

Bericht zum Versuch Transistor

Anton Haase, Michael Goerz

22. September 2005

GP II

Tutor: K. Lenz

1 Einführung

Funktionsweise des Transistors

Ein Transistor ist ein elektronisches Bauelement, welches auf der Verwendung unterschiedlich dotierter Halbleiter basiert.

Die Beschreibung eines Halbleiters erfolgt im Bändermodell eines Festkörpers. Dabei bilden die diskreten Energieniveaus der Elektronen in den Schalen der Atome durch die Überlappung der Elektronenwolken verschieden große näherungsweise kontinuierliche Energiebänder, in denen sich Elektronen aufhalten und bewegen können. Bei Festkörpern unterscheidet man im Allgemeinen zwischen einem voll besetzten Valenzband, das alle Elektronen der äußersten Atomschale enthält und einem leeren Leitungsband, in dem sich die Elektronen potentiell frei durch den Festkörper bewegen können (siehe Abb. 1). Bei Metallen und anderen Leitern ist der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband gleich Null oder es gibt sogar eine Überlagerung der beiden Bänder. Diese Stoffe können den elektrischen Strom bei fast jeder Temperatur leiten, da stets Valenzelektronen als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Anders ist dies bei Halbleitern. Dort besteht ein geringer, aber merklicher Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband, so dass die Elektronen erst durch thermische oder elektrische Anregung in das Leitungsband angehoben werden müssen bevor eine elektrische Leitung stattfinden kann. Bei dieser Anhebung hinterlassen sie sog. Elektronenfehlstellen (Löcher) im Valenzband.

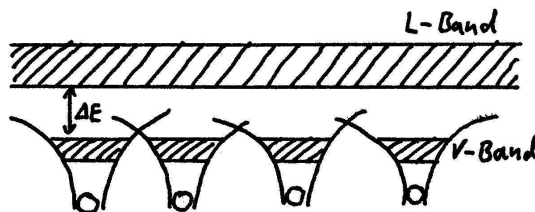


Abb. 1: Bändermodell

Bei dotierten Halbleitern, wie sie zum Bau eines Transistors benötigt werden, sind Fremdelemente in die Gitterstruktur des Grundelements (z.B. Silizium) ein-

gebracht, so dass entweder ein zusätzliches Valenzelektron zur Verfügung steht (n-dotiert) oder eines fehlt (p-dotiert). Die Art der Dotierung entscheidet auch über das Vorzeichen der Ladungsträger, die für den Strom verantwortlich sind. In einem n-Halbleiter sind es die Elektronen, in einem p-Halbleiter hingegen die Elektronenfehlstellen (Löcher).

Die Kombination beider Typen, wie in Abb. 2 dargestellt, ist bereits eine einfache Richtungsdiode. An der Grenzschicht zwischen den beiden Halbleitern kommt es zu einem Ausgleich der Ladungsträger. Da die Ladungsträger nicht beliebig weit in das jeweilig andere Material eindringen können (zu hoher Widerstand), entsteht eine Potentialdifferenz in einem ladungsarmen Raum nahe der Grenzschicht (siehe Abbildung), sodass der Ausgleichsvorgang nicht weiter stattfinden kann. Es stellt sich also ein Gleichgewicht ein.

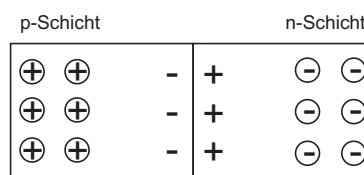


Abb. 2: n-p-Grenzschicht

Legt man nun eine Spannung an, sodass das n-dotierte Material am negativen Pol und das p-dotierte Material am positiven Pol liegt, so werden die jeweiligen Materialien wieder mit positiven (p-Seite) bzw. negativen Ladungen (n-Seite) überflutet. Das zuvor eingestellte Gleichgewicht besteht nicht mehr, so dass wieder ein Ladungsausgleich beginnt. Es fließt also ein Strom. Dreht man die Polung um, so werden jeweils noch freie Ladungen abgezogen und die Potentialdifferenz an der Grenzschicht vergrößert. Damit kann kein Ladungsausgleich stattfinden und auch kein Strom fließen.

