Semesterarbeit

Sallen-Key Bandpassfilter

# Vorwort

In der modernen Elektronik spielt die Filtertechnik eine entscheidende Rolle bei der Verarbeitung und Manipulation von Signalen. Filter werden verwendet, um unerwünschte Frequenzkomponenten zu unterdrücken und gewünschte Frequenzbereiche zu verstärken oder zu isolieren. Ein besonders nützliches Filter ist der Sallen-Key Bandpassfilter, der aufgrund seiner Einfachheit und Effektivität weit verbreitet ist.

Der Sallen-Key Bandpassfilter ist ein aktiver Filter, der sowohl Hoch- als auch Tiefpassfilterstufen kombiniert, um ein bestimmtes Frequenzband durchzulassen und alle anderen Frequenzen zu unterdrücken. Dieses Projekt zielt darauf ab, einen solchen Filter zu entwickeln

Die folgende Arbeit beschreibt die schrittweise Entwicklung dieses Filters, beginnend mit der theoretischen Bestimmung der Übertragungsfunktionen, über die Dimensionierung und Simulation der Schaltung, bis hin zur praktischen Umsetzung und Vermessung. Ziel ist es, ein tiefgehendes Verständnis für die Funktionsweise und die Herausforderungen bei der Entwicklung von Sallen-Key Bandpassfiltern zu vermitteln.

# Inhaltsverzeichnis:

[1. Vorwort I](#_Toc169011827)

[2. Inhaltsverzeichnis: II](#_Toc169011828)

[3. Aufgabenstellung 1](#_Toc169011829)

[3.1 Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p) 1](#_Toc169011830)

[3.2 Dimensionieren der Schaltung 1](#_Toc169011831)

[3.3 Darstellen der Übertragungsfunktion 1](#_Toc169011832)

[3.4 Simulation der Schaltung 1](#_Toc169011833)

[3.5 Stabilität der Schaltung 2](#_Toc169011834)

[3.6 Aufbauen und Ausmessen der Schaltung 2](#_Toc169011835)

[3.7 Einschwingverhalten 2](#_Toc169011836)

[4. Lösungsansatz 3](#_Toc169011837)

[4.1 Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p) 3](#_Toc169011838)

[4.1.1 Tiefpass 1. und 2. Ordnung 3](#_Toc169011839)

[4.1.2 Hochpass 1. und 2. Ordnung 4](#_Toc169011840)

[4.1.3 Filter 3. Ordnung 4](#_Toc169011841)

[4.2 Dimensionieren der Schaltung 5](#_Toc169011842)

[4.3 Darstellen der Übertragungsfunktion 5](#_Toc169011843)

[4.3.1 Tiefpass 5](#_Toc169011844)

[4.3.2 Hochpass 6](#_Toc169011845)

[4.3.3 Bandpass 7](#_Toc169011846)

[4.4 Simulation der Schaltung 8](#_Toc169011847)

[4.5 Stabilität der Schaltung 8](#_Toc169011848)

[4.6 Aufbauen und Ausmessen der Schaltung 9](#_Toc169011849)

[4.7 Vergleich der Messung und Simulation 10](#_Toc169011850)

[4.8 Einschwingverhalten 10](#_Toc169011851)

[5. Anhang 12](#_Toc169011852)

[5.1 Abbildungsverzeichnis 12](#_Toc169011853)

[5.2 Formelverzeichnis 12](#_Toc169011854)

[5.3 Verweise 12](#_Toc169011855)

# Aufgabenstellung

Mit Hilfe der nachfolgend abgebildeten Sallen-Key-Hoch- und Tiefpassfilter 3. Ordnung soll durch eine geeignete Zusammenschaltung ein Bandpassfilter entwickelt werden, welches eine Grundverstärkung von A0 = 1 aufweist und die Frequenz fg = 50 kHz passieren lässt und alle andern möglichst gut dämpft. .

