

# Praktikum 4.2: Aktives Filter

Cyril Stoller, Marcel Bärtschi

March 1, 2013

## Contents

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
2.1	Motivation . . . . .	2
2.2	Aufgabenstellung . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>2</b>
3.1	Theorie . . . . .	2
3.2	Dimensionierung . . . . .	3
3.3	Simulation . . . . .	3
3.4	Aufbau . . . . .	3
3.5	Abstimmung . . . . .	3
3.5.1	Mittenfrequenz . . . . .	3
3.6	Messung . . . . .	4
3.7	Fehlerabschätzung . . . . .	4
3.8	Diskussion . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>4</b>
	<b>Anhang</b>	<b>6</b>

## Abstract

Dieser Bericht ist ergänzend zum Laborjournal und enthält vertiefte Diskussion der gemessenen Resultate, sowie die detaillierten Berechnungen.

# 1 Ziel

Dieser Bericht beinhaltet genaue Angaben zur Durchführung und eine Diskussion des Versuches Aktive Filter im Modul BTE5032.02. Es soll ein aktives Filter dimensioniert, aufgebaut und ausgemessen werden. Die Resultate sollen anschliessend mit Resultaten aus einer Simulation verglichen und diskutiert werden.

## 2 Einleitung

### 2.1 Motivation

Die im letzten Semester erlernte Filtertheorie soll mit diesem Praktikum in der Praxis nachvollzogen und zu vertieft werden. Ausserdem soll während dem Praktikum ein Laborjournal geführt werden. Dies soll soweit geübt werden, dass es im Arbeitsalltag als Elektroingenieur zur Gewohnheit wird.

### 2.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist unter <http://moodle.bfh.ch/course/view.php?id=3380> oder im Anhang zu finden.

## 3 Durchführung

### 3.1 Theorie

Ein aktives Filter besteht aus einem OpAmp mit einer Beschaltung aus Kondensatoren und Widerständen. Es hat verglichen zum passiven Filter (welches ausschliesslich aus diskreten Elementen wie Widerständen, Kondensatoren und Spulen) die Vorteile, dass es einfacher höhere Ordnungen erzielen kann und eine Verstärkung enthält.

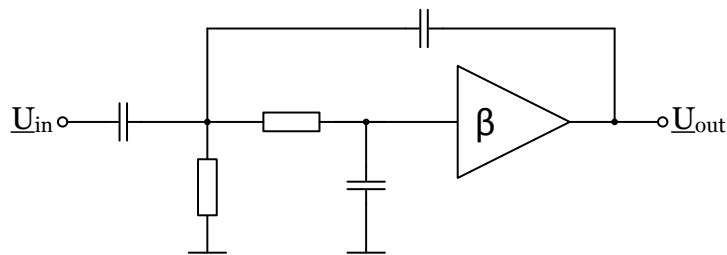


Figure 1: Konzeptschema des Bandpasses zweiter Ordnung[1]

Hier verwenden wir ein Bandpassfilter zweiter Ordnung (siehe Abb. 1). Der Verstärkerblock mit der Bezeichnung  $\beta$  ist im Prinzip eine nicht-invertierende OpAmp-Verstärkerschaltung mit einer Offset-Kompensation.

## 3.2 Dimensionierung

Bei der Dimensionierung sind wir genau nach der Aufgabenstellung gegangen. Zuerst haben wir das  $\beta$  berechnet.

Um die Werte genau zu erreichen, haben wir bei den Widerständen  $R_1$  und  $R_3$  zusätzlich ein Potentiometer in Serie geschaltet. Somit bleibt einen gewisser Spielraum um die Schaltung sauber abzustimmen.

