HWE-Skript

Leopold Götsch

2025-05-08

Inhaltsverzeichnis

# Willkommen zum Skript

**In Arbeit!!**

Dieses Skriptum dient zur Unterstützung und Ergänzung der Inhalte aus dem Unterricht. Der “rote Faden” im Unterricht ist in den jeweiligen Klassennotizbüchern zu finden. Darin sind auch Links zu den passenden Kapiteln in diesem Skript zu finden. Das Skriptum wird ständig erweitert und verbessert. Input ist herzlich willkommen.  
Danke an alle, die mit Ideen und Unterlagen zur Erstellung beitragen und sich die Zeit nehmen, mit Korrekturen das Skriptum zu verbessern.

## Verbessern

Ich freue mich über alle Fehlerkorrekturen und Verbesserungsvorschläge, die mich erreichen. Am einfachsten ist dies via Mail oder über GitHub.

## Mitwirken

Wer am Skriptum mitarbeiten möchte, kann mich gerne kontaktieren. Meine Kontaktdaten sind auf der Homepage der HTL-Anichstrasse zu finden.

Viel Vergnügen mit HWE und dem interaktiven Quarto Book!

# 1. Boolesche Algebra

## 1.1 Von der Wahrheitstabelle zur Booleschen Gleichung

Es soll mittels Boolescher Algebra die einfachste Boolesche Gleichung aus der Wahrheitstabelle ermittelt werden.

### 1.1.1 Wahrheitstabelle

| Nummer | D | C | B | A | Y | Minterm | Verwendet |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |  | x |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | - |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |  | xy |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |  | x |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |  | - |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |  | y |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |  | x |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | - | - |
| 12 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |  | y |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |  | - |
| 14 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |  | - |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | - | - |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | - | - |

### 1.1.2 Vereinfachen durch Vergleich von Thermen mit nur einem Unterschied

Da gilt (Idempotenzgesetz der Disjunktion) können Therme mehrfach verwendet werden. Es muss nur so lange verglichen werden, bis alle Terme einmal benutzt wurden! Gibt es zu einem Term keinen weiteren Term mit nur einer abweichenden Negation, so ist dieser vollständig in das Ergebnis zu übernehmen.

x  
 y  
 z  
 y  
 z  
  
 x

Nun wird erneut verglichen bis jeder Therm mindestens einmal verwendet wurde. Gibt es zu einem Term keinen weiteren Term mit nur einer abweichenden Negation, so ist dieser vollständig in das Ergebnis zu übernehmen.

Mit dem Idempotenzgesetz der Disjunktion kann der letzte dieser Terme weg gelassen werden, da er bereits in der ersten Zeile vorkommt.

Das Ergebnis:

### 1.1.3 Überprüfung

Zur Überprüfung wird das Ergebnis mittels Sympy berechnet.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | D | C | B | A | Y | | --- | --- | --- | --- | --- | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |   Tabelle 1.1: Wahrheitstabelle |

|  |
| --- |
| Hinweis |
|  |

… Y Ausgang

… D Eingang

… B Eingang

… A Eingang

… C Eingang

[Gleichung 1.1](#eq-bool2) und [Gleichung 1.2](#eq-Yeq) stimmen überein, daher ist davon auszugehen, dass das Ergebnis stimmt.

### 1.1.4 Schaltung

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Es handelt sich um eine automatisch generierte Schaltung mit amerikanischen Symbolen! Diese Schaltung entspricht NICHT europäischen Normen und ist rein informativ. |

|  |
| --- |
| Abbildung 1.1: Logik Schaltung für Ausgang Y |

# 2. Knoten- Spannungs- Analyse

Die Knoten-Spannungsanalyse ist eine Methode zur Berechnung der unbekannten elektrischen Größen in einem Netzwerk von elektrischen oder elektronischen Komponenten.  
Unter Verwendung der Knotenregel, der Maschenregel und dem Ohmschen Gesetz werden Gleichungen aufgestellt, welche die Schaltung rechnerisch beschreiben. Es entsteht ein lineares Gleichungssystem, das gelöst werden kann.

## 2.1 Beispiel 1

In Grafik [Abbildung 2.1](#fig-KSA1) ist ein Netzwerk aus Widerständen und Spannungsquellen dargestellt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.1: Netzwerk |

Vorgehensweise  
**1. Alle Ströme und Spannungen einzeichnen**  
**2. Unbekannte Größen definieren**

… Widerstand

… Quellspannung

… Spannungsabfall am Widerstand

… Strom

**3. Knoten und Maschen einzeichnen**  
Siehe [Abbildung 2.1](#fig-KSA1)  
**4. Knoten- und Maschengleichungen aufstellen**

Maschengleichungen

Knotengleichungen

Es gibt keinen Knoten

**5. Ohmsche Gesetze für die Widerstände anschreiben**

Ohmsches Gesetz

**6. Überprüfen, ob es gleich viele Gleichungen wie Unbekannte gibt**  
Passt, es gibt 2 Gleichungen und 2 Unbekannte.

**7. Gleichungssystem lösen**  
Das Gleichungssystem kann mit der Hand gelöst werden. Für komplexere Schaltungen ist es sinnvoll, ein Computerprogramm zu verwenden.

Für so eine einfache Schaltung würde man die Knoten-Spannungs-Analyse nicht verwenden. Die Methode lässt sich allerdings auf beliebig Komplexe Schaltungen anwenden.

## 2.2 Beispiel 2

In Grafik [Abbildung 2.2](#fig-KSA2) ist ein Netzwerk aus Widerständen und Spannungsquellen dargestellt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.2: Netzwerk |

Vorgehensweise  
**1. Alle Ströme und Spannungen einzeichnen**  
**2. Unbekannte Größen definieren**

… Widerstand 1

… Widerstand 2

… Widerstand 3

… Quellspannung

… Spannungsabfall an R1

… Spannungsabfall an R2

… Spannungsabfall an R3

… Strom durch R1

… Strom durch R2

… Gesamtstrom

**3. Knoten und Maschen einzeichnen**  
Siehe [Abbildung 2.2](#fig-KSA2)  
**4. Knoten- und Maschengleichungen aufstellen**

Maschengleichungen

Knotengleichungen

**5. Ohmsche Gesetze für die Widerstände anschreiben**

Ohmsches Gesetz

**6. Überprüfen ob es gleich viele Gleichungen wie Unbekannte gibt**  
Passt, es gibt 6 Gleichungen und 6 Unbekannte.

**7. Gleichungssystem lösen**  
Das Gleichungssystem kann mit der Hand gelöst werden. Für komplexere Schaltungen ist es sinnvoll, ein Computerprogramm zu verwenden.

## 2.3 Beispiel 3

In Grafik [Abbildung 2.3](#fig-KSA3) ist ein Netzwerk aus Widerständen und Spannungsquellen dargestellt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.3: Netzwerk |

### 2.3.1 Alle Ströme und Spannungen einzeichnen

### 2.3.2 Bekannte Größen

### 2.3.3 Unbekannte Größen definieren

… Spannungsabfall an R1

… Spannungsabfall an R2

… Spannungsabfall an R3

… Strom durch R1

… Strom durch R2

… Gesamtstrom

### 2.3.4 Knoten und Maschen einzeichnen

Siehe [Abbildung 2.3](#fig-KSA3)

### 2.3.5 Knoten- und Maschengleichungen aufstellen

Maschengleichungen

Knotengleichungen

### 2.3.6 Ohmsche Gesetze für die Widerstände anschreiben

Ohmsches Gesetz

### 2.3.7 Überprüfen ob es gleich viele Gleichungen wie Unbekannte gibt

Passt, es gibt 6 Gleichungen und 6 Unbekannte.

### 2.3.8 Gleichungssystem lösen

Das Gleichungssystem kann mit der Hand gelöst werden. Für komplexere Schaltungen ist es sinnvoll, ein Computerprogramm zu verwenden.

## 2.4 Beispiel 4

In Grafik [Abbildung 2.4](#fig-KSA4) ist ein Netzwerk aus Widerständen und Spannungsquellen dargestellt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.4: Netzwerk |

Vorgehensweise  
**1. Alle Ströme und Spannungen einzeichnen**  
**2. Unbekannte Größen definieren**

Bekannte Größen

… Widerstand 1

… Widerstand 2

… Widerstand 3

… Quellspannung

… Quellspannung

Unbekannte Größen

… Spannungsabfall an R1

… Spannungsabfall an R2

… Spannungsabfall an R3

… Strom durch R1

… Strom durch R2

… Strom durch R3

… Strom durch Quelle

… Querstrom

… Gesamtstrom

**3. Knoten und Maschen einzeichnen**  
Siehe [Abbildung 2.4](#fig-KSA4)

**4. Knoten- und Maschengleichungen aufstellen**

Maschengleichungen

Knotengleichungen

**5. Ohmsche Gesetze für die Widerstände anschreiben**

Ohmsches Gesetz

**6. Überprüfen ob es gleich viele Gleichungen wie Unbekannte gibt**  
Passt, es gibt 9 Gleichungen und 9 Unbekannte.

**7. Gleichungssystem lösen**  
Das Gleichungssystem kann mit der Hand gelöst werden. Für komplexere Schaltungen ist es sinnvoll, ein Computerprogramm zu verwenden.

## 2.5 Beispiel 5

In Grafik [Abbildung 2.5](#fig-KSA5) ist ein Netzwerk aus Widerständen und Spannungsquellen dargestellt.

|  |
| --- |
| Abbildung 2.5: Netzwerk |

Vorgehensweise  
**1. Alle Ströme und Spannungen einzeichnen**  
**2. Unbekannte Größen definieren**

**Bekannte Größen**

… Widerstand 1

… Widerstand 2

… Widerstand 3

… Widerstand 3

… Widerstand 3

… Quellspannung

… Quellspannung

Anzahl der bekannten Größen:

7

**Unbekannte Größen**

… Spannungsabfall an R1

… Spannungsabfall an R2

… Spannungsabfall an R3

… Spannungsabfall an R4

… Spannungsabfall an R5

… Strom durch R1

… Strom durch R2

… Strom durch R3

… Strom durch R4

… Strom durch R5

… Querstrom

Anzahl der unbekannten Größen:

11

**3. Knoten und Maschen einzeichnen**  
Siehe [Abbildung 2.5](#fig-KSA5)

**4. Knoten- und Maschengleichungen aufstellen**

Maschengleichungen

Knotengleichungen

**5. Ohmsche Gesetze für die Widerstände anschreiben**

Ohmsches Gesetz

Anzahl der Gleichungen:

12

**6. Überprüfen ob es gleich viele Gleichungen wie Unbekannte gibt**

Anzahl der Gleichungen:

12

Anzahl der Unbekannten:

11

Das Gleichungssystem ist überbestimmt. Es gibt mehr Gleichungen als Unbekannte. Das bedeutet, dass Gleichungen abhängig sind. Eine Gleichung kann aus den anderen abgeleitet werden. Wird diese Gleichung aus dem Gleichungssystem entfernt, so ist das Gleichungssystem lösbar. Mit Sympy kann das Gleichungssystem gelöst werden. Die überflüssigen Gleichungen werden ignoriert.

