

Block 04 — Passive Filter und Filterentwurf

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 04 — Passive Filter und Filterentwurf	2
4.0 Einführung	2
4.0.1 Lernziele	2
4.0.2 Vorbereitung zu Hause	2
4.0.3 90-Minuten-Plan	3
4.0.4 Konzeptübersicht	3
4.1 Kerninhalt	3
4.1.1 Was soll ein Filter tun?	3
4.1.2 Der RC-Tiefpass	4
Betrachtung für niedrige Frequenzen	4
Betrachtung für hohe Frequenzen	4
4.1.3 Übertragungsfunktion des RC-Tiefpasses	4
Grenzfrequenz	5
4.1.4 Das Bode-Diagramm des Tiefpasses	5
Praktische Falstad-Untersuchung	5
4.1.5 Der RC-Hochpass	6
Für niedrige Frequenzen	6
Für hohe Frequenzen	6
4.1.6 Vom Frequenzgang zur Dimensionierung	6
Beispiel	7
4.1.7 Filter für die Strommessung der Leit-Schaltung	7
4.1.8 Der belastete passive Filter	8
4.1.9 Grenzen eines passiven Filters erster Ordnung	8
4.2 Häufige Fehler	9
4.3 Übungen	9
4.4 Zusammenfassung	10
4.5 Ausblick	10

Block 04 — Passive Filter und Filterentwurf

4.0 Einführung

In Block 02 wurde das Bode-Diagramm als Werkzeug zur Beschreibung frequenzabhängiger Schaltungen eingeführt.

In Block 03 wurde deutlich, dass Kondensatoren frequenzabhängige Impedanzen besitzen und reale Kondensatoren zusätzliche Grenzen aufweisen.

Nun werden beide Ideen zusammengeführt.

In der Leit-Schaltung soll das Shunt-Signal ausgewertet werden. Gleichzeitig entstehen durch die PWM bei etwa 30 kHz schnelle Signalanteile, die für die eigentliche Strommessung möglicherweise unerwünscht sind.

Ein möglicher Ansatz ist ein RC-Tiefpass.

Damit entsteht erstmals eine echte Entwurfsfrage:

Wie müssen R und C gewählt werden, damit gewünschte Frequenzen weitgehend erhalten bleiben und unerwünschte Frequenzen ausreichend gedämpft werden?

4.0.1 Lernziele

Nach diesem 90-minütigen Block können Sie

- Tiefpass und Hochpass anhand ihrer Wirkung und ihres Frequenzgangs unterscheiden,
- das Verhalten eines RC-Filters für $\rightarrow 0$ und $\rightarrow \infty$ qualitativ bestimmen,
- die Grenzfrequenz eines RC-Filters bestimmen,
- aus einer gewünschten Grenzfrequenz geeignete Werte für R und C dimensionieren,
- Amplitude und Phase eines Filters erster Ordnung interpretieren,
- die Dämpfung bei einer gegebenen Frequenz aus dem Frequenzgang bestimmen,
- den Unterschied zwischen exaktem und asymptotischem Bode-Diagramm erklären,
- den Einfluss einer realen Last auf einen passiven Filter beurteilen,
- einen RC-Filter für eine konkrete Aufgabe der Leit-Schaltung dimensionieren und in Falstad überprüfen.

4.0.2 Vorbereitung zu Hause

Wiederholen Sie aus Block 02:

- $A_{\text{dB}} = 20 \log_{10} |A|$
- Dekade
- $\pm 20\text{ dB/dec}$
- Amplituden- und Phasengang
- -3 dB .

Wiederholen Sie aus Block 03:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

und qualitativ:

- niedrige Frequenz $\rightarrow$ große Kondensatorimpedanz,
- hohe Frequenz $\rightarrow$ kleine Kondensatorimpedanz.

4.0.3 90-Minuten-Plan

1. **Einstieg (10 min):** Shunt-Signal mit PWM-Anteilen; was soll ein Filter leisten?
2. **RC-Tiefpass verstehen (20 min):** Grenzfälle und Falstad.
3. **Grenzfrequenz und Bode-Diagramm (20 min):** f_c , $-3\sim\mathrm{dB}$, Phase und Steigung.
4. **Filter dimensionieren (20 min):** vom Anforderungsprofil zu R und C .
5. **Belasteter Filter (10 min):** Einfluss der nachfolgenden Schaltung.
6. **Praktische Entwurfsübung (7 min):** Filter für die Leit-Schaltung simulieren.
7. **Abschluss (3 min):** Übergang zu OPV und aktiven Filtern.