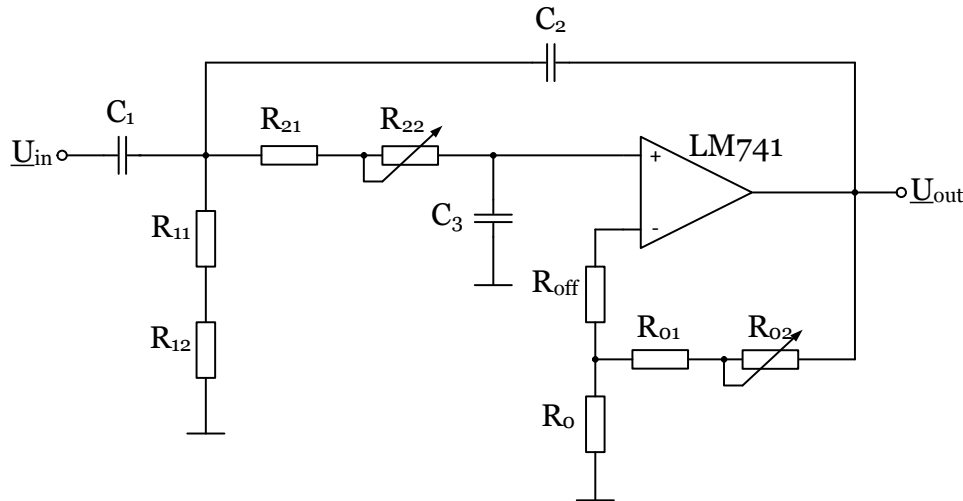


Figure 2: Schema für den Aufbau

## 3.3 Simulation

Die Simulation wurde in LT Spice durchgeführt. Da in der Aufgabenstellung der OpAmp LM741 vorgegeben ist, mussten wir diesen zuerst noch im Spice hinzufügen. Danach die Simulation gemäss dem Schema aufbauen und die Werte entsprechend der Dimensionierung wählen. Die Widerstände haben wir in der Simulation genau auf den berechneten Wert eingestellt. Bei der realen Schaltung haben wir einen Näherungswert genommen und mit einem Potentiometer in Serie zum Widerstand den Wert genau abgeglichen.

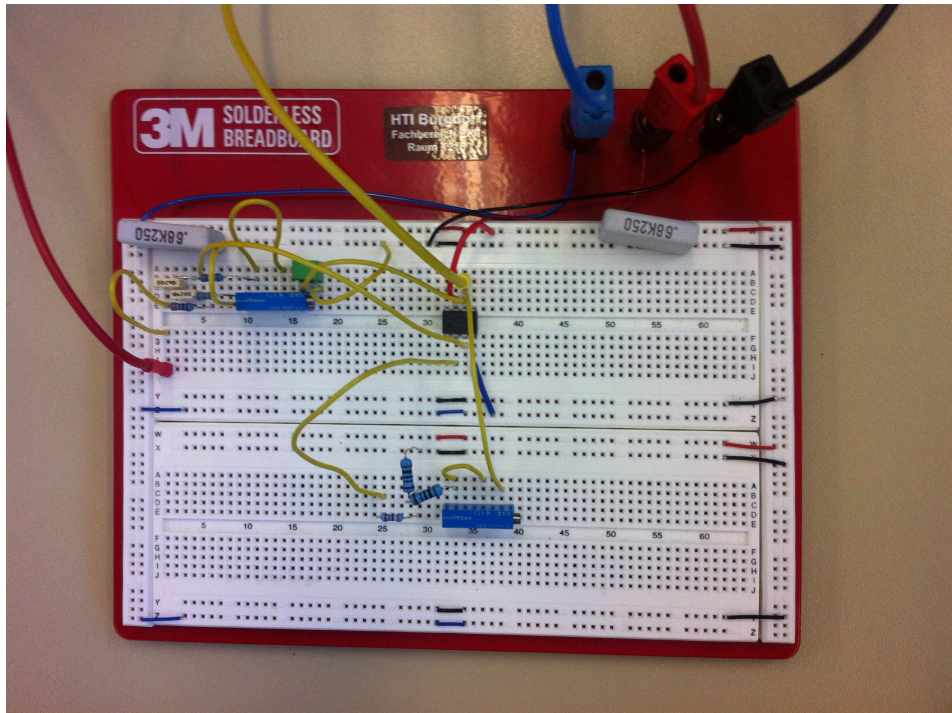
## 3.4 Aufbau

Der Aufbau auf der Steckplatte hat uns am meisten Schwierigkeiten bereitet. Gleich zwei mal hatten wir einen Fehler im Aufbau.