**7. Gleichungssystem lösen**

# 3. Komplexe Wechselstromtechnik

## 3.1 Tiefpass 2ter Ordnung

## 3.2 Hochpass 2ter Ordnung

Der Hochpass kann dazu benutzt werden, um die Frequenzen unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz zu dämpfen. Wird ein Hochpass zweiter Ordnung verwendet ist die Dämpfung unterhalb der Grenzfrequenz 40dB pro Dekade. Bei einem Hochpass erster Ordnung sind es nur 20dB pro Dekade.

|  |
| --- |
| Abbildung 3.1: Hochpass 2ter Ordnung |

Das hier gezeigte Beispiel soll demonstrieren welche Untersuchungen, Berechnungen und Simulation bei einem Hochpass 2ter Ordnung durchgeführt werden können.

### 3.2.1 Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion beschreibt das Verhältnis zwischen der Eingangsgröße, hier die Eingangsspannung, und der Ausgangsgröße, hier die Ausgangsspannung. Sie ist eine Funktion der Frequenz und wird in der Regel in Form eines Bode-Diagramms dargestellt.

Da es sich hier um eine Einfache Serienschaltung handelt, kann die Übertragungsfunktion auch als Verhältnis der Impedanzen dargestellt werden. Es wird die Spannungsteilerregel verwendet.

### 3.2.2 Resonanzfrequenz

Das Wissen über die Resonanzfrequenz ist nicht nur wichtig wenn das diese Bauteile in ganz ähnlicher Anordnung als Schwingkreis verwendet wird. Auch bei Hochpass und Tiefpassfiltern ist die Resonanzfrequenz wichtig. Auch wenn für Filter die Grenzfrequenz öfter herangezogen wird.  
Da es sich bei dieser Schaltung um eine Schaltung mit zwei Energiespeichern handeln zwischen der die Energie hin und her Pendeln kann ist dieses System schwingfähig und in der Lage bei Resonanz eine Resonanzüberhöhung zu erzeugen. Das bedeutet, dass die Amplitude am Ausgang größer als der Eingang ist. Es ist leicht vorsstellbar, dass in solch einem Fall eine eventuell dahinter liegende Schaltung zerstört werden könnte. daher gilt es die Resonanzüberhöhung meistens zu vermeiden.

Die Resonanzfrequenz ist die Frequenz, bei der die Impedanz des Hochpasses minimal ist. Resonanz tritt ein wenn der Widerstand des Schaltung am kleinsten ist. Das ist der Fall wenn sich die induktive Impedanz und die kapazitive Impedanz aufheben. Der Imaginärteil also Null ist. Damit lässt sich die Resonanzfrequenz berechnen.

#### 3.2.2.1 Übertragungsfunktion bei Resonanz

Mit der Übertragungsfunktion kann nun der Ausgang in Abhängigkeit der des Eingangs berechnet werden. Wird zum beispiel für die Resonanzfrequenz eingesetzt, so erhält man die Übertragungsfunktion bei Resonanz.

### 3.2.3 Grenzfrequenz

Die Grenzfrequenz ist die Frequenz, bei der die Übertragungsfunktion um 3dB abfällt. Wird der Betrag der Übertragungsfunktion betrachtet, so ist die Grenzfrequenz die Frequenz, bei der der Betrag der Übertragungsfunktion beträgt.

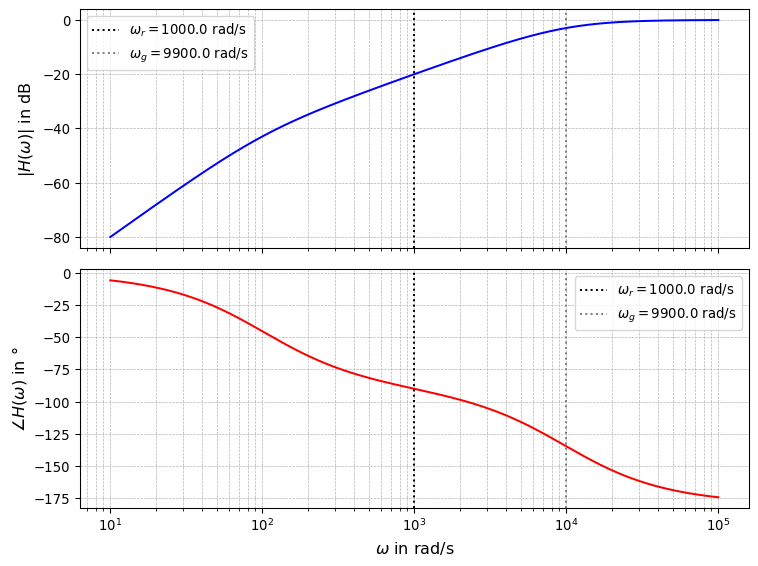
Wird die Gleichung umgestellt, so erhält man die Grenzfrequenz.

### 3.2.4 Bode-Diagramm in Abhängigkeit der Bauteilwerte

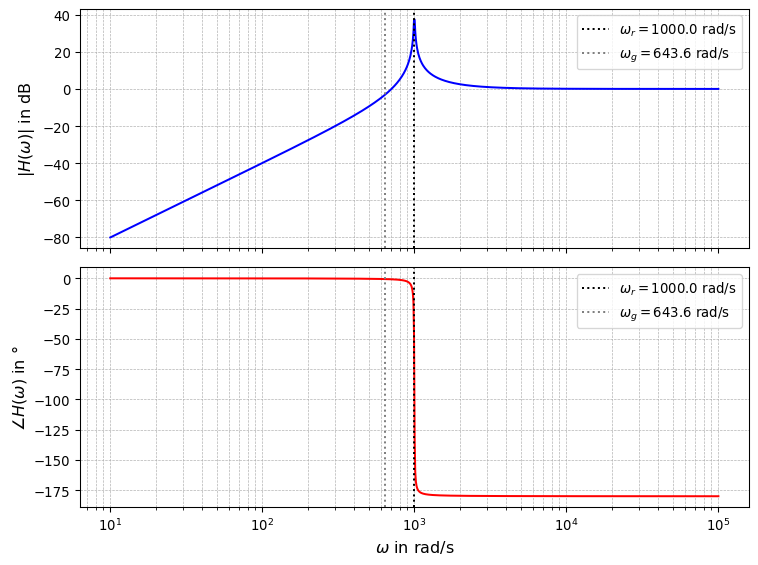
Das Bode-Diagramm ist eine grafische Darstellung der Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Frequenz. Es wird in zwei Diagrammen dargestellt, einem für den Betrag der Übertragungsfunktion in dB und einem für die Phase der Übertragungsfunktion. Die Frequenz wird in logarithmischer Skala dargestellt. Die Phase der Übertragungsfunktion wird in Grad angegeben und gibt an, wie viel die Ausgangsspannung gegenüber der Eingangsspannung verschoben ist.  
Aus dem Bode-Diagramm kann das Verhalten des Filter, welches mathematisch in der Übertragungsfunktion beschrieben ist, grafisch abgelesen werden.  
Nicht nur Filter können mittels Bode-Diagramm gut analysiert werden. Auch andere Systeme welche einen Eingang und einen Ausgang haben, können mit Hilfe der Übertragungsfunktion und dem Bode-Diagramm analysiert werden.

Ob es zu einer Resonanzüberhöhung kommt, davon ab wie Stark das System gedämpft ist. Bei einem Hochpass 2ter Ordnung ist die Dämpfung durch den Widerstand R maßgeblich bestimmt.

#### 3.2.4.1 Ohne Resonanzüberhöhung - stark gedämpft

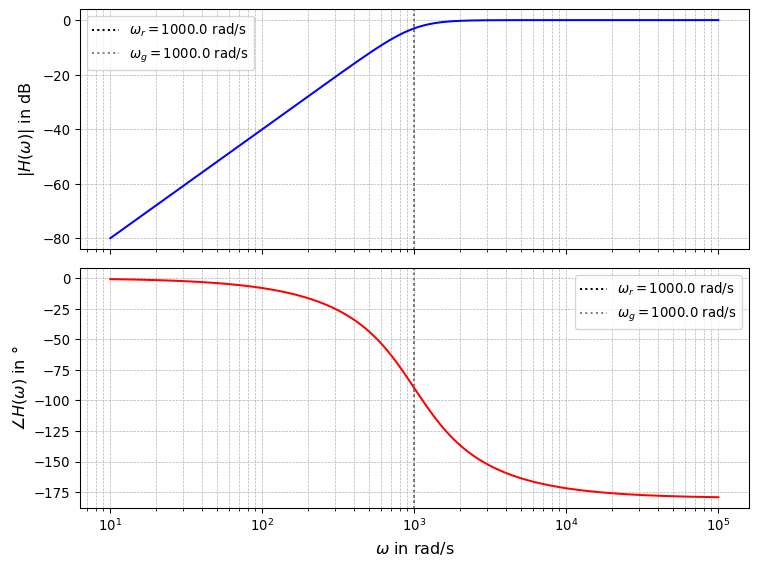


#### 3.2.4.2 Mit Resonanzüberhöhung



#### 3.2.4.3 Grenzfall

Der Grenzfall wird erreicht wenn der Widerstand gerade so groß ist, dass eine Resonanzüberhöhung unterdrückt wird. Aber auch nicht so groß, dass unnötig viel Energie als Wärme verloren geht. In diesem Fall ist die Resonanzfrequenz gleich der Grenzfrequenz. Damit kann der Betrag der Übertragungsfunktion bei Resonanz gleich dem Betrag der Übertragungsfunktion bei der Grenzfrequenz gesetzt werden und R aus C und L berechnet werden.



