

HWE-Skript

Leopold Götsch

2023-12-13

Inhaltsverzeichnis

Willkommen zum Skript	3
Verbessern	3
Mitwirken	3
I. 3. Jahrgang	4
1. Der Transistor	5
1.1. Feldeffekttransistor	5
1.1.1. Aufgabe	6
1.2. Bipolartransistor	6
1.2.1. Die Emitterschaltung mit Temperaturstabilisierung	6
1.2.2. Aufgabenstellung	6
1.2.3. Berechnung	9
1.2.4. Die Kollektorschaltung	9
II. 4. Jahrgang	10
2. Leistungsverstärker	11
2.0.1. Die Gegentaktendstufe	11
2.0.2. Rückkopplung	12
2.0.3. Vorspannen	12
2.0.4. Reale Spannungsquelle	20
2.0.5. Stromversorgung	27
2.0.6. Reale Stromquelle	31
2.0.7. Praktische Herangehensweise	35
2.0.8. Abwandlungen und Erweiterungen	35
3. H-Brücke	36
References	37

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.

3. Jahrgang

1. Der Transistor

1.1. Feldeffekttransistor

Die einfachste und die gleichzeitig eine der wichtigsten Anwendungen des MOSFET's ist der Schalter. Mittels Spannung am Gate wird der MOSFET ein- und ausgeschaltet.

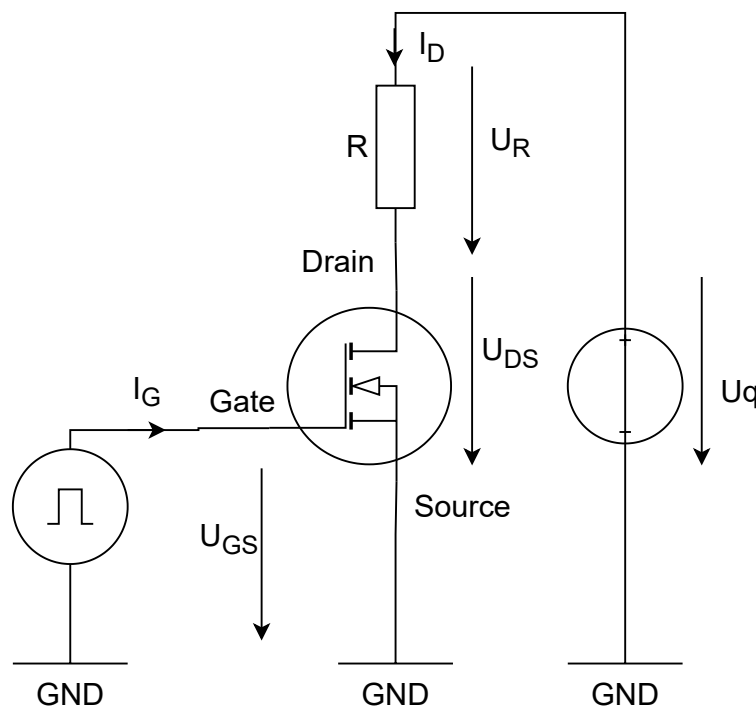


Abbildung 1.1.: N-Kanal MOSFET als Schalter

Die notwendigen und zulässigen Spannungen sind aus dem Datenblatt des gewählten Transistors zu entnehmen. Am Gate wird kein Vorwiderstand benötigt, da der Eingangswiderstand des MOSFET's sehr hoch ist und dadurch, in den meisten Fällen, mit $I_D = 0$ A angenommen werden kann.

1.1.1. Aufgabe

1.1.1.1. Teil 1: N-Kanal Anreicherungstyp

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

1.1.1.2. 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.

1.2. Bipolartransistor

1.2.1. Die Emitterschaltung mit Temperaturstabilisierung

Ein einfacher Spannungsverstärker. Der Re dient der Temperaturstabilisierung der U_{BE} Strecke.

1.2.2. Aufgabenstellung

Entwerfen Sie einen Spannungsverstärker mit einer Verstärkung.

$$v_U = -\frac{R_c}{R_e} \quad (1.1)$$

$$v_U = -20$$

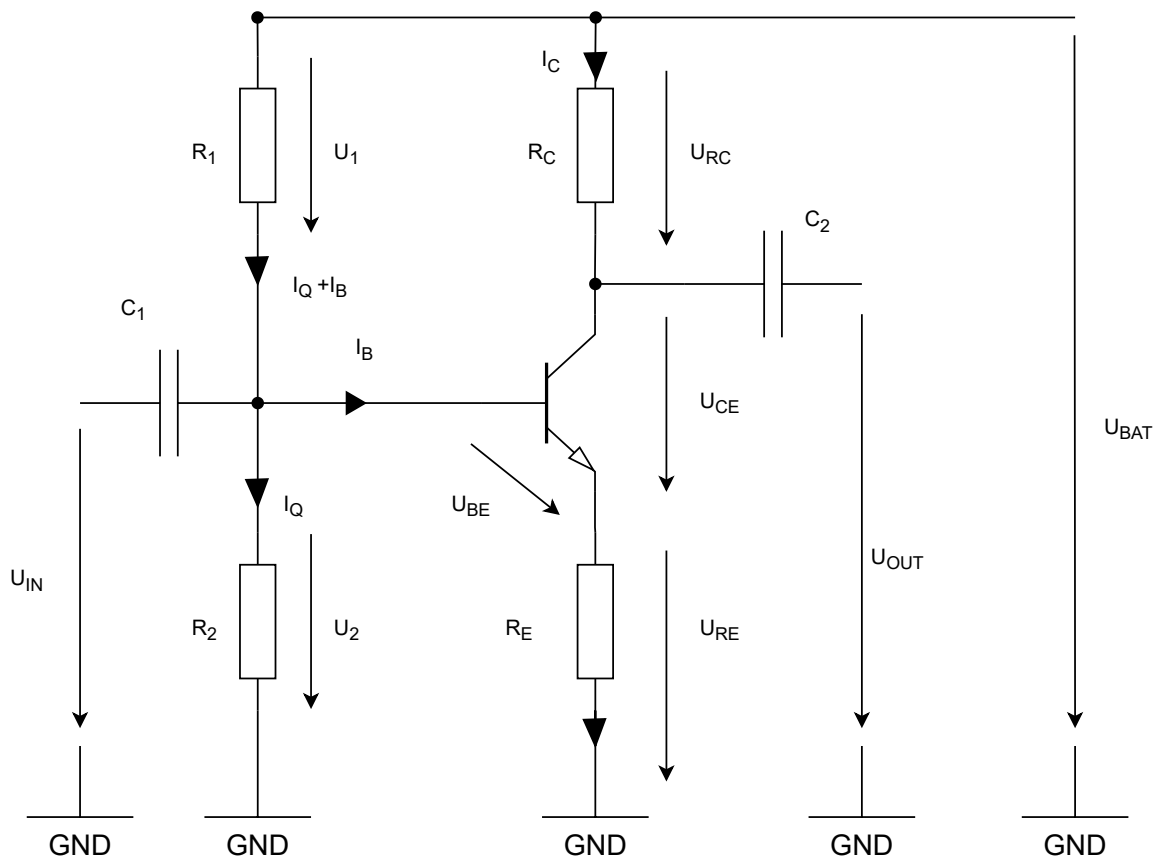


Abbildung 1.2.: Bipolartransistor in Emittergrundsaltung mit R_E

1.2.2.1. Gegeben

1.2.2.1.1. Aus der Angabe

$$v_U = -20$$

$$U_{bat} = 10 \text{ V}$$

1.2.2.1.2. Aus dem Datenblatt

$$B = 300$$

1.2.2.1.3. Aus der Erfahrung / Faustregel

- Zahlenwerte

$$U_T = 25 \text{ mV}$$

$$I_c = 1 \text{ mA}$$

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

- Gleichungen

$$I_c = \frac{U_{bat}}{2R_c + 2R_e} \quad (1.2)$$

1.2.3. Berechnung

- Gleichung Gleichung 1.1 nach R_e auflösen. Das Ergebnis in Gleichung Gleichung 1.2 einsetzen und nach R_c auflösen.

$$v_U = -\frac{R_c}{R_e} \quad (1.3)$$

$$I_c = \frac{U_{bat}}{2R_c - \frac{2R_c}{v_U}} \quad (1.4)$$

$$R_c = \frac{U_{bat}v_U}{2I_c(v_U - 1)} \quad (1.5)$$

$$R_c = 4.76 \text{ k}$$

1.2.4. 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 Eingangswiderstand einstellt.

To be Continued

Teil II.

4. Jahrgang

2. Leistungsverstärker

Transistorverstärker, wie sie bisher bekannt sind Kapitel 1.2, 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 Kapitel 1.2 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.

2.0.1. 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.

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	1 kHz	
V_{in} Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	3	

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
----------------------	------	-----------

2.0.2. 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.

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 2.1 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.

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	10 kHz	
V_{in} Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	3	

2.0.3. 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.