## 3.5 Abstimmung

### 3.5.1 Mittenfrequenz

Wir speisen am Eingang die Mittenfrequenz ein und messen am Ausgang die Phase. Da die Amplitude in der Nähe der Mittenfrequenz recht flach ist, kann man damit schlecht



2.jpg

Figure 3: Aufbau auf der Steckplatte[?]

abstimmen. Laut dem erwarteten Phasengang eines Bandpasses wird sich dort die Phase aber schnell ändern und bei perfekter Abstimmung bei  $45^\circ$  sein.

### 3.6 Messung

Messmittelliste ist im Anhang zu finden.

### 3.7 Fehlerabschätzung

### 3.8 Diskussion

## 4 Schlussfolgerung

Als Fazit können wir sagen, dass wir mit Hilfe der Anleitung die Dimensionierung gut durchführen konnten. Leider haben wir beim Aufbau zu viel Zeit verloren, die uns danach gefehlt hat, um die Auswertung noch detaillierter zu gestalten. So hatten wir zum Beispiel keine Zeit mehr die Güte anhand der Bandbreite und der Mittenfrequenz nachzukontrollieren.

# Quellenverzeichnis

## Quellenverzeichnis

[1] Richard Matthew Stallman and Stefan Kreml, *Software muß frei sein!*, Website, 1999, Available online at <http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/te/2860/1.html>; visited on January 8th 2005.

## List of Figures

1	Konzeptschema des Bandpasses zweiter Ordnung . . . . .	2
2	Schema für den Aufbau . . . . .	3
3	Aufbau auf der Steckplatte . . . . .	4

## Praktikum Signale und Systeme und Regelungstechnik

### Modul 5032.2

### Aktives Filter

### Übung 4.2

## 1 Einleitung

In dieser Übung wird ein aktiver Bandpass berechnet, auf die vorgegebenen Eigenschaften abgestimmt und ausgemessen. Die gemessenen Werte werden anschliessend mit einer Simulation überprüft.

### Ziele:

- Repetition der Berechnungsmethoden für Netzwerke mit Operationsverstärkern.
- Dimensionierung und Abstimmung mit Hilfe des Gain-Phase-Meters eines Bandpassfilters 2. Ordnung.
- Messung des Amplituden und Phasenganges mit einem Netzwerk-Analyzer.
- Vergleich der Messungen mit der Simulation.

**Zeitaufwand:** 4 Lektionen

## 2 Theorie

Aktive Filter lassen sich auch durch mitgekoppelte Verstärker realisieren. Allerdings muss die Verstärkung  $\beta$  durch eine interne Gegenkopplung auf einen genau definierten Wert festgelegt werden. Der Spannungsteiler  $R_0$ ,  $(\beta-1) \cdot R_0$  in Bild 2 bewirkt diese Gegenkopplung und stellt die innere Verstärkung auf den Wert  $\beta$  ein. Die Mitkopplung erfolgt über den Kondensator  $C_2$ .

Die Übertragungsfunktion für einen Bandpass 2. Ordnung lautet in der allgemeinen Form:

$$H(s) = \frac{U_{\text{out}}(s)}{U_{\text{in}}(s)} = K \cdot \frac{\frac{\omega_0}{Q} \cdot s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot s + \omega_0^2} \quad (1)$$

Für ein stabiles System ergibt sich daraus der Frequenzgang durch die Substitution  $s \rightarrow j\omega$ :

$$H(j\omega) = \frac{U_{\text{out}}(j\omega)}{U_{\text{in}}(j\omega)} = K \cdot \frac{j \frac{\omega_0}{Q} \cdot \omega}{-\omega^2 + j \frac{\omega_0}{Q} \cdot \omega + \omega_0^2} \quad (2)$$

Mit den Definitionen:  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$  (3)

und  $Q = \frac{f_0}{B} = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi \cdot B}$  (4)

