



HiFi-Leistungsverstärker

Skriptum zum
ingenieurwissenschaftlichen Praktikum

Sommersemester 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ablauf	1
1.2	Eigenschaften des Verstärkers	2
2	Komponenten des Verstärkers	2
2.1	Bipolar-Transistor	3
2.2	Stromspiegel	4
2.3	Differenzverstärker	6
2.4	Treiberstufe	8
2.5	Gesamtschaltung	11
3	Schaltplan, Layout	12
4	Aufgaben	13

1 Einleitung

In diesem Versuch wird ein HiFi-Leistungsverstärker aufgebaut, der in der Lage ist, ein Audiosignal (Radio, CD-Player, Kopfhörerbuchse am Smartphone, Bluetooth-Empfänger, ...) so zu verstärken, dass eine handelsübliche Lautsprecherbox zur Musikwiedergabe auf Zimmerlautstärke angesteuert werden kann. Das Modell des fertigen Verstärkers ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

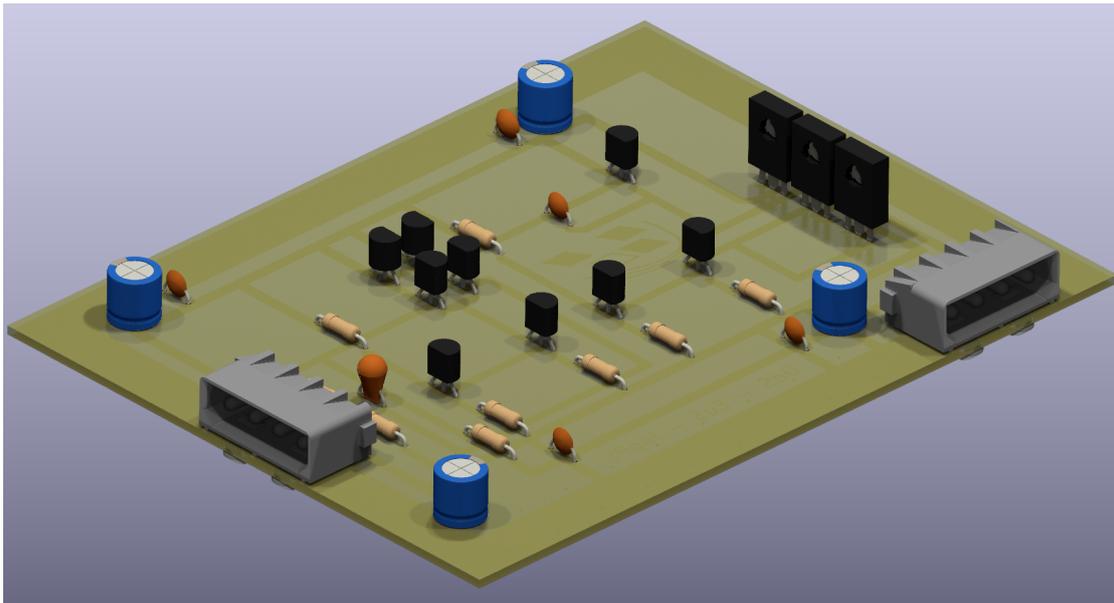


Abbildung 1.1: Der HiFi-Leistungsverstärker.

1.1 Ablauf

Am Versuchstag findet ein **Antestat** statt, welches überprüfen soll, ob das vorliegende Skript gelesen und verstanden wurde. Nach dem Antestat wird die Versuchsschaltung aufgebaut. Hierzu wird eine Platine mit den entsprechenden Bauteilen bestückt. Diese Platine wird anschließend durch die Versuchsteilnehmer vermessen und auf ihre Funktion überprüft. Der Praktikumsversuch gilt als bestanden, wenn das Antestat bestanden und die Schaltung innerhalb der vorgegebenen Zeit funktionsfähig aufgebaut wurde.

1.2 Eigenschaften des Verstärkers

Das menschliche Ohr ist in der Lage, Frequenzen zwischen ca. 20 Hz und 20 kHz wahrzunehmen. Im Audiobetrieb ist es daher notwendig, in diesem Frequenzbereich eine lineare Verstärkung zu realisieren. Lineare Verstärkung meint hier, dass die Signalform des Eingangssignals nicht verändert, sondern das Signal nur in seiner Amplitude verstärkt wird. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass der Verstärker die nötige Leistung bzw. den nötigen Strom, welcher aufgrund des verstärkten Signals durch die Last (Lautsprecher) fließt, bereitstellen kann. Hierfür sind Stufen mit verschiedenen Funktionen notwendig, welche im Folgenden kurz erläutert werden. Auf die genauen Grundlagen zu den Stufen wird nicht eingegangen. Interessierte können in den zwei Vorlesungen der Schaltungstechnik: „Elektronische Schaltungen“ und „Elektrische Netzwerke“¹ das notwendige Wissen erlangen.

