

HWE-Skript

Leopold Götsch

2023-12-03

Inhaltsverzeichnis

Willkommen zum Skript	3
Verbessern	3
Mitwirken	3
I. 4. Jahrgang	4
1. Die Projekte	5
1.1. Leistungsverstärker	5
1.1.1. Die Gegentaktendstufe	5
1.1.2. Rückkopplung	9
1.1.3. Vorspannen	11
1.1.4. Reale Spannungsquelle	13
1.1.5. Stromversorgung	17
1.1.6. Reale Stromquelle	17
1.1.7. Praktische Herangehensweise	17
1.1.8. Abwandlungen und Erweiterungen	18
References	20

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!

Teil I.

4. Jahrgang

1. Die Projekte

1.1. Leistungsverstärker

Transistorverstärker, wie sie bisher bekannt sind **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 I_C 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.

Um höhere Leistungen und eine geringere Verlustleistung zu erreichen, muss der Arbeitspunkt nach “unten” also zu einem kleineren I_C gebracht werden. Wird dies am Beispiel des Verstärkers in Emitttergrundsaltung **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 Halbwelle. Warum der I_C , und damit die Verlustleistung, trotzdem nicht ganz Null sein kann, sehen wir im folgenden Teil.

1.1.1. Die Gegentaktendstufe

Um zu vermeiden, dass der Arbeitspunkt eine höhere Verlustleistung aufgrund eines höheren I_C 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 und die Betriebsart wird 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.

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 sinuiden 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.

