

# Versuch V05: Bipolar- und Feldeffekttransistoren

Henri Menke\* und Jan Trautwein†

Gruppe 1-11 — Platz k

(Betreuer: Torsten Rendler)

(Datum: 18. November 2013)

In diesem Versuch werden die Eingangs- und Ausgangskennlinien von Bipolar- und Feldeffekttransistoren. Für den Bipolartransistor wird zudem die Stromverstärkung  $\mathcal{B}$ , für den Feldeffekttransistor die Steilheit  $\mathcal{S}$  an ausgezeichneten Punkten ermittelt.

## INHALT

I. Grundlagen	1
A. Halbleiter	1
B. Transistoren	1
1. Bipolartransistoren	1
2. Feldeffekttransistoren	2
II. Versuchsaufbau und -durchführung	2
A. Bipolartransistor	2
B. Feldeffekttransistor	3
III. Formeln	3
IV. Messwerte	3
V. Auswertung	3
A. Bipolartransistor	3
1. Stromverstärkung	3
2. Ausgangskennlinie	4
B. Feldeffekttransistor	4
1. Eingangskennlinie	4
2. Ausgangskennlinie	4
VI. Fehlerrechnung	5
VII. Zusammenfassung	5
Literatur	5

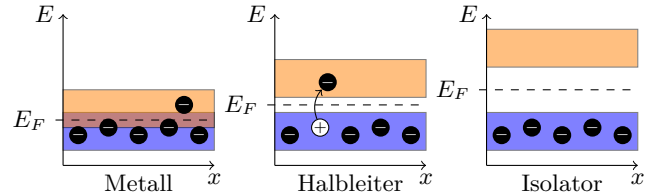


ABB. 1. Das Bändermodell. Das Leitungsband ist orange, das Valenzband blau dargestellt. Kreise mit einem „-“ sind Elektronen, Kreise mit einem „+“ sind Defektstellen.

Bandlücke und leiten von sich aus sehr schlecht, weshalb sie dotiert werden. Hat der zu dotierende Halbleiter vier Valenzelektronen, so wird er mit einem Element mit fünf Valenzelektronen verunreinigt um zusätzliche Leitungselektronen zu erhalten (n-Dotierung) oder mit einem Element mit drei Valenzelektronen um durch die entstehenden Defektstellen eine Löcherleitung zu etablieren (p-Dotierung).

Beim Kontakt einer p- mit einer n-Schicht beginnt ein Strom zu fließen, bei dem die Elektronen der n-Schicht in die Löcher der p-Schicht diffundieren und dort rekombinieren. So bildet sich eine Sperrschicht zwischen den beiden Schichten und der Rekombinationsprozess kommt zum Erliegen.

## B. Transistoren

### 1. Bipolartransistoren

Der schematische Aufbau eines Bipolartransistors (engl.: *bipolar junction transistor*, BJT) mit npn-Belegung ist in Abbildung 2 zu sehen. Der Bipolartransistor verfügt über drei Anschlüsse: Basis, Emitter und Kollektor. An den n-p bzw. p-n-Übergängen entstehen Sperrschichten, das entstehende elektrische Feld wirkt einer weiteren Diffusion entgegen. Eine der beiden Sperrschichten ist auf jeden Fall in Sperrrichtung geschaltet, wenn man einen Strom anlegt.

Legt man nun einen Strom zwischen Emitter und Basis an, sodass die Sperrschicht dazwischen durchlässig wird, so treten Elektronen aus dem Emitter in die Basis ein und es fließt ein Strom  $I_{BE}$ . Die p-Schicht wird daraufhin mit Elektronen geflutet und die p-n-Schicht zwischen Basis und Kollektor wird durchlässig. Somit besteht eine

Ein Transistor oder eine Diode ist in der Regel aus einem Halbleiter aufgebaut. Der Unterschied zwischen normalen Leitern, Halbleitern und Isolatoren besteht in der Lage der Fermienergie im Bezug auf die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Eine Illustration ist in Abbildung 1 abgebildet.