4.0.4 Konzeptübersicht

1. Passive Filter nutzen frequenzabhängige Impedanzen, um Frequenzanteile unterschiedlich stark zu übertragen.
2. Beim RC-Tiefpass werden niedrige Frequenzen weitgehend übertragen und hohe Frequenzen gedämpft.
3. Beim RC-Hochpass gilt das umgekehrte Verhalten.
4. Die Grenzfrequenz eines RC-Filters erster Ordnung wird durch das Produkt RC bestimmt.
5. Bei der Grenzfrequenz beträgt der Amplitudenfaktor $1/\sqrt{2}$ bzw. ungefähr $-3\sim\mathrm{dB}$.
6. Ein Filter erster Ordnung besitzt außerhalb des Übergangsbereichs eine asymptotische Steigung von $20\sim\mathrm{dB/dec}$.
7. Ein real angeschlossener Verbraucher kann die Dimensionierung eines passiven Filters verändern.

4.1 Kerninhalt

4.1.1 Was soll ein Filter tun?

Ein reales Messsignal besteht häufig aus mehreren Frequenzanteilen.

Beispiel Leit-Schaltung:

- langsamer Verlauf des Motorstroms,
- PWM-Anteil bei etwa $30\sim\mathrm{kHz}$,
- zusätzliche hochfrequente Störungen durch schnelle Schaltflanken.

Ein Filter soll nicht einfach „das Signal glätten“.

Stattdessen muss festgelegt werden:

- welche Frequenzen übertragen werden sollen,
- welche Frequenzen gedämpft werden sollen,
- wie groß die zulässige Dämpfung im Nutzbereich ist,
- wie groß die notwendige Dämpfung im Störbereich sein soll.



Ein Filter wird nicht ausgehend von R und C dimensioniert.

Am Anfang steht eine **Anforderung an den Frequenzgang**.

4.1.2 Der RC-Tiefpass

[Schaltung: R in Reihe, C nach GND, Ausgang über C]

[Falstad-Simulation RC-Tiefpass mit veränderbarer Frequenz]

Betrachtung für niedrige Frequenzen

Für $f \rightarrow 0$ wird $|Z_C|$ sehr groß.

Der Kondensator wirkt näherungsweise wie eine Unterbrechung.

Damit gilt näherungsweise:

$$U_{\text{O}} \approx U_{\text{I}}.$$

Betrachtung für hohe Frequenzen

Für $f \rightarrow \infty$ wird $|Z_C|$ klein.

Der Kondensator leitet das Ausgangssignal zunehmend gegen Masse ab.

Damit gilt:

$$U_{\text{O}} \rightarrow 0.$$

Aus diesen beiden Grenzfällen lässt sich bereits das qualitative Bode-Diagramm vorhersagen:

- niedrige Frequenzen: ungefähr $0 \sim \text{dB}$,
- hohe Frequenzen: zunehmende Dämpfung.

4.1.3 Übertragungsfunktion des RC-Tiefpasses

Mit

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

und dem Spannungsteiler ergibt sich:

$$\underline{A}(\omega) = \frac{Z_C}{R + Z_C}$$

und daraus

$$\boxed{\underline{A}(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}}.$$

Der Betrag lautet:

$$|A(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Die Phase ist:

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega RC)$$

Grenzfrequenz

Die Grenzfrequenz liegt dort, wo

$$|Z_C| = R$$

Daraus folgt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

An dieser Stelle gilt:

$$|A(f_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$$

bzw.

$$A_{\text{dB}}(f_c) \approx -3 \text{ dB}$$

Die Phase beträgt

$$\varphi(f_c) = -45^\circ$$

4.1.4 Das Bode-Diagramm des Tiefpasses

[draw.io: exaktes und asymptotisches Bode-Diagramm]

Der Amplitudengang kann näherungsweise durch zwei Geraden beschrieben werden:

- für $f \ll f_c$: 0 dB ,
- für $f \gg f_c$: -20 dB/dec .

Die beiden asymptotischen Geraden schneiden sich bei f_c .

Der tatsächliche Frequenzgang liegt dort jedoch bei -3 dB .



Die asymptotische Bode-Darstellung ist eine Näherung.

Sie eignet sich sehr gut zum schnellen Abschätzen, ersetzt aber nicht den exakten Frequenzgang im Übergangsbereich.

Praktische Falstad-Untersuchung

Für einen RC-Tiefpass mit bekannten R und C :

1. Berechnen Sie f_c .

2. Suchen Sie diesen Punkt im Bode-Diagramm.
3. Lesen Sie Amplitude und Phase ab.
4. Prüfen Sie die Steigung eine Dekade oberhalb der Grenzfrequenz.
5. Verdoppeln Sie R .
6. Beobachten Sie die Verschiebung des Frequenzgangs.