2 Komponenten des Verstärkers

Der Verstärker besteht aus verschiedenen Teilschaltungen, welche im Zusammenspiel die Funktionalität der Gesamtschaltung sicherstellen. Diese Teilschaltungen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Eine Übersicht der Gesamtschaltung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

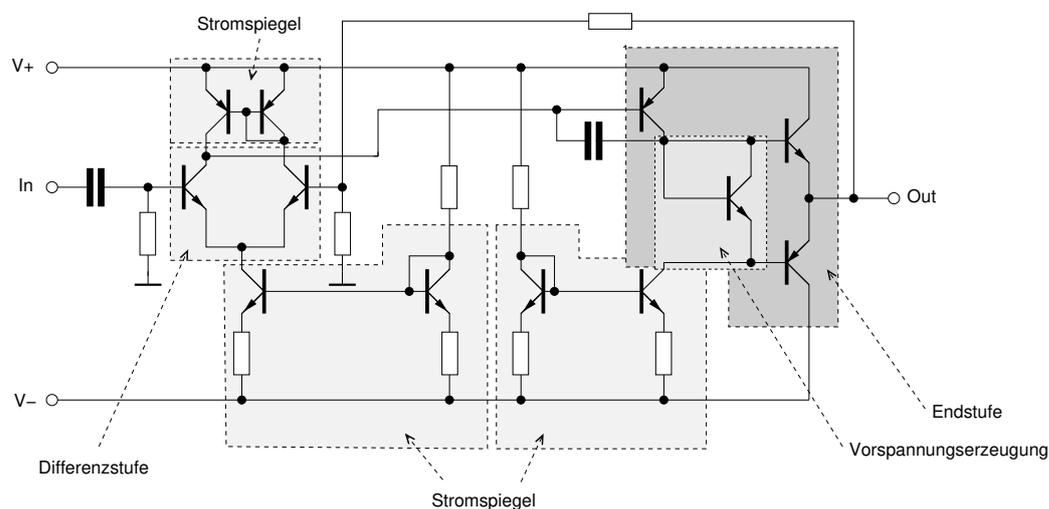


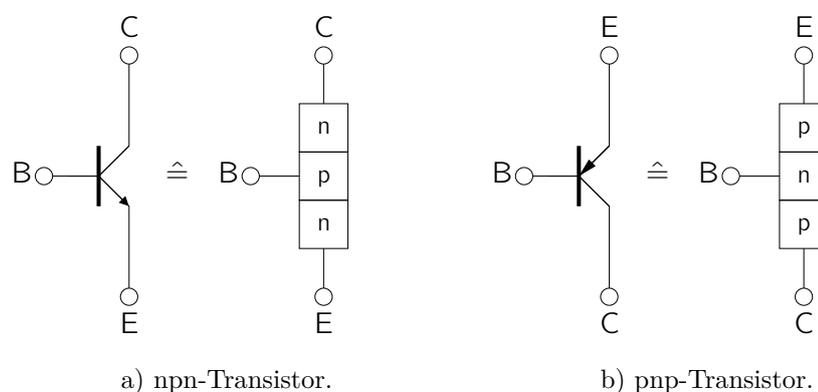
Abbildung 2.1: Die verschiedenen Komponenten des HiFi-Leistungsverstärkers.

¹beide Vorlesungen werden im 4. Fachsemester angeboten

2.1 Bipolar-Transistor

Ein Bipolar-Transistor (im Folgenden nur „Transistor“) ist ein elektronisches Bauelement, das zur Verstärkung und zum Schalten von elektrischen Signalen verwendet werden kann. Er besteht aus drei Schichten von Halbleitermaterial (meist Silizium), die jeweils unterschiedliche Dotierungen aufweisen. Die drei Schichten sind mit elektrischen Kontakten versehen, die als Emitter, Basis und Kollektor bezeichnet werden.

Es gibt zwei Haupttypen von Transistoren, die in Abbildung 2.2 gegenübergestellt sind. npn- und pnp-Transistoren unterscheiden sich in der Anordnung der dotier-



a) npn-Transistor.

b) pnp-Transistor.

Abbildung 2.2: Typen von Bipolar-Transistoren.

ten Schichten: Beim npn-Typ sind Kollektor und Emitter n-dotiert, während die Basis p-dotiert ist. Beim pnp-Transistor ist es genau umgekehrt. Bei der n- und p-Dotierung werden durch das Hinzufügen von bestimmten Verunreinigungen (Dotierstoffen) zum reinen Halbleitermaterial Atome ins Kristallgefüge eingebracht, die mehr (n-Dotierung) oder weniger (p-Dotierung) Elektronen in ihrer äußeren Schale haben als das Halbleitermaterial selbst. Dadurch wird ein Überschuss an freien Elektronen bzw. Löchern (fehlende Elektronen) erzeugt, der die Eigenschaften des Halbleiters verändert. Die genaue Herleitung der Funktionsweise des Transistors wird in der Vorlesung „Physikalische Grundlagen der Elektronik“² erläutert.