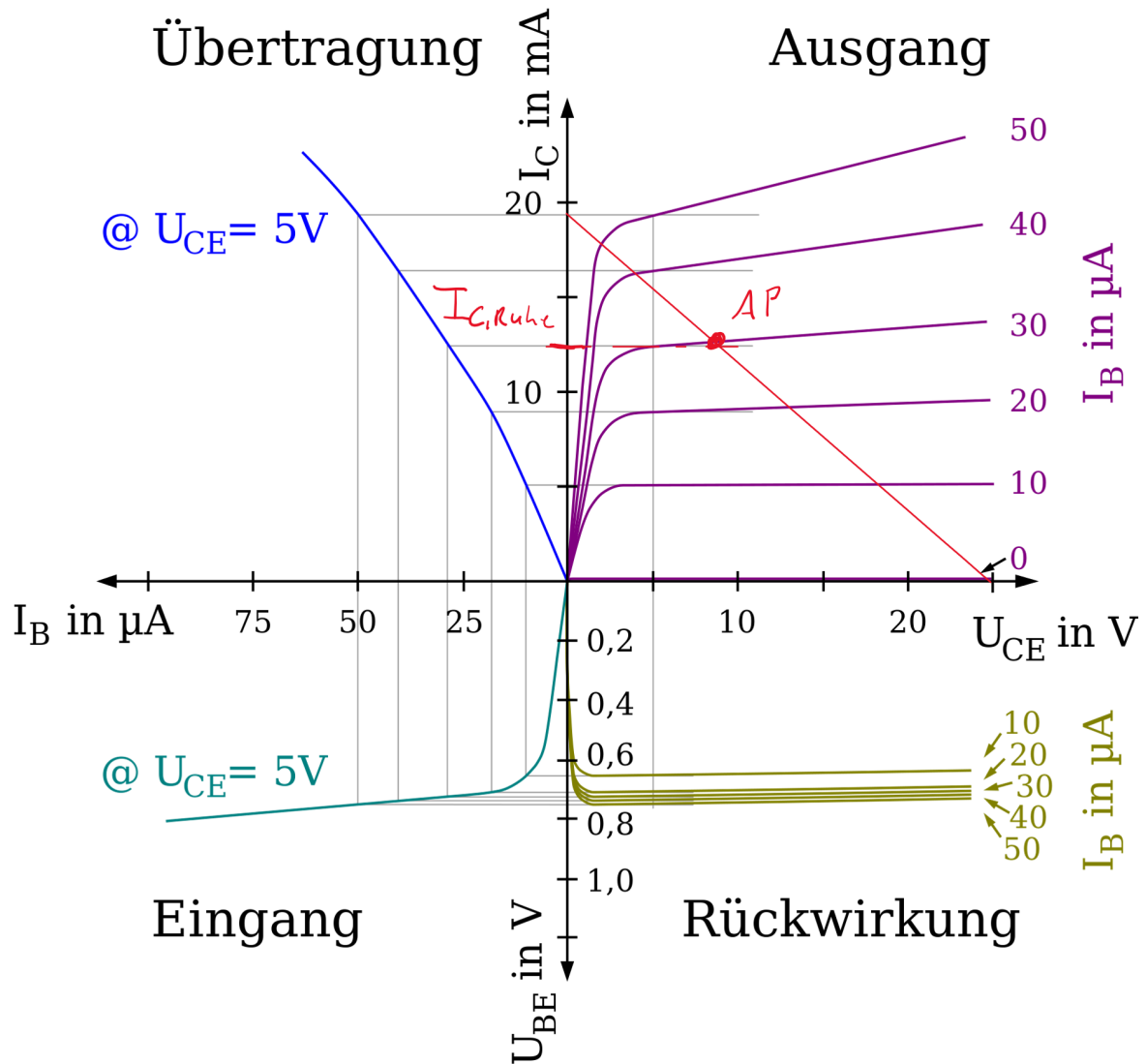


Abbildung 1.1.: Bipolartransistor Arbeitspunkt und Ruhestrom [1]