Die Welligkeit des Filters oder die Überhöhung bei der Grenzfrequenz soll 12 dB nicht überschreiten und das Filter soll eine hohe Impedanz-Wandlung aufweisen.

|  |  |
| --- | --- |
| **Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Plan, technische Zeichnung enthält.  Automatisch generierte Beschreibung**  Abbildung 1: Sallen-Key Tiefpass 3. Ordnung | **Ein Bild, das Diagramm, Reihe, technische Zeichnung, Plan enthält.  Automatisch generierte Beschreibung**  Abbildung 2: Sallen-Key Hochpass 3. Ordnung |

## Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p)

Für diesen Filter ist die Übertragungsfunktion der sekundärseitig leerlaufenden Schaltung in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω und der einzelnen Komponenten zu bestimmen.

|  |
| --- |
| Formel 1: Übertragungsfunktion mit Abhängigkeiten |

## Dimensionieren der Schaltung

Anhand der in 3.1 errechneten Übertragungsfunktion soll das Filter nun so dimensioniert, dass er bei einer Grenzfrequenz von 50 kHz einen möglichst steil verlaufende Bandpasscharakteristik aufweist, wobei die Welligkeit maximal 6dB betragen soll. Die Grundverstärkung des Filters soll A0 = 1 sein. Es sind mehrere Varianten zu prüfen.

## Darstellen der Übertragungsfunktion

Die in 3.1 errechneten Übertragungsfunktionen des in 3.2 dimensionierten Filters soll nach Bode in Amplituden und Phasengang dargestellt werden.

## Simulation der Schaltung

Diese Schaltung soll mit einem geeigneten Werkzeug simuliert werden. Allfällige Abweichungen zu den Berechnungen sind zu begründen. Es sollen auch die Einflüsse der Toleranzen der Bauteile in der Simulation untersucht werden.

## Stabilität der Schaltung

Anhand der Pol- und Nullstellen soll die Stabilität der Schaltung überprüft werden. Ansätze sind zu begründen.

## Aufbauen und Ausmessen der Schaltung

Die Schaltung soll mit den in der Teilaufgabe 3.2 berechneten Bauteilen aufgebaut und ausgemessen werden. Allfällige Abweichungen zur in 3.3 berechneten Übertragungsfunktion sind zu begründen. Der Messaubau und die Interpretation der Messresultate ist dahingehend zu konzipieren und zu automatisieren, dass daraus ein Testgerät entwickelt werden könnte.

## Einschwingverhalten

Für den Bandpassfilter soll der Verlauf der Sprungantwort u2(t) berechnet und graphisch dargestellt werden. Zudem ist der Signalverlauf hinsichtlich der gewünschten Filterwirkung zu interpretieren.

# Lösungsansatz

## Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p)

Die in Abbildung 1 und Abbildung 2 gezeigten Schaltungen der 3. Ordnung können in jeweils in eine Schaltung der ersten (Abbildung 3 und Abbildung 5) und zweiten (Abbildung 4 und Abbildung 6 ) Ordnung aufgeteilt werden.

### Tiefpass 1. und 2. Ordnung

|  |  |
| --- | --- |
| Abbildung 3: RC Tiefpass 1. Ordnung[[1]](#footnote-1) | Abbildung 4: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung1 |

Somit sind die Übertragungsfunktionen für die Tiefpass-Filter(Formel 2 und Formel 3):

|  |
| --- |
| Formel 2: RC Tiefpassfilter 1. Ordnung |

|  |
| --- |
| Formel 3: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung |

Gemäss den Grundgesetzen der Operationsverstärker ist die Verstärkung G in Formel 4 erläutert:

|  |
| --- |
| Formel 4: Verstärkungsfaktor G |

### Hochpass 1. und 2. Ordnung

|  |  |
| --- | --- |
| Ein Bild, das Reihe enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung[[2]](#footnote-2) | Abbildung 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung2 |

Somit sind die Übertragungsfunktionen für die Hochpass-Filter (Formel 5 und Formel 6):

|  |
| --- |
| Formel 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung |

|  |
| --- |
| Formel 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung |

### Filter 3. Ordnung

Durch die Multiplikation der Übertragungsfunktionen der ersten und der zweiten Stufe erhalten wir die Übertragungsfunktion der dritten Stufe (Formel 7 und Formel 8). Um die Übertragungsfunktion der gesamten Schaltung zu erhalten, müssen die beiden Übertragungsfunktionen der Filter der dritten Stufe miteinander multipliziert werden.

|  |
| --- |
| Formel 7: Sallen-Key Tiefpassfilter 3. Ordnung |

|  |
| --- |
| Formel 8: Sallen-Key Hochpassfilter 3. Ordnung |

## Dimensionieren der Schaltung

Durch die Wahl einer Chebyscheff-Charakteristik erhalten wir eine Überhöhung nahe der Grenzfrequenz. Das hat zur Folge, dass der 3dB-Punkt beim Tiefpass nach oben und beim Hochpass nach unten geschoben werden muss. Durch trial and Error haben wir die Grenzfrequenzen der Filter bestimmen können, nämlich 58.569 kHz für den Tief- und 43kHz für den Hochpass. Diese Werte sind unter optimalen Bedingungen anzunehmen. Durch die Wahl der Bauteile unter Berücksichtigung der Wahl der Kondensatoren der E6-Reihe und die Wahl der Widerstände der E12-Reihe werden diese Werte leicht verändert werden.

