Semesterarbeit

Sallen-Key Bandpassfilter

Erik Haubrich und Marco Müller

# 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 erlangen.

# Inhaltsverzeichnis:

[3.1 Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p) 1](#_Toc170062979)

[3.2 Dimensionieren der Schaltung 1](#_Toc170062980)

[3.3 Darstellen der Übertragungsfunktion 1](#_Toc170062981)

[3.4 Simulation der Schaltung 1](#_Toc170062982)

[3.5 Stabilität der Schaltung 2](#_Toc170062983)

[3.6 Aufbauen und Ausmessen der Schaltung 2](#_Toc170062984)

[3.7 Einschwingverhalten 2](#_Toc170062985)

[4.1 Bestimmen der Übertragungsfunktionen f(p) 3](#_Toc170062986)

[4.1.1 Tiefpass 1. und 2. Ordnung 3](#_Toc170062987)

[4.1.2 Hochpass 1. und 2. Ordnung 4](#_Toc170062988)

[4.1.3 Filter 3. Ordnung 5](#_Toc170062989)

[4.2 Dimensionieren der Schaltung 5](#_Toc170062990)

[4.3 Darstellen der Übertragungsfunktion 6](#_Toc170062991)

[4.3.1 Tiefpass 6](#_Toc170062992)

[4.3.2 Hochpass 6](#_Toc170062993)

[4.3.3 Bandpass 8](#_Toc170062994)

[4.4 Simulation der Schaltung 9](#_Toc170062995)

[4.5 Stabilität der Schaltung 9](#_Toc170062996)

[4.6 Aufbauen und Ausmessen der Schaltung 11](#_Toc170062997)

[4.7 Vergleich der Messung und Simulation 13](#_Toc170062998)

[4.8 Einschwingverhalten 13](#_Toc170062999)

[4.9 Fazit 14](#_Toc170063000)

[5.1 Abbildungsverzeichnis 15](#_Toc170063001)

[5.2 Formelverzeichnis 15](#_Toc170063002)

[5.3 Verweise 15](#_Toc170063003)

[5.4 Verwendete Werkzeuge 15](#_Toc170063004)

# 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. Das vereinfacht die Berechnungen und Definition der Bauteile.

### Tiefpass 1. und 2. Ordnung

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

Die Übertragungsfunktionen für die Tiefpass-Filter sind Formel 2 und Formel 3 dargestellt. Bei der Filterschaltung der ersten Stufe sind nur ein Widerstand und ein Kondensator. Für die zweite Stufe sind für das Filterverhalten R1, R2, C1 und C2 verantwortlich. R3 und R4 sind für die Verstärkung G der Operationsverstärkers (OP).

|  |
| --- |
| 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 |

Wie auch beim Tiefpass erfüllen die Bauteile hier denselben Zweck. Die Übertragungsfunktionen für die Hochpass-Filter sind in Formel 5 und Formel 6 dargestellt.

|  |
| --- |
| 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. Da diese sehr umfangreicht ist, habe wir sie hier nicht aufgeschrieben.

|  |
| --- |
| 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 angestrebte Mittenfrequenz von 50kHz mit einer Verstärkung von 0dB eingehalten werden.

## Simulation der Schaltung

Anhand des Messaufbaus in der Spice-Software (Abbildung 14), konnten wir die vorhergehenden MATLAB Berechnungen verifizieren. Die Ergebnisse theoretischer Natur sind in Abbildung 15 und Abbildung 16 verglichen und stimmen sehr gut überein.

|  |
| --- |
| Abbildung 14: Aufbau Simulation |

|  |  |
| --- | --- |
| Abbildung 15: Spice-Plot | Abbildung 16: MATLAB-Plot |

## Stabilität der Schaltung

Aus den Lehren zu den Pol- und Nullstellen zum Ermitteln der Stabilität der Schaltung, sehen wir, dass unsere Schaltung mit hoher Wahrscheinlichkeit Stabil laufen wird, da sich die Polstellen im zweiten und dritten Quadranten befinden (Abbildung 17). Dies wird sich mit dem Einschwingverhalten bestätigen (4.8).

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Screenshot, Reihe, Diagramm enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 17: Pol- und Nullstellen BP 6. Ordnung |

## Aufbauen und Ausmessen der Schaltung

Der Messaufbau (Abbildung 18) 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 18: Messaufbau Bandpass |

Um die Schaltung auszumessen wurden die OPs mit ±5V gespiesen und ein Signal von 1Vpp eingespiesen und ein AC-Sweep durchgeführt.