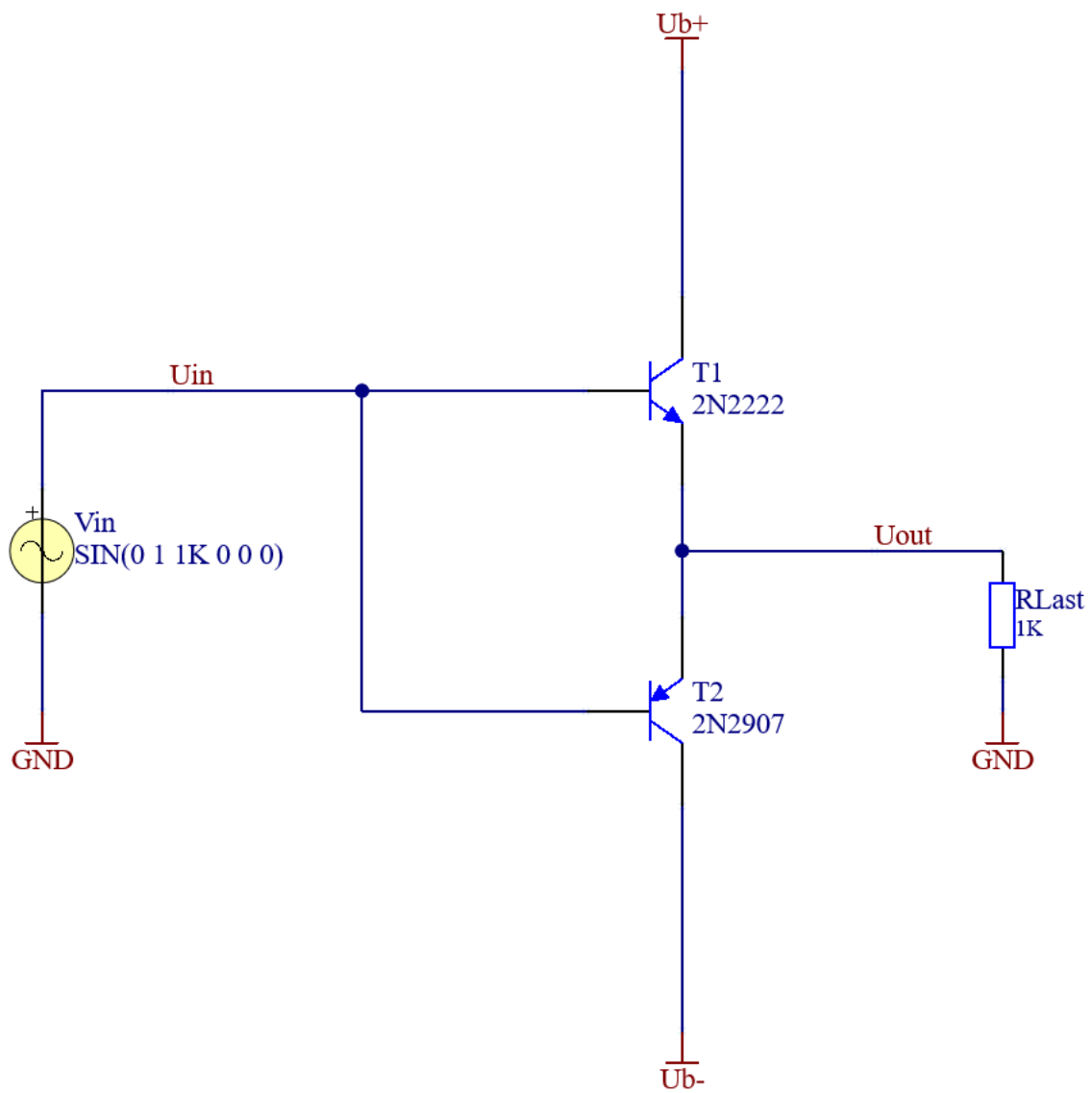


Abbildung 1.2.: Bipolartransistoren in Gegentakt

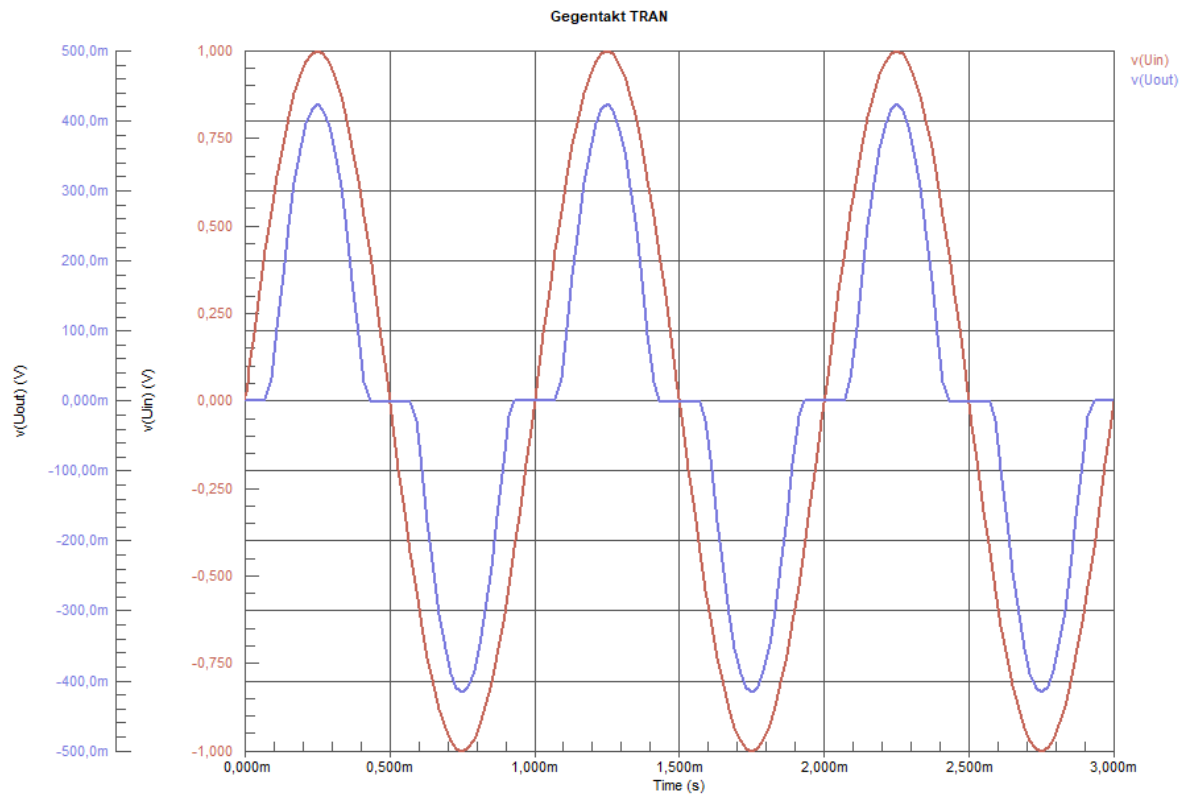


Abbildung 1.3.: Bipolartransistoren in Gegentakt, Simulationsergebnisse

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
Vin Frequenz	1 kHz	
Vin Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	3	

1.1.2. 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 Lautsprecher zu betreiben.