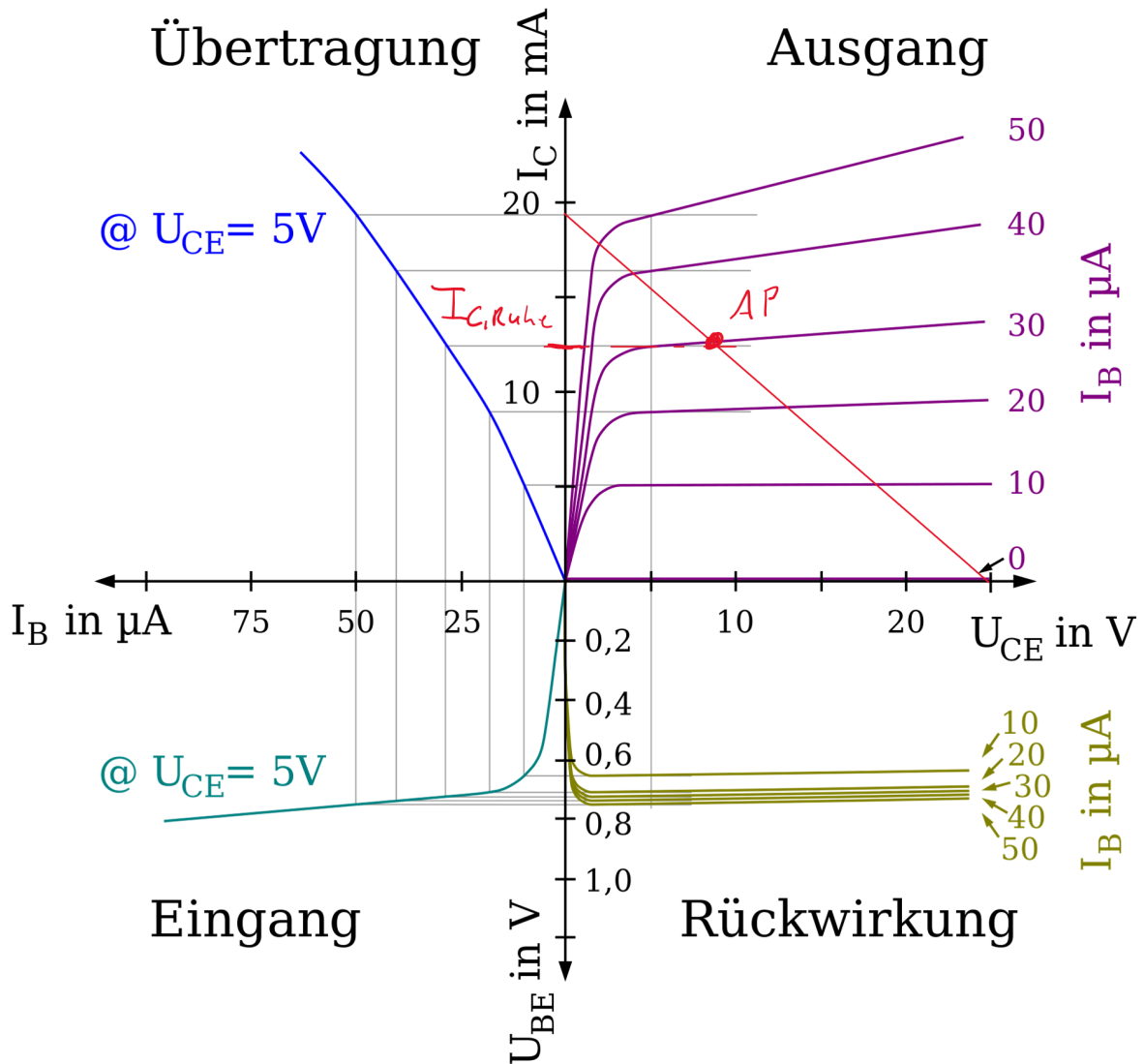


Abbildung 2.1.: Bipolartransistor Arbeitspunkt und Ruhestrom [1]