4.1.5 Der RC-Hochpass

[Schaltung: C in Reihe, R nach GND, Ausgang über R]

Auch hier können zunächst die Grenzfälle betrachtet werden.

Für niedrige Frequenzen

$|Z_C|$ ist groß.

Das Eingangssignal wird kaum zum Ausgang übertragen.

$U_O \rightarrow 0$.

Für hohe Frequenzen

$|Z_C|$ wird klein.

Der Kondensator wirkt näherungsweise wie eine Verbindung.

$U_O \approx U_I$.

Damit überträgt der Hochpass hohe Frequenzen und dämpft niedrige Frequenzen.

Die Grenzfrequenz lautet auch hier:

$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$.

[Kurze Vergleichstabelle Tiefpass/Hochpass]

Eigenschaft	Tiefpass	Hochpass
niedrige Frequenzen	werden übertragen	werden gedämpft
hohe Frequenzen	werden gedämpft	werden übertragen
Steigung im Sperrbereich	$-20 \sim \mathrm{dB/dec}$	$+20 \sim \mathrm{dB/dec}$
Betrag bei f_c	$-3 \sim \mathrm{dB}$	$-3 \sim \mathrm{dB}$

4.1.6 Vom Frequenzgang zur Dimensionierung

Nun wird die Blickrichtung umgedreht.

Bisher wurde gefragt:

Welchen Frequenzgang erzeugen gegebene Werte R und C ?

Beim Entwurf lautet die Frage:

Welche Werte R und C benötigen wir für einen gewünschten Frequenzgang?

Aus

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

folgt beispielsweise:

$$C = \frac{1}{2\pi R f_c}.$$

Es existieren unendlich viele Kombinationen von R und C , die dieselbe Grenzfrequenz erzeugen.

Die Wahl ist daher zusätzlich von praktischen Randbedingungen abhängig:

- Belastung der Signalquelle,
- Eingangsimpedanz der nachfolgenden Schaltung,
- verfügbare Kondensatorwerte,
- Baugröße,
- Toleranz,
- Leckströme,
- parasitäre Eigenschaften.

Beispiel

Gesucht ist ein Tiefpass mit

$$f_c = 10 \text{ kHz}.$$

Es wird zunächst $R = 1 \text{ k}\Omega$ gewählt.

Damit ergibt sich:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ kHz}} \approx 15.9 \text{ nF}.$$

Ein verfügbarer Standardwert könnte beispielsweise $C = 15 \text{ nF}$ oder 16 nF sein.

Anschließend muss die tatsächlich resultierende Grenzfrequenz erneut bestimmt werden.

4.1.7 Filter für die Strommessung der Leit-Schaltung

In der Leit-Schaltung liegt ein PWM-Anteil bei ungefähr

$$f_{\text{PWM}} = 30 \text{ kHz}$$

vor.

Nehmen wir als ersten Entwurf:

$$R = 1 \text{ k}\Omega$$

und

$$C = 10 \text{ nF}.$$

Dann liegt die Grenzfrequenz bei ungefähr

$$f_c = \{1 \over 2\pi\} \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} \approx 15.9 \text{ kHz}.$$

Die PWM-Frequenz liegt damit nur knapp eine Oktave oberhalb der Grenzfrequenz.

Frage:

Wie stark wird ein Signal bei 30 kHz tatsächlich gedämpft?

Bestimmen Sie den Wert zunächst aus dem Bode-Diagramm bzw. der Falstad-Simulation.

Diese Betrachtung zeigt einen wichtigen Punkt:

Eine Grenzfrequenz unterhalb der Störfrequenz bedeutet nicht automatisch, dass die Störung stark unterdrückt wird.

Ein Filter erster Ordnung besitzt nur eine Flankensteilheit von -20 dB/dec .

4.1.8 Der belastete passive Filter

Bisher wurde angenommen, dass der Ausgang des Filters nicht belastet wird.

Reale Schaltungen besitzen jedoch eine endliche Eingangsimpedanz.

Wird am Ausgang des Tiefpasses ein Lastwiderstand R_L angeschlossen, liegt dieser parallel zum Kondensator.

Damit verändert sich

- das Spannungsübertragungsverhältnis und
- unter Umständen auch der Frequenzgang.

[Falstad: unbelasteter und belasteter Tiefpass]

Praktische Untersuchung:

- $R_L \gg R$
- $R_L \approx 10R$
- $R_L \approx R$



Ein passiver Filter kann nicht unabhängig von Quelle und Last betrachtet werden.

Die nachfolgende Schaltung ist Teil des Filters.