Ein Transistor erhält man, wenn man die Anordnung aus Abb. 2 noch um eine weitere n-Schicht ergänzt, wie in Abb. 3 dargestellt. In diesem Fall handelt es sich um einen npn-Transistor. Der ebenfalls mögliche pnp-Transistor wird hier nicht weiter behandelt. Schließt man hier wieder eine Spannung an, sodass der negative Pol am Emitter und der positive Pol am Kollektor liegt, fließt auf Grund der Sperrschicht am Kollektor zunächst kein Strom. Wird jedoch noch eine positive Spannung an der Basis angelegt, so erfolgt eine „Freischaltung“ der Emitter-Kollektor-Strecke und es fließt ein Strom. Ein geringer Teil des Stroms fließt jedoch auch über die Emitter-Basis-Strecke ab. Dieser kann jedoch durch geeignete Bauweise auf 1% des Emitter-Kollektor-Stroms reduziert werden.

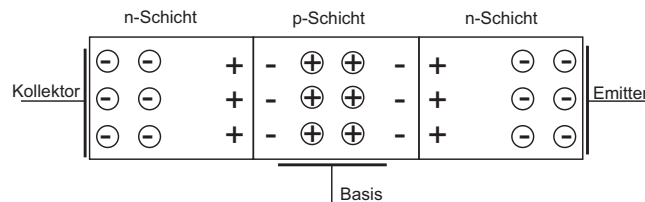


Abb. 3: Transistor

Ein Transistor kann somit als Verstärker oder elektronischer Schalter genutzt

werden.

Kennlinienfeld eines Transistors

Ein angeschlossener Transistor wird durch sechs Größen vollständig beschrieben. Gemäß der Kirchhoffschen Knotenregel muss die Summe aller drei möglichen Ströme gleich Null sein. An jedem Anschluss kann ein Strom fließen, es gibt somit den Kollektorstrom I_C , den Emitterstrom I_E und den Basisstrom I_B , wobei gilt

$$I_B + I_C + I_E = 0. \quad (1)$$

Analog gilt für die drei möglichen Spannungen Basis-Emitter-Spannung U_{EB} , Emitter-Kollektor-Spannung U_{EC} und Basis-Kollektor-Spannung U_{BC} ,

$$U_{EC} = U_{BC} + U_{EB}. \quad (2)$$

Aus diesen Größen setzt sich das statische Kennlinienfeld eines Transistors, wie in Abb. 4 dargestellt, zusammen. Die zugehörige Schaltung entspricht der in Abb. 5 dargestellten, allerdings ohne den Arbeitswiderstand R_A (statischer Fall)

