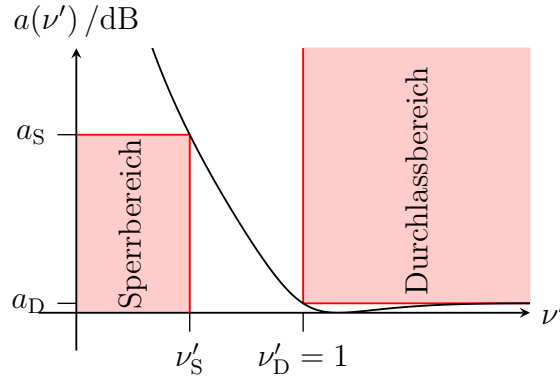


Abbildung 4: Toleranzschema eines Hochpasses

Für die Transformation eines frequenzunabhängigen normierten Wirkwiderstands gilt

$$r' = r. \quad (13)$$

Aus der normierten Impedanz

$$\underline{z}(\nu) = j\nu l$$

einer normierten Induktivität l wird durch die Transformation

$$\underline{z}'(\nu') = -\frac{j l}{\nu'} = \frac{1}{j\nu' \underbrace{\frac{1}{l}}_{c'}},$$

siehe (6) und (8). Die normierte Induktivität l wird in die normierte Kapazität

$$c' = \frac{1}{l} \quad (14)$$

transformiert.

Aus der normierten Admittanz

$$\underline{y}(\nu) = j\nu c$$

einer normierten Kapazität c wird durch die Transformation

$$\underline{y}'(\nu') = -\frac{jc}{\nu'} = \frac{1}{j\nu' \underbrace{\frac{1}{c}}_{\nu'}}$$

siehe (6) und (8). Die normierte Kapazität c wird in die normierte Induktivität

$$l' = \frac{1}{c} \quad (15)$$

transformiert.

Durch Transformation der in Abbildung 2 gezeigten Schaltung eines Tiefpassprototypen dritter Ordnung gewinnt man die in Abbildung 5 gezeigte Schaltung eines Hochpassprototypen dritter Ordnung.

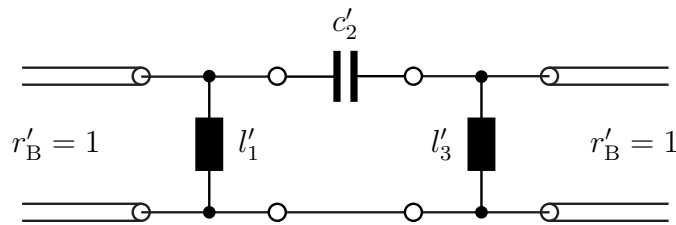


Abbildung 5: Schaltung eines Hochpassprototypen

1.4.2. Tiefpass-Bandpass-Transformation

Aus einem Tiefpassprototypen kann man durch Transformation der normierten Frequenz gemäß

$$\nu = \frac{\nu' - \frac{1}{\nu'}}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}$$

mit

$$\nu'_D > 1$$

einen Bandpassprototypen gewinnen, siehe Tabelle 2. Die untere normierte Durchlassgrenze entspricht $1/\nu'_D$ und die obere normierte Durchlassgrenze entspricht ν'_D . Abbildung 6 zeigt das entsprechende Toleranzschema eines Bandpasses.

Für die Transformation eines frequenzunabhängigen normierten Wirkwiderstands gilt wieder

$$r' = r. \quad (16)$$

Aus der normierten Impedanz

$$\underline{z}(\nu) = j\nu l$$

Tabelle 2: Tiefpass-Bandpass-Transformation

| Bandpass ν' | Tiefpass ν | |
|---------------------|-------------------|------------------|
| $-\infty$ | $-\infty$ | Sperrbereich |
| $-\nu'_D$ | -1 | |
| -1 | 0 | Durchlassbereich |
| $-\frac{1}{\nu'_D}$ | $+1$ | |
| 0 | $\pm\infty$ | Sperrbereich |
| $+\frac{1}{\nu'_D}$ | -1 | |
| $+1$ | 0 | Durchlassbereich |
| $+\nu'_D$ | $+1$ | |
| $+\infty$ | $+\infty$ | Sperrbereich |