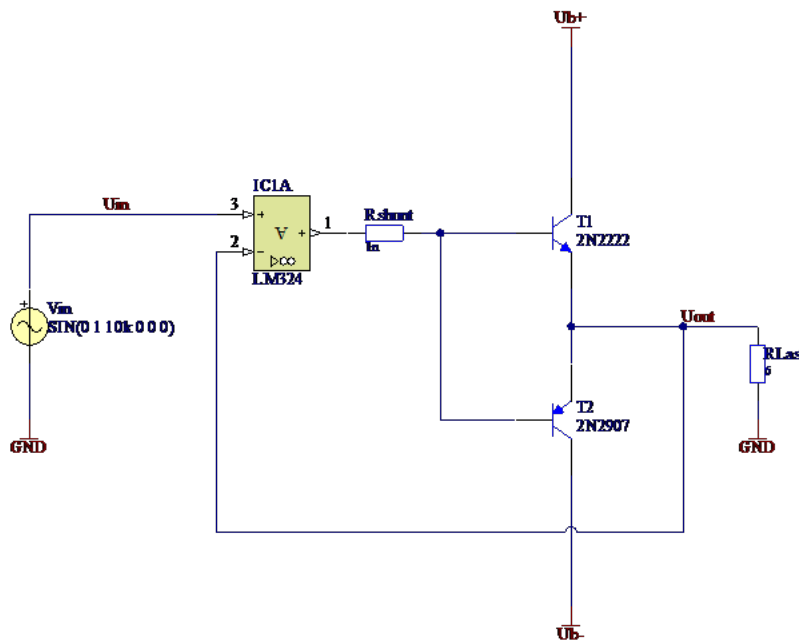


Abbildung 1.4.: Gegentaktendstufe mit Rückkopplung

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 1.1](#)

lässt sich erkennen, dass sich in der Nähe des Ursprunges ein Knick befindet. Erst ab einer U_{BE} größer von ca. 0,7 V 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 $\frac{V}{s}$ ab.

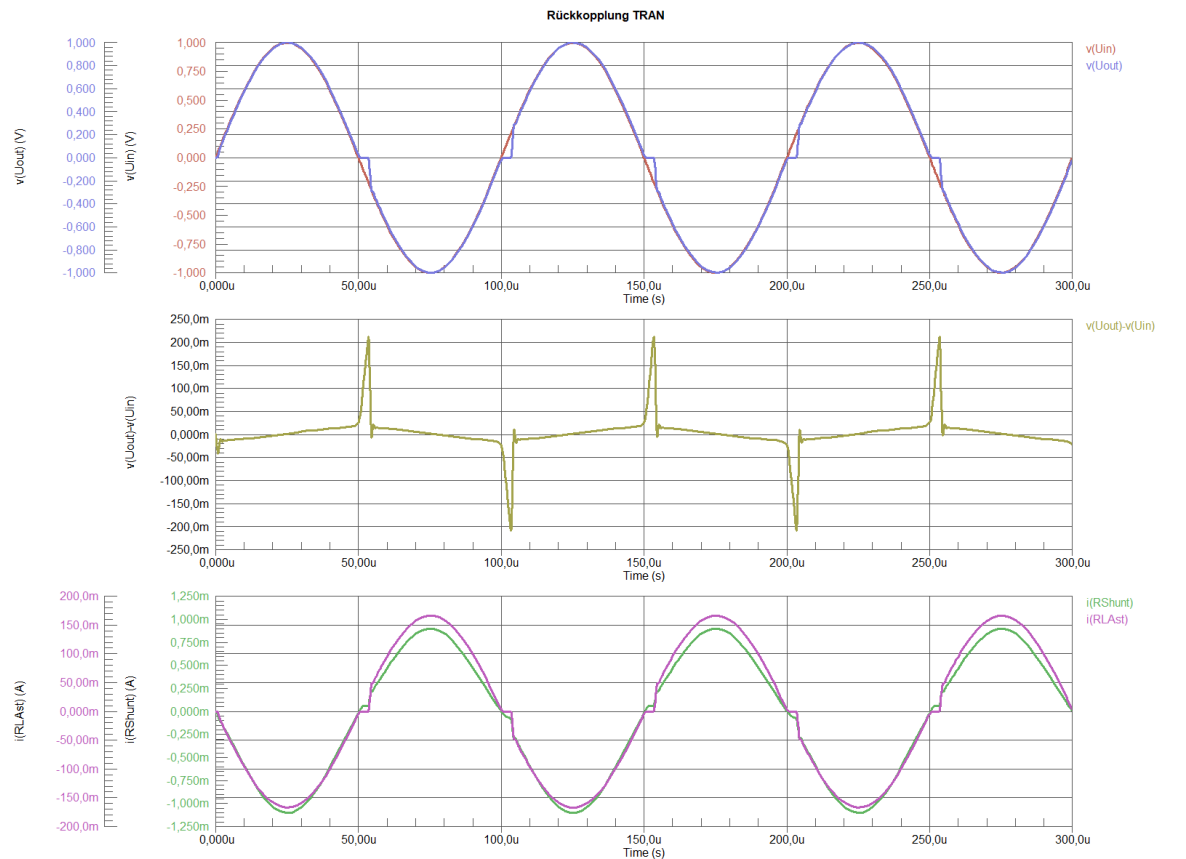


Abbildung 1.5.: Gegentaktendstufe mit Rückkopplung, Simulationsergebnisse

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

1.1.3. 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 angesteuert.