Die Funktionsweise eines Transistors beruht auf der Steuerung des Stromflusses durch die Basis. Ein kleiner Strom, der in die Basis fließt, kann einen viel größeren

²Vorlesung im 3. Fachsemester

Strom zwischen Emitter und Kollektor steuern. Dadurch kann der Transistor als Verstärker oder Schalter verwendet werden.

Transistoren sind in vielen elektronischen Schaltungen zu finden, von einfachen Verstärkern bis hin zu komplexen digitalen Schaltungen. Sie sind ein grundlegendes Element in der modernen Elektronik.

2.2 Stromspiegel

Um die Funktionsweise elektronischer Bauelemente sicherzustellen, ist es erforderlich, die Bauelemente in bestimmten Arbeitsbereichen zu betreiben. Beispielsweise hängen die Eigenschaften eines Transistors stark davon ab, in welchem Arbeitspunkt er betrieben wird. Die Arbeitspunkte stellen Ruhelagen der Schaltung dar, also stabile Punkte, um welche mit dem Signal ausgelenkt wird. Um den Arbeitspunkt und damit die resultierenden Eigenschaften des Transistors einzustellen, besteht eine Methode darin, den Transistor mit einem konstanten Strom zu speisen.

Um eine Stromquelle mit einem bekannten und konstanten Strom zu realisieren, kann ein sogenannter Stromspiegel verwendet werden. Der hier behandelte, einfache Stromspiegel (vgl. Abbildung 2.3a) besteht aus einem Widerstand R und zwei Transistoren. Bei einem Transistor werden Basis und Kollektor kurzgeschlossen, wodurch er sich wie eine Diode verhält (vgl. Abbildung 2.3b). Eine Diode kann vereinfacht als ein Bauelement betrachtet werden, das den Strom nur in eine vorgegebene Richtung (Flussrichtung) durchlässt. Nach Überschreiten einer Schwellspannung in Flussrichtung fällt über ihr eine nahezu konstante Spannung³ U_D ab, welche vom Strom durch die Diode abhängt.

Wird ein Widerstand R in Reihe zu der Diode geschaltet und eine Spannung U_0 über Widerstand und Diode angelegt (vgl. Abbildung 2.3b), so stellt sich ein Strom $I_0 = \frac{U_0 - U_D}{R}$ ein. Zur Berechnung des Stroms kann die Spannung U_D in guter Näherung als konstant angenommen werden. Der genaue Arbeitspunkt ergibt sich als Schnittpunkt aus den Kennlinien der Diode und des restlichen Netzwerks (vgl. Abbildung 2.4).

³Durch die exponentielle Kennlinie der Diode bleibt die Spannung über der Diode in einem weiten Strombereich annähernd konstant.

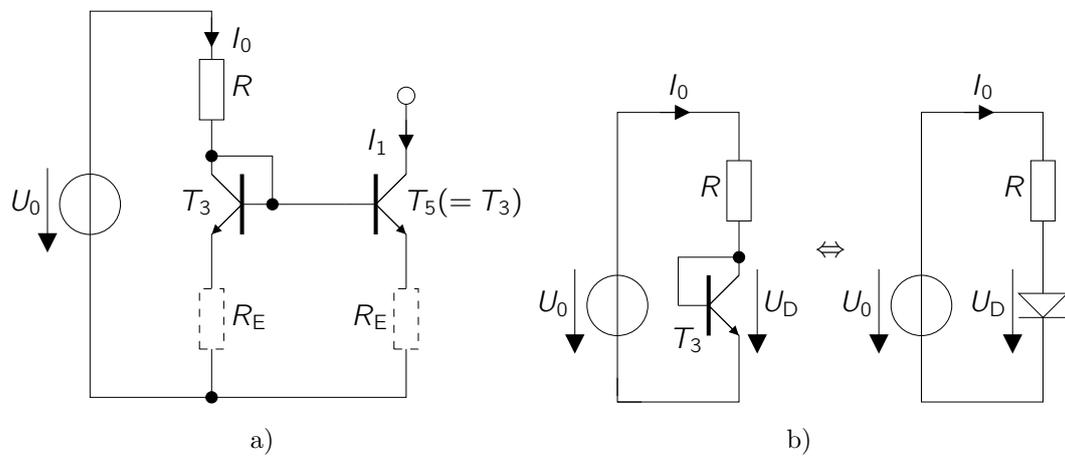


Abbildung 2.3: a) Stromspiegel mit Betriebsspannungsquelle U_0 und optionalen Emittergegenkopplungswiderständen R_E . Am Ausgang des Stromspiegels (Kollektor von T_5) fließt ein in erster Näherung zum Strom durch den Widerstand R identischer Strom $I_1 = I_0$.

b) Als Diode verschalteter Transistor T_3 aus Abbildung 2.3a und äquivalente Darstellung.