4.1.9 Grenzen eines passiven Filters erster Ordnung

Der passive RC-Tiefpass ist

- einfach,
- kostengünstig,
- robust und
- für viele Aufgaben ausreichend.

Er besitzt aber auch Grenzen:

- nur $20 \sim \mathrm{dB/dec}$ Flankensteilheit,
- keine Verstärkung,
- Belastung durch nachfolgende Schaltungen,
- Zielkonflikt zwischen Signalbandbreite und Störunterdrückung.

Wenn stärkere Filterung oder eine definierte Verstärkung erforderlich ist, können aktive Filter verwendet werden.

Damit ist die Brücke zum nächsten Block vorbereitet.

4.2 Häufige Fehler

- Grenzfrequenz und Sperrfrequenz gleichsetzen.
- Annehmen, dass bei f_c das Ausgangssignal null ist.
- $-3 \sim \mathrm{dB}$ als halbe Spannung interpretieren.
- Die asymptotische Gerade mit dem exakten Frequenzgang verwechseln.
- Eine Frequenz knapp oberhalb von f_c bereits als „stark gedämpft“ betrachten.
- Den Einfluss der Last ignorieren.
- R und C ausschließlich aus f_c auswählen, ohne praktische Randbedingungen zu betrachten.
- Einen idealen Kondensator verwenden, obwohl Block 03 gezeigt hat, dass reale Bauteile Grenzen besitzen.

4.3 Übungen

Aufgabenideen:

1. Tiefpass verstehen:

- Grenzfälle $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$ erklären.
- Bode-Diagramm qualitativ skizzieren.

2. Grenzfrequenz:

- gegeben R und C .
- f_c bestimmen.
- Betrag und Phase bei f_c angeben.

3. Dimensionierung:

- gewünschtes f_c und vorgegebenes R .
- C bestimmen.
- Standardwert wählen.
- resultierendes f_c neu berechnen.

4. Dämpfung bei der PWM-Frequenz:

- $R=1 \sim \mathrm{k\Omega}$, $C=10 \sim \mathrm{nF}$.
- Dämpfung bei $30 \sim \mathrm{kHz}$ bestimmen.
- mit Falstad vergleichen.

- beurteilen, ob die PWM stark unterdrückt wird.

5. Filtervarianten vergleichen:

- $f_c = 5 \sim \text{kHz}$, $15 \sim \text{kHz}$ und $50 \sim \text{kHz}$.
- Auswirkungen auf Nutzsignal und PWM-Anteil diskutieren.

6. Belasteter Tiefpass:

- ideal hochohmige Last mit $R_L = 10 \sim \text{k}\Omega$ und $R_L = 1 \sim \text{k}\Omega$ vergleichen.
- Falstad verwenden.
- erklären, warum sich der Frequenzgang verändert.

7. Entwurfsaufgabe Leit-Schaltung:

- Anforderungen an Nutzsignalbandbreite und Dämpfung vorgeben.
- R und C auswählen.
- Bode-Diagramm vorhersagen.
- Simulation durchführen.
- Ergebnis bewerten.

4.4 Zusammenfassung

- Passive RC-Filter nutzen die frequenzabhängige Impedanz des Kondensators.
- Ein Tiefpass überträgt niedrige und dämpft hohe Frequenzen.
- Ein Hochpass dämpft niedrige und überträgt hohe Frequenzen.
- Für einen RC-Filter erster Ordnung gilt $f_c = 1/(2\pi RC)$.
- Bei f_c beträgt der Amplitudenfaktor ungefähr 0.707 bzw. $-3 \sim \text{dB}$.
- Ein Filter erster Ordnung besitzt im Sperrbereich eine Steigung von $20 \sim \text{dB/dec}$.
- Beim Filterentwurf muss zuerst der gewünschte Frequenzgang festgelegt werden.
- Quelle und Last beeinflussen einen passiven Filter.
- Ein Filter ist immer ein Kompromiss zwischen gewünschter Bandbreite und Unterdrückung unerwünschter Signalanteile.

4.5 Ausblick

Für die Strommessung reicht ein passiver Filter nicht immer aus.

Das Shunt-Signal ist klein und muss zusätzlich verstärkt werden. Gleichzeitig soll die nachfolgende Schaltung den passiven Filter möglichst wenig belasten.

Im nächsten Block wird deshalb der **Operationsverstärker als reales Bauteil** wieder aufgegriffen.

Dabei werden insbesondere

- Eingangs- und Ausgangsgrenzen,
- Bandbreite,
- Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt und
- aktive Filter

betrachtet.

From:

<https://wiki.mexle.org/> - **MEXLE Wiki**

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/block04

Last update: **2026/09/28 00:25**