Da durch das Vorspannen auch ein Kollektorstrom durch den Transistor fließt wenn am Eingang 0 V anliegen erhöhen sich die Verluste. Dieser Kollektorstrom wird auch als Ruhestrom bezeichnet $I_{C,Ruhe}$. Um den Ruhestrom möglichst klein zu halten muss die Spannungsquelle an die Transistoren und deren Fertigungstoleranzen angepasst werden.

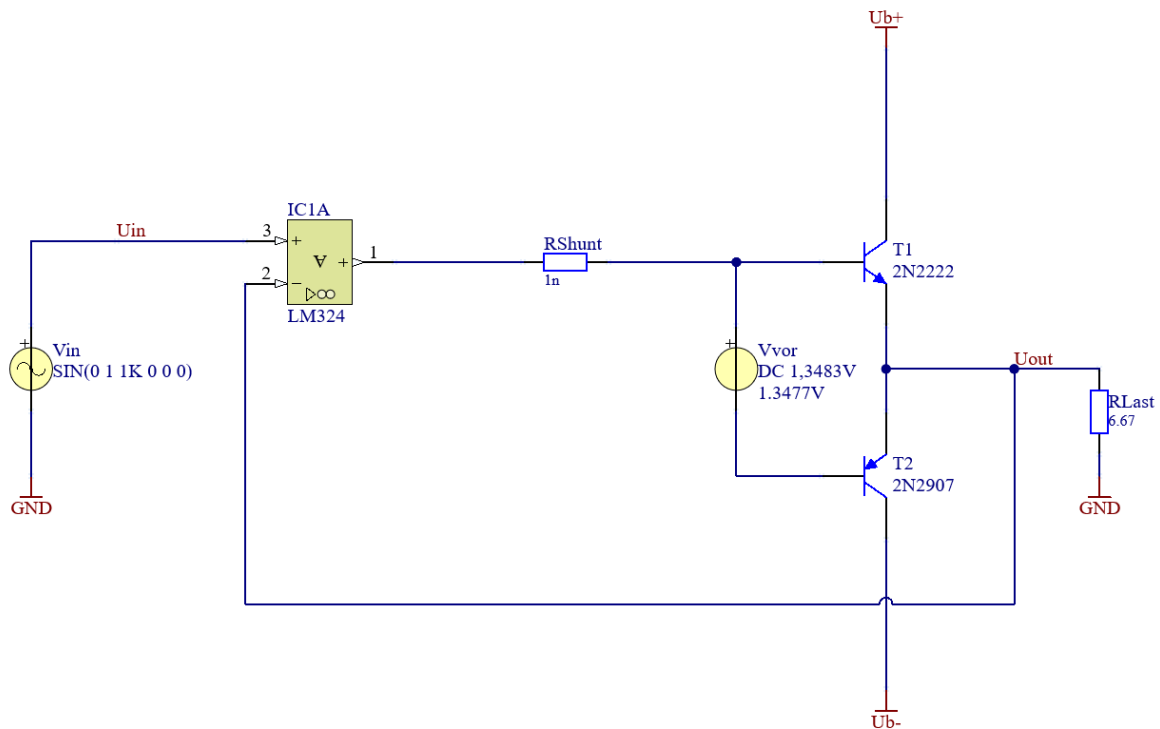
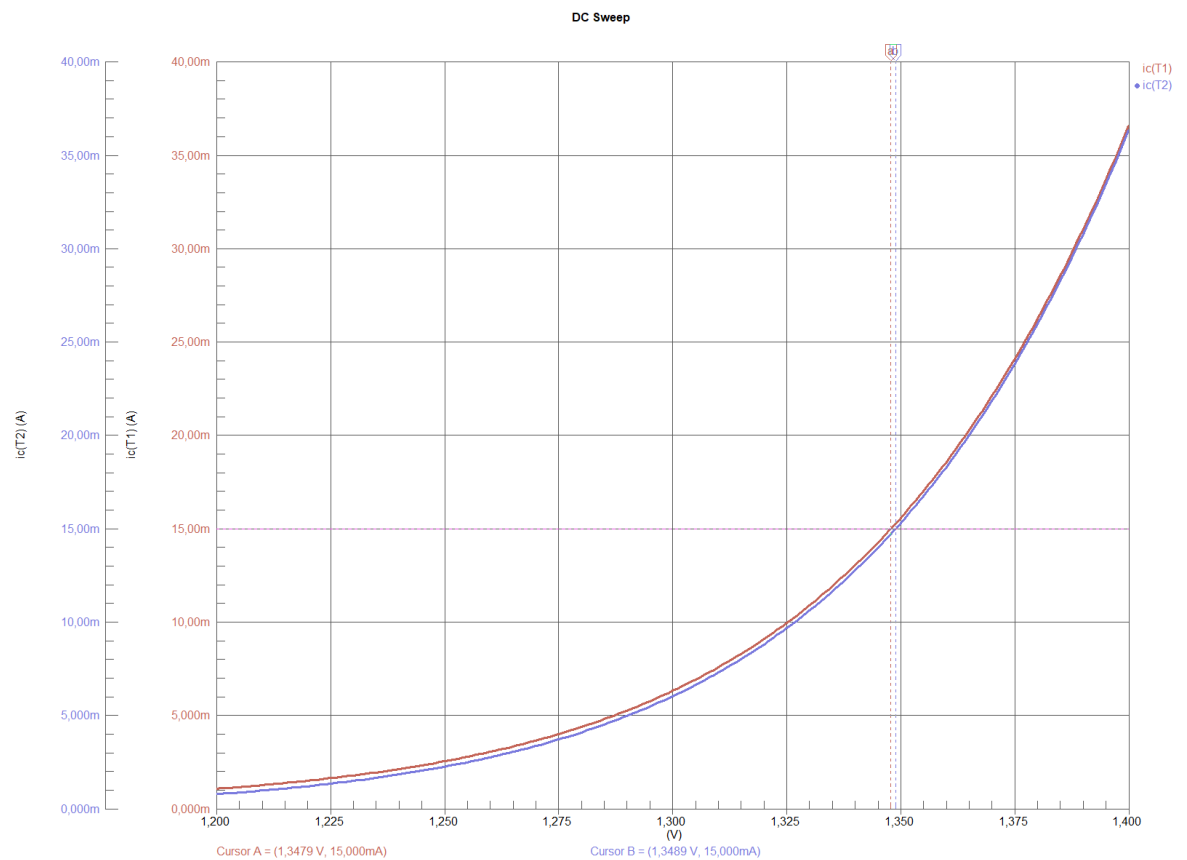