# 4. Der Transistor

## 4.1 Feldeffekttransistor

Die einfachste und gleichzeitig eine der wichtigsten Anwendungen des MOSFETs ist der Schalter. Mittels Spannung am Gate wird der MOSFET ein- und ausgeschalten.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.1: N-Kanal MOSFET als Schalter |

Die notwendigen und zulässigen Spannungen sind aus dem Datenblatt des gewählten Transistors zu entnehmen. Die kleinste Spannung, welche für das Schalten zwischen Gate und Source anliegen muss, wird Threshold-Spannung genannt. Am Gate wird kein Vorwiderstand benötigt, da der Eingangswiderstand des MOSFETs sehr hoch ist und dadurch in den meisten Fällen mit angenommen werden kann.

### 4.1.1 Aufgabe

#### 4.1.1.1 Teil 1: N-Kanal Anreicherungstyp

Simulieren Sie die gegebene Schaltung. Wählen Sie die Spannungen aus dem Datenblatt aus. Geben Sie für zwei Eingangspulse den Strom durch, und die Spannung über den Widerstand an. Verwenden Sie dafür die Transientenanalyse und geben Sie deutlich an, ob das Ergebnis den Erwartungen entspricht oder nicht. Argumentieren Sie Ihre Aussage.

#### 4.1.1.2 Teil 2: P-Kanal Anreicherungstyp

Simulieren Sie die Schaltung erneut unter der Verwendung eines P-Kanal Anreicherungstypen. Passen Sie die Spannungen so an, dass auch dieser als Schalter funktioniert. Verwenden Sie dazu erneut das passende Datenblatt. Geben Sie deutlich an, ob das Ergebnis den Erwartungen entspricht oder nicht. Argumentieren Sie Ihre Aussage.

## 4.2 Bipolartransistor

### 4.2.1 Die Emitterschaltung mit Temperaturstabilisierung

Ein einfacher Spannungsverstärker. Der Re dient der Temperaturstabilisierung der Strecke.

|  |
| --- |
| Abbildung 4.2: Bipolartransistor in Emittergrundschaltung mit Re |

### 4.2.2 Aufgabenstellung

Entwerfen Sie einen Spannungsverstärker mit gegebenen Werten.

#### 4.2.2.1 Gegeben

##### 4.2.2.1.1 Aus der Angabe

##### 4.2.2.1.2 Aus dem Datenblatt

##### 4.2.2.1.3 Aus der Erfahrung / Faustregel

* Zahlenwerte
* Gleichungen

### 4.2.3 Berechnung

* Gleichung [Gleichung 4.1](#eq-vU_eq) nach auflösen. Das Ergebnis in Gleichung [Gleichung 4.2](#eq-Ic1) einsetzen und nach auflösen.

### 4.2.4 Die Kollektorschaltung

Die Kollektorschaltung wird als Impedanzwandler eingesetzt. Daher ist die wesentliche Eigenschaft der Eingangswiderstand. Die Bauteile müssen also so berechnet werden, dass sich ein gewünschter Eingangwiderstand einstellt.

**To be Continued**

# 5. Leistungsverstärker

**Lernziele**

* Auslegung von analogen Schaltungen
* Strukturiertes aufbereiten einer Aufgabenstellung
* Plausibilität und Qualitätsbeurteilung mittels Simulation
* Übersichtliches zeichnen komplexer Schaltpläne
* Strukturiertes, Zeitoptimiertes Dokumentieren der Arbeit

Transistorverstärker, wie sie bisher bekannt sind [Kapitel 4.2](#sec-BJT), in denen ein Transistor in einem Arbeitspunkt betrieben wird, haben bei höheren Leistungen eine zu hohe Verlustleistung. Die Verlustleistung ist proportional zum Strom durch den Kollektor in Ruhe, also ohne Signal am Eingang. Bei der Emitterschaltung ist der Ruhestrom höher, da der Arbeitspunkt auf der Kennlinie weiter “oben” ist. Diese Betriebsart wird auch A - Betrieb genannt.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.1: Bipolartransistor Arbeitspunkt und Ruhestrom [1] |

Um höhere Leistungen und eine geringere Verlustleistung zu erreichen, muss der Arbeitspunkt nach “unten”, also zu einem kleineren gebracht werden. Wird dies am Beispiel des Verstärkers in Emittergrundschaltung [Kapitel 4.2](#sec-BJT) gemacht, würde das bedeuten, dass nur noch eine Halbwelle verstärkt wird. Um dies zu verhindern, werden ein PNP und ein NPN Transistor in Gegentakt geschaltet. Jeder Transistor übernimmt nun die Verstärkung einer Halbewelle. Warum der , und damit die Verlustleistung, trotzdem nicht ganz Null sein kann, sehen wir im folgenden Teil.

## 5.1 Die Gegentaktendstufe

Um zu vermeiden, dass der Arbeitspunkt eine höhere Verlustleistung aufgrund eines höheren verursacht, und trotzdem ein symmetrisches Signal verstärkt werden kann, können zwei Transistoren eingesetzt werden. Damit ist auch die maximale Leistung höher, da der Arbeitsbereich pro Transistor besser ausgenutzt wird. Ein Transistor verstärkt die positiven Signale. Der andere die negativen. Dies wird Gegentaktendstufe genannt. Die Betriebsart wird hier als B bezeichnet. Wird eine reale Schaltung entwickelt, ist stets darauf zu achten, dass die Bauteileigenschaften berücksichtigt werden. Speziell die Maximalwerte dürfen nicht überschritten werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.2: Bipolartransistoren in Gegentakt |

Wird diese Schaltung einem Test unterzogen, zeigt sich, dass das Ergebnis wenig zufriedenstellend ist. Weder wird die Amplitude erreicht, das Signal wird gedämpft, noch folgt der Ausgang dem sinusförmigen Verlauf des Eingangs. Speziell an den Nulldurchgängen gibt es beträchtliche Verzerrungen. Als Qualitätskriterium soll von nun an die Differenz zwischen Ausgangsspannung und Eingangsspannung herangezogen werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.3: Bipolartransistoren in Gegentakt, Simulationsergebnisse |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 1 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 3 |  |

## 5.2 Rückkopplung

Um den Verlauf der Ausgangsspannung an den Verlauf der Eingangsspannung anzupassen, wird eine Gegenkopplung verwendet. Dazu ist eine Subtraktion des Ausgangssignals vom Eingangssignal notwendig. Als Transistorschaltung würde sich eine Differenzverstärkerschaltung anbieten. Für ein noch besseres Ergebnis wird hier ein OPV eingesetzt. Durch die Rückkopplung der gesamten Ausgangsspannung wird eine Spannungsverstärkung von Eins erreicht. Das Ausgangssignal folgt dem Eingangssignal. Eine legitime Frage ist, warum nicht einfach nur der OPV verwendet wird? Hier kann auf die Überschrift verwiesen werden. Es soll Leistung verstärkt werden. Und die Ausgangsleistung eines OPV reicht in der Regel nicht aus, um beispielsweise einen Lautsprecher zu betreiben.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.4: Gegentaktendstufe mit Rückkopplung |

Mittels Simulation kann nun erneut die Qualität überprüft werden. Es ist zu erkennen, dass die Amplitude erreicht wird. An den Nulldurchgängen sind jedoch noch Störungen zu sehen. Die Ursache dieser Störungen sind die Kennlinien der Transistoren. In [Abbildung 5.1](#fig-BJT-AP_Ruhestrom) lässt sich erkennen, dass sich in der Nähe des Ursprunges ein Knick befindet. Erst ab einer größer von ca. beginnt der Transistor zu leiten. Das bedeutet, dass Eingangssignale kleiner als diese minimal notwendige Basis- Emitterspannung nicht verstärkt werden.  
Der OPV wirkt zwar auch den Übergabeverzerrungen entgegen, allerdings ist er stark abhängig von der Frequenz. Je schneller im Verhältnis zum Signal der OPV sein Ausgangssignal ändern kann, umso kleiner sind die Verzerrungen. Wie schnell der OPV seinen Ausgang ändern kann, hängt von der Slew-Rate mit der Einheit ab.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.5: Bipolartransistoren in Gegentakt, Simulationsergebnisse |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 10 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 3 |  |

## 5.3 Vorspannen

Um die Übergabeverzerrungen zu eliminieren wird die B-E Strecke vorgespannt. Das bedeutet eine Spannung anzulegen, welche größer ist als die Schwellspannung der Basis- Emitter Strecke. Damit ist der Transistor bereits im leitenden Bereich und wird nur noch vom Eingangssignal weiter ausgesteuert.  
Da durch das Vorspannen auch ein Kollektorstrom durch den Transistor fließt, wenn am Eingang anliegen erhöhen sich die Verluste. Dieser Kollektorstrom wird auch als Ruhestrom bezeichnet . Um den Ruhestrom möglichst klein zu halten, muss die Spannungsquelle an die Transistoren und deren Fertigungstoleranzen angepasst werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.6: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren |

Mittels DC-Sweep kann die Spannungsquelle auf einen gewünschten eingestellt werden. Der ist so zu wählen, dass der Arbeitspunkt außerhalb des nichtlinearen Bereichs der Transistorkennlinie liegt. Gleichzeitig soll er so klein wie möglich sein, um die Verluste gering zu halten. Hier soll der ein Zehntel des maximalen Laststromes betragen.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.7: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren, DC-Sweep |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| min | 1 V |  |
| max | 1,4 V |  |
| step size | 10 mV |  |

Mit dem Cursor können die Ergebnisse exakt abgelesen werden.

| Simulationsergebnis | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| bei = 15 mA an T1 | 1,3479 V |  |
| bei = 15 mA an T2 | 1,3488 V |  |

Da es sich um unterschiedliche Transistoren handelt, ist natürlich auch der Zusammenhang zwischen und ein anderer. Da die Werte sehr nahe beieinander liegen, kann ein gerundetes arithmetisches Mittel als Ergebnis für verwendet werden.