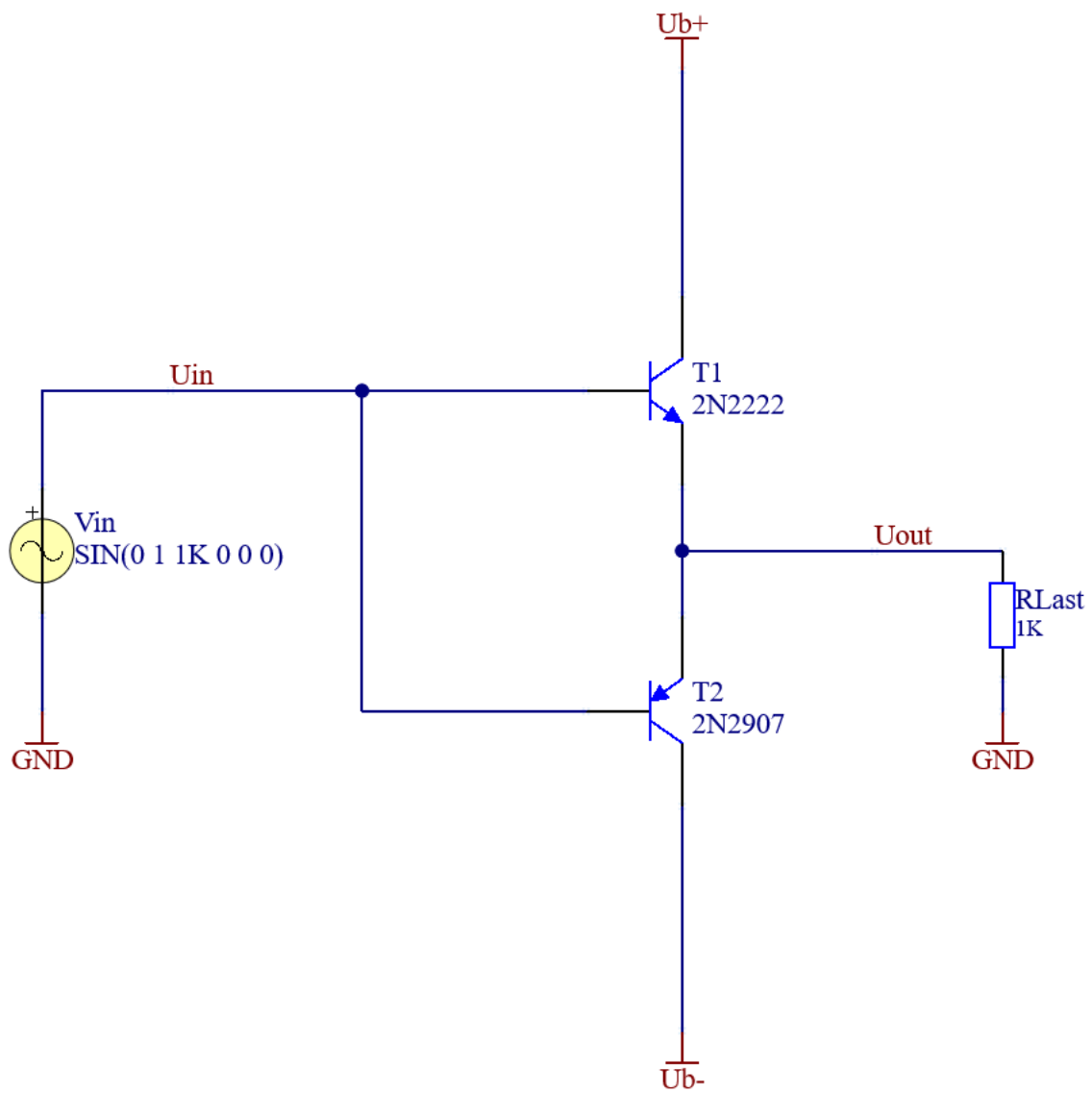


Abbildung 2.2.: Bipolartransistoren in Gegentakt

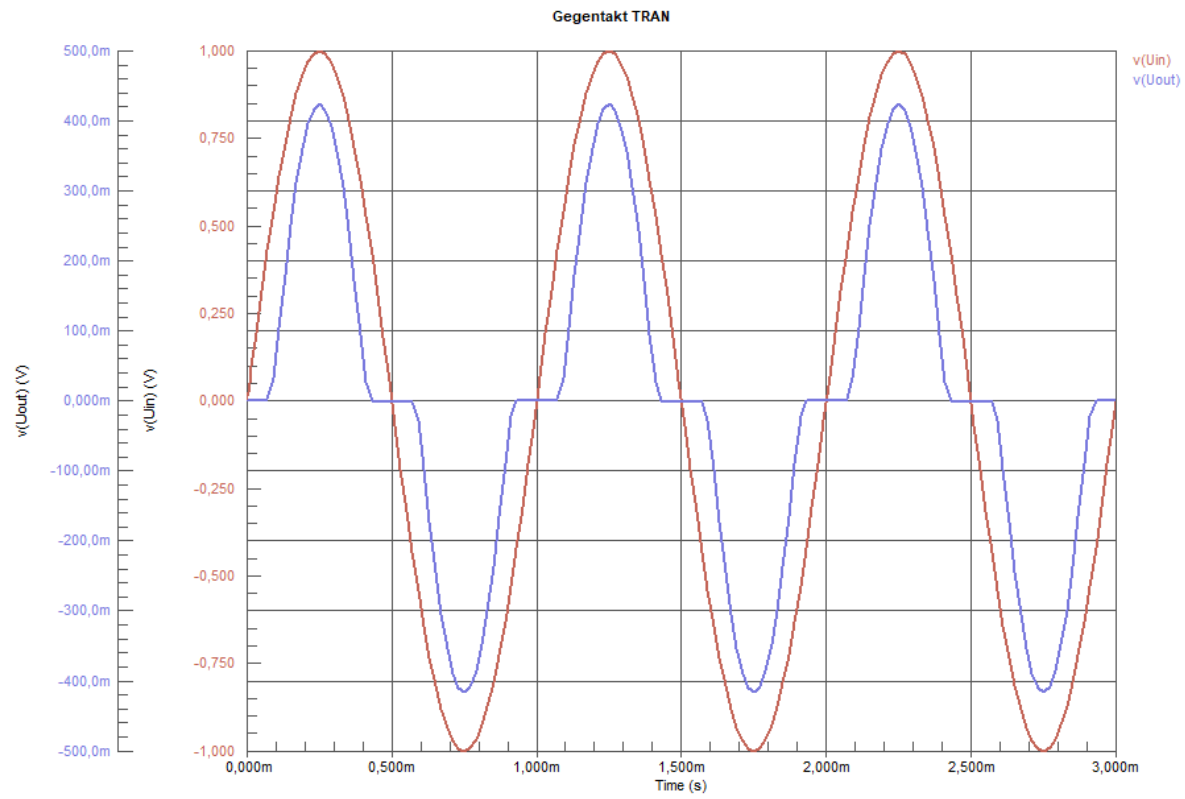


Abbildung 2.3.: Bipolartransistoren in Gegentakt, Simulationsergebnisse

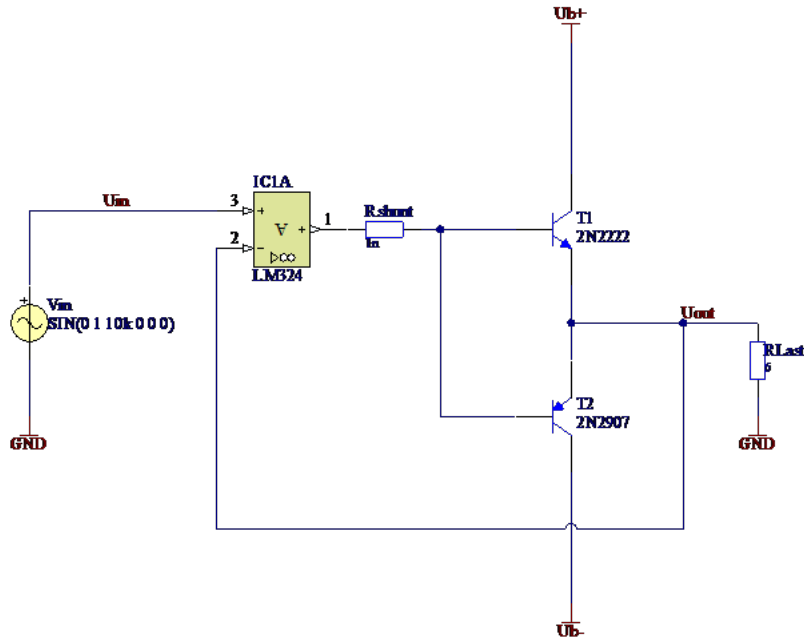


Abbildung 2.4.: Gegentaktendstufe mit Rückkopplung

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.

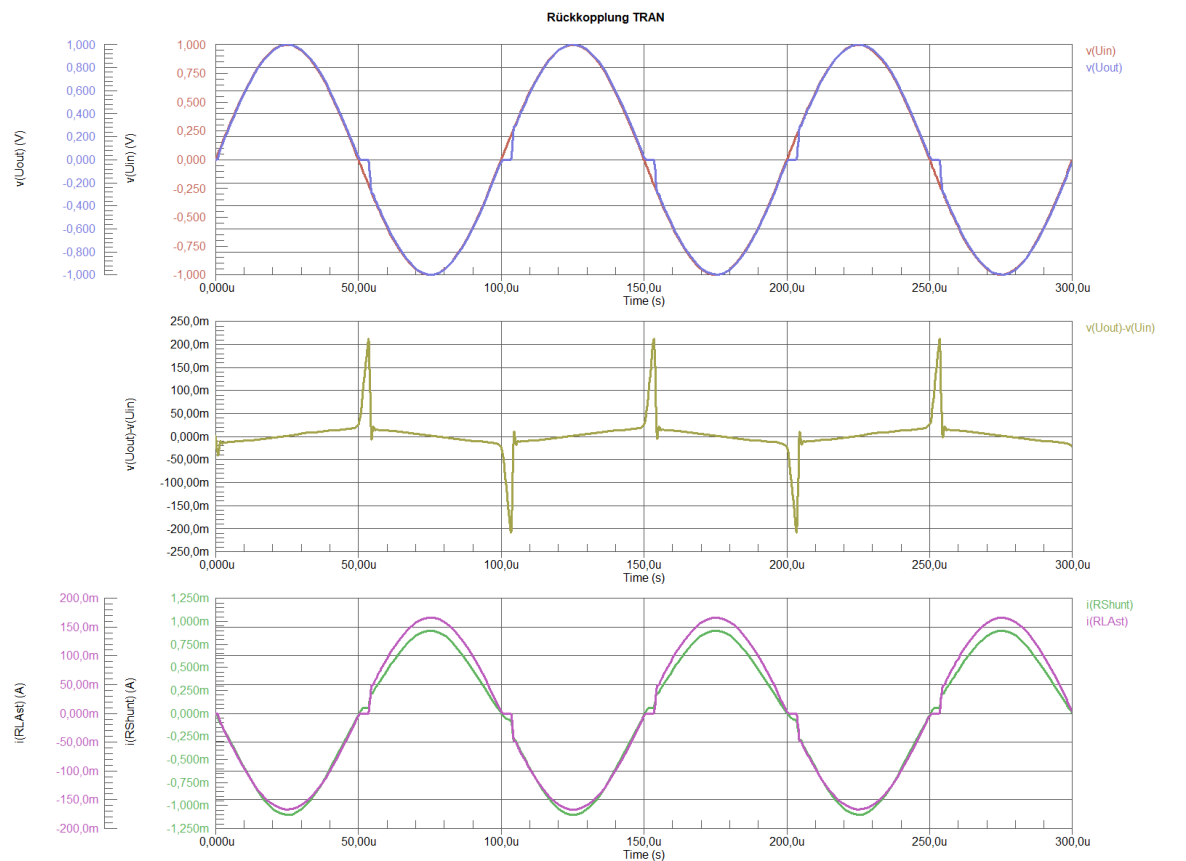


Abbildung 2.5.: Gegentaktendstufe mit Rückkopplung, Simulationsergebnisse

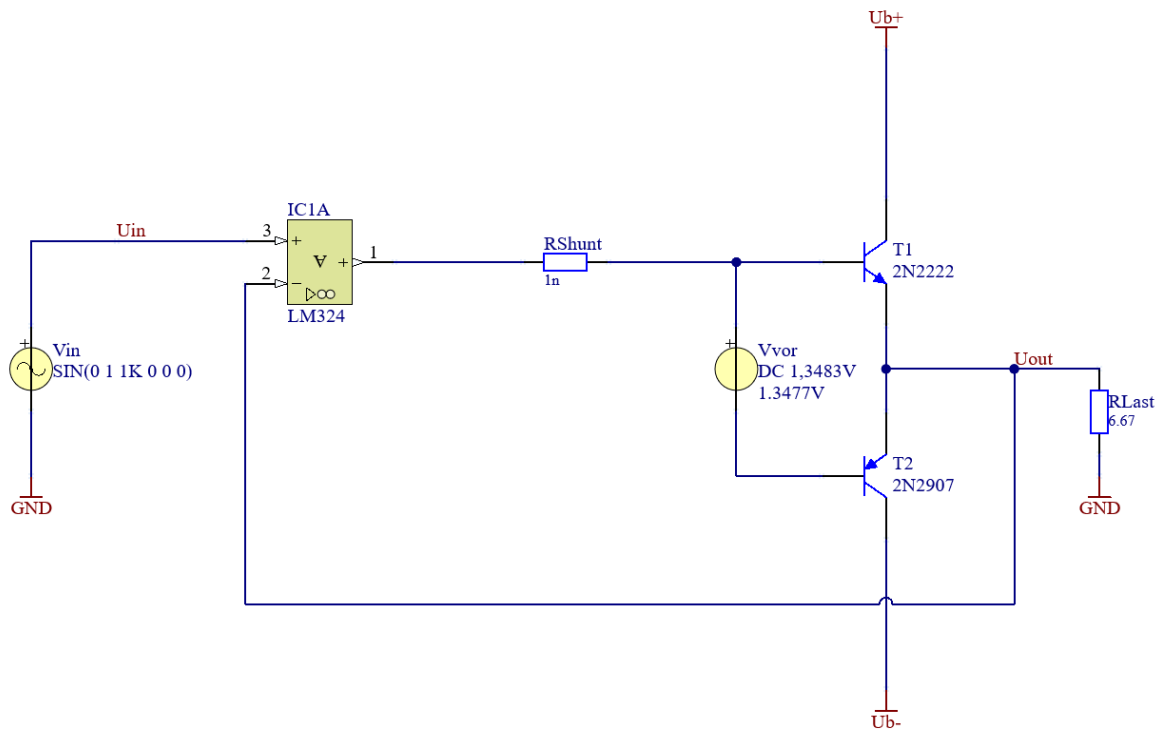
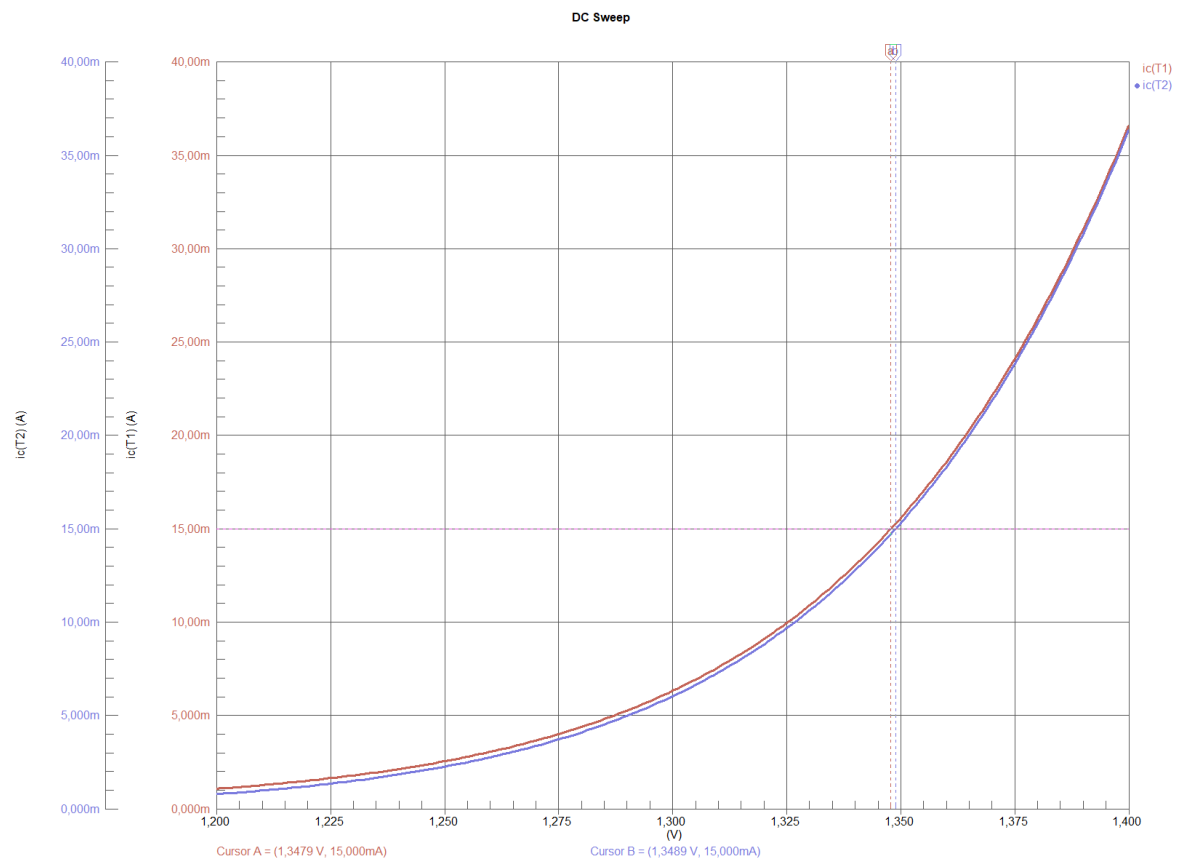