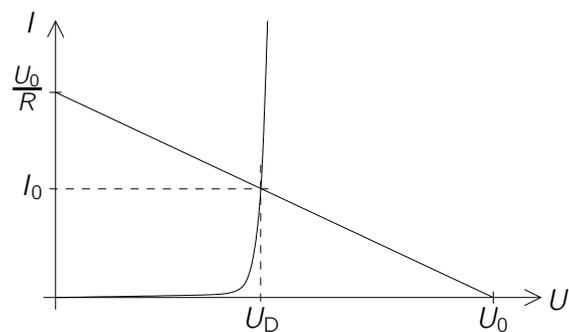


Abbildung 2.4: Kennlinie einer Diode (die Exponentialfunktion) und Kennlinie des restlichen Netzwerks (auch „Lastgerade“). Der Schnittpunkt bestimmt den Arbeitspunkt, d. h. Strom und Spannung an der Diode.

Wird zum ersten Transistor ein baugleicher Transistor so hinzugeschaltet, dass die Basen miteinander verbunden sind, so stellt sich durch den zweiten Transistor ein identischer Strom $I_1 = I_0$ ein⁴. Auf eine genauere Betrachtung wird an dieser Stelle verzichtet, die Thematik wird in den Vorlesungen zur Schaltungstechnik ausführlich behandelt.

In der Verstärkerschaltung haben die Stromspiegel jeweils einen Widerstand R_E an den Emitttern, der zur Temperaturkompensation dient. Ohne diesen Widerstand könnten sich die Transistoren unter bestimmten Betriebsbedingungen unkontrolliert aufheizen und selbst zerstören.

2.3 Differenzverstärker

Zur Verstärkung des Eingangssignals (in Abbildung 2.1) dient im aufzubauenden HiFi-Leistungsverstärker ein Differenzverstärker. Dieser bildet bspw. eine wichtige Teilschaltung innerhalb eines Operationsverstärkers, der in weiteren Vorlesungen wie „Elektronische Systeme“⁵ im Mittelpunkt stehen wird. Aufgrund der hohen erreichbaren Geschwindigkeit des Schaltungskonzepts ist der Differenzverstärker auch in der Master-Vorlesung „High Speed Electronics“ Thema.

Abbildung 2.5a zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Differenzverstärkers aus zwei identischen Transistoren und einer Stromquelle. Als Stromquelle kommt ein Stromspiegel zum Einsatz (vgl. Abschnitt 2.2). Aufgrund der Funktionsweise der Transistoren stellen sich ohne Eingangssignal an den beiden Kollektoren gleiche Ströme ein. Da die Basisströme der Transistoren i. d. R. gegenüber den Kollektorströmen vernachlässigbar sind, entspricht dieser Strom dem halben Quellstrom I_0 ,

$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2}.$$

⁴Für Experten: Die Modellierung des Transistorverhaltens erfolgt bspw. durch das Transferstrommodell. Der Kollektorstrom des Transistors ergibt sich näherungsweise aus der Gleichung

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

mit I_S : Sättigungsstrom, U_T : Temperaturspannung $\frac{kT}{e} \approx 26$ mV. Da an beiden Transistoren T_3 , T_5 die gleiche Basis-Emitter-Spannung U_{BE} anliegt, fließt auch in beiden ein identischer Strom.