Der Verstärker hat nun eine Qualität, welche das Verstärken von niederfrequenten Signalen in ausreichender Güte erlaubt, um beispielsweise Musik zu verstärken. Dies ist am geringen Unterschied zwischen der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung zu erkennen.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.8: Bipolartransistoren in Gegentakt, Simulationsergebnisse |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 10 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 3 |  |

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Welche anderen Darstellungen des Verhältnisses zwischen Ausgang und Eingang würden sich eignen um nachzuweisen, dass die Verzerrung akzeptabel ist? |

## 5.4 Reale Spannungsquelle

Ideale Spannungsquellen, wie oben eingezeichnet, existieren nicht. Daher muss die ideale Spannungsquelle mit einer realen Spannungsquelle ersetzt werden. Aus Kostengründen muss dies mit möglichst wenigen Bauteilen geschehen. Daher fällt ein Netzteil aus. Eine Schaltung mit nur drei Bauteilen, welche die Aufgabe erledigen kann, ist ein sogenannter “-Vervielfacher” [2, pp. 301].  
In [Abbildung 5.9](#fig-BJT_GegenRueckVorReal2) wird die Schaltung gezeigt. Um die Schaltung zu dimensionieren, kann der -Vervielfacher alleine betrachtet werden. ist aus [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) bekannt. Es müssen nun also die Widerstände und so dimensioniert werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.9: Reale Spannungsquelle, -Vervielfacher |

Der Ablauf ist wie folgt und gilt für alle Dimensionierungsaufgaben von Schaltungen.

### 5.4.1 -Vervielfacher berechnen.

Dabei wird die Schaltung analytisch, also mit Formeln berechnet.  
Es soll, wie bei der Dimensionierung der Emitterverstärkerschaltung, klar gekennzeichnet werden, woher die Formeln und Werte kommen.  
Gesucht wird und so, dass der gesuchten Vorspannung aus [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) entspricht.

Der maximale Laststrom der Vorspannungsquelle wurde in [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) bestimmt, indem der maximale Strom der Vorspannungsquelle im Betrieb mittels Simulation bestimmt wurde und mit einer gewissen Sicherheit aufgerundet wurde.

Die Berechnung von Transistorschaltungen erfolgt immer mit gewissen Annahmen. Eine exaktere und damit kompliziertere Berechnung ist nicht sinnvoll, da die Bauteiltoleranzen und Temperatureinflüsse zu groß sind. Folgende *Faustregeln* gelten für die Berechnung:

Mit Maschengleichung 1 erhält man den Zusammenhang zwischen und .

Mit Maschengleichung 2 lässt sich berechnen.

kann aus dem Knoten 2 berechnet werden, indem [Gleichung 5.10](#eq-I2_eq) eingesetzt wird.

Wird nun noch [Gleichung 5.16](#eq-Ib_eq) in [Gleichung 5.11](#eq-I1_eq2) eingesetzt, erhält man eine Gleichung für in Abhängigkeit von .

Über den Knoten 1 wird der Zusammenhang zwischen den Strömen dargestellt. Für muss der maximale Lastrom eingesetz werden. Dieser kann aus einer Transientensimulation in [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) ermittelt werden. Der Strom kann mit der Faustregel [Gleichung 5.3](#eq-Ispg_eq) bestimmt werden. Werden diese Informationen und [Gleichung 5.17](#eq-I1_eq3) in Knoten 1 [Gleichung 5.13](#eq-K1_eq) eingesetzt, kann durch Umformen berechnet werden.

Durch Einsetzen der Zahlenwerte können nun und berechnet werden.

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Wird der Spannungsteiler aus und als unbelastet betrachtet, indem sichergestellt wird, dass ist, vereinfacht sich die Berechnung erheblich. Allerdings sind damit auch höhere Ruheströme und damit Verluste verbunden. |

### 5.4.2 Überprüfen und einstellen mittels Simulation

Nun wird mittels Simulation die Berechnung überprüft und die Schaltung exakt eingestellt. Zur Überprüfung wird eine “OP” (Operating Point) Simulation verwendet. Um die Schaltung einzustellen, kann eine “DC-Sweep” Simulation, wie dies zum Beispiel in [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) zur Bestimmung der korrekten Vorspannung gemacht wurde, verwendet werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.10: Reale Spannungsquelle, Simulation 1 |

Werden die oben berechneten Werte mittels Simulation überprüft, erhält man eine gute Übereinstimmung für . Um eine noch Bessere Übereinstimmung zu erzielen, können die Widerstände mittels DC-Sweep eingestellt werden. Dazu wird laut Berechnung gewählt und Widerstand “gesweept”. Ziel ist es, den Widerstandswert so zu bestimmen, dass den notwendigen Wert der Vorspannung hat, welcher in [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) mittels “DC-Sweep” ermittelt wurde.

.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.11: Reale Spannungsquelle, DC-Sweep |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Sweep Bereich | bis in Schritten |  |

| Simulationsergebnis | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| bei |  |  |

Eine neuerliche Simulation bestätigt das Ergebnis.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.12: Reale Spannungsquelle, Simulation 2 |

### 5.4.3 Aufbau

Ist aus dem Schaltungsaufbau zu erwarten, dass Bauteiltoleranzen und Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur) eine Rolle spielen, müssen Potentiometer in der realen Schaltung vorgesehen werden, um diese Effekte zu kompensieren. Beim -Vervielfacher würde als Trimpotentiometer ausgeführt werden. Außerdem ist zu beachten, dass für einen realen Aufbau Widerstandswerte aus den E-Reihen zu wählen sind!

### 5.4.4 Reale Spannungsquelle in der Schaltung

Der zuvor dimensionierte -Vervielfacher kann nun in die Schaltung eingebaut werden.

Es gilt aufs neue die Qualität zu überprüfen. Dabei werden die selben Parameter wie in [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) zur Beurteilung heran gezogen. Zuerst wird wieder eine Operating Point Analyse (OP) durchgeführt um den Arbeitspunkt zu kontrollieren, [Abbildung 5.13](#fig-BJT_GegenRueckVorReal3). Bereits hier ist zu erkennen, dass die gewünschte Vorspannung nicht erreicht wird.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.13: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle, Simulation 1 |

|  |
| --- |
| Abbildung 5.14: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle, Transienten Simulation |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 10 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 3 |  |

In der Simulation über die Zeit, der Transientensimulation, sind auch eindeutig die Übergabeverzerrungen zu sehen. Der Grund dafür liegt in der fehlenden Stromversorgung der Spannungsquelle.

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Welche noch kostengünstigere Variante zur Realisierung der Vorspannung mit Dioden gibt es? Welchen Nachteile hat diese Lösung? Warum wird nicht einfach eine Stromquelle mit einem Widerstand zur Vorspannung genutzt? |

## 5.5 Stromversorgung

Wie in [Kapitel 5.4.4](#sec-RealeVorspannung) Simulationsergebnis [Abbildung 5.13](#fig-BJT_GegenRueckVorReal3) und [Abbildung 5.14](#fig-BJT_GegenRueckVorReal4) sichtbar ist, reicht der Ausgangsstrom des OPV’s nicht aus um die reale Vorspannungsquelle zu versorgen. Daher müssen zusätzliche Stromquellen eingebaut werden. Da der Verstärker symetrisch aussteuert, müssen zwei Stromquellen eingebaut werden. Eine für die negative und eine für die positive Versorgung.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.15: Gegentaktendstufe mit Stromversorgung, Simulation 1 |

Mittels Arbeitspunktsimulation ist zu sehen, dass die Vorspannung durch den Einbau der Stromquellen erreicht wird. Die Höhe des Stromes richtet sich nach der Dimensionierung von in [Kapitel 5.4.1](#sec-ube_verf_bere).

|  |
| --- |
| Abbildung 5.16: Gegentaktendstufe mit Stromversorgung, Transienten Simulation |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 10 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 5 |  |

Die Verzerrungen sind wieder auf dem Niveau aus [Kapitel 5.3](#sec-LV_Vorspannen) und damit akzeptabel. Nun müssen nur noch die idealen Stromquellen mit realen ersetzt werden.

## 5.6 Reale Stromquelle

Als geeignete Stromquellen bietet sich der sogenannte Stromspiegel an. Dieser kann wieder analytisch berechnet werden nach [2, pp. 157] oder mittels DC-Sweeps des Widerstandes bestimmt werden. Zur Simulation eignen sich als Last Spannungsgesteuerte Spannungsquellen.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.17: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Simulation 1 |

Die Stabilität der Stromquelle kann ermittelt werden, indem die Lastspannung “gesweept” wird. Dabei soll der Verlauf des Stromes möglichst horizontal und konstant sein.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.18: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, DC Sweep |

Nachdem die ausreichende Stabilität gezeigt wurde, können die Stromquellen eingebaut und die gesamte Schaltung auf ihre Qualität überprüft werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.19: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Arbeitspunktanalyse |

|  |
| --- |
| Abbildung 5.20: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Transienten Analyse |

| Simulationsparameter | Wert | Bemerkung |
| --- | --- | --- |
| Frequenz | 10 kHz |  |
| Amplitude | 1 V |  |
| Simulierte Perioden | 5 |  |

Vergleicht man nun Ergebnis [Abbildung 5.8](#fig-BJT_GegenRueckVorSim1), bei welchem die Vorspannung ideal ausgeführt wurde, und das Ergebnis [Abbildung 5.20](#fig-BJT_06_LV_Real_TRANSim1) mit realen und damit tatsächlich fertigbar Quellen, ist die Qualitätsunterschied zu vernachlässigen. Die Schaltung gilt damit als fertig dimensioniert. Natürlich kann die Schaltung erweitert, adaptiert und verbessert werden. Siehe dazu [Kapitel 5.9](#sec-AbwErw).

## 5.7 Strombegrenzung

Um die Schaltung im Kurzschlussfall zu schützen, kann eine Strombegrenzung eingebaut werden [2], Abb. 18.30 c . Die Strombegrenzung besteht aus einem Widerstand und einem weiteren Transistor [Abbildung 5.21](#fig-BJT_07_LV_StromBeg).  
Die Widerstände und werden so dimensioniert, dass beim erreichen des maximal erlaubten Stroms durch die Transistoren und , die Spannung zwischen Basis und Emitter der Transistoren und so groß ist, dass diese zu leiten beginnen. Damit wird die Basis-Emitter Strecke der Transistoren und kurzgeschlossen und der Stromfluss unterbrochen.

|  |
| --- |
| Abbildung 5.21: Gegentaktendstufe mit Strombegrenzung |

Die Berechnung der Widerstände kann vereinfacht durch die Annahme erfolgen, dass die Spannung der Transistoren und größer sein muss um zu leiten.

Die Widerstände und werden zum nächsten Wert der E12 Reihe ausgewählt und die Schaltung mittels Simualtion überprüft.

Es ist gut zu erkennen wie die Ströme durch die Transistoren und korrekt begrenzt werden. Nun gilt es, mittels Simulation, nachzuweisen, dass die Schaltung auch im Normalbetrieb noch funktioniert.