Abbildung 2.6.: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren



Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
$V_{vor} \text{ min}$	1,2 V	
$V_{vor} \text{ max}$	1,4 V	
$V_{vor} \text{ step size}$	1 mV	

Mit dem Cursor können die Ergebnisse exakt abgelesen werden.

Simulationsergebnis	Wert	Bemerkung
V_{vor} bei $I_C = 15 \text{ mA}$ an T1	1,3479 V	
V_{vor} 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.

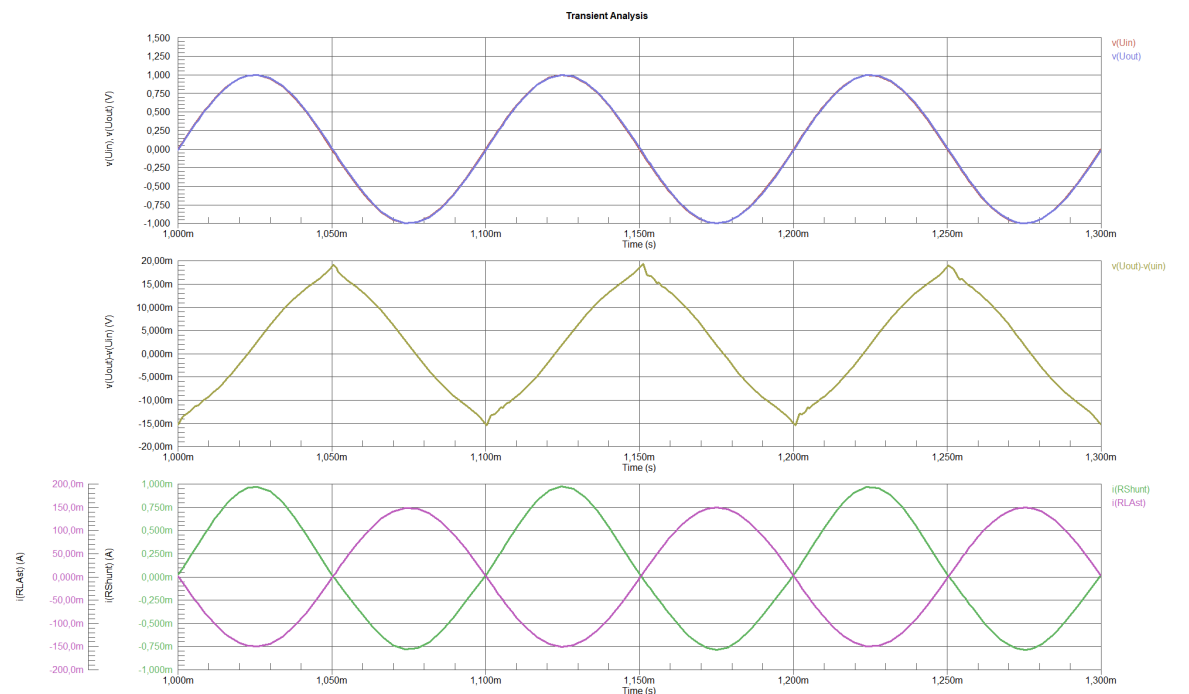


Abbildung 2.7.: Gegentaktendstufe mit vorgespannten Transistoren, Simulationsergebnisse

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	10 kHz	
V_{in} 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?

2.0.4. 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, pp. 301].

In Abbildung 2.12 wird die Schaltung gezeigt. Um die Schaltung zu dimensionieren kann der U_{BE} -Vervielfacher alleine betrachtet werden. U_{out} ist aus Kapitel 2.0.3 bekannt. Es müssen nun also die Widerstände R_{sq1} und R_{sq2} so dimensioniert werden.

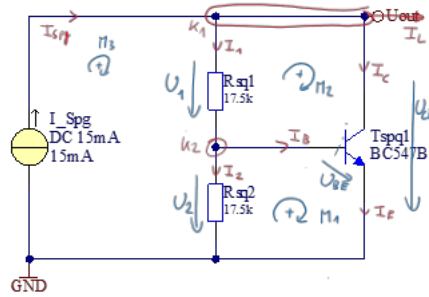


Abbildung 2.8.: Reale Spannungsquelle, U_{BE} -Vervielfacher

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

2.0.4.1. 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 Kapitel 2.0.3 entspricht.

$$U_{out} = 1.35 \text{ V}$$

Der maximale Laststrom I_{Lmax} wurde in Kapitel 2.0.3 bestimmt.

$$I_{Lmax} = 500 \text{ uA}$$

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:

$$I_1 = I_2 + I_B \quad (2.1)$$

$$I_B = \frac{I_C}{100} \quad (2.2)$$

$$I_{Spq} = 20I_{Lmax} \quad (2.3)$$

$$I_{Spq} = 10 \text{ mA}$$

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

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

$$0 = -U_2 + U_{BE} \quad (2.4)$$

$$U_2 = U_{BE} \quad (2.5)$$

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

Mit Maschengleichung 2 M_2 lässt sich U_1 berechnen.

$$0 = U_1 + U_2 - U_{out} \quad (2.6)$$

$$U_1 = -U_2 + U_{out} \quad (2.7)$$

$$U_1 = 650 \text{ mV}$$

I_1 kann aus dem Knoten 2 berechnet werden indem Gleichung [2.10](#) eingesetzt wird.

$$0 = I_1 - I_2 - I_B \quad (2.8)$$

$$I_1 = I_2 + I_B \quad (2.9)$$

$$I_2 = 10I_B \quad (2.10)$$

$$I_1 = 11I_B \quad (2.11)$$

Wird nun noch Gleichung 2.16 in Gleichung 2.11 eingesetzt erhält man eine Gleich für I_1 in Abhängigkeit von I_C .

$$I_1 = \frac{11I_C}{100} \quad (2.12)$$

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 Kapitel 2.0.3 ermittelt werden. Der Strom I_{spg} kann mit der Faustregel Gleichung 2.3 bestimmt werden. Werden diese Informationen und Gleichung 2.17 in Knoten 1 Gleichung 2.13 eingesetzt, kann durch umformen, I_c berechnet werden.

$$0 = -I_1 - I_C - I_L + I_{Spq} \quad (2.13)$$

$$0 = -\frac{11I_C}{100} + 19I_{Lmax} \quad (2.14)$$

$$I_C = \frac{1900I_{Lmax}}{111} \quad (2.15)$$

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

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

$$I_B = \frac{I_C}{100} \quad (2.16)$$

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

$$I_1 = 11I_B \quad (2.17)$$

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

$$R_{sq1} = \frac{U_1}{I_1} \quad (2.18)$$

$$R_{sq1} = 690$$

$$I_2 = 10I_B \quad (2.19)$$

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

$$R_{sq2} = \frac{U_2}{I_2} \quad (2.20)$$

$$R_{sq2} = 818$$

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 höhere Ruhestrome und damit Verluste verbunden.