Mithilfe des Rechners auf der Seite okawa-denshi.jp[[3]](#footnote-3) haben wir folgende Werte erhalten.

Tiefpass 1. Ordnung (Abbildung 3): R= 82Ω und C = 33nF

Tiefpass 2. Ordnung (Abbildung 4): R1 = 820Ω, R2 = 270Ω, R3 = 10Ω, R4 = 6.8Ω, C1 = 15nF und C2 = 2.2nF

Hochpass 1. Ordnung (Abbildung 5): R= 47Ω und C= 68nF

Hochpass 2. Ordnung (Abbildung 6): R1 = 220Ω, R2 = 1kΩ, R3 = 10Ω, R4 = 6.8Ω, C1 = 6.8nF und C2 = 6.8nF

## Darstellen der Übertragungsfunktion

### Tiefpass

In Abbildung 7 und Abbildung 8 werden die Amplituden- und Phasengänge der Tiefpassstufen dargestellt. Es sind die zu erwarteten Charakteristika zu erkennen.

|  |  |
| --- | --- |
| Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, parallel enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 7: Amplituden- und Phasengang TP 1. Ordnung | Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Zahl enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 8: Amplituden- und Phasengang TP 2. Ordnung |

Durch die Multiplikation der zwei Tiefpassfilter erhalten wir in Abbildung 9 den Amplituden- und Phasengang der dritten Ordnung, welche eine Chebyscheff-Charakteristik aufweist.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Zahl enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 9: Amplituden- und Phasengang TP 3. Ordnung |
|  |

### Hochpass

In Abbildung 10Abbildung 7 und Abbildung 11 werden die Amplituden- und Phasengänge der Hochpassstufen dargestellt. Es sind auch hier die zu erwarteten Charakteristika zu erkennen.

|  |  |
| --- | --- |
| Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Zahl enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 10: Amplituden- und Phasengang HP 1. Ordnung | Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Zahl enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 11: Amplituden- und Phasengang HP 2. Ordnung |

Durch die Multiplikation der zwei Hochpassfilter erhalten wir in Abbildung 12 den Amplituden- und Phasengang der dritten Ordnung, welche eine Chebyscheff-Charakteristik aufweist.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Zahl enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 12: Amplituden- und Phasengang HP 3. Ordnung |

### Bandpass

Nachdem wiederum die gesamten Übertragungsfunktionen der Tief- und Hochpassfilter miteinander multipliziert werden, entsteht die Gesamtübertragungsfunktion deren Amplituden- und Phasengang in Abbildung 13 grafisch dargestellt wird.

|  |
| --- |
| Abbildung 13: Amplituden- und Phasengang BP 6. Ordnung |

Aus dem Graph ist weiter zu erkennen, dass die angestrebten 50kHz mit einer Verstärkung von 0dB eingehalten werden.

## Simulation der Schaltung

Simulaitonsfile

## Stabilität der Schaltung

Aus den Lehren zu den Pol- und Nullstellen zum Ermitteln der Stabilität der Schaltung, sehen wir, dass unsere Schaltung Stabil laufen soll, da sich die Polstellen im zweiten und dritten Quadranten befinden (Abbildung 14).