Werden die Werte mit Strombegrenzung **?@fig-BJT\_07\_LV\_StromGeb\_Normal\_TRANSim1** mit den Werten ohne Strombegrenzung [Abbildung 5.20](#fig-BJT_06_LV_Real_TRANSim1) verglichen, ist zu erkennen, dass die Schaltung eine leicht höhere Abweichung zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung aufweist. Ob die Abweichung akzeptabel ist, muss im Einzelfall entschieden werden. Für unsere Zwecke stellen wir fest, dass die Schaltung nach wie vor das Signal in ausreichender Qualität verstärkt.  
Somit ist festzuhalten, dass die erweiterung um die Strombegrenzung lediglich in der Verlustleistung zu Buche schlägt, jedoch keine Auswirkungen auf die Qualität der Verstärkung hat.

## 5.8 Praktische Herangehensweise

* Welche Last muss versorgt werden?
* Welche Lastströme sind gewünscht?
* Auswahl passender Transistoren in Bezug auf die maximale Werte.
* Definition der Qualitätsparameter, z.B. Differenz der Ein- und Ausgangspannungen, Oberwellen Anteile, …

## 5.9 Abwandlungen und Erweiterungen

Wie könnte die Rückkopplung, welche hier mit einem OPV umgesetzt wurde noch realisiert werden?   
Wie könnte die Vorspannung mit Dioden umgesetzt werden?  
Wie könnte die Leistung weiter erhöht werden?

# 6. H-Brücke

Der Markt für DC-Motoren belief sich im Jahr 2022 auf ca. 20,1 Milliarden US-Dollar und es wurde erwartet, dass sich das Volumen bis 2031 auf 49,3 Milliarden erhöht [3]. Jeder dieser Motoren braucht eine mehr oder weniger komplizierte Ansteuerung. Eine mögliche Ansteuerung soll hier gezeigt werden.

**Ziel**  
Es soll eine Schaltung entworfen werden, welche es erlaubt, einen DC-Motor in folgenden Betriebsarten zu betreiben:

* Linkslauf
* Rechtslauf
* Bremsen
* Optional: Leerlauf

Bei den ersten beiden Punkten soll es möglich sein, die Drehzahl mittels *Puls-Weiten-Modulation* (PWM) zu ändern.

**Lernziele**

* Strukturiertes aufbereiten einer Aufgabenstellung
* Auslegung von digitalen Schaltungen
* Plausibilität und Qualitätsbeurteilung mittels Simulation
* Hierarchisches Design in Schaltplänen
* Strukturiertes, zeitoptimiertes Dokumentieren der Arbeit
* Application Notes/Datenblätter der Hersteller lesen und verstehen

**Hilfestellung**

[Video: Hierarchisches Design](https://htlanichstrasse.sharepoint.com/:v:/s/HWE_G1_GoetL_4CHEL_2324/EZasQb_YxYJFhKNIHozMHHEBL6wJfvGr8gDUHmqqvegymg?e=bt8iiY&nav=eyJyZWZlcnJhbEluZm8iOnsicmVmZXJyYWxBcHAiOiJTdHJlYW1XZWJBcHAiLCJyZWZlcnJhbFZpZXciOiJTaGFyZURpYWxvZy1MaW5rIiwicmVmZXJyYWxBcHBQbGF0Zm9ybSI6IldlYiIsInJlZmVycmFsTW9kZSI6InZpZXcifX0%3D)  
[Altium Hilfe: Multi-sheet & Hierarchical Designs in Altium Designer](https://www.altium.com/documentation/altium-designer/multi-sheet-multi-channel-design?version=22)

## 6.1 Beschreibung der H-Brücke

Im einfachsten Fall wird die Stromversorgung, welche eine entsprechende Leistung hat, mit einem Schalter eingeschaltet und der Motor dreht sich. Um einen Motor drehzahlgesteuert zu betreiben, bedarf es ein Steuersignal und der entsprechenden Leistung für den Motor. In den meisten Fällen ist es so, dass das Steuersignal selbst nicht ausreichend Leistung hat, da es aus einem Mikrocontroller kommt.  
Mit Schaltung [Abbildung 4.1](#fig-n-Channel_switch) kann ein Motor drehzahlgesteuert betrieben werden. Der MOSFET verstärkt dabei die Leistung des Steuersignales. Die Leistung wird von der Quelle zur Verfügung gestellt. Allerdings lässt sich dabei die Drehrichtung nicht ändern.  
Um die oben geforderten Betriebszustände zu erreichen, bedarf es der H-Brücke, auch Vier-Quadranten-Steller genannt, in [Abbildung 6.1](#fig-H-Bruecke).

|  |
| --- |
| Abbildung 6.1: H-Brücke [4] |

### 6.1.1 Funktionsweise

Für die Erklärung der Funktionsweise werden die MOSFET’s durch gedachte Schalter ersetzt. Dies ist zulässig, da der MOSFET als Schalter betrieben werden kann. Siehe dazu [Kapitel 4.1](#sec-MOSFET).

|  |
| --- |
| Abbildung 6.2: Ersatzschaltbild H-Brücke mit Schaltern |

und stellen dabei Potentiale dar. Zur Erinnerung, ein MOSFET schaltet, wenn die Spannung zwischen Gate und Source, , die Threshold-Spannung überschreitet.

Der Trick ist, den Stromfluss durch den Motor für Rechtslauf und Linkslauf umzukehren. Dies gelingt wie folgt.

#### 6.1.1.1 Linkslauf

|  |
| --- |
| Abbildung 6.3: Ersatzschaltbild H-Brücke mit Schaltern, Linkslauf |

Transistoren und müssen durchschalten. Transistoren und müssen gesperrt sein.

#### 6.1.1.2 Rechtslauf

|  |
| --- |
| Abbildung 6.4: Ersatzschaltbild H-Brücke mit Schaltern, Rechtslauf |

Transistoren und müssen durchschalten. Transistoren und müssen gesperrt sein.

#### 6.1.1.3 Bremsen

Um den Motor zu bremsen, muss er kurzgeschlossen werden. Daraus ergibt sich, dass die Transistoren und durchgeschaltet sind und die Transistoren und gesperrt sind.

|  |
| --- |
| Abbildung 6.5: Ersatzschaltbild H-Brücke mit Schaltern, Bremsen |

## 6.2 Entwicklung der Logik

### 6.2.1 Von der Wahrheitstabelle zur Booleschen Gleichung

Zunächst muss in der Zuordnungstabelle der Zusammenhang zwischen dem logischen Zustand und dem physikalischen Wert definiert werden.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Eingang / Ausgang | Bezeichnung | Zuordnung | Beschreibung | | --- | --- | --- | --- | | Eingang | E … Enable | 0 … Disabled; 1 … Enabled | Damit wird die Schaltung betriebsbereit. Ist Enable deaktiviert, kann an den anderen Eingängen ein beliebiges Signal anliegen, der Motor darf sich trotzdem nicht bewegen. | | Eingang | B … brake | 0 … Disabled; 1 … Enabled | Aktivierung des Bremsbetriebs. Hat Vorrang über die Richtungswahl. | | Eingang | D … Direction | 0 … Linkslauf; 1 … Rechtslauf | Gibt die Drehrichtung vor. | | Eingang | P … PWM | PWM Signal | Gibt die Drehzahl vor. | | Ausgänge | S1, S2, S3, S4 | 0 … MOSFET aus; 1 … MOSFET ein | Steuersignal für die Transistoren. Diese entsprechen noch nicht dem benötigten Potentialen! |   Tabelle 6.1: Zuordnungstabelle |

In der Wahrheitstabelle wird nun der Schaltzustand der Ausgänge in Abhängigkeit der Eingänge definiert. Das PWM Signal soll nur auf die Transistoren T2 und T4 wirken. Die Transistoren T1 und T3 sollen nur durch die Eingänge E, B und D gesteuert werden. In der H-Brücke werden die Transistoren T1 und T3 in der Regel dazu verwendet, die Richtung des Stromflusses und damit die Drehrichtung des Motors zu steuern. Die Transistoren T2 und T4 werden dann mit einem PWM-Signal gesteuert, um die Geschwindigkeit des Motors zu regeln. Die Verwendung von PWM nur für die unteren Transistoren (T2 und T4) hat mehrere Vorteile, darunter eine verbesserte Energieeffizienz, eine reduzierte Wärmeentwicklung und einen besseren Schutz des Motors.

| Enable | Direction | Brake | S1 | S3 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

| PWM | Enable | Direction | Brake | S2 | S4 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Mittels KV-Diagram oder Boolescher Algebra kann aus der Wahrheitstabelle die einfachste Boolesche Gleichung ermittelt werden.

|  |
| --- |
| Hinweis |
|  |

Zur Überprüfung werden aus den Gleichungen die Wahrheitstabellen erstellt und mit den oben definierten Wahrheitstabellen verglichen.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | E | D | B | S1 | S3 | | --- | --- | --- | --- | --- | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |   Tabelle 6.2: Wahrheitstabelle Kontrolle T1 und T3 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | P | E | D | B | S2 | S4 | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   Tabelle 6.3: Wahrheitstabelle Kontrolle T2 und T4 |

Die Tabellen stimmen überein. Die Gleichungen sind somit richtig.

### 6.2.2 Schaltung

Die Logik kann mit verschiedenen Technologien umgesetzt werden. Hier wurde eine Lösung mittels TTL Gattern gewählt. Die Schaltung ist in [Abbildung 6.6](#fig-LogikSchaltung) dargestellt. In einer modernen Anwendung würde die Logik mittels Mikrocontroller realisiert werden. Software technisch bieten hier Quartus oder PSoC Creator Lösungen an. In Quartus lässt sich die Logik auch simulieren.

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Für die Simulation von hierarchischen Designs in Altium muss im *Simulation Dashboard* von *Document* auf *Project* umgestellt werden. |

|  |
| --- |
| Hinweis |
| Aus wirtschaftlichen Gründen sollte eine Logikschaltung aus möglichst wenigen verschiedenen Logikgattern bestehen. Es bietet sich an, die Schaltung mit NAND oder NOR Gattern aufzubauen. Aus zeitgründen wird im Moment hier darauf verzichtet. Mit der Regel von DeMorgan kann die Schaltung in die jeweilige Schreibweise übergeführt werden. |

|  |
| --- |
| Abbildung 6.6: Logikschaltung mit TTL |

Mittels Simulation kann die Funktion der Schaltung überprüft werden. Dazu wird der zeitliche verlauf mit der Wahrheitstabelle verglichen. Stimmen die Signale überein, ist die Schaltung richtig.