2.0.4.2. Überprüfen und einstellen mittels Simulation

Nun wird mittels Simulation die Berechnung überprüft und die Schaltung exakt eingestellt. Zur Überprüfung wird eine “OP” Simulation verwendet. Um die Schaltung einzustellen kann eine “DC-Sweep” Simulation, wie dies zum Beispiel in Kapitel 2.0.3 zur Bestimmung der korrekten Vorspannung gemacht wurde, verwendet werden.

Werden die oben berechneten Werte mittels Simulation überprüft, erhält man eine gute Übereinstimmung für U_{out} . Um eine noch Bessere Übereinstimmung zu erzielen können die Widerstände mittels DC-Sweep eingestellt werden. Dazu wird R_{sq1} laut Berechnung gewählt und Widerstand R_{sq2} “gesweept”. Ziel ist es Den Widerstandswert R_{sq2} so zu bestimmen, dass U_{out} den notwendigen Wert der Vorspannung hat, welcher in Kapitel 2.0.3 mittels “DC-Sweep” ermittelt wurde $U_{out} = 1.35 \text{ V}$.

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
Rsq2 Sweep Bereich	1 Ohm bis 20 kOhm in 100 Ohm Schritten	

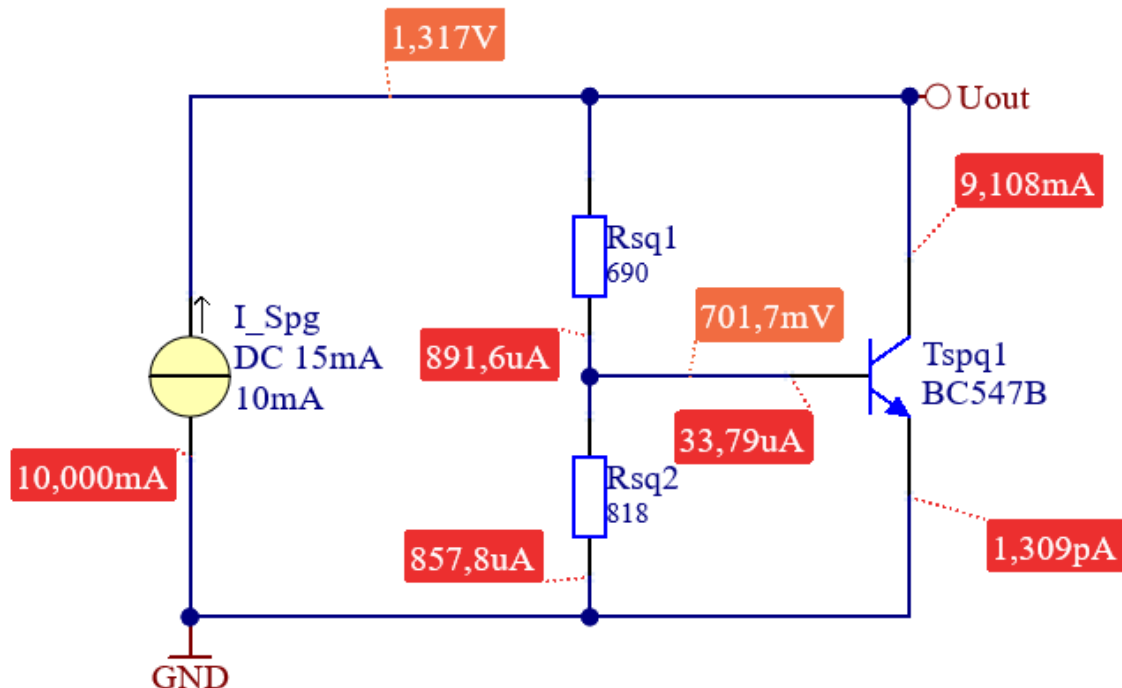


Abbildung 2.9.: Reale Spannungsquelle, Simulation 1

Simulationsergebnis	Wert	Bemerkung
R_{sq2} bei $U_{out} = 1,35 \text{ V}$	$R_{sq2} = 774,11 \Omega$	

Eine neuerliche Simulation bestätigt das Ergebnis.

2.0.4.3. 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 U_{BE} -Vervielfacher würde R_{sq2} als Trimpotentiometer ausgeführt werden. Weiters ist zu beachten, dass für einen realen Aufbau Widerstandswerte aus den E-Reihen zu wählen sind!

2.0.4.4. Reale Spannungsquelle in der Schaltung

Der zuvor dimensionierte U_{BE} -Vervielfacher kann nun in die Schaltung eingebaut werden.

Es gilt aufs neue die Qualität zu überprüfen. Dabei werden die selben Parameter wie in Kapitel 2.0.3 zur Beurteilung heran gezogen. Zuerst wird wieder eine Operating Point Analyse (OP) durchgeführt um den Arbeitspunkt zu kontrollieren, Abbildung 2.13. Bereits hier ist zu erkennen, dass die gewünschte Vorspannung nicht erreicht wird.

Simulationsparameter ²⁵	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	10 kHz	
V_{in} Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	3	

In der Simulation über die Zeit, der Transientensimulation, sind auch eindeutig die