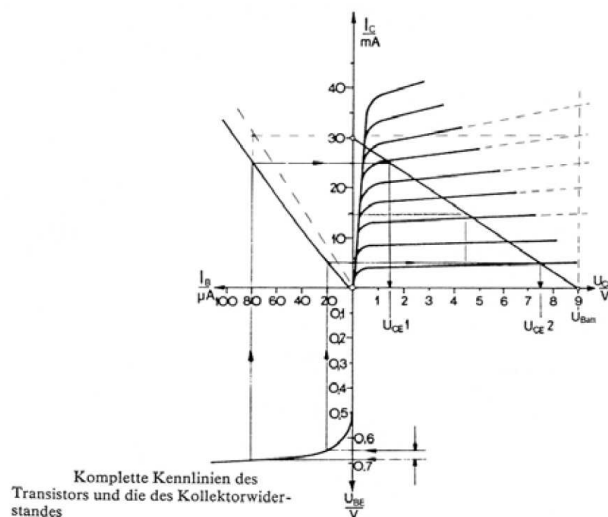


Abb. 4: Kennlinienfeld eines Transistors

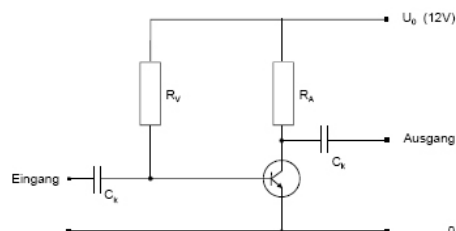


Abb. 5: Verstärkerschaltung

Der erste Quadrant zeigt die Kennlinien des Kollektorstroms über der Kollektor–Emitter–Spannung aufgetragen. Dabei lässt sich feststellen, dass nur eine geringe Abhängigkeit des Stroms von der Spannung besteht, da die Kurven im weiteren Verlauf nur leicht ansteigen. Der starke Anstieg am Anfang lässt sich durch die Basisschwellspannung erklären, welche zunächst erreicht werden muss, damit der Emitter–Kollektor–Weg „freigeschaltet“ wird. Der unterschiedlich starke Stromfluss wird durch die Stärke des Basisstroms I_B bestimmt. Die fallende Gerade kommt erst nach dem Einfügen des Arbeitswiderstandes ins Spiel und beschreibt die durch eben diesen Widerstand vorgegebene Strom–Spannungs–Beziehung. Somit ist der Betrag der Steigung nach dem Ohmschen Gesetz wieder der Widerstand R_A .

Im zweiten Quadranten wird der Kollektorstrom I_C über dem Basisstrom I_B aufgetragen. Der Betrag der Steigung der Geraden gibt die Verstärkung des Stroms zwischen Eingang und Ausgang an. Der zugehörige Koeffizient wird β genannt und ist wie folgt definiert:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (3)$$

Der dritte Quadrant zeigt die einfache Kennlinie einer Diode, wie sie bereits anfangs beschrieben wurde, da der Basis–Emitter–Übergang letztendlich nichts anderes ist, als ein solches Bauteil. Hier gibt es ebenfalls eine Schwellspannung, die zum Aufbau eines Stromflusses erreicht werden muss.

Im vierten Quadranten wird die Rückwirkung der Emitter–Kollektor–Spannung auf die Basis–Emitter–Spannung festgehalten.

Untersuchte Schaltungsbeispiele

Die zuerst untersuchte Verstärkerschaltung ist bereits in Abb. 5 dargestellt. Sie bewirkt die Verstärkung einer zwischen Eingang und Erde angelegten Spannung, welche dann zwischen Ausgang und Erde abgegriffen werden kann. Damit auch das Anlegen einer Wechsellspannung ermöglicht wird, muss dieser eine Gleichspannung überlagert werden, so dass die Spannungsschwankung innerhalb der Schaltung und am Transistor nur im positiven Bereich stattfindet. Zu diesem Zweck wird durch geeignete Wahl des Arbeitswiderstandes ein Arbeitspunkt (also eine Grundspannung von z.B. 6 V) eingestellt. Die Berechnung der Spannungsverstärkung erfolgt aus den Spannungsdifferenzen, bzw. über das Ohmsche Gesetz durch die Stromverstärkung β

$$v = \frac{\Delta U_{EC}}{\Delta U_{EB}} = \frac{\beta \cdot R_A}{r_{EB}}, \quad (4)$$

wobei r_{EB} der differentielle Eigenwiderstand $\frac{\Delta U_{EB}}{\Delta I_B}$ ist.

Ein Problem dieser Schaltung ist die Veränderung der Widerstände innerhalb des Transistors durch thermische Einflüsse oder Reaktionen. Um dies zu vermeiden wird eine Parallelgegenkopplung eingebaut, bei der ein Teil der verstärkten Ausgangsspannung invertiert auf den Eingang zurückgeführt wird und somit eine Veränderung des Verstärkungsverhältnisses verhindert. Die entsprechende Schaltung ist in Abb. 6 dargestellt. Die Schwankung der Ausgangsspannung kann über den Rückkopplungsfaktor $\alpha = \frac{U_{EB}}{U_{EC}}$ auch quantitativ erfasst werden. Dabei gilt:

$$\Delta U_{EC} = \frac{\Delta U_{EC}}{1 + \alpha v} \quad (5)$$

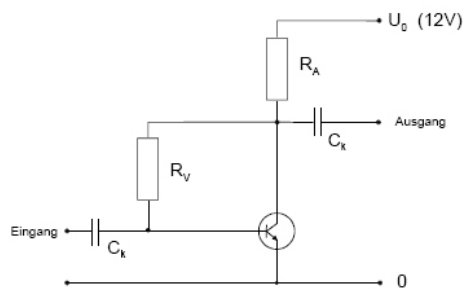


Abb. 6: Verstärkerschaltung mit Parallelgegenkopplung

2 Aufgaben

1. Aufnahme und Konstruktion des (statischen) Kennlinienfeldes eines npn-Transistors für eine angenommene Betriebsspannung (Versorgungsspannung) von 12 V. Bestimmung der Stromverstärkung für den statischen Fall.
Aufbau einer Verstärkerstufe mit einer Parallel-Gegenkopplung zur Stabilisierung.
2. (a) Dimensionierung der Schaltung: Abschätzung des Arbeitswiderstandes und des Basisvorwiderstandes.
(b) Experimentelle Überprüfung der Kollektor-Widerstandsgeraden durch Variation des Basisvorwiderstandes und Bestimmung der Stromverstärkung.
(c) Verstärkung einer Eingangs-Wechselspannung als Signal. Messung der Spannungsverstärkung und Vergleich mit der theoretischen Erwartung.

3 Auswertung

3.1 Kennliniendiagramm des Transistors

In der zuerst aufgebauten Schaltung wurden die verschiedenen Spannungen und Ströme am Transistor gemäß der Schaltskizze aus dem Messprotokoll bestimmt. Aus diesen Werten wurde das Kennliniendiagramm erstellt, welches sich am Ende dieser Auswertung befindet. Alle Berechnungen (außer die des differentiellen Eigenwiderstands) wurden anhand separater Plots vorgenommen, die bei den jeweiligen Aufgaben eingefügt wurden. Das gezeichnete Diagramm dient somit ausschließlich der qualitativen Begutachtung des Versuchs.

Die Fehler sämtlicher x-Werte wurden mit der Steigung der jeweiligen Ausgleichsgeraden auf die y-Fehler umgerechnet.

3.2 Statische Stromverstärkung und Eigenwiderstand

Die statische Stromverstärkung ergibt sich laut Gleichung (3) aus der Steigung der Ausgleichsgeraden in der Abb. 7.

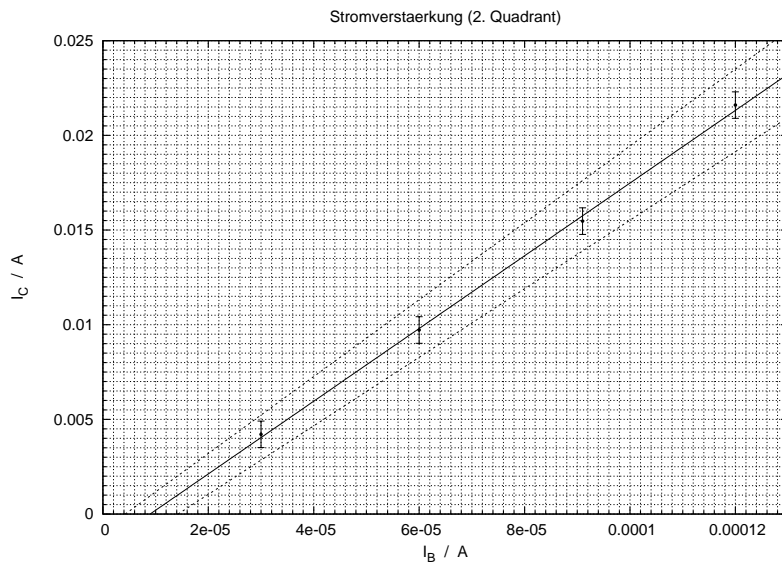


Abb. 7: Statische Stromverstärkung

Die Anwendung des Verfahrens der Linearen Regression ergab einen Wert von

$$\beta = (192 \pm 11) \quad (6)$$

Der differentielle Eigenwiderstand wurde direkt aus dem Kennliniendiagramm abgelesen. Auf Grund der kleinen Einheit des Basisstroms, liegt der relative Fehler bei 15 %.

$$r_{EB} = (2500 \pm 400) \Omega \quad (7)$$

3.3 Verstärkerschaltung

In einem zweiten Experiment wurde eine Verstärkerschaltung mit Parallelgegenkopplung aufgebaut. Aus den Messdaten für die Kennlinien des 1. Quadranten

konnte ein Arbeitswiderstand für den gewünschten Arbeitspunkt bei 6 V bestimmt werden. Aus unseren Messdaten errechneten wir einen Wert von

$$R_A \approx 315 \Omega \quad (8)$$

Der tatsächlich verwendete Widerstand war jedoch mit 470Ω angegeben (Messwert: $R_A = (464 \pm 3) \Omega$).