Der Signallaufplan passt mit der Wahrheitstabelle überein. Somit ist davon auszugehen, dass die TTL-Schaltung korrekt umgesetzt wurde.

## 6.3 Ansteuerung der H-Brücke

Die H-Brücke besteht aus P-Kanal MOSFETs und N-Kanal MOSFETs. MOSFETs werden über den Potentialunterschied zwischen Gate und Source gesteuert. Bei den N-Kanal MOSFETs T2 und T4 könnte direkt der Ausgang der Logikschaltung verwendet werden, sofern die notwendige Leistung zur Verfügung steht. Bei den P-Kanal MOSFETs T1 und T3 ist dies nicht möglich, da die Logikschaltung nicht das geeignete Potential liefern kann. Die P-Kanal MOSFETs sperren, wenn am Gate dieselbe Spannung anliegt wie am Source Eingang. Sie leiten, wenn am Gate Ground anliegt. Es muss also eine Schaltung entworfen werden, welche die Potentiale anpasst. Aus der obigen Überlegung ergibt sich folgende Anforderung an die Pegelanpassung.

| Ausgang TTL S1 und S3 | Potential am Source Eingang |
| --- | --- |
| 0 V |  |
| 5 V | 0 V |

### 6.3.1 Umsetzung für die Simulation

Diese Pegelanpassung lässt sich einfach mit OPVs realisieren. Durch die Slew-Rate der OPVs entstehen dabei aber deutliche Verluste bei jedem Schaltvorgang. Für die Funktion und Simulation wird trotz der Nachteile diese Lösung gewählt. Wichtig ist dabei, dass die OPVs Ausgangsspannungen deutlich unter bzw. deutlich über der Threshholdspannung der MOSFETs ausgeben.

|  |
| --- |
| Abbildung 6.7: Pegelanpassung mit OPV |

### 6.3.2 Umsetzung in der Praxis

Wird eine H-Brücke in der Praxis verwendet, wird eine integrierte oder teilintegrierte Lösung, sogenannte H-Brückentreiber, gewählt. Folgende Lösungen und viele andere von verschiedenen Herstellern, sind verfügbar:

* Treiber für H-Brücken in einem IC [5]
* Logik und Treiber in einem IC [6]
* Logik, Treiber und H-Brücke in einem IC [7] [8]

Im Datenblatt der Bauteile sind Anwendungsbeispiele und *Application Notes* zu finden. Diese sind eine gute Quelle für die Entwicklung der Schaltungen.

## 6.4 Funktionsüberpürfung der H-Brücke

Will man nun die Funktion der H-Brücke simulieren, muss die Logikschaltung mit der Pegelanpassung, die H-Brücke und das Motormodel zusammengeführt werden. Die Schaltung ist in [Abbildung 6.8](#fig-TopSheet) dargestellt. Der Motor kann über das einfache Modell [Abbildung 6.9](#fig-SimpleMotorModel) simuliert werden. Das erweiterte Modell **?@fig-ExtendedMotorModel** liefert auch Informationen über die Drehzahl und das Massenträgheitsmoment, damit kann auch der Bremsvorgang betrachtet werden.

|  |
| --- |
| Abbildung 6.8: Zusammengeführte Schaltung |

|  |
| --- |
| Abbildung 6.9: Einfaches Motormodell |

|  |
| --- |
| Abbildung 6.10: Erweitertes Motormodell, [**MotorModell?**] |

Nun können die Betriebszustände simuliert werden. Die Simulation ist in **?@fig-BridgeSim** dargestellt. Die Simulation zeigt, dass die H-Brücke wie gewünscht funktioniert. Die Drehzahl lässt sich mittels PWM verändern. Die Drehrichtung lässt sich mittels Direction ändern. Die Bremsfunktion lässt sich mittels brake aktivieren.

## 6.5 PWM und induktive Lasten

**To Be Continued**

# 7. Oszillator

Oszillatoren werden für folgende Anwendungen benötigt:

* Taktgeber für digitale Schaltungen
* Erzeugung von Trägersignalen für Drahtlose Kommunikation
* Frequenzgeneratoren
* Taktsignale für die Zeitmessung
* Erzeugung von Sinuswellen für die Audiotechnik

Und viele weitere Anwendungen. Oszillatorschaltungen sind damit grundlegende Schaltungen der Elektronik.

## 7.1 Grundlagen

**Schwingkreis** Ein Schwingkreis ist ein physikalisches System, das eine periodische Schwingung erzeugt. Ein Schwingkreis benötigt mindestens zwei Energiespeicher, um schwingfähig zu sein. Die Energiespeicher können Kondensatoren oder Spulen sein aber auch ein mechanisches System wie ein Pendel bestehend aus einer Feder und einem Gewicht.

**Oszillator** Ein Oszillator ist eine elektronische Schaltung, die aus einem Schwingkreis und einer Verstärkerschaltung besteht und den Zweck hat eine periodische Spannung zu erzeugen.

### 7.1.1 Oszillatorschaltungen

Ein System ist schwingfähig, wenn es mindestens zwei Energiespeicher enthält. Zum Beispiel zwei Kondensatoren oder einen Kondensator und eine Spule.

Es gibt verschiedene Arten von Oszillatorschaltungen, die auf unterschiedlichen Prinzipien basieren. Die häufigsten Typen sind:  
\* LC-Oszillatoren  
\* RC-Oszillatoren  
\* Kristalloszillatoren  
\* Relaxationsoszillatoren  
\* MEMS-Oszillatoren  
\* Phasenverschobene Oszillatoren

Jeder dieser Oszillatoren hat seine eigenen Vor- und Nachteile und wird für spezifische Anwendungen eingesetzt. In diesem Kapitel werden wir uns auf die RC-Oszillatoren konzentrieren, die auf einem Schwingkreis basieren, der aus Widerständen und Kondensatoren besteht.  
Es soll ein Wien-Robinson-Oszillator erarbeitet werden.

Weitere Links zum Thema [Altium Designer - Oscillators](https://resources.altium.com/p/everything-you-need-know-about-oscillators)

### 7.1.2 Blockschaltbild eines Oszillators

Als Blockschaltbild lässt sich ein Oszillator aus zwei Teilen darstellen. Einem Frequenzbestimmendem System, dem Schwingkreis, und einem Verstärker.

|  |
| --- |
| Abbildung 7.1: Blockschaltbild eines Oszillator |

Jeder der in [Abbildung 7.1](#fig-OscBlockschaltbildOszillator) gezeigten Blöcke lässt sich mathematisch beschreiben. Auch das gesamte System lässt sich mathematisch beschreiben.  
Mathematisch kann ein Schwingkreis durch eine Differentialgleichung beschrieben werden. Besser eignet sich die Beschreibung durch eine Übertragungsfunktion im Frequenzbereich, die die Beziehung zwischen Eingang und Ausgang des Schwingkreises beschreibt. Die Theorie der Übertragungsfunktionen wird unter anderem in der Regelungstechnik verwendet. Es unterscheidet sich lediglich die [Nomenklatur](https://de.wikipedia.org/wiki/Nomenklatur) und die Anwendung, die Mathematik ist die gleiche. Weiters ist die Zweitortheorie sehr eng mit der Theorie der Übertragungsfunktionen verwandt. Wer hier die genauen Zusammenhänge verstehen möchte muss sich mit der [Laplace-Transformation](https://de.wikipedia.org/wiki/Laplace-Transformation) auseinandersetzen.  
Grafisch lässt sich die Übertragungsfunktion mit dem Bode-Diagramm gut Darstellen.

Hier wird die Übertragungsfunktion dazu benutzt die korrekten Bauteilwerte für einen Wien-Robinson-Oszillator zu berechnen.

## 7.2 Dimensionierung eines Wien-Robinson-Oszillator

Für dieses Beispiel wird der Wien-Robinson-Oszillator ausgewählt. Die Schaltung ist in [2, chap. 13.2] zu finden. Schematisch ist die Schaltung als Blockschaltbild in [Abbildung 7.1](#fig-OscBlockschaltbildOszillator) dargestellt. Die zwei Blöcke können getrennt betrachtet werden. Der Schwingkreis und der Verstärker.

### 7.2.1 Übertragungsfunktion des Schwingkreises

Übertragungsfunktionen werden im Frequenzbereich betrachtet. das bedeutet, dass unsere Gleichungen nicht von der Zeit abhängen sondern von der Frequenz. Beim Wien-Robinson-Oszillator wird eine Schaltung aus zwei Widerständen und zwei Kondensatoren verwendet, [Abbildung 7.2](#fig-RCSchwingkreis).

|  |
| --- |
| Abbildung 7.2: RC Schwingkreis |

Die Übertragungsfunktion lässt sich nun auf zwei Arten darstellen. Entweder mathematisch mittels der Komplexen Wechselstromrechnung oder mittels Simulation.

#### 7.2.1.1 Mathematische Berechnung

Die Übertragungsfunktion lässt sich mittels Spannungsteileregel anschreiben.

Werden die zwei Widerstände und die zwei Kondensatoren als gleich angenommen, also und ergibt sich folgende Vereinfachung.

Bei der Schwingfrequenz des Oszillators handelt es sich um die Eigenfrequenz des Schwingkreises. Bei der Schwingfrequenz ist der Imaginärteil Null. Das lässt sich benutzen, um die Eigenfrequenz zu berechnen. Ist der Zähler rein real, kann nur der Imaginärteil des Nenners betrachtet werden. Ist der Zähler nicht nur real kann dies eventuell durch erweitern mit erreicht werden.

Wird die Gleichung nach aufgelöst, ergibt sich die Gleichung für die Eigenfrequenz des Schwingkreises.

Mit den Zahlenwerten für die Bauteile ergibt sich folgender Wert für die Eigenfrequenz des Schwingkreises.

Wird mit ersetzt ergibt sich die Übertragungsfunktion des Schwingkreises in Laplace-Form. Damit kann die Übertragungsfunktion des gesamten Systems berechnet werden und der Bode-Plot erstellt werden.

Im Bodediagramm ist die Eigenfrequenz am Punkt der größten Verstärkung zu sehen. Da bei gilt, dass der Imaginärteil Null ist muss bei der Eigenfrequenz auch die Phasenverschiebung Null sein. Damit ist aus dem Bodediagramm die Eigenfrequenz abzulesen. Es ist zu erkennen, dass die Eigenfrequenz des Schwingkreises beim berechneten Wert liegt.