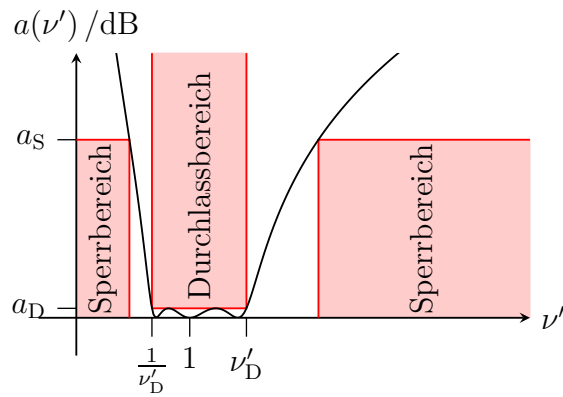


Abbildung 6: Toleranzschema eines Bandpasses

einer normierten Induktivität l wird durch die Transformation

$$\underline{z}'(\nu') = j \frac{\nu' - \frac{1}{\nu'_D}}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}} l = j \underbrace{\nu'}_{\nu'} \frac{l}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}} + \underbrace{\frac{1}{j\nu'}}_{c'}$$

siehe (6) und (8). Die normierte Induktivität l wird in eine Serienschaltung aus einer normierten Induktivität

$$l' = \frac{l}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}} \quad (17)$$

und einer normierten Kapazität

$$c' = \frac{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}{l} \quad (18)$$

transformiert.

Aus der normierten Admittanz

$$\underline{y}(\nu) = j\nu c$$

einer normierten Kapazität c wird durch die Transformation

$$\underline{y}'(\nu') = j \frac{\nu' - \frac{1}{\nu'}}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}} c = j\nu' \underbrace{\frac{c}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}}_{c'} + \frac{1}{j\nu' \underbrace{\frac{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}{c}}_{\nu'}}$$

siehe (6) und (8). Die normierte Kapazität c wird in eine Parallelschaltung aus einer normierten Kapazität

$$c' = \frac{c}{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}} \quad (19)$$

und einer normierten Induktivität

$$l' = \frac{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}{c} \quad (20)$$

transformiert.

Durch Transformation der in Abbildung 2 gezeigten Schaltung eines Tiefpassprototypen dritter Ordnung gewinnt man die in Abbildung 7 gezeigte Schaltung eines Bandpassprototypen dritter Ordnung.

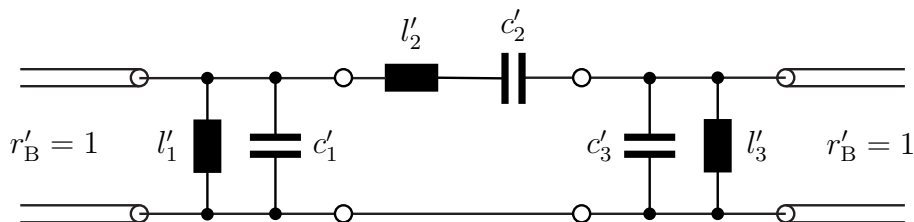


Abbildung 7: Schaltung eines Bandpassprototypen

1.4.3. Tiefpass-Bandsperre-Transformation

Aus einem Tiefpassprototypen kann man durch Transformation der normierten Frequenz gemäß

$$\nu = -\frac{\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}}{\nu' - \frac{1}{\nu'}}$$

mit

$$\nu'_D > 1$$

Tabelle 3: Tiefpass-Bandsperre-Transformation

| Bandsperrere ν' | Tiefpass ν | |
|------------------------|-------------------|------------------|
| $-\infty$ | 0 | Durchlassbereich |
| $-\nu'_D$ | +1 | Sperrbereich |
| -1 | $\pm\infty$ | |
| $-\frac{1}{\nu'_D}$ | -1 | |
| 0 | 0 | Durchlassbereich |
| $+\frac{1}{\nu'_D}$ | +1 | Sperrbereich |
| +1 | $\pm\infty$ | |
| $+\nu'_D$ | -1 | |
| $+\infty$ | 0 | Durchlassbereich |