⁵Vorlesung im 5. Fachsemester

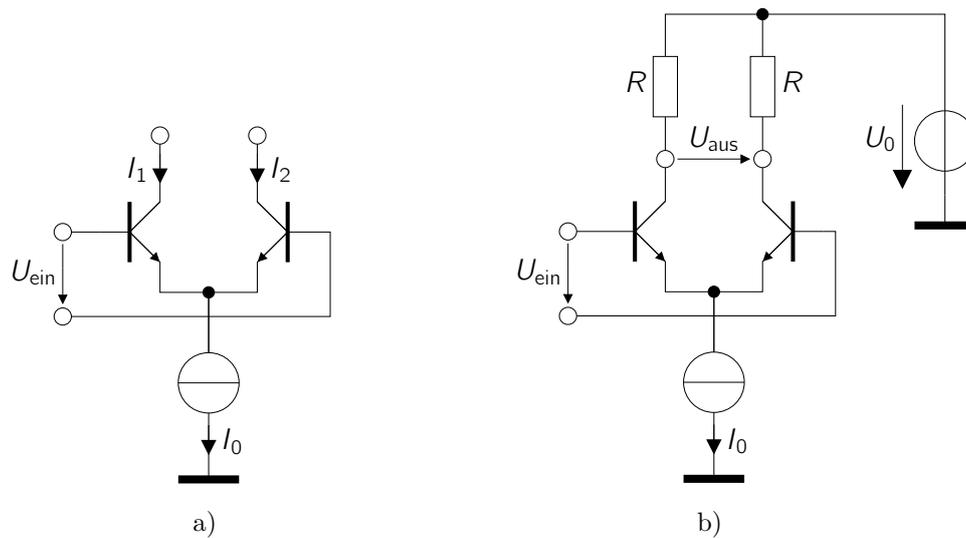


Abbildung 2.5: a) Grundsätzlicher Aufbau eines Differenzverstärkers.
 b) Differenzverstärker mit Widerständen am Ausgang, um eine Ausgangsspannung zu erzeugen.

Mit dem Eingangssignal ändern sich die Eigenschaften der Transistoren⁶, so dass in den Kollektorzweigen unterschiedliche Ströme $I_1 \neq I_2$ fließen. Als Ausgangssignal des Verstärkers wird diese Stromdifferenz genutzt.

Um aus der Stromdifferenz eine Spannungsdifferenz zu erzeugen, werden z. B. identische Widerstände in die Ausgangszweige geschaltet (vgl. Abbildung 2.5b). Die Differenzspannung U_{aus} ist proportional zur Eingangsspannung U_{ein} und dient als Ausgangssignal.

In der vorliegenden Schaltung wird nicht die Spannung, sondern direkt der Differenzstrom als Ausgangssignal genutzt. Dazu muss die Differenz zwischen den Strömen I_1, I_2 in einen Differenzstrom $I_{\text{aus}} = I_1 - I_2$ mit Hilfe einer sogenannten aktiven Last gewandelt werden.

⁶Für Experten: Durch die Eingangsspannung wird die Basis-Emitter-Spannung der Transistoren variiert. Hierdurch ändert sich der Strom durch die Transistoren.

Aktive Last

Die aktive Last, dargestellt in Abbildung 2.6, arbeitet wie ein Stromspiegel. Wenn sich aufgrund einer Differenzspannung am Eingang der Strom zwischen den Zweigen um den Wert ΔI um den Ruhewert $\frac{I_0}{2}$ verschiebt, ändert sich der Ausgangsstrom I_{out} um den doppelten Wert ($2 \cdot \Delta I$). Dies ergibt sich durch einfache Anwendung der Kirchhoffschen Knotenregel (Summe aller Ströme in einem Knoten ist gleich Null) am Knoten N_1 in Abbildung 2.6.

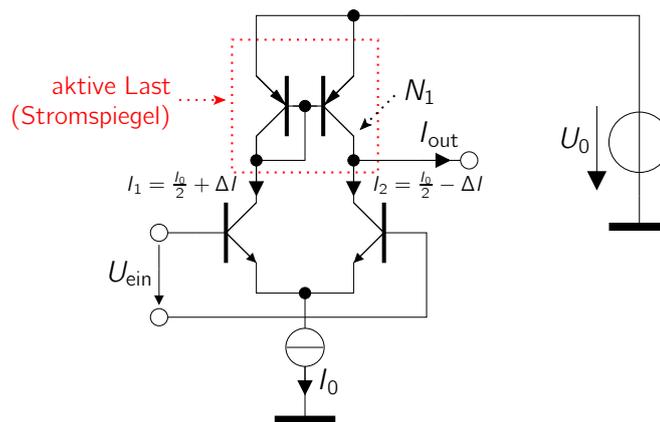


Abbildung 2.6: Differenzverstärker mit einer aktiven Last, durch die der Ausgangsstrom ΔI einer Seite verdoppelt wird.

2.4 Treiberstufe

Die gesamte Treiberstufe stellt einen sogenannten AB-Verstärker dar. Dieser besteht aus einer Vorspannungserzeugung und der eigentlichen Gegentaktendstufe. Der Ausgangsstrom der Differenzstufe wird mit Hilfe des pnp-Transistors T_9 (vgl. Abbildung 2.7) in ein Spannungssignal umgesetzt. Je nach Höhe des Eingangssignals I_{in} (= Ausgangsstrom I_{out} der aktiven Last in Abbildung 2.6) ändert sich der Ausgangsstrom von T_9 und erzeugt in Verbindung mit dem konstanten Arbeitspunktstrom I_0' eine von der Signalamplitude abhängige Spannungsänderung U_{CE9} am Transistor T_9 .