#### 7.2.1.2 Simulation

Mittels *AC-Analysis* kann die Übertragungsfunktion des Schwingkreises simuliert werden. Die Simulationseinstellungen richten sich nach der erwarteten Frequenz des Schwingkreises. Die Simulationseinstellungen für oben gewählte Werte

.PLOT AC {MAG(v(uout)/v(uin))} =PLOT(1) =AXIS(1)  
.PLOT AC {PHASE(v(uout)/v(uin))} =PLOT(1) =AXIS(2)  
  
\*Selected Circuit Analyses:  
.AC DEC 10 10 10meg

|  |
| --- |
| Abbildung 7.3: Bodediagramm des Schwingkreises |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Wave Name | X | Y | | --- | --- | --- | | MAG(v(uout)/v(uin)) | 1,5816 kHz | 333,30 m | | PHASE(v(uout)/v(uin)) | 1,5915 kHz | -13,239 f° |   Tabelle 7.1: Simulations Ergebnisse für den Schwingkreis an der Eigenfrequenz . |

Um die Ergebnisse vergleichen zu können muss von der Frequenz auf die Kreisfrequenz umgerechnet werden.

Das Simulationsergebnis stimmt mit dem berechneten Wert aus [Kapitel 7.2.1.1](#sec-OscMathBerechnung) überein.

### 7.2.2 Übertragungsfunktion des Oszillators

Um den Oszillator dauerhaft in Schwingung zu halten muss ein Teil des Ausgangssignals an den Eingang zurück gekoppelt werden, siehe [Abbildung 7.1](#fig-OscBlockschaltbildOszillator).  
Da das Signal am Ausgang des Schwingkreises eine kleinere Amplitude hat als das Signal am Eingang, wie im Bodediagramm **?@fig-ACAnalysis** ersichtlich ist, muss diese Dämpfung durch einen Verstärker, , ausgeglichen werden.

#### 7.2.2.1 Übertragungsfunktion des Verstärkers

Die Übertragungsfunktion eines idealen Verstärkers ist eine Konstante. Eine reale OPV Verstärkerschaltung wird am besten mit einem PT1 oder PT2 Glied angenähert. Ist die zu verstärkende Frequenz sehr klein im Verhältnis zu den Knickfrequenzen der Verstärkerschaltung ist aber das einfache Modelle einer Konstanten ausreichend. Für den hier gezeigten Fall trifft dies zu.

… Verstärkung des Verstärkers

#### 7.2.2.2 Open Loop Betrachtung

Für die Beurteilung ob die Verstärkung des Verstärkers richtig gewählt wurde, kann das System ohne Rückkopplung betrachtet werden. Auch kann die Stabilität mittels Pol-Nullstellen Diagramm beurteilt werden.  
Die Übertragungsfunktion des offenen Systems, also ohne Rückkopplung, auch Open-Loop genannt, ist das Produkt der Übertragungsfunktionen des Schwingkreises und des Verstärkers.

|  |
| --- |
| Abbildung 7.4: Open Loop |

#### 7.2.2.3 Stabiles System

Die Verstärkung des gesamten Systems muss so gewählt werden, dass das System stabil ist. Das bedeutet, dass die Schwingung nicht abklingt und auch nicht aufschwingt. Die Gesamtverstärkung von Schwingkreis und Verstärker muss an der Eigenfrequenz 1 sein. Das bedeutet, dass die Verstärkung des Verstärkers gleich der Dämpfung des Schwingkreises sein muss.  
Wie in Abschnitt [Kapitel 7.2.2.4](#sec-OscGedämpftesSignal) und [Kapitel 7.2.2.5](#sec-OscInstabilesSystem) gezeigt wurde, muss die Verstärkung “richtig” gewählt werden um sowohl ein Aufschwingen als auch ein Abklingen zu verhindern.  
Das Ausgangssignal des Schwingkreises ist um den Faktor 3 gedämpft. Dies lässt sich aus dem Bodediagramm [Abbildung 7.3](#fig-ACBodeRCSchwingkreis) oder aus der Formel ablesen. Damit ergibt sich die notwendige Verstärkung.

Es ist zu erkennen, dass mit einem Verstärker das Verhältnis von Eingangssignal zu Ausgangssignal bei der Eigenfrequenz tatsächlich 1 ist, . Der Verstärker wurde richtig dimensioniert.

#### 7.2.2.4 Gedämpftes Signal

Wird kein Verstärker verwendet oder die Verstärkung ist zu klein, würde der Oszillator nicht von selbst starten. Wird die Schwingung zum Beispiel mit einem Puls gestartet würde die Schwingung abklingen. Das Signal wird kleiner. Die Schleifenverstärkung, der Schwingkreis und der Verstärker, müssen so gewählt werden, dass die Gesamtverstärkung an der Eigenfrequenz 1 ist. Das bedeutet, dass die Verstärkung des Verstärkers gleich der Dämpfung des Schwingkreises sein muss.

#### 7.2.2.5 Instabiles System

Ist die Verstärkung zu groß schwingt das System auf. Das Signal wird größer und größer. Das System ist instabil. Das bedeutet, dass die Schleifenverstärkung, Schwingkreis und Verstärker, kleiner als 1 bei der Eigenfrequenz ist.

#### 7.2.2.6 Closed Loop Betrachtung

Wird nun der Kreis geschlossen, siehe [Abbildung 7.1](#fig-OscBlockschaltbildOszillator), das Ausgangssignal wird am Eingang zurückgeführt, kann eine dauerhafte Schwingung aufrecht erhalten werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Verstärkung des Verstärkers richtig gewählt wird.

#### 7.2.2.7 Anschwingvorgang

Es braucht eine “Störung” um das System erstmalig in Schwingung zu versetzten. Dies kann Entweder durch anlegen eines kurzen Impulses geschehen oder in dem die Störungen im System verstärkt werden.  
Erstere Lösung würde einen zusätzlichen Aufwand bedeuten und nur funktionieren wenn das System stabil ist, das bedeutet, die Bauteile exakt eingestellt sind. Das ist alleine aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Bauteile nicht möglich.  
Zweitere Lösung bedeutet, dass kleine Signale im System verstärkt werden bis es schwingt. Es muss also mit Absicht ein instabiles System erzeugt werden. Die Schwingung soll aber eine bestimmte Amplitude nicht überschreiten. Das würde wiederum ein stabiles System erfordern. Um dies zu erreichen benötigt es eine **Amplitudenregelung**. Diese ist ohnehin notwendig um die Bauteiltoleranzen und Temperaturabhängigkeiten auszugleichen. Daher ist die zweite Lösung die praktikablere.

### 7.2.3 Praktische Umsetzung

Nun soll das theoretische Wissen mit einer Konkreten Schaltung umgesetzt werden.

#### 7.2.3.1 Der Schwingkreis

Der wurde bereits in [Kapitel 7.2.1](#sec-OscSchwingkreis) berechnet und überprüft. Es folgte die Erkenntnisse, dass die Amplitude bei der Eigenfrequenz um den Faktor 3 gedämpft ist. Daraus folgt der nächste Schritt. Die Dimensionierung eines Verstärkers um die Schleifenverstärkung auf 1 zu bringen.

#### 7.2.3.2 Der Verstärker

Die theoretischen Hintergründe wurden in [Kapitel 7.2.2](#sec-OscRückkopplung) behandelt. Da die Verstärkung größer als 1 sein muss, keine Phasendrehung gewünscht ist und eine hohe Eingangsimpedanz hilfreich ist, wird eine Nicht-Invertierende Operationsverstärkerschaltung verwendet.

|  |
| --- |
| Abbildung 7.5: Open Loop Schaltung |

|  |
| --- |
| Abbildung 7.6: Open Loop AC Analysis |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Wave Name | X | Y | | --- | --- | --- | | MAG(v(uout)/v(uin)) | 1,5755 kHz | 999,69 m | | PHASE(v(uout)/v(uin)) | 1,5755 kHz | -8,8818 f° |   Tabelle 7.2: Simulations Ergebnisse für den Schwingkreis mit Verstärker an der Eigenfrequenz . |

Die Ergebnisse der Schaltung sind identisch mit den Berechnungen aus [Kapitel 7.2.2.3](#sec-OscStableSignal). Die Verstärkung ist 1 und die Phasenverschiebung ist 0 bei der Eigenfrequenz. Der Verstärker wurde richtig dimensioniert.  
Die Eigenfrequenz hat sich jedoch leicht verschoben. Dies ließe sich durch anpassen der Bauteile im Schwingkreis korrigieren, soll an dieser Stelle aber vernachlässigt werden.

#### 7.2.3.3 Closed Loop Schaltung

Die Schaltung wird nun geschlossen. Das Ausgangssignal wird am Eingang zurückgeführt. Damit ist eine dauerhafte Schwingung möglich. Es gilt die Stabilität zu überprüfen. Dies lässt sich gut mit einer Transienten Simulation zeigen.

|  |
| --- |
| Abbildung 7.7: Closed Loop Schaltung |

|  |
| --- |
| Abbildung 7.8: Closed Loop Transienten Analyse im Stabilen Zustand |

In [Abbildung 7.8](#fig-OscClosedLoopSimulationStable) ist zu erkennen, dass im stabilen Zustand das System nicht zu schwingen beginnt. Wie in [Kapitel 7.2.2.7](#sec-OscAnschwingen) beschrieben benötigt es eine Störung um das System in Schwingung zu versetzen. Alternativ dazu kann das System instabil gemacht werden in dem die Verstärkung erhöht wird. Dann werden kleinste Störungen in der Schaltung, welche es immer gibt, verstärkt und das System schwingt [Abbildung 7.9](#fig-OscClosedLoopSimulationInstable).

|  |
| --- |
| Abbildung 7.9: Closed Loop Transienten Analyse im instabilen Zustand |

Der Nachteil des instabilen Systems ist es, dass die Schwingung immer größer wird. Das System wird übersteuert und dadurch stark verzerrt. Daher muss die Verstärkung so gewählt werden, dass das System stabil ist. Das bedeutet, dass die Schleifenverstärkung, Schwingkreis und Verstärker, an der Eigenfrequenz 1 ist. Das System schwingt dann mit einer konstanten Amplitude

Daraus folgt, dass es einen Verstärker bedarf der seine Verstärkung ändern kann. Das ist eine **Amplitudenregelung**. Diese ist ohnehin notwendig um die Bauteiltoleranzen und Temperaturabhängigkeiten auszugleichen.