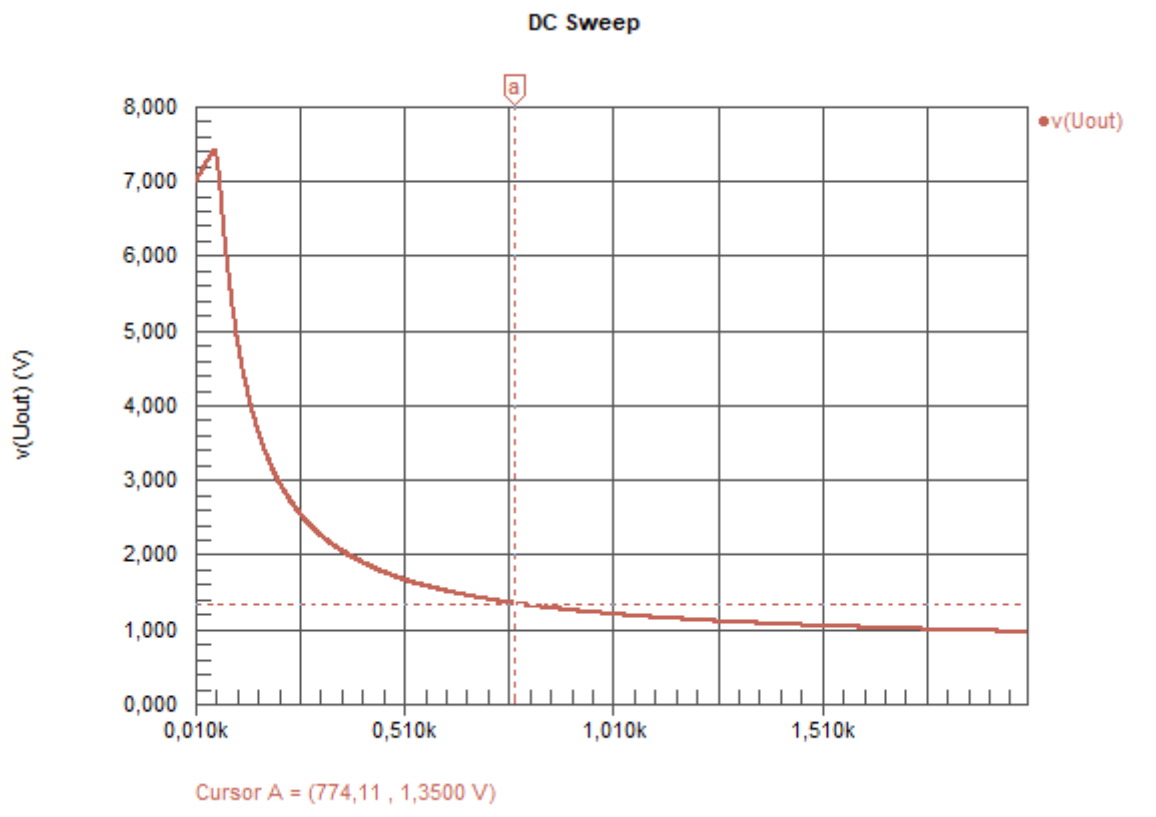


Abbildung 2.10.: Reale Spannungsquelle, DC-Sweep

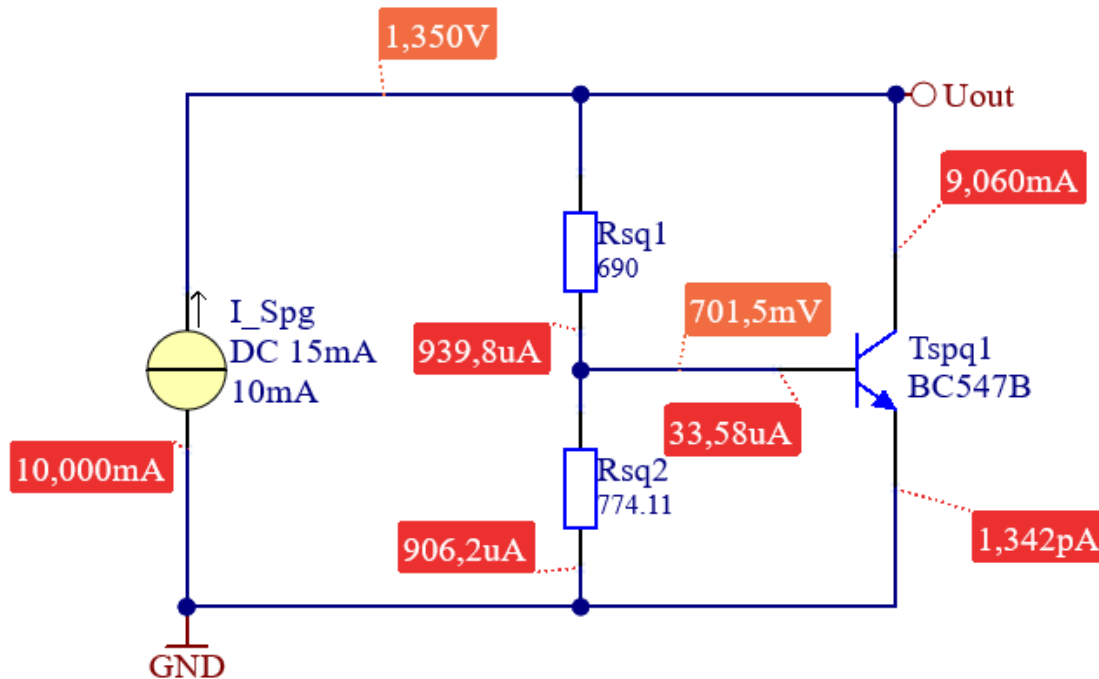


Abbildung 2.11.: Reale Spannungsquelle, Simulation 2

2.0.5. Stromversorgung

Wie in Kapitel 2.0.4.4 Simulationsergebnis Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 sichtbar ist, fehlt für die reale Vorspannungsquelle noch die Stromversorgung.

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 I_{spqg} in Kapitel 2.0.4.1.

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	10 kHz	
V_{in} Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	5	

Die Verzerrungen sind wieder auf dem Niveau aus Kapitel 2.0.3 und damit akzeptabel. Nun müssen nur noch die idealen Stromquellen mit realen ersetzt werden.

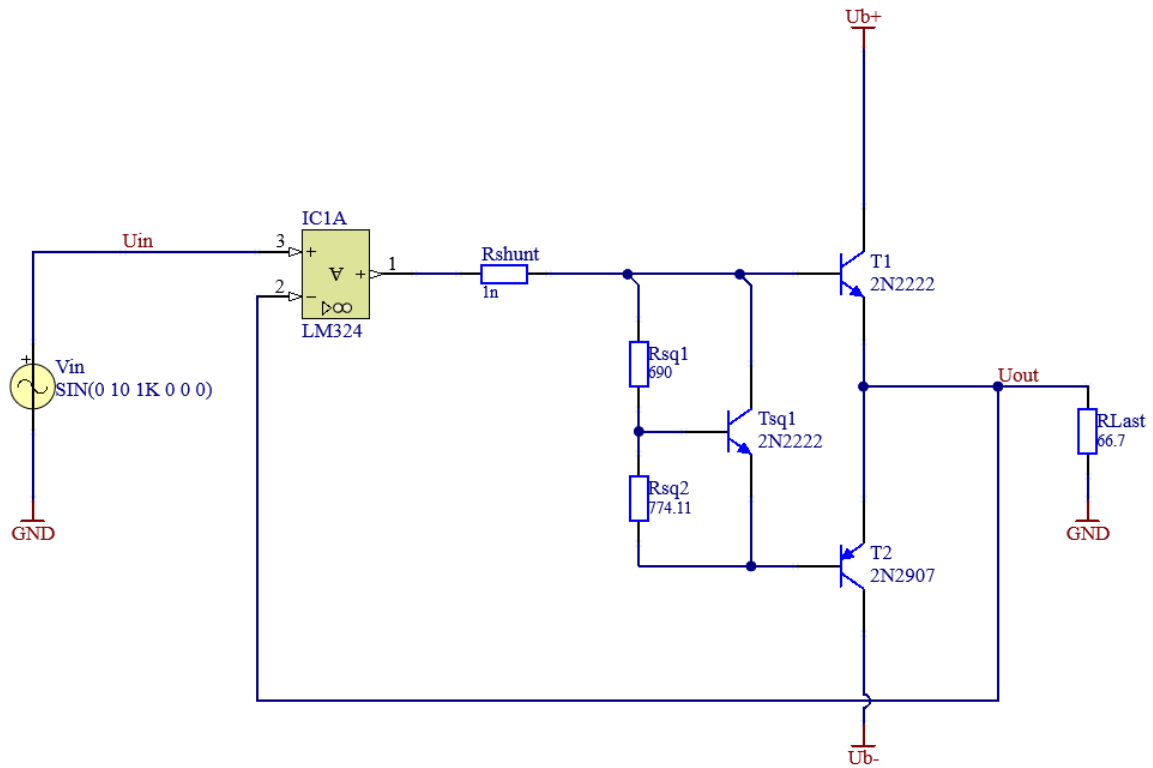


Abbildung 2.12.: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle

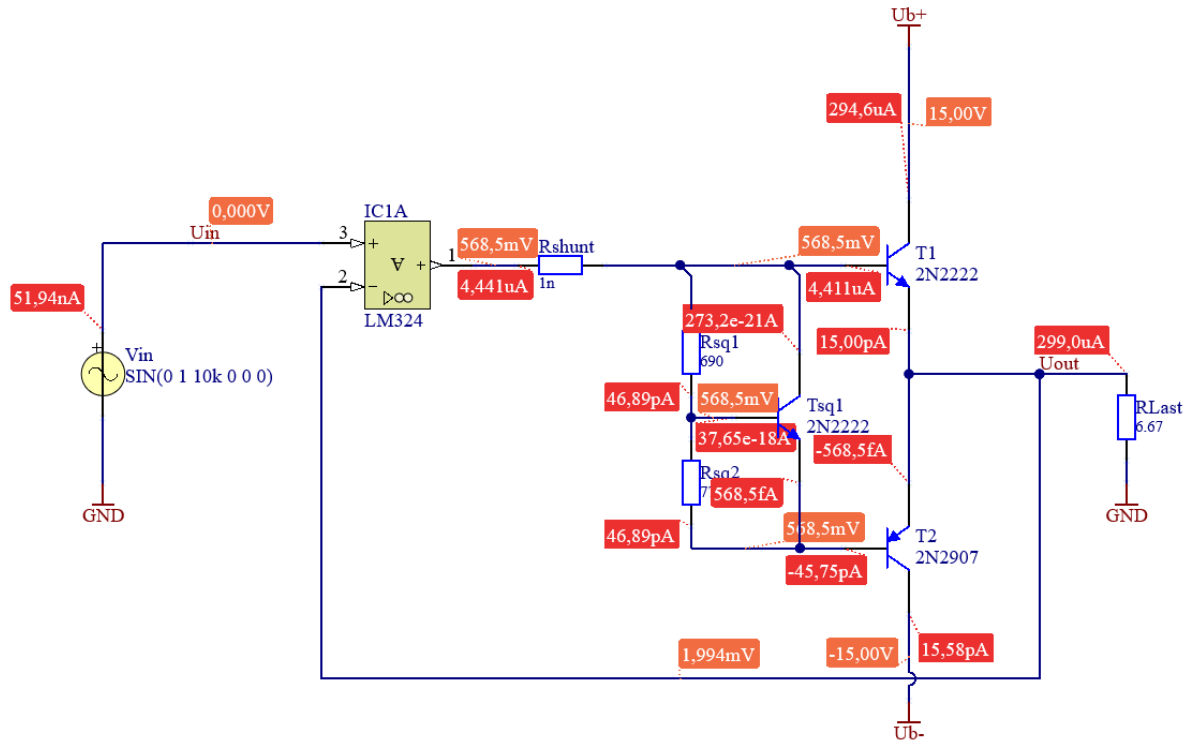


Abbildung 2.13.: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle, Simulation 1

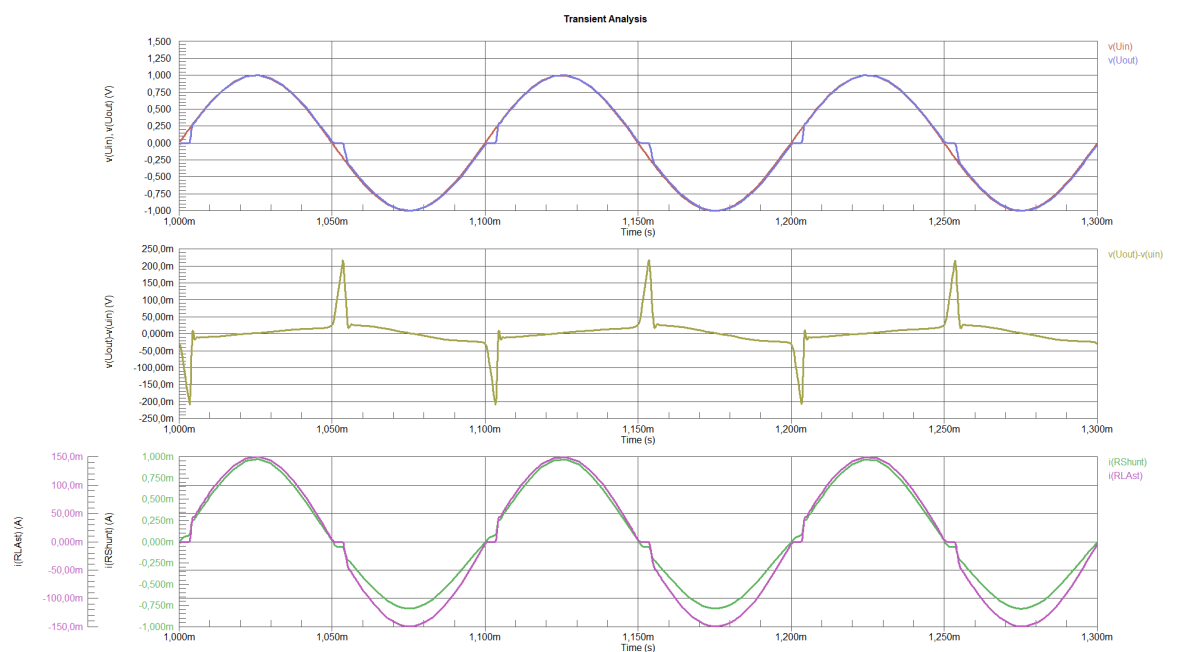


Abbildung 2.14.: Gegentaktendstufe mit realer Vorspannungsquelle, Transienten Simulation