Legende:

 $\omega_0$ : Mittenkreisfrequenz

Q: Güte

B: 3 dB-Bandbreite

K: Verstärkung bei Mittenfrequenz (Amplitudenmaximum)

Zur Realisierung dieses Frequenzganges gibt es verschiedene Schaltungen.  
Wir wählen folgende:

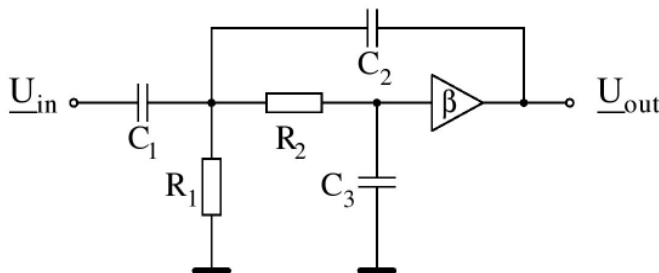
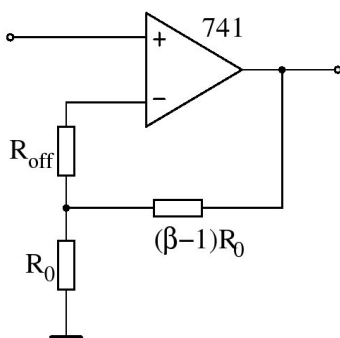


Bild 1: Aktiver Bandpass 2. Ordnung

Der  $\beta$ -Verstärker wird durch folgende Operationsverstärkungsschaltung realisiert:



Bei der Berechnung ist  $R_{\text{off}}$  zu vernachlässigen. Dieser Widerstand dient nur zur Offset-Kompensation:

Er wird so dimensioniert, dass die resultierenden Gleichstromwiderstände vom invertierenden und nichtinvertierenden Eingang zur Masse gleich sind.

Bild 2: Nichtinvertierender Verstärker

Berechnet man die Übertragungsfunktion des aktiven Bandpasses (Bild 1), so ergibt ein Koeffizientenvergleich mit (1) die charakteristischen Filtergrößen aus den Elementen wie folgt:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2) \cdot C_3}} \quad (5a)$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0 \cdot [R_1 \cdot (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2) \cdot C_3 - \beta \cdot R_1 \cdot C_2]} \quad (5b)$$

$$K = R_1 \cdot C_1 \cdot \omega_0 \cdot Q \cdot \beta \quad (5c)$$

Zur Dimensionierung der 3 Kennwerte ( $\omega_0$ ,  $Q$ ,  $K$ ) dieses Filters stehen 6 Parameter ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $\beta$ ) zur Verfügung, d.h. wir haben 3 Freiheitsgrade.

Bei der Analyse der Schaltung haben wir den Operationsverstärker als ideal angenommen. Theoretische Untersuchungen (Sensitivitätstheorie) zeigen nun, dass der Einfluss des realen Operationsverstärkers minimiert werden kann.

Für diese Schaltung erweist sich folgender Ansatz als recht günstig:

$$C_1 = C_2 = C \text{ und } C_3 = \frac{C}{2}$$

Aus praktischen Gründen wird  $C$  vorgewählt. Damit haben wir nun keinen Freiheitsgrad mehr, die Dimensionierung ist dadurch eindeutig.

Setzen wir  $R_1 = R$  und  $R_2 = r^2 \cdot R$

so folgt aus Gleichung:

$$(5a) \quad \omega_0 = \frac{1}{r \cdot R \cdot C} \quad (6a)$$

$$(5b) \quad Q = \frac{r}{2.5 + \frac{r^2}{2} - \beta} \quad (6b)$$

$$(5c) \quad K = \beta \cdot \frac{Q}{r} \quad (6c)$$

$$(6c) \quad r = \frac{\beta \cdot Q}{K} \quad (7)$$

(7) in (6b) eingesetzt ergibt eine Bestimmungsgleichung für  $\beta$ :

$$\beta^2 - \frac{2 \cdot K^2 + 2 \cdot K}{Q^2} \cdot \beta + \frac{5 \cdot K^2}{Q^2} = 0 \quad (8)$$

$$K > \sqrt{5} \cdot Q - 1 \quad (9)$$

Die Mittenfrequenzverstärkung kann also nicht frei vorgegeben werden!