#### 7.2.3.4 Amplitudenregelung

In der obigen, theoretische Erklärung, wird angenommen, dass die Verstärkung exakt eingestellt werden kann. In der Praxis ist das aufgrund der Bauteiltoleranzen und der Temperaturabhängigkeit der Bauteile nicht möglich. Es wird daher unweigerlich zu einer gedämpften oder instabilen Schwingung kommen.  
Es braucht daher eine Amplitudenregelung. Damit kann auch das Anschwingen realisiert werden, siehe [Kapitel 7.2.2.7](#sec-OscAnschwingen).  
Es braucht also einen einstellbaren Verstärker. Das lässt sich realisieren indem einer der beiden Widerstände veränderbar gemacht wird. Da sich die Amplitude jedoch selbst regeln muss, und nicht von Hand nachgestellt werden soll und kann, wird eine elektronisch veränderbarer Widerstand benötigt.

#### 7.2.3.5 Elektronisch veränderbarer Widerstand - VCR

Ein elektronisch veränderbarer Widerstand, englisch Voltage Controlled Resistor, kurz VCR, ist ein Widerstand, dessen Widerstandswert durch eine Spannung verändert werden kann. Eine einfache Bauform lässt sich mit einem JFET realisieren. Der Widerstandswert eines JFETs ist proportional zur Gate-Source Spannung.  
Folgende Überlegungen sind anzustellen. \* Wird besser der Widerstand oder verändert? \* Welcher JFET Typ ist geeignet? N-Kanal oder P-Kanal?

Der Regler soll die Verstärkung kleiner machen wenn die Amplitude der Ausgangsspannung zu groß wird und die Verstärkung erhöhen wenn die Amplitude der Ausgangsspannung zu klein ist. Es ist also ein indirekt-proportionaler Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Verstärkung. Daraus folgt, dass der Widerstand verändert werden soll, da er in der Formel für die Verstärkung im Nenner steht.

Da das Ausgangssignal des Oszillators eine Sinuswelle ist, ist der JFET Typ egal. Es kann sowohl ein N-Kanal als auch ein P-Kanal JFET verwendet werden. Da sich sowohl die negative Steuerspannung für den N-Kanal JFET als auch die positive Steuerspannung für den P-Kanal JFET mit einem einfachen Gleichrichter realisieren lässt. Um die Bauteile der Amplitudenregelung bestimmen zu können, muss der Arbeitspunkt des VCR’s bestimmt werden. Dazu wird eine DC-Sweep Analyse durchgeführt. Die Widerstände und dienen der Linearisierung des JFETs. Der Widerstand dient als Shuntwiderstand zur Messung des Stromes.

|  |
| --- |
| Abbildung 7.10: VCR |

|  |
| --- |
| Abbildung 7.11: VCR DC-Sweep |

Der Arbeitspunkt muss möglichst mittig in einem linearen Teilstück des JFET liegen. Eine Steuerspannung zwischen 3 und 5 Volt ist ideal. Um diese Spannung aus dem Ausgangssignal zu gewinnen, wird ein Spannungsteiler, realisiert mit einem Potentiometer, und ein Einweggleichrichter verwendet.  
Der Widerstandswert des JFETs zwischen Drain und Source ist dann ca. . Dieser Wert wird nun vom oben eingebauten abgezogen. Der neue Widerstand wird also so dimensioniert, dass der Widerstand der Drain-Source Strecke und des Widerstandes zusammen den Widerstandswert von ergeben.

#### 7.2.3.6 Die Oszillatorschaltung

|  |
| --- |
| Abbildung 7.12: Oszillatorschaltung |

Es ist zu sehen, dass nach einer Einschwingphase die Amplitude der Ausgangsspannung konstant bleibt. Die Amplitudenregelung funktioniert. Der Oszillator funktioniert.

Um eine Aussage über die Qualität zu machen muss die Verzerrung des Signals betrachtet werden. Dazu wird das Signal in seine Fourierkoeffizienten zerlegt und die Oberwellen berechnet. Die Oberwellen dürfen nicht zu groß sein.

Es wurde ein einfacher, funktionsfähiger Oszillator dimensioniert. Es gibt jedoch noch viele Möglichkeiten zur Verbesserung.

## 7.3 Aufgabenstellung

Hier werden einige Ideen für die Aufgabenstellung gegeben.

### 7.3.1 Dimensionierung Schwingkreis

Dimensionieren Sie ein Wien-Robinson Glied für Ihren Oszillator.  
1. Leiten Sie die Gleichungen für die Eigenfrequenz her und berechnen Sie die Bauteilwerte. Verwenden Sie Werte aus entsprechenden Normreihen.  
2. Überprüfen Sie Ihre Berechnungen mittels Simulation.  
3. Geben Sie an wie groß die Verstärkung eines nachgeschaltenen Verstärkers sein muss, damit die Amplitude am Eingang des Schwingkreises gleich groß ist wie die Amplitude nach dem Verstärker.  
4. Machen Sie einen Vorschlag für eine passende Verstärkerschaltung.

### 7.3.2 Dimensionierung Verstärker

Dimensionieren Sie einen Verstärker so, dass die Amplitude am Eingang des Schwingkreises gleich groß ist wie die Amplitude nach dem Verstärker bei der Resonanzfrequenz.  
Überprüfen Sie Ihre Berechnung und machen Sie eine klare Aussage.

### 7.3.3 Rückkopplung

Implementieren Sie die Rückkopplung wie im Skriptum gezeigt.  
Betrachten Sie das Ausgangssignal  
- Welches Ergebnis erwarten Sie?  
- Welches Ergebnis haben Sie?  
- Erklären Sie die Abweichung.  
Welche Ideen haben Sie um das erwartete Ergebnis zu erhalten?

### 7.3.4 Amplitudenregelung

**Warum Amplitudenregelung**  
Geben Sie kurz an warum eine Amplitudenregelung notwendig ist.

**Setzen Sie die Amplitudenregelung um**  
Wählen Sie aus folgenden zwei Methoden:  
a. Mittels Hilfe des Buches E. Böhmer WO D. Ehrhardt Elemente der angewandten Elektronik. Kapitel 13.2.  
b. Mit dem im Unterricht aufgezeigten Weg

**Erklären der Schaltung**  
Versuchen Sie die Schaltung in einzelne Teilschaltungen einzuteilen und erklären Sie die Schaltung.  
Versuchen Sie es so zu erklären wie Sie es gerne erklärt haben würden.  
Testen Sie Ihre Erklärung wechselseitig im Team.  
Achten Sie darauf, dass Ihre Erklärung gängige Normen und Standards einhält.

### 7.3.5 Ideen für den Einser

Ideen für den Nachweis der Eigenständigkeit:  
• Verwenden Sie ein alternatives Frequenzbestimmendes Glied  
• Setzten Sie die Amplitudenregelung alternativ um  
• Nehmen Sie eine Schaltung aus der Literatur und erklären Sie die Vor- und Nachteile zu der im Unterricht entwickelten Schaltung.  
• …

# 8. State Variable Filter

Filter allgemein werden eingesetzt um Signale zu verarbeiten. Ein Filter kann dabei unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Ein Filter kann z.B. dazu verwendet werden, um ein Signal zu glätten, um Störungen zu unterdrücken oder um Signale zu trennen. Filter können dabei unterschiedliche Strukturen aufweisen.

Der hier vorgestellte *State Variable Filter*, [Abbildung 8.1](#fig-svf_sch) ist ein Filter, welcher mit einer Schaltung sowohl als Tiefpassfilter, Hochpassfilter, Bandpassfilter oder Bandsperre verwendet werden kann. Welcher Filter auf das Eingangssignal angewandt wird, wird durch die Auswahl des Ausganges bestimmt.

|  |
| --- |
| Abbildung 8.1: Schaltung eines *State Variable Filters* |

Das Verhalten von Filtern kann am besten mit deren Übertragungsfunktion beschrieben werden. Dabei geht es immer darum, das Verhältnis von Ausgangssignal zu Eingangssignal zu beschreiben. Da sich das Wort Filter auf Frequenzen bezieht, wird die Übertragungsfunktion in der Regel im Frequenzbereich betrachtet. Ob dabei nun die komplexe Schreibweise oder die Laplace-Transformation verwendet wird, hängt im Wesentlichen davon ab welche Art von Eingangssignalen betrachtet werden sollen.

Für den hier gezeigten *State Variable Filter* müssen die Übertragungsfunktionen für die vier möglichen Filtertypen analytisch berechnet werden.

Die analytisch berechneten Übertragungsfunktionen der Filter werden verwendet, um Bodediagramme zu erstellen. Diese Bodediagramme geben Aufschluss über das Frequenzverhalten des Systems, indem sie die Verstärkung und Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz darstellen. Im Anschluss an die Berechnung der Bodediagramme auf analytischer Basis erfolgt der Vergleich mit numerischen Simulationsergebnissen, die in *Altium* durchgeführt werden.

Der Vergleich zwischen analytischen und simulierten Ergebnissen ermöglicht eine Überprüfung der Genauigkeit des mathematischen Modells sowie der Simulationseinstellungen in Altium. Eventuelle Abweichungen können auf Vereinfachungen im analytischen Modell, numerische Fehler oder auf die verwendeten Bauteilparameter in der Simulation zurückzuführen sein.

## 8.1 Analytische Herleitung der Übertragungsfunktionen

1. Biezl V Bipolartransistor Kennlinienfeld. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7329334>. Accessed 19 Nov 2023

2. Böhmer E, Ehrhardt D, Oberschelp W (2018) Elemente der angewandten Elektronik. Springer Verlag, Wiesbaden

3. Transparency Market Reserach Inc DC Motors Market. <https://www.transparencymarketresearch.com/dc-motors-market.html>. Accessed 13 Dez 2023

4. Biezl V Vierquadrantensteller steuert Gleichstrommotor. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4792919>. Accessed 13 Dez 2023

5. Technologies I TLE7182EM H-Bridge and Dual Half Bridge Driver IC. <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE7182EM-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a30432f5008fe012f5442920c3996>. Accessed 1 Feb 2024

6. Microelectronics S L99H02 Motor bridge driver. <https://www.st.com/en/automotive-analog-and-power/l99h02.html>. Accessed 1 Feb 2024

7. Technologies I IFX9201SG 6 A H-Bridge. <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IFX9201SG-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4624cb7f111014d2e8916795dea>. Accessed 1 Feb 2024

8. Microelectronics S L298 Dual Full Bridge Driver. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>. Accessed 1 Feb 2024