Der Basisvorwiderstand sollte nach unseren Berechnungen etwa $42 \text{ k}\Omega$ betragen.

In einer Messung variierten wir nun den Basisvorwiderstand. Daraus erhielten wir Messwerte für die Kollektorwiderstandsgerade, welche in der Abb. 8 gemeinsam mit der erwarteten Widerstandsgeraden (dickere Linie) bei einer Versorgungsspannung von 12 V graphisch dargestellt ist.

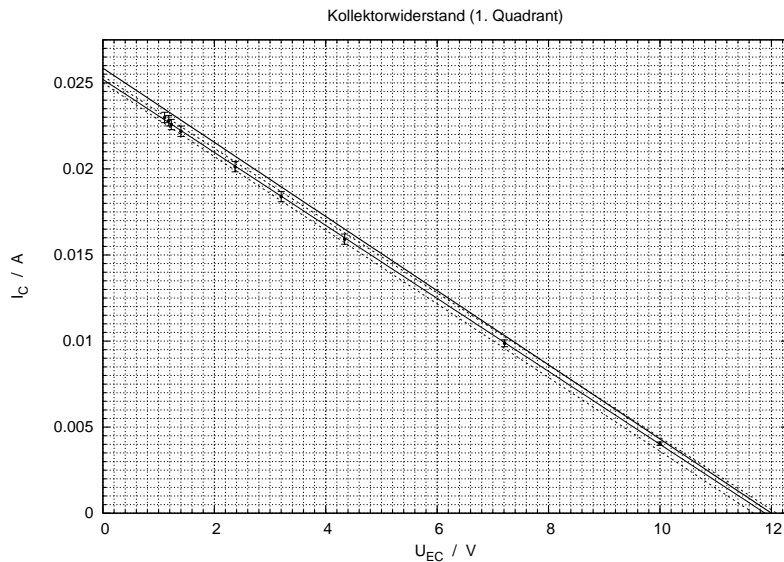


Abb. 8: Kollektorwiderstandsgerade

Aus dem Kehrwert des Betrags der Steigung erhält man nun den experimentell bestimmten Arbeitswiderstand. Dieser hatte einen Wert von

$$R_A = (472 \pm 5) \Omega. \quad (9)$$

Dieser Wert ist mit dem direkt gemessenen verträglich.

3.4 Dynamische Stromverstärkung

Aus den gewonnenen Messwerten im 2. Experiment kann zudem noch die dynamische Stromverstärkung bestimmt werden. In der Abb. 9 wurde dies anhand des dritten, vierten, fünften und sechsten Messwerts vorgenommen. Erwartungsgemäß ändert sich die Stromverstärkung je nach Basisvorwiderstand leicht.