Die Verstärkung  $\beta$  soll aus Empfindlichkeitsgründen möglichst klein gewählt werden.



Für die Bestimmung der Güte berechnet man die Frequenzen, bei denen die Phase um  $\pm 45^\circ$  gegenüber der Phase bei Mittenfrequenz abweicht.

Es gilt:

$$\frac{\omega_{+45}}{\omega_0} = \frac{\sqrt{4 \cdot Q^2 + 1} - 1}{2 \cdot Q} \quad (10a)$$

$$\frac{\omega_{-45}}{\omega_0} = \frac{\sqrt{4 \cdot Q^2 + 1} + 1}{2 \cdot Q} \quad (10b)$$

$$\omega_{+45} \cdot \omega_{-45} = \omega_0^2 \quad \text{logarithmische Symmetrie} \quad (10c)$$

### 3 Aufgaben

#### Allgemein:

Die Herleitungen und Simulationen sind ausserhalb des Laborunterrichts durchzuführen!

- Optional: Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion des Filters in Bild 1 und verifizieren Sie die Gleichungen (3a, b, c).
- Optional: Simulieren Sie die Schaltung mit PSpice oder versuchen Sie die Dimensionierung mit einem Filter-Entwicklungsprogramm nachzuvollziehen.

#### Berechnungsablauf:

1. K vorgeben. (Bedingung (9) einhalten)
2.  $\beta$  berechnen. (kleineren Wert wählen)
3. r aus (7) berechnen.
4.  $R = R_1$  aus (6a) berechnen.
5.  $R_2 = r^2 \cdot R_1$

#### Dimensionierung:

- Dimensionieren Sie den Bandpass für die Kennwerte  $f_0 = 1 \text{ kHz}$ ,  $Q = 5$ ,  $K = 25$ ,  $C = 10 \text{ nF}$ !  
Für die Widerstände wählen Sie Normwerte, die höchstens  $2 \text{ k}\Omega$  kleiner sind als der berechnete Wert. Gleichen Sie den exakten Wert mittels  $2 \text{ k}\Omega$  Potentiometer in Serie ab.  
Für  $R_0$  wählen Sie  $1 \text{ k}\Omega$ .

#### Abstimmung:

Aus der Filtertheorie ist bekannt, dass die Mittenfrequenzabstimmung wichtiger ist als die Gütenabstimmung.

Die Abstimmung der Verstärkung ist von untergeordneter Bedeutung. Wir müssen also zuerst die Mittenfrequenz abstimmen, nachher die Güte, ohne aber die Mittenfrequenz wieder zu beeinflussen.

- Aus der Gleichung (6a) ist nun leicht ersichtlich, dass  $\omega_0$  durch Verändern von  $r$  und  $R$ , d.h. durch verändern von  $R_1$  und/oder  $R_2$  eingestellt werden kann. Da die Phase viel empfindlicher auf Änderungen der Mittenfrequenz reagiert als die Amplitude, wird somit die Phase entsprechend eingestellt.
- Die Güte kann nun mit  $\beta$  eingestellt werden (mit Hilfe der Gleichung (6b)), ohne die Mittenfrequenz wieder zu verändern.  
Bei Filterstrukturen wo dies nicht möglich ist, muss ein Abgleich von  $f_0$  und  $Q$  mehrmals durchgeführt werden.

**Messungen:**

- Messen Sie Amplituden- und Phasengang.
- $Q \rightarrow \infty$  bedeutet, dass das Filter schwingt. Stabilitätsgrenze?

## 4 Materialliste

- 1 Dualspeisegerät
- Sinusgenerator
- Gain-Phase-Meter
- Networkanalyzer
- Oszilloskop
- Multimeter
- Laborsteckbrett