Abbildung 1.6.: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren

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



Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
Vvor min	1,2 V	
Vvor max	1,4 V	
Vvor step size	1 mV	

Mit dem Cursor können die Ergebnisse exakt abgelesen werden.

Simulationsergebnis	Wert	Bemerkung
Vvor bei $I_C = 15 \text{ mA}$ an T1	1,3479 V	
Vvor bei $I_C = 15 \text{ mA}$ an T2	1,3489 V	

Da es sich um unterschiedliche Transistoren handelt, ist natürlich auch der Zusammenhang zwischen U_{BE} und I_C ein anderer. Da die Werte sehr nahe beieinander liegen kann ein gerundetes arithmetisches Mittel als Ergebnis für V_{Vor} 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.

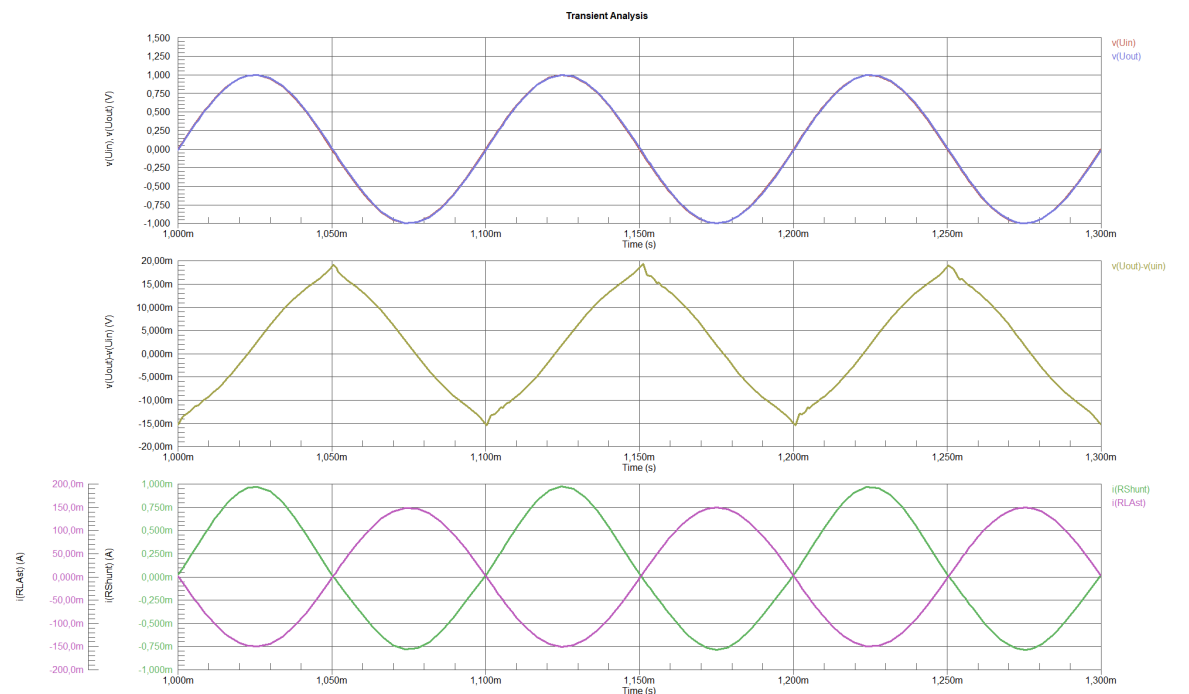


Abbildung 1.7.: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren, Simulationsergebnisse