Der aus der Steigung ermittelte Wert war

$$\beta_D = (137 \pm 10). \quad (10)$$

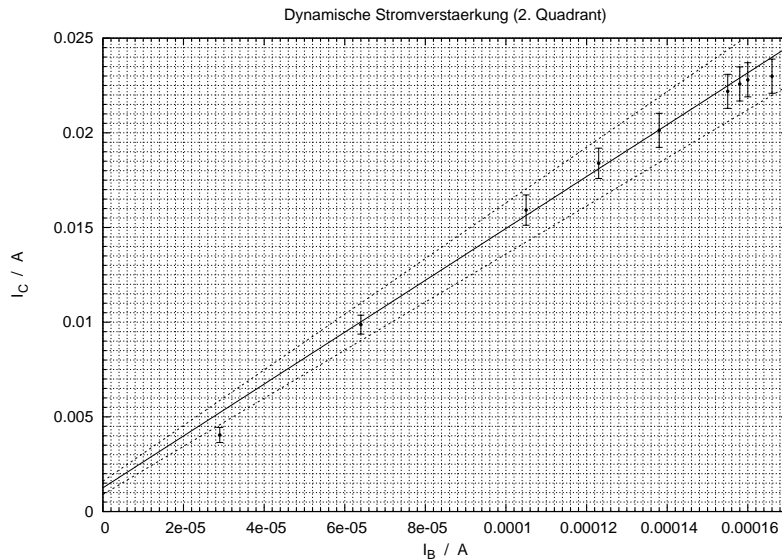


Abb. 9: Dynamische Stromverstärkung

3.5 Verstärktes Sinussignal

Im letzten Experiment wurde nun ein „echtes“ Sinussignal an den Eingang der Verstärkerschaltung gelegt und am Ausgang über ein Oszilloskop beobachtet. Die qualitativen Beobachtungen sind bereits im Messprotokoll beschrieben. Durch eine Überlagerung des Eingangs- und Ausgangssignals konnte die Spannungsverstärkung qualitativ abgeschätzt werden. Sie betrug bei einer Frequenz von ca. 1000 Hz und einem Basisvorwiderstand von 10 k Ω etwa den Faktor 5. Das Ausgangssignal war im Vergleich zum Original um $\pi/2$ Phasenverschoben. Der Grund dafür liegt natürlich in den eingebauten Kondensatoren.

Eine Änderung der Frequenz erbrachte auch eine erhebliche Änderung der Verstärkung, so dass die aufgebaute Schaltung nicht für einen tatsächlichen Einsatz als Frequenzverstärker geeignet gewesen wäre. Die Verkleinerung des Basisvorwiderstands ergab auch eine Verkleinerung der Spannungsverstärkung (wie im Realfall der Regler eines Verstärkers).

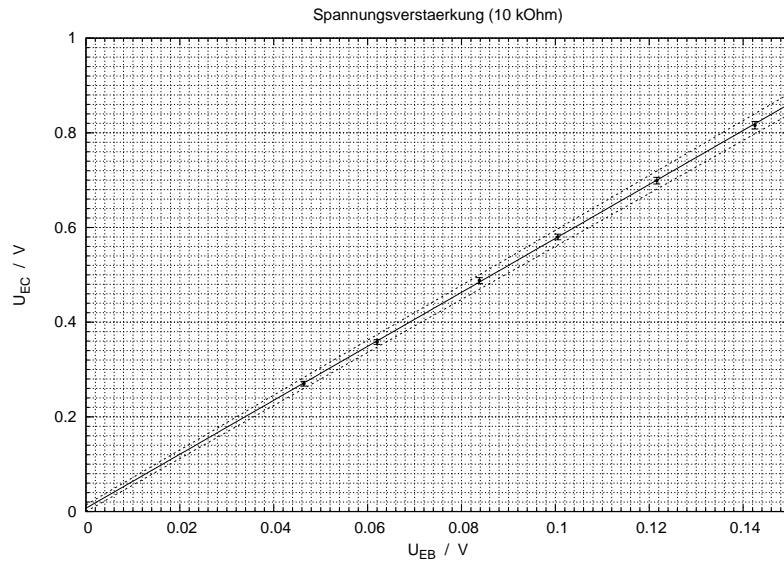
Bemerkenswert war zudem noch, dass ein zu großes Eingangssignal bzw. eine zu große Verstärkung zu einem Abschneiden der Amplitude des Ausgangssignals führte. Die Diskussion der Gründe für diese Beobachtung erfolgt unten.

Im Anschluss an die qualitative Begutachtung wurde noch eine quantitative Messung für zwei verschiedene Basisvorwiderstände vorgenommen. Diese sind im folgenden graphisch dargestellt.

Der aus der Steigung der Abb. 10 ermittelte Wert für die Spannungsverstärkung beträgt $v = (5,7 \pm 0,1)$. Er ist also mit der qualitativen Beobachtung verträglich (unter Berücksichtigung des hohen Fehlers der ersten Schätzung). Für einen Widerstand von 18 k Ω ergibt sich die in Abb. 11 dargestellte Gerade.

Der Wert der Verstärkung beträgt somit $v = (8,2 \pm 0,2)$.