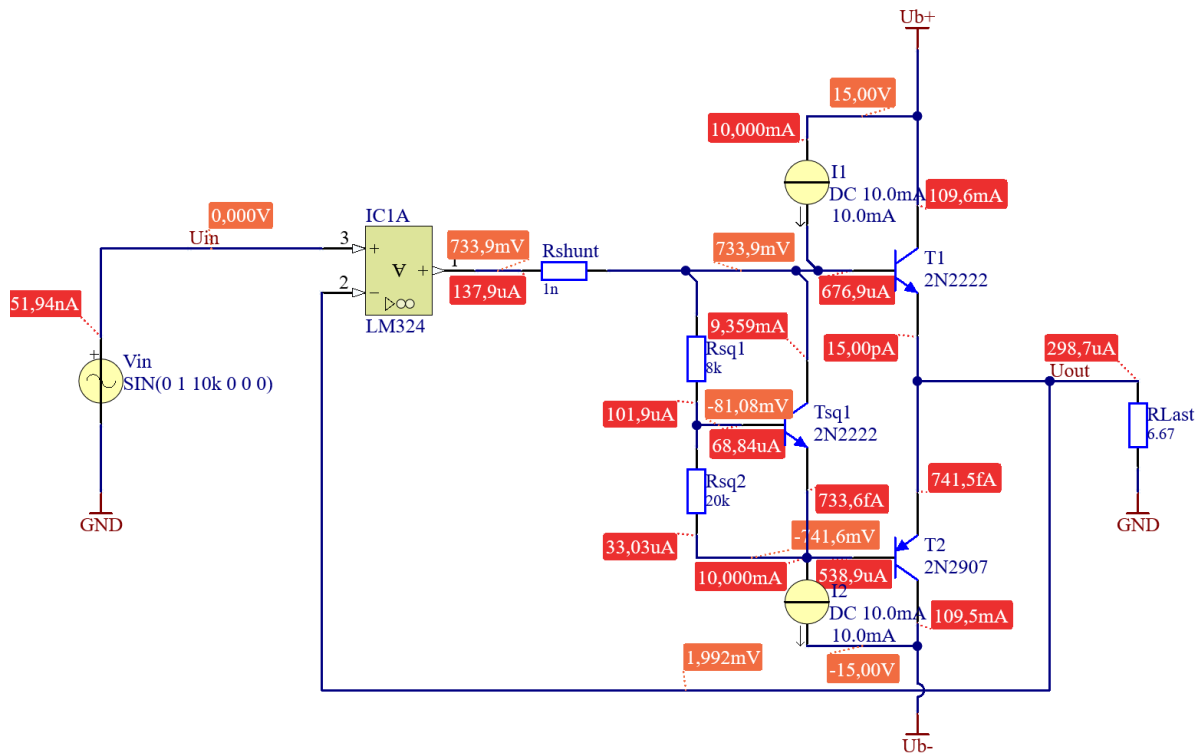


Abbildung 2.15.: Gegentaktendstufe mit Stromversorgung, Simulation 1

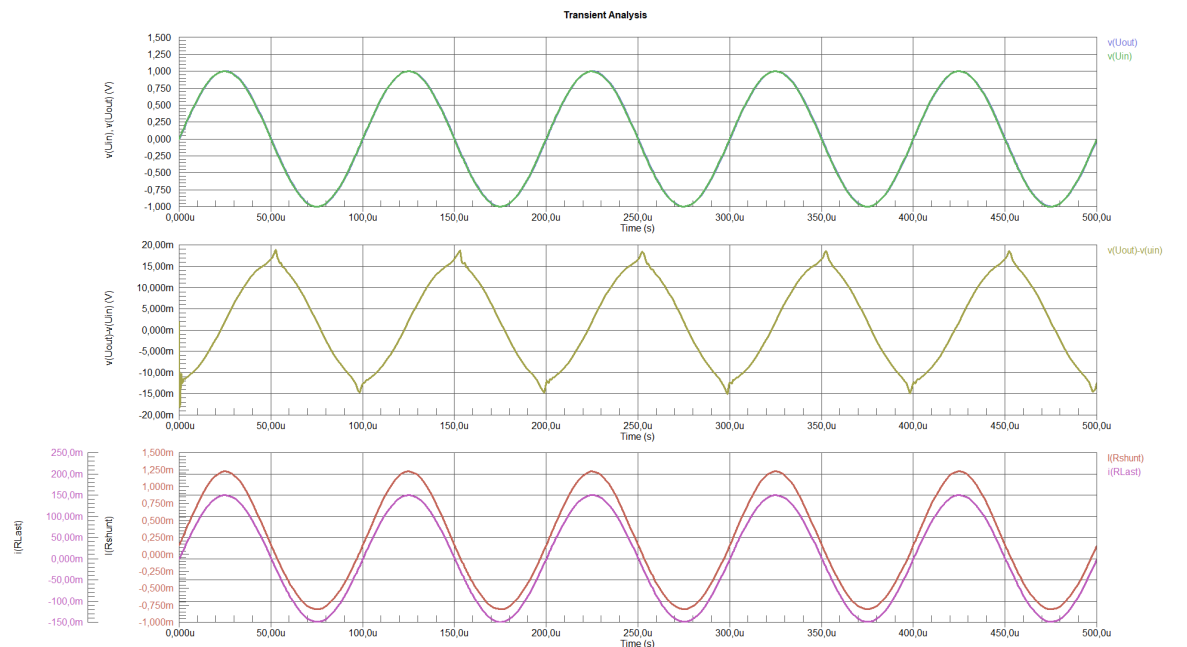


Abbildung 2.16.: Gegentaktendstufe mit Stromversorgung, Transienten Simulation

2.0.6. 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 Stromquellen.

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

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

Simulationsparameter	Wert	Bemerkung
V_{in} Frequenz	10 kHz	
V_{in} Amplitude	1 V	
Simulierte Perioden	5	

Vergleicht man nun Ergebnis Abbildung 2.7, bei welchem die Vorspannung ideal ausgeführt wurde und das Ergebnis Abbildung 2.20 mit realen, und damit tatsächlich fertigbar, Quellen ist die Qualitätsunterschied zu vernachlässigen. Das Schaltung gilt damit als fertig

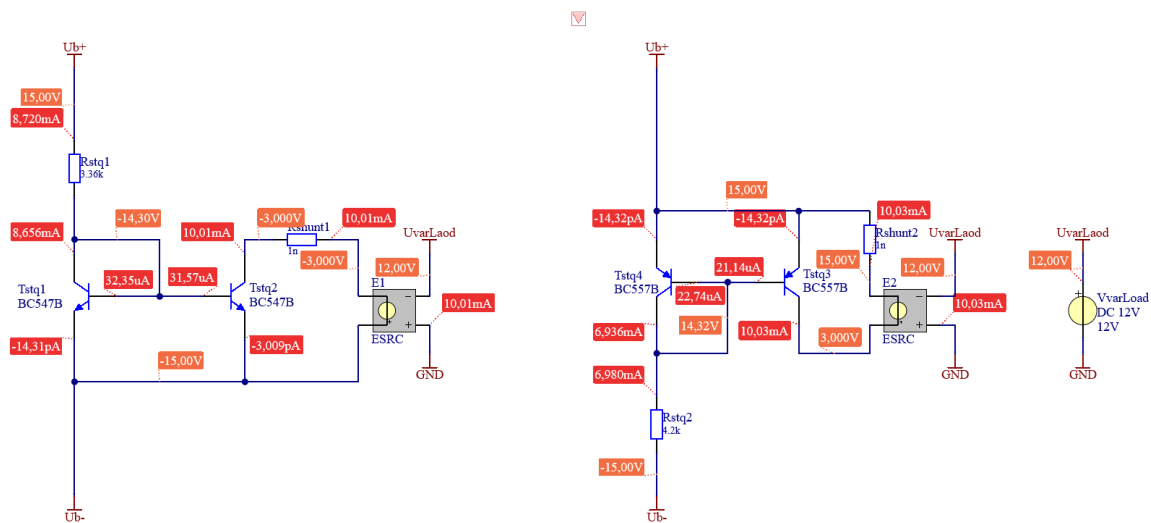


Abbildung 2.17.: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Simulation 1