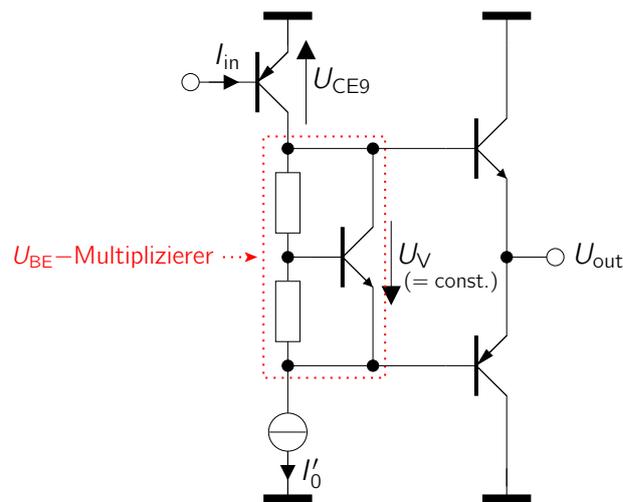


Abbildung 2.7: Endstufe mit Vorspannungserzeugung (vgl. Abbildung 2.8) und pnp-Schaltung am Ausgang des Differenzverstärkers zur Wandlung des Stromsignals in ein Spannungssignal.

Vorspannungserzeugung

Transistoren besitzen im Allgemeinen eine nicht-lineare Kennlinie. Auf dieser existieren aber lineare Bereiche, in welchen der Transistor betrieben werden kann, was in den Vorlesungen zur Schaltungstechnik noch weiter vertieft werden wird. Um diesen linearen Arbeitsbereich zu erreichen ist es notwendig, am Transistor eine (Vor-)Spannung zwischen Basis und Emitter einzustellen. Diese Spannung wird in der vorliegenden Schaltung durch einen sogenannten U_{BE} -Multiplizierer (nach Abbildung 2.8) erzeugt.

Die U_{BE} -Multiplizierer-Schaltung stellt zwischen Emitter und Kollektor eine konstante Spannung U_V ein. Diese beträgt ein durch das Teilverhältnis der Widerstände R_1, R_2 an der Basis einstellbares Vielfaches der Basis-Emitterspannung des Transistors⁷. Zur Erzeugung von $U_V = U_{BE}$ werden in der vorliegenden Schaltung $R_1 = 0 \Omega$ und $R_2 \rightarrow \infty$ gewählt.

⁷Für Experten: Unter der Annahme einer konstanten Spannung U_{BE} kann die Spannung U_{CE} (welche die Vorspannung für die beiden folgenden Transistoren darstellt) direkt über den Spannungsteiler berechnet werden. Sie beträgt $U_{CE} = U_{BE} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$, wie bereits erwähnt ein Vielfaches der Basis-Emitter-Spannung. Für thermische Stabilität ist es wichtig, den Transistor der Vorspannungserzeugung möglichst identisch zu den angesteuerten Transistoren zu wählen, und diese thermisch zu koppeln.

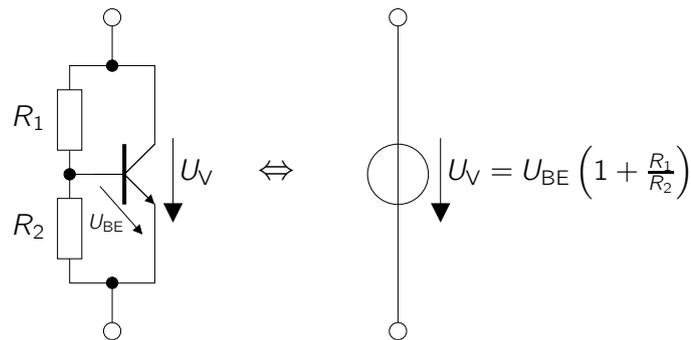


Abbildung 2.8: Vorspannungserzeugung äquivalent zu einer Spannungsquelle mit Wert U_V .

Durch die Vorspannungserzeugung treten keine sogenannten Übernahmeverzerrungen auf, welche sich negativ auf den Klirrfaktor des Verstärkers auswirken. Zur Vertiefung wird auf einschlägige Literatur oder auf einen Selbstversuch mit zu kleiner Vorspannung ($U_V \rightarrow 0$) verwiesen.

Gegentaktendstufe

Die Gegentaktendstufe dient dazu, der Schaltung eine niedrige Ausgangsimpedanz zu verleihen, was ermöglicht, dass sie am Ausgang große Ströme durch die niederohmige Last (ca. $8\ \Omega$) bereitstellen kann. Der Differenzverstärker alleine wäre nicht in der Lage, die hier benötigten Ausgangsströme bereitzustellen.