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

i Hinweis

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

1.1.4. 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 die die Aufgabe erledigen kann ist ein sogenannter “ U_{BE} -Vervielfacher” [2].

In Abbildung 1.9 wird die Schaltung gezeigt. Um die Schaltung zu dimensionieren kann der U_{BE} -Vervielfacher alleine betrachtet werden. U_{out} ist aus Abschnitt Kapitel 1.1.3 bekannt. Es müssen nun also die Widerstände R_{sq1} und R_{sq2} so dimensioniert werden.

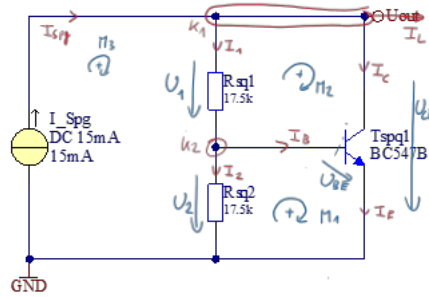


Abbildung 1.8.: Reale Spannungsquelle, U_{BE} -Vervielfacher

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

1.1.4.1. U_{BE} -Vervielfacher berechnen.

Dabei wird die Schaltung analytisch, also mit Formeln berechnet.

Es soll wie bei der Dimensionierung der Emittterverstärkerschaltung klar gekennzeichnet werden woher die Formeln und Werte kommen.

Gesucht wird R_{sq1} und R_{sq2} so, dass U_{out} der gesuchten Vorspannung aus Abschnitt Kapitel 1.1.3 entspricht.

$$U_{out} = 1.38 \text{ V}$$

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

$$I_1 = I_2 + I_B \quad (1.1)$$

$$I_B = \frac{I_C}{100} \quad (1.2)$$

$$I_{Spg} = 20I_{Lmax} \quad (1.3)$$

$$U_{BE} = 700 \text{ mV}$$

Mit Maschengleichung 1 M_1 erhält man den Zusammenhang zwischen U_1 und U_{BE} .

$$0 = -U_2 + U_{BE} \quad (1.4)$$

$$U_2 = U_{BE} \quad (1.5)$$

$$U_2 = 700 \text{ mV}$$

Mit Maschengleichung 2 M_2 lässt sich U_1 berechnen.

$$0 = U_1 + U_2 - U_{out} \quad (1.6)$$

$$U_1 = -U_2 + U_{out} \quad (1.7)$$

$$U_1 = 680 \text{ mV}$$

I_1 kann aus dem Knoten 2 berechnet werden indem Gleichung Gleichung 1.10 eingesetzt wird.

$$0 = I_1 - I_2 - I_B \quad (1.8)$$

$$I_1 = I_2 + I_B \quad (1.9)$$

$$I_2 = 10I_B \quad (1.10)$$

$$I_1 = 11I_B \quad (1.11)$$

Wird nun noch Gleichung Gleichung 1.16 in Gleichung Gleichung 1.11 eingesetzt erhält man eine Gleich für I_1 in Abhängigkeit von I_C .

$$I_1 = \frac{11I_C}{100} \quad (1.12)$$

Über den Knoten 1 wird der Zusammenhang zwischen den Strömen dargestellt. Für I_L muss der maximale Laststrom eingesetzt werden. Dieser kann aus einer Transientensimulation in Abschnitt Kapitel 1.1.3 ermittelt werden. Der Strom I_{spg} kann mit der Faustregel Gleichung 1.3 bestimmt werden. Werden diese Informationen und Gleichung 1.17 in die Gleichung von Knoten 1 Gleichung 1.13 eingesetzt kann, durch umformen, I_C berechnet werden.

$$0 = -I_1 - I_C - I_L + I_{spg} \quad (1.13)$$

$$0 = -\frac{111I_C}{100} + 19I_{Lmax} \quad (1.14)$$

$$I_C = \frac{1900I_{Lmax}}{111} \quad (1.15)$$

$$I_C = 8.56 \text{ mA}$$

Durch einsetzen der Zahlenwerte können nun R_{sq1} und R_{sq2} berechnet werden.