Das Messresultat 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 19). Die Störeinflüsse sind dadurch zu erkennen, dass wir ein hohes Rauschmass auf dem gefilterten Signal haben. Der höchste Punkt des Signals ist abgetrennt, weil wir für die Messung, für die Speisung ±5V gewählt haben. Um die Abtrennung der Spitzen zu verhindern muss die Betriebsspannung des OPs erhöht werden, auf zum Beispiel ±12V.

|  |
| --- |
| Abbildung 19: Messung des Aufbaus |

## Vergleich der Messung und Simulation

In Abbildung 20 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 20: Vergleich LTspice, MATLAB, PicoScope |

## Einschwingverhalten

Das Einschwingverhalten in Abbildung 21 lässt erkennen, dass diese Schaltung mit den definierten Bauteilwerten nach ungefähr 1.4 Sekunden relativ stabil läuft. Das bestätigt die Annahme aus den Erkenntnissen des Pol- und Nullstellengraphs (4.5).

|  |
| --- |
| Ein Bild, das Text, Reihe, Diagramm, Schrift enthält.  Automatisch generierte Beschreibung  Abbildung 21: Einschwingverhalten BP 6. Ordnung |

## Fazit

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Sallen-Key Bandpassfilter entwickelt, simuliert und praktisch umgesetzt. Durch die detaillierte Bestimmung der Übertragungsfunktionen, die sorgfältige Dimensionierung der Bauteile und die anschließende Simulation konnten die theoretischen Grundlagen gefestigt und in der Praxis angewendet werden.

Die Simulationen mit LTspice und MATLAB zeigten eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen. Dies unterstreichen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der durchgeführten Dimensionierung und der gewählten Methodik. Die praktische Umsetzung des Filters auf einer Lochrasterplatine offenbarte jedoch Herausforderungen, insbesondere durch Störeinflüsse und Streukapazitäten, die in einer professionellen PCB-Umsetzung minimiert werden könnten.

Trotz der suboptimalen Bedingungen des Messaufbaus konnte die gewünschte Filtercharakteristik weitgehend erreicht werden. Die Messungen bestätigten, dass die angestrebte Mittenfrequenz von 50 kHz eingehalten und die maximale Überhöhung von 12 dB nicht überschritten wurde. Dies zeigt, dass die grundlegende Funktionsweise des Filters korrekt ist, auch wenn Verbesserungen in der Umsetzung notwendig sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt erfolgreich die Entwicklung eines Sallen-Key Bandpassfilters demonstriert hat. Die Kombination aus theoretischen Berechnungen, Simulationen und praktischen Messungen ermöglichte ein umfassendes Verständnis der Filtercharakteristik und der Herausforderungen bei der Umsetzung. Für zukünftige Projekte wird empfohlen, die Implementierung auf einer professionellen Platine zu realisieren, um Störeinflüsse zu minimieren und die Performance des Filters weiter zu verbessern.

# Anhang

## Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Sallen-Key Tiefpass 3. Ordnung 1](#_Toc170063522)

[Abbildung 2: Sallen-Key Hochpass 3. Ordnung 1](#_Toc170063523)

[Abbildung 3: RC Tiefpass 1. Ordnung 3](#_Toc170063524)

[Abbildung 4: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung1 3](#_Toc170063525)

[Abbildung 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung 4](#_Toc170063526)

[Abbildung 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung2 4](#_Toc170063527)

[Abbildung 7: Amplituden- und Phasengang TP 1. Ordnung 6](#_Toc170063528)

[Abbildung 8: Amplituden- und Phasengang TP 2. Ordnung 6](#_Toc170063529)

[Abbildung 9: Amplituden- und Phasengang TP 3. Ordnung 6](#_Toc170063530)

[Abbildung 10: Amplituden- und Phasengang HP 1. Ordnung 7](#_Toc170063531)

[Abbildung 11: Amplituden- und Phasengang HP 2. Ordnung 7](#_Toc170063532)

[Abbildung 12: Amplituden- und Phasengang HP 3. Ordnung 7](#_Toc170063533)

[Abbildung 13: Amplituden- und Phasengang BP 6. Ordnung 8](#_Toc170063534)

[Abbildung 14: Aufbau Simulation 9](#_Toc170063535)

[Abbildung 15: Spice-Plot 9](#_Toc170063536)

[Abbildung 16: MATLAB-Plot 9](#_Toc170063537)

[Abbildung 17: Pol- und Nullstellen BP 6. Ordnung 10](#_Toc170063538)

[Abbildung 18: Messaufbau Bandpass 11](#_Toc170063539)

[Abbildung 19: Messung des Aufbaus 12](#_Toc170063540)

[Abbildung 20: Vergleich LTspice, MATLAB, PicoScope 13](#_Toc170063541)

[Abbildung 21: Einschwingverhalten BP 6. Ordnung 13](#_Toc170063542)

## Formelverzeichnis

[Formel 1: Übertragungsfunktion mit Abhängigkeiten 1](#_Toc170063543)

[Formel 2: RC Tiefpassfilter 1. Ordnung 3](#_Toc170063544)

[Formel 3: Sallen-Key Tiefpassfilter 2. Ordnung 3](#_Toc170063545)

[Formel 4: Verstärkungsfaktor G 4](#_Toc170063546)

[Formel 5: RC Hochpassfilter 1. Ordnung 4](#_Toc170063547)

[Formel 6: Sallen-Key Hochpassfilter 2. Ordnung 4](#_Toc170063548)

[Formel 7: Sallen-Key Tiefpassfilter 3. Ordnung 5](#_Toc170063549)

[Formel 8: Sallen-Key Hochpassfilter 3. Ordnung 5](#_Toc170063550)

## Verweise

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

## Verwendete Werkzeuge

PicoScope 2204A SN: JO243/1412

MATLAB R2022b

LTspice V17.2.4 for MacOS

NI Multisim 14.1

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)