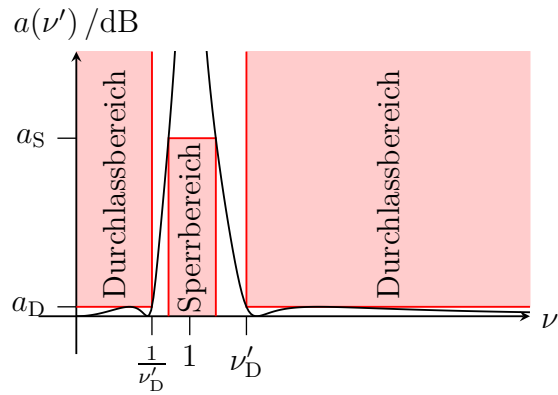


Abbildung 8: Toleranzschema einer Bandsperre

einen Bandsperreprototypen gewinnen, siehe Tabelle 3. Die untere normierte Durchlassgrenze entspricht $\frac{1}{\nu'_D}$ und die obere normierte Durchlassgrenze entspricht ν'_D . Abbildung 8 zeigt das entsprechende Toleranzschema einer Bandsperre.

Für die Transformation eines frequenzunabhängigen normierten Wirkwiderstands gilt wieder

$$r' = r. \quad (21)$$

Aus der normierten Admittanz

$$\underline{y}(\nu) = \frac{1}{j\nu l}$$

einer normierten Induktivität l wird durch die Transformation

$$\underline{y}'(\nu') = -\frac{\nu' - \frac{1}{\nu'}}{j\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right)l} = j\nu' \underbrace{\frac{1}{\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right)l}}_{c'} + \underbrace{\frac{1}{j\nu' \left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right)l}}_{\nu'}$$

siehe (6) und (8). Die normierte Induktivität l wird in eine Parallelschaltung aus einer normierten Kapazität

$$c' = \frac{1}{\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) l} \quad (22)$$

und einer normierten Induktivität

$$l' = \left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) l \quad (23)$$

transformiert.

Aus der normierten Impedanz

$$\underline{z}(\nu) = \frac{1}{j\nu c}$$

einer normierten Kapazität c wird durch die Transformation

$$\underline{z}'(\nu') = -\frac{\nu' - \frac{1}{\nu'}}{j\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) c} = j\nu' \underbrace{\frac{1}{\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) c}}_{l'} + \underbrace{\frac{1}{j\nu' \left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) c}}_{c'}$$

siehe (6) und (8). Die normierte Kapazität c wird in eine Serienschaltung aus einer normierten Induktivität

$$l' = \frac{1}{\left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) c} \quad (24)$$

und einer normierten Kapazität

$$c' = \left(\nu'_D - \frac{1}{\nu'_D}\right) c \quad (25)$$

transformiert.

Durch Transformation der in Abbildung 2 gezeigten Schaltung eines Tiefpassprototypen dritter Ordnung gewinnt man die in Abbildung 9 gezeigte Schaltung eines Bandsperreprototypen dritter Ordnung.

2. Versuchsvorbereitung

Aufgabe 1 Gegeben ist das Tschebyscheff-Polynom

$$T(\nu) = 4\nu^3 - 3\nu \quad (26)$$

dritten Grades. Führen Sie eine Kurvendiskussion durch, das heißt bestimmen Sie die Nullstellen, die lokalen Extrema und skizzieren Sie die den Graphen der Funktion!

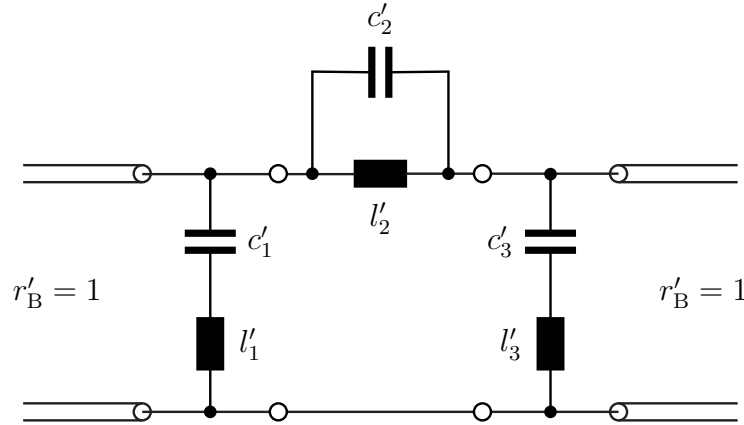


Abbildung 9: Schaltung eines Bandsperreprototypen

Aufgabe 2 Basierend auf dem Tschebyscheff-Polynom dritten Grades erhält man einen möglichen Dämpfungsverlauf

$$a(\nu) = 10 \log(1 + T^2(\nu)) \quad (27)$$

eines Tiefpassprototypen dritter Ordnung. Wie groß ist die Durchlassdämpfung a_D ? Wie groß ist das Maximum des Betrags des Reflexionsfaktors $\underline{S}_{1,1}(\nu)$ im Durchlassbereich?