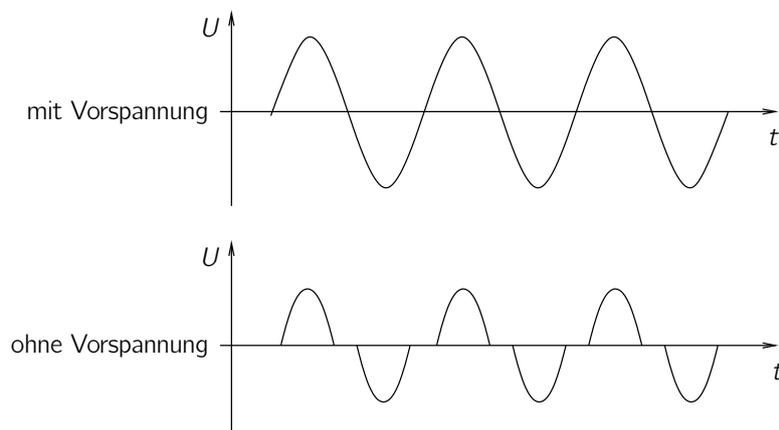


Abbildung 2.9: Ausgangssignal bei Ansteuerung mit Sinussignal, mit und ohne Vorspannung an der Gegentaktendstufe.

Liefert die Differenzstufe kein Signal, so fließt durch die Endstufentransistoren ein geringer (Vor-)Strom (eingestellt durch die Vorspannung) und am Knoten der beiden Emitter stellt sich ein Nullpotenzial ein⁸. Wird die Endstufe mit einem Signal um das Nullpotenzial angesteuert, so leitet (je nach Polarität der Halbwelle) ein Transistor mehr und der Andere beginnt zu sperren. Der Ausgang folgt dem Eingangssignal, und die Signalquelle wird dabei nur kaum belastet.

Würden die Transistoren ohne Vorspannung mit einem sinusförmigen Signal angesteuert, so würde der Bereich um den Nulldurchgang abgeschnitten (vgl. Abbildung 2.9). Dies würde starke Verzerrungen im Audiosignal verursachen⁹. Durch die Vorspannung wird sichergestellt, dass auch das Ausgangssignal sinusförmig ist.

2.5 Gesamtschaltung

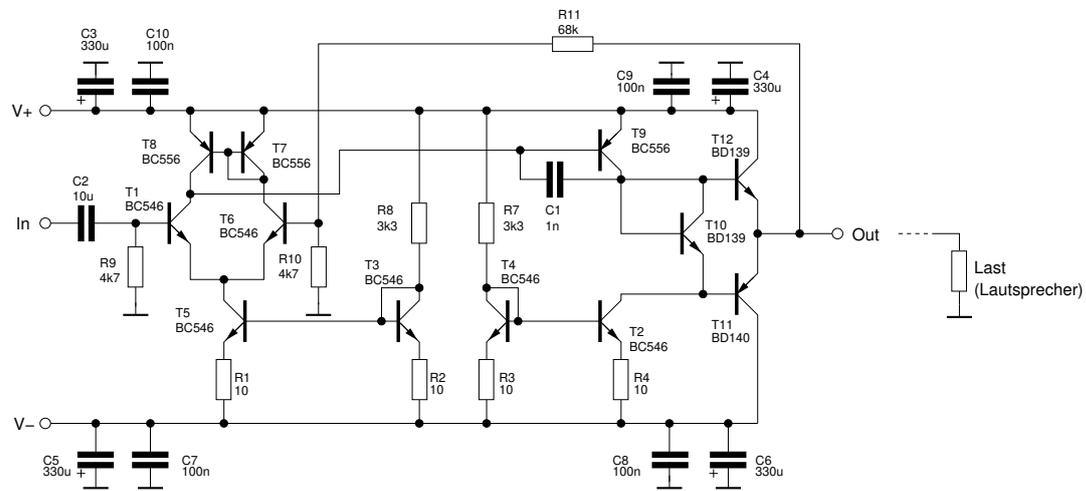
Die Gesamtschaltung besteht aus den zuvor beschriebenen Teilschaltungen. Der gesamte Verstärker ist rückgekoppelt, d.h. ein Teil des Ausgangssignals wird zum Eingang zurückgeführt. Dies ermöglicht es, eine feste Verstärkung einzustellen. Ohne Rückkopplung arbeitet der Verstärker mit einer sehr großen, idealerweise unendlich hohen, Verstärkung. Durch diese würde sich aufgrund kleinster Differenzspannungen am Eingang, bspw. durch Schwankungen der Bauteilparameter, am Ausgang das Potenzial einer der beiden Betriebsspannungen einstellen. Des weiteren würde jedes Signal in ein Rechtecksignal umgeformt, was im Audiobetrieb aufgrund des daraus folgenden hohen Klirrfaktors nicht erwünscht ist.