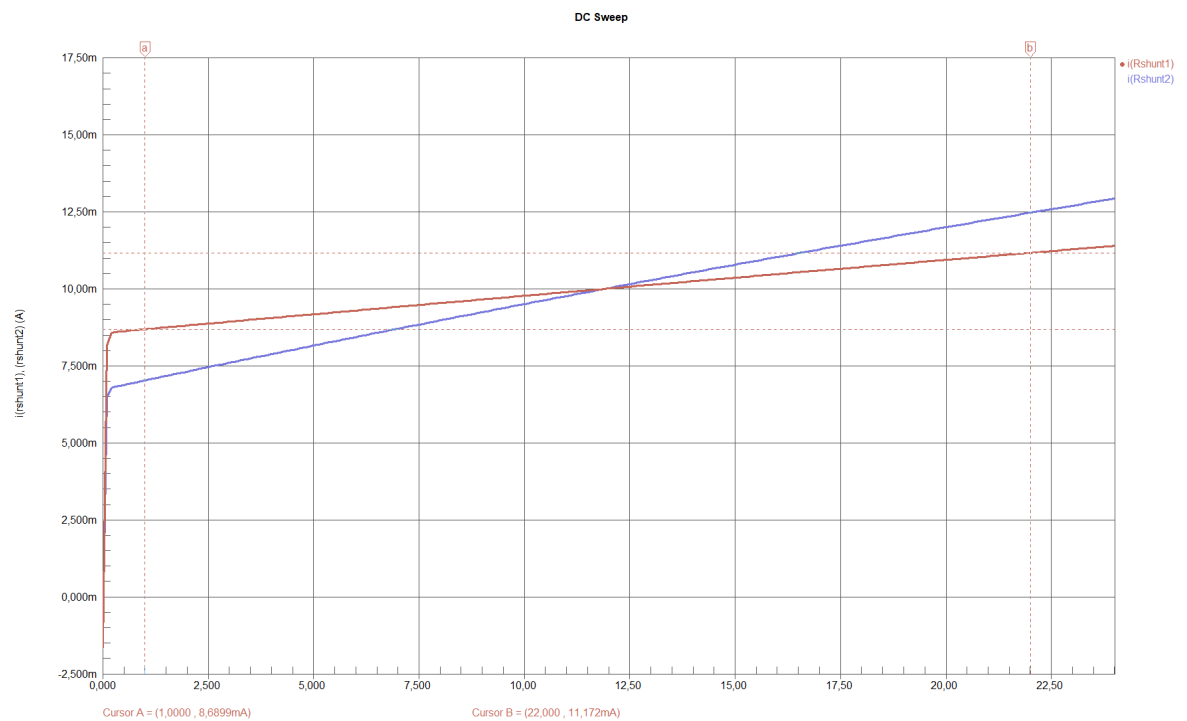


Abbildung 2.18.: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, DC Sweep

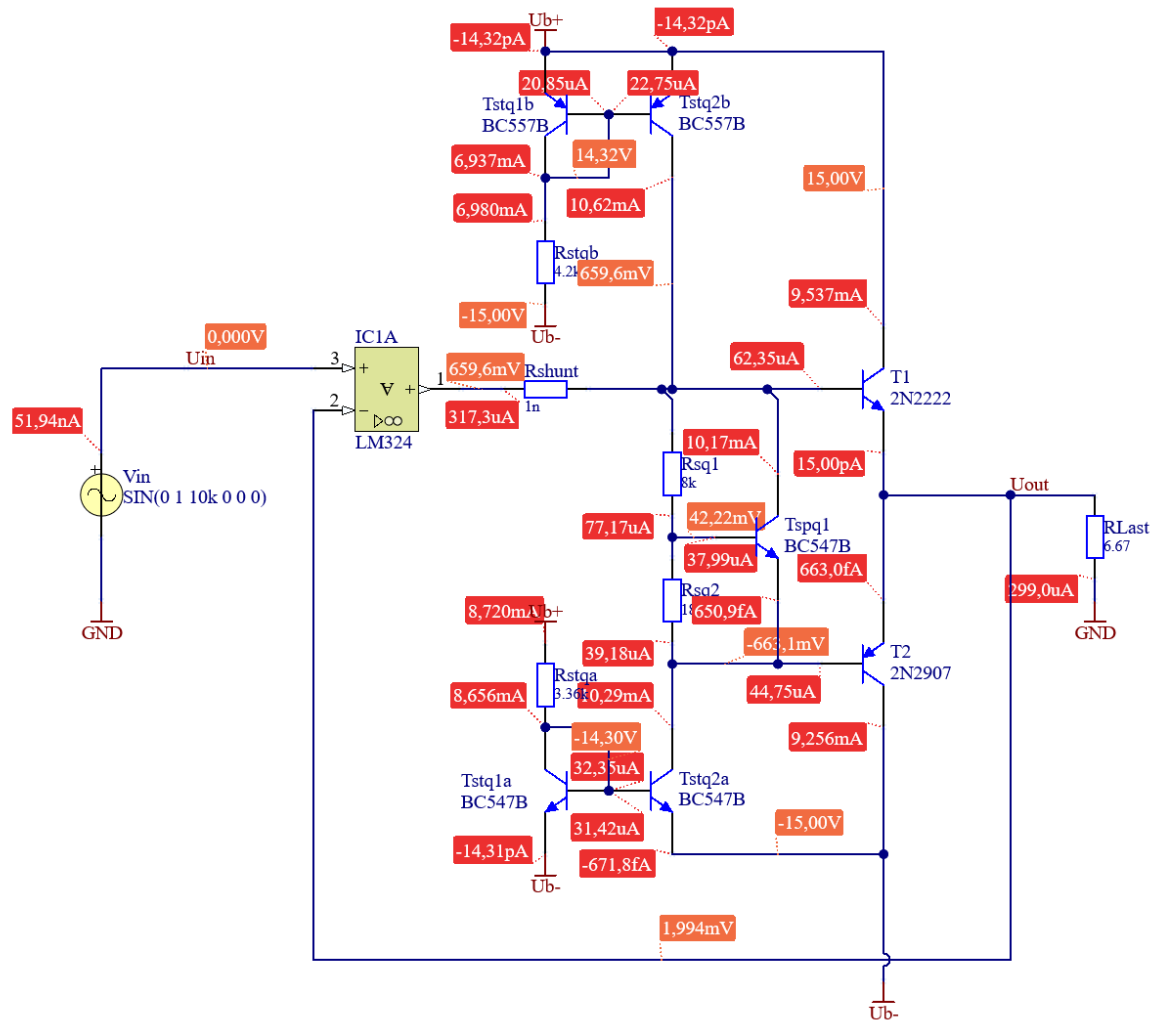


Abbildung 2.19.: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Arbeitspunktanalyse

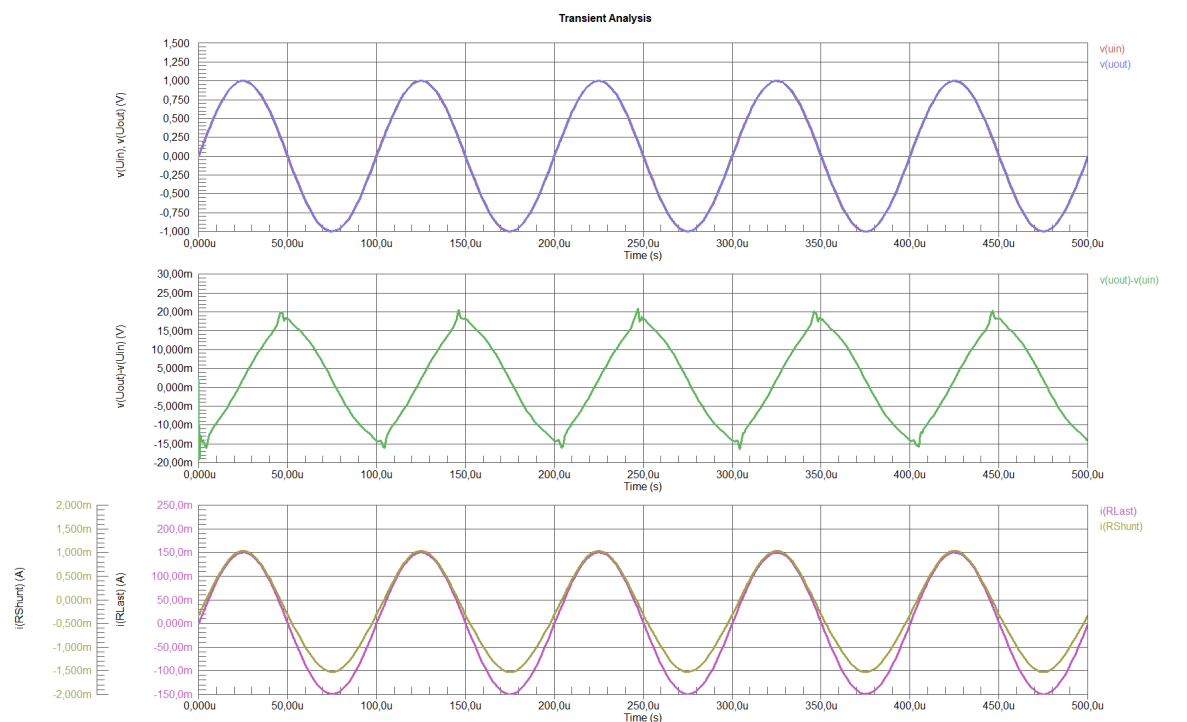


Abbildung 2.20.: Gegentaktendstufe mit realen Stromquellen, Transienten Analyse

dimensioniert. Natürlich kann die Schaltung erweitert, adaptiert und verbessert werden. Siehe dazu Kapitel [2.0.8](#).

2.0.7. 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 Ausgangsspannungen, Oberwellen Anteile, ...

2.0.8. Abwandlungen und Erweiterungen

Wie könnte eine Strombegrenzung, Kurzschlussicherheit, 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?

3. H-Brücke

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