Zeigen Sie, dass mit den normierten Bauelementewerten c_1 , l_2 und c_3 des Tiefpassprototypen dritter Ordnung in induktivitätsarmer Schaltung gemäß Abbildung 3b

$$\left| \underline{S}_{2,1}(\nu) \right|^2 = \frac{1}{\frac{c_1^2 l_2^2 c_3^2}{4} \nu^6 + \frac{(c_1^2 + c_3^2) l_2^2 - 2c_1 l_2 c_3 (c_1 + c_3)}{4} \nu^4 + \frac{(c_1 - l_2 + c_3)^2}{4} \nu^2 + 1} \quad (28)$$

gilt! Berechnen Sie hierzu zunächst $z_1(\nu)$ und $\underline{S}_{1,1}(\nu)$ als gebrochen rationale Funktionen der normierten Frequenz ν mit c_1 , l_2 und c_3 als Parametern.

Bestimmen Sie die normierten Bauelementewerte c_1 , l_2 und c_3 des Tiefpassprototypen durch Koeffizientenvergleich der Nennerpolynome von $\left| \underline{S}_{2,1}(\nu) \right|^2$ und $1/(1 + T^2(\nu))$! Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Tabellen in [MYJ80]!

Aufgabe 3 Entwerfen sie durch Transformation des in Aufgabe 2 entworfenen Tiefpassprototypen einen Bandpass der Mittenfrequenz 1 MHz und der Bandbreite 500 kHz für den Bezugswiderstand $R_B = 50 \Omega$! Überprüfen Sie Ihr Ergebnis durch Simulation des entworfenen Bandpasses mit LTspice! Verwenden Sie den Befehl `.net [V(out[,ref])|I(Rout)] <Vin|Iin> [Rin=<val>] [Rout=<val>]` zum Berechnen der Streuparameter.

3. Versuchsdurchführung

Aufgabe 4 Bauen Sie das in Aufgabe 3 entworfene Filter auf! Induktivitäten hoher Güte können mit Eisenpulverringkernen realisiert werden, siehe Abbildung 10. Um die berechneten Bauelementewerte hinreichend genau zu realisieren, müssen Sie möglicherweise Serienschaltungen oder Parallelschaltungen mehrerer der verfügbaren Bauelemente verwenden. Messen sie die verwendeten Bauelementewerte und wiederholen Sie die Simulation mit diesen Werten, um den Einfluss der Abweichungen von den idealen Werten zu untersuchen!

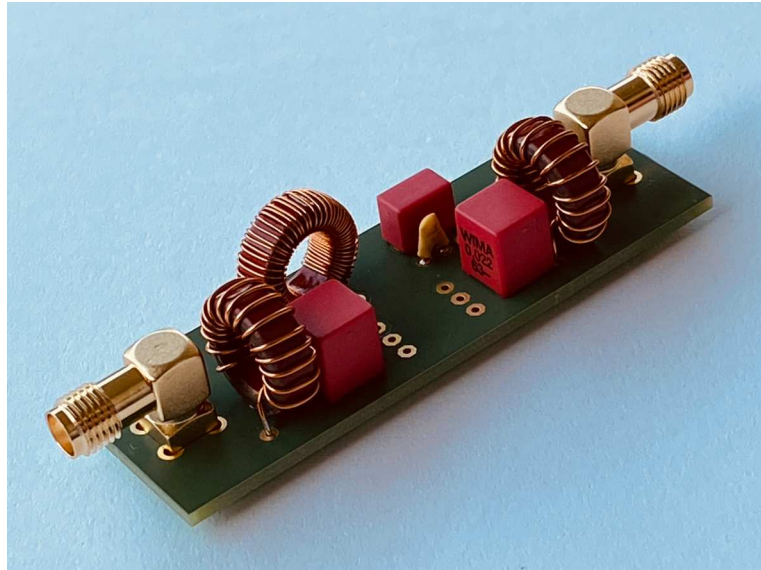


Abbildung 10: Realisierter Bandpass

Aufgabe 5 Messen Sie die Übertragungsfunktion $\underline{S}_{2,1}(f)$ und die 3 dB-Bandbreite des Filters mit dem Vektornetzwerkanalysator! Hierzu sind folgende Bedienschritte direkt am Vektornetzwerkanalysator durchzuführen:

1. Zurücksetzen der Einstellungen des Vektornetzwerkanalysators auf Standardwerte mit **PRESET** .
2. Messen des Betrags von $\underline{S}_{2,1}(f)$ sollte jetzt aktiv sein.
3. Einstellen der Startfrequenz von 100 kHz mit **SPAN** **Start** .
4. Einstellen der Stopfrequenz von 2 MHz mit **SPAN** **Stop** .
5. Einstellen einer Testsignalleistung von 0 dBm mit **PWR BW** **Power** .
6. Einstellen einer Auflösebandbreite von 10 Hz mit **PWR BW** **Meas Bandwidth** .

7. Aktivieren des Single Sweep Modus mit `Sweep` `Single (All Chans)` .
8. Starten einer einfachen Kalibrierung mit `CAL` `Start Cal` `Two-Port P1 P2` `Normalize Both Directions` . Wählen Sie als Steckverbinder PC 3.5 (m) und als Kalibrierkit PC 3.5 Ideal Kit aus.¹ Als Kalibrierstandard wird nur eine Durchverbindung benötigt.
9. Anschließen des Filters.
10. Auslösen einer Messung mit `SWEEP` `Restart` .
11. Messen der Bandbreite mit `MKR->` `Marker Search` `Bandfilter` `Bandpass Search Ref to Max` .
12. Speichern des Messergebnisses mit `PRINT` `Print Screen` . Die Einstellungen für das Dateiformat können falls erforderlich mit `PRINT` `Device Setup` ändern.

A. Materialliste

Neben einem Arbeitsplatzrechner mit LTspice wird das in der Tabelle 4 aufgelistete Labormaterial benötigt. Die Versuchsanleitung ist für den Vektornetzwerkanalysator ZVL von Rohde & Schwarz geschrieben. Eine Anpassung an die meisten anderen handelsüblichen Vektornetzwerkanalysatoren sollte jedoch leicht möglich sein.

Tabelle 4: Materialliste

| Anzahl | Bezeichnung |
|--------|---|
| 1 | Vektornetzwerkanalysator ZVL von Rohde & Schwarz |
| 2 | Messtorkabel N-male/SMA-male |
| 2 | Adapterleitung BNC/AL 0,64 |
| 2 | Adapter N-male/BNC-female |
| 1 | Durchverbindung SMA-female |
| 1 | Komponententester, zum Beispiel LCR200 von Extech |
| 1 | Steckbrett mit Zubehör |
| 1 | Pinzette |
| 1 | Bauelementesortiment mit Induktivitäten und Kapazitäten |

¹PC 3.5 ist eine Präzisionsversion der SMA-Steckverbinder.

B. Sicherheitshinweise

Hochfrequenztechnische Messgeräte sind empfindliche Präzisionsinstrumente. Zum Vermeiden von Beschädigungen sind folgende Hinweise zu beachten:

- Vermeiden Sie elektrostatische Aufladungen. Verwenden Sie Erdungsarmbänder.
- Berühren Sie niemals die Kontaktflächen der Steckverbinder. Drehen Sie zum Befestigen und Lösen der Steckverbinder nur die Überwurfmutter und nicht die Steckverbinder selbst.
- Überschreiten Sie niemals die maximal zulässigen Signalpegel. Diese finden Sie in den Datenblättern und häufig auch direkt am Gerät neben dem entsprechenden Anschluss. Beachten Sie, dass häufig keinerlei Gleichspannungen zulässig sind.

Literatur

- [Mil92] O. Mildenerger. *Entwurf analoger und digitaler Filter*. Braunschweig: Vieweg, 1992.
- [MYJ80] G. L. Matthaei, L. Young und E. M. T. Jones. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. Norwood, MA: Artech House, 1980.
- [Rup72] W. Rupprecht. *Netzwerksynthese: Entwurfstheorie linearer passiver und aktiver Zweipole und Vierpole*. Berlin: Springer, 1972.
- [Vie74] P. Vielhauer. *Passive lineare Netzwerke: Mikusinski-Operatoren, Leitungstheorie, Vieltortheorie, Netzwerksynthese*. Berlin: Verlag Technik, 1974.
- [Zve67] A. I. Zverev. *Handbook of Filter Synthesis*. New York, NY: Wiley, 1967.