Zusätzlich verfügen die beiden Betriebsspannungen über mehrere Abblockkapazitäten gegen Masse. Diese gleichen Spannungsschwankungen aus und stellen sicher, dass die Betriebsspannungen für hochfrequente und niederfrequente Störungen konstant sind.

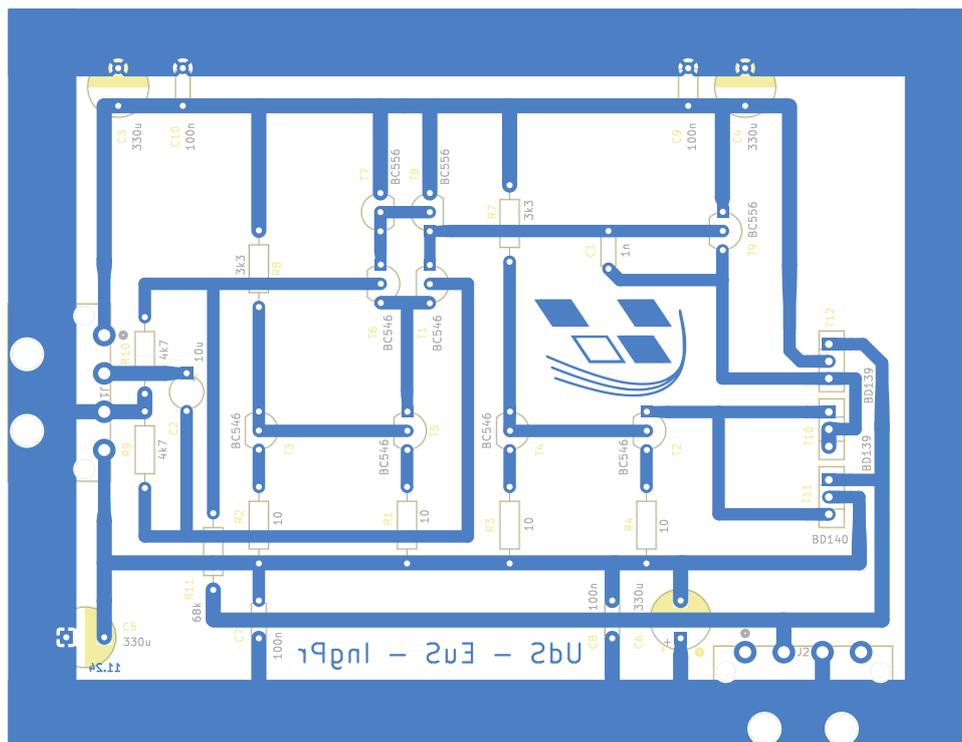
⁸Genauer gesagt stellt sich das Nullpotenzial automatisch aufgrund der Rückkopplung durch R_{10} und R_{11} , vgl. Abbildung 3.1a, ein.

⁹Für Experten: Das Abschneiden des Signals verursacht Oberschwingungen, welche bspw. durch Fouriertransformation des Signals gezeigt werden können. Da diese Oberschwingungen unangenehme Nebengeräusche (Klirren) verursachen, verschlechtert (vergrößert) sich der Klirrfaktor mit größer werdendem Oberschwingungsanteil. Zur Vermeidung der Oberschwingungen ist es notwendig, eine lineare Übertragung auch der Nulldurchgänge der Transistoren sicherzustellen. Hierfür muss die BE-Spannung nahe an der Flussspannung der BE-Diode (ca. 800 mV) gehalten werden.

3 Schaltplan, Layout



a)



b)

Abbildung 3.1: a) Der Schaltplan des HiFi-Leistungsverstärkers mit Bauteilwerten.
b) Das Layout der zu bestückenden Platine (Draufsicht).

4 Aufgaben

- Machen Sie sich die Funktionsweise der Schaltung, soweit mit ihrem Vorwissen möglich, klar. Sollten Sie Fragen haben, wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter.
- Zeigen Sie mit Hilfe von Abbildung 2.6, dass der Ausgangsstrom am Knoten N_1 mit aktiver Last stets verdoppelt wird.
- Bestücken Sie die Platine mit den Bauteilen, die Werte sind im Schaltplan (Abbildung 3.1a) vermerkt. Achten Sie auf die korrekte Polarität bei Transistoren und Elektrolytkondensatoren. Die Anschlussbelegungen der Transistoren können den ausliegenden Datenblättern entnommen werden.
- Abschließend erfolgt ein Funktionstest mit Ansteuerung eines Lautsprechers, sowie weiteren Erläuterungen durch den Versuchsleiter.