Beide Werte sind signifikant unterschiedlich zu dem theoretisch ermittelten Wert, welcher nur von der dynamischen Stromverstärkung, dem Arbeitswiderstand und dem differentiellen Eingangswiderstand abhängt, nicht jedoch von

Abb. 10: Spannungsverstärkung bei $R_V = 10 \text{ k}\Omega$

der Frequenz, welche wie bereits beschrieben, einen sehr starken Einfluss auf die Spannungsverstärkung hat. Der theoretisch ermittelte Wert beträgt $v = (25 \pm 4)$.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Insgesamt betrachtet war der Versuch ein voller Erfolg. Es konnten alle relevanten Größen ohne Probleme berechnet werden. Bei der Auswertung der einzelnen Messergebnisse stellte sich heraus, dass es keine „Ausreißer“ vom erwarteten Wert gab. Die Bestimmung der Kennlinien des ersten Quadranten ($U_{EC} < 1,5 \text{ V}$) konnte auf Grund von nicht messbaren Bereichen nur geschätzt werden.

Die zunächst durchgeführte Bestimmung der Stromverstärkung zeigte einen linearen Verlauf mit sehr geringer Streuung um die Ausgleichsgerade. Der Schnittpunkt mit der y-Achse liegt im negativen, da der minimale Kollektorstrom bereits bei ca. $15 \mu\text{A}$ erreicht ist (Schwellspannung / -strom).

Die Analyse der Kollektorwiderstandsgeraden ergab eine Übereinstimmung (innerhalb der Fehlertoleranz) mit der theoretisch ermittelten Geraden. Leichte parallele Verschiebungen können von einer ungenauen Bestimmung der tatsächlichen Versorgungsspannung herrühren.

Der differentielle Eingangswiderstand wurde aus der handgefertigten Zeichnung bestimmt und ist auch auf Grund des kleinen Basisstroms nur sehr ungenau. Ein genauere Bestimmung war auf Grund der Messgenauigkeit der Geräte nicht möglich.

Zuletzt wurde schließlich noch die Verwendbarkeit der Schaltung als Frequenzverstärker überprüft. Die Berechneten Werte für die Spannungsverstärkung sind zwar sehr genau, variieren jedoch sehr stark in Abhängigkeit der Frequenz. Der Vergleich mit dem theoretischen Wert schlug fehl, weil dieser keinerlei Abhängigkeit von dem Basisvorwiderstand und der Frequenz berücksichtigt. Bereits auf dem Oszilloskop konnte die Verstärkung sehr gut eingeschätzt wer-

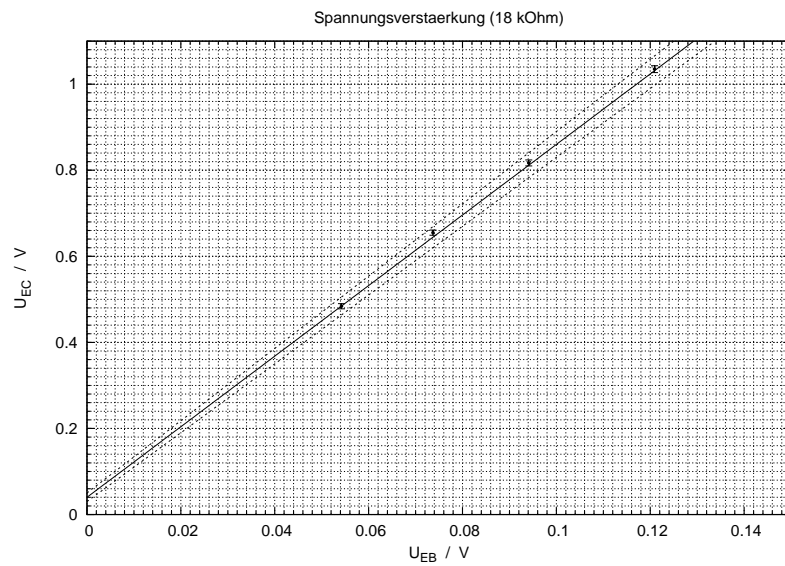


Abb. 11: Spannungsverstärkung bei $R_V = 18 k\Omega$

den. Der Grund für teilweise abgeschnittene Amplituden des Ausgangssignals liegt in der am Arbeitspunkt herrschenden Betriebsspannung von 6 V. Wird diese durch die Amplitude in den negativen Bereich gebracht, fließt kein Strom mehr durch den Transistor und das Signal wird „abgeflacht“.

Kennliniendiagramm Transistor