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Screenshot, Reihe, Diagramm enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 14: Pol- und Nullstellen BP 6. Ordnung |

## Aufbauen und Ausmessen der Schaltung

Der Messaufbau (Abbildung 15) wurde auf einer Lochrasterplatine realisiert. Hier ist der Aufbau nicht optimal, da sehr viele Störeinflüsse die Funktion beeinflussen können. Um die Schaltung für den realen Einsatz zu bauen, wäre es nötig ein PCB korrekt zu layouten. Die Messungen wurden noch mit früher dimensionierten Bauteilen für den Tiefpass durchgeführt. Da haben wir sehr kleine Kapazitäten verwendet, was zur Folge hat, dass Streukapazitäten einen negative Einfluss haben.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Elektronik, Elektrische Leitungen, Elektronisches Bauteil, Elektrisches Bauelement enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 15: Messaufbau Bandpass |

Die Messung ergibt, dass wir trotz schlechtem Aufbau und unerwünschten Einflüssen, die gewünschte Filtercharakteristik nahe der angestrebten Frequenz erhalten haben und die vorgegebene Überhöhung von 12dB nicht überschreiten (Abbildung 16).

|  |
| --- |
| Abbildung 16: Messung Aufbau |

## Vergleich der Messung und Simulation

In Abbildung 17 werden Ergebnisse aus den Berechnungen in MatLab, der Simulation in LTSpice und dem praktischen Aufbau verglichen. Es ist zu erkennen, dass die Berechnungen und die Simulation übereinstimmen, jedoch weist der praktische Aufbau Abweichungen sowie Rauschen auf. Dies ist auf den unzureichenden Aufbau und den negativen Einflüssen der Streukapazitäten beim Tiefpass.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Reihe, Diagramm, Screenshot, Steigung enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 17: Vergleich LTSpice, MATLAB, PicoScope |

## Einschwingverhalten

Das Einschwingverhalten in Abbildung 18 lässt erkennen, dass diese Schaltung mit den definierten Bauteilwerten nach ungefähr 1.4 Sekunden stabil läuft. Das bestätigt die Annahme aus den Erkenntnissen des Pol- und Nullstellengraphs.

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Schrift enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 18: Einschwingverhalten BP 6. Ordnung |

# Anhang

## Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Sallen-Key Tiefpass 3. Ordnung 1](#_Toc169011856)

[Abbildung 2: Sallen-Key Hochpass 3. Ordnung 1](#_Toc169011857)

[Abbildung 3: RC Tiefpass 1. Ordnung 3](#_Toc169011858)

[Abbildung 4: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung1 3](#_Toc169011859)

[Abbildung 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung 4](#_Toc169011860)

[Abbildung 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung2 4](#_Toc169011861)

[Abbildung 7: Amplituden- und Phasengang TP 1. Ordnung 5](#_Toc169011862)

[Abbildung 8: Amplituden- und Phasengang TP 2. Ordnung 5](#_Toc169011863)

[Abbildung 9: Amplituden- und Phasengang TP 3. Ordnung 6](#_Toc169011864)

[Abbildung 10: Amplituden- und Phasengang HP 1. Ordnung 6](#_Toc169011865)

[Abbildung 11: Amplituden- und Phasengang HP 2. Ordnung 6](#_Toc169011866)

[Abbildung 12: Amplituden- und Phasengang HP 3. Ordnung 7](#_Toc169011867)

[Abbildung 13: Amplituden- und Phasengang BP 6. Ordnung 7](#_Toc169011868)

[Abbildung 14: Pol- und Nullstellen BP 6. Ordnung 8](#_Toc169011869)

[Abbildung 15: Messaufbau Bandpass 9](#_Toc169011870)

[Abbildung 16: Messung Aufbau 10](#_Toc169011871)

[Abbildung 17: Vergleich LTSpice, MATLAB, PicoScope 10](#_Toc169011872)

[Abbildung 18: Einschwingverhalten BP 6. Ordnung 11](#_Toc169011873)

## Formelverzeichnis

[Formel 1: Übertragungsfunktion mit Abhängigkeiten 1](#_Toc169011874)

[Formel 2: RC Tiefpassfilter 1. Ordnung 3](#_Toc169011875)

[Formel 3: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung 3](#_Toc169011876)

[Formel 4: Verstärkungsfaktor G 3](#_Toc169011877)

[Formel 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung 4](#_Toc169011878)

[Formel 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung 4](#_Toc169011879)

[Formel 7: Sallen-Key Tiefpassfilter 3. Ordnung 4](#_Toc169011880)

[Formel 8: Sallen-Key Hochpassfilter 3. Ordnung 4](#_Toc169011881)

## Verweise

*http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm*. (2024).

1. (http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm, 2024) [↑](#footnote-ref-1)
2. (http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm, 2024) [↑](#footnote-ref-2)
3. (http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm, 2024) [↑](#footnote-ref-3)