$$I_B = \frac{I_C}{100} \quad (1.16)$$

$$I_B = 85.6 \text{ uA}$$

$$I_1 = 11I_B \quad (1.17)$$

$$I_1 = 941 \text{ uA}$$

$$R_{sq1} = \frac{U_1}{I_1} \quad (1.18)$$

$$R_{sq1} = 722 \text{ ohm}$$

$$I_2 = 10I_B \quad (1.19)$$

$$I_2 = 856 \text{ uA}$$

$$R_{sq2} = \frac{U_2}{I_2} \quad (1.20)$$

$$R_{sq2} = 818 \text{ ohm}$$

i Hinweis

Wird der Spannungsteiler aus R_{sq1} und R_{sq2} als unbelastet betrachtet, indem sichergestellt wird, dass $I_1 \gg I_B$ ist, vereinfacht sich die Berechnung erheblich. Allerdings sind damit auch höher Ruheströme und damit Verluste verbunden.

1.1.4.2. Überprüfen und Einstellen mittels Simulation

Mittels Simulation die Berechnung überprüfen und exakt einstellen, wie dies zum Beispiel mit dem DC-Sweep in Abschnitt Kapitel 1.1.3 zur Bestimmung der korrekten Vorspannung gemacht wurde.

1.1.4.3. 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 die diese Effekte zu kompensieren. Beim U_{BE} -Vervielfacher würde R_{sq2} als Trimpotentiometer ausgeführt werden.

i 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?

1.1.5. Stromversorgung

1.1.6. Reale Stromquelle

1.1.7. Praktische Herangehensweise

- welche Last muss versorgt werden.
- welche Lastströme sind gewünscht.
- Auswahl passender Transistoren in Bezug auf die maximale Werte.

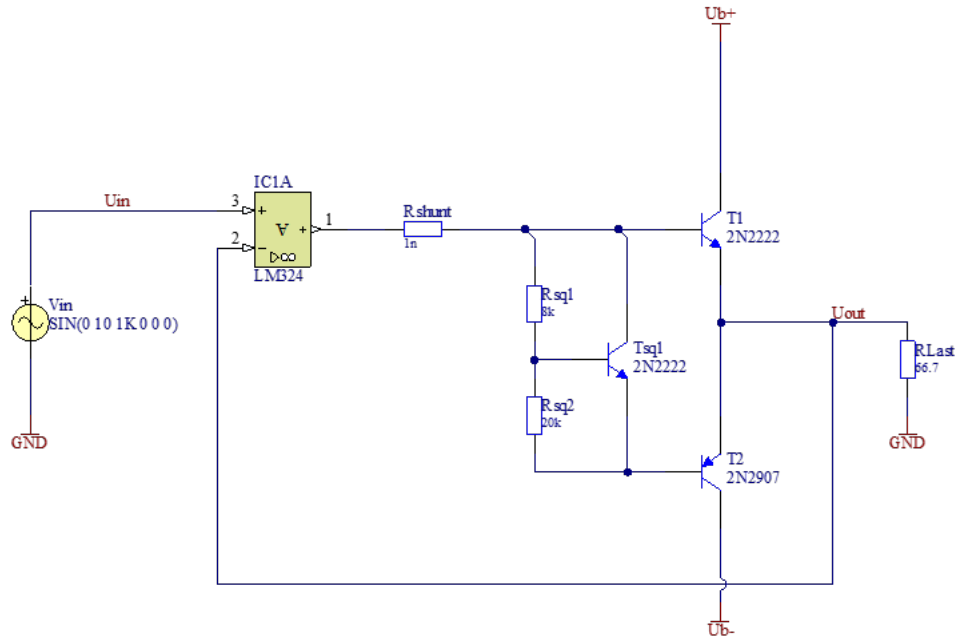


Abbildung 1.9.: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle

- Definition der Qualitätsparameter, z.B. Differenz der ein und Ausgangsspannungen, Oberwellen Anteile, ...

1.1.8. Abwandlungen und Erweiterungen

Wie könnte eine Strombegrenzung, Kurzschlusssicherheit, umgesetzt werden?

Wie könnte die Rückkopplung die hier mit einem OPV umgesetzt wurde noch realisiert werden?

Wie könnte die Vorspannung mit Dioden umgesetzt werden?

Wie könnte die Leistung weiter erhöht werden?



References

1. Biezl V Bipolartransistor Kennlinienfeld. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7329334>. Accessed 19 Nov 2023
2. E. Böhmer WO D. Ehrhardt (2018) Elemente der angewandten Elektronik. Springer Verlag, Wiesbaden