Bei Leitern ist keine Bandlücke vorhanden, bei Isolatoren ist sie sehr groß. Halbleiter haben eine kleine

\* henrimenke@gmail.com

† jan.manuel.trautwein@web.de

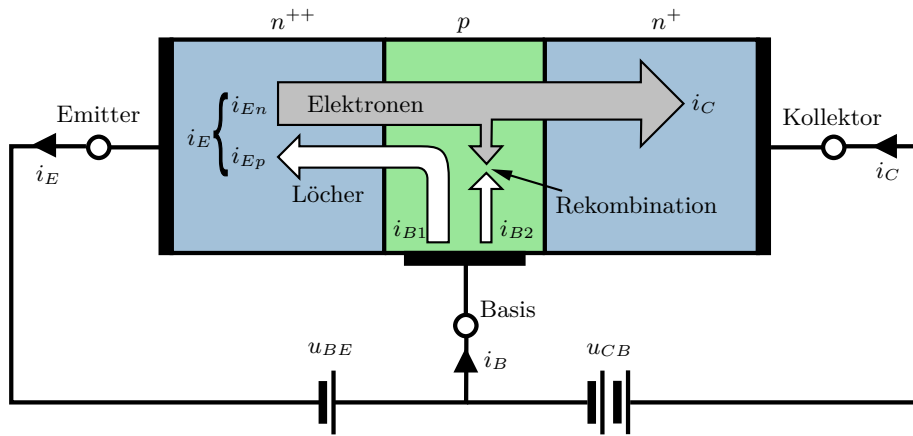


ABB. 2. Funktionsweise eines Bipolartransistors aus [1]

Verbindung zwischen Kollektor und Emitter und es kann ein Strom hindurchfließen.

Legt man den Strom zwischen Basis und Emitter anders herum an, so bleiben die Sperrschichten undurchlässig und nichts passiert. Der Transistor wird also durch den Strom zwischen Basis und Emitter  $I_{BE}$  gesteuert.

Die Eingangskennlinie  $I_B$  eines BJT sieht aus wie die einer Diode, die Ausgangskennlinie  $I_C$  steigt exponentiell an, bis ein durch  $I_B$  festgelegter Grenzwert erreicht wird.

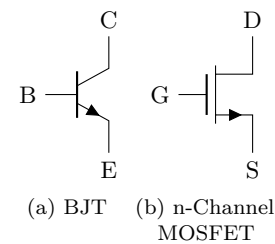


ABB. 3. Schaltsymbole für Transistoren.

## 2. Feldeffekttransistoren

Anders als BJTs werden Feldeffekttransistoren (engl.: *field effect transistor*, FET) durch das durch die anliegende Spannung erzeugte elektrische Feld gesteuert. Ein FET hat ebenfalls drei Anschlüsse, die jedoch Source, Gate und Drain heißen. Die Steuerspannung am Gate steuert die Leitfähigkeit.

Zwei Ausführungen von FETs sind der JFET und der MOSFET.

**JFET:** Ein JFET ist aus einem n dotierten Kanal zwischen Source und Drain mit einer p dotierten Elektrode namens Gate darin. Die Sperrschicht am p-n-Übergang wächst in den n-Kanal hinein und kann diesen blockieren. Die Sperrschicht wächst mit steigender Spannung zwischen Gate und Source  $U_{GS}$ .

**MOSFET:** Der Aufbau ist ähnlich dem eines JFETs bis darauf hin, dass sich zwischen Gate und Kanal ein Isolator befindet. Ein durch die Spannung  $U_{GS}$  erzeugtes elektrisches Feld beeinflusst die Elektrodendichte im Kanal.

Da bei FETs der Übergang zwischen Gate und Source in Sperrrichtung betrieben wird ist der Strom nur sehr klein. Der Strom zwischen Drain und Source lässt sich quasi *stromlos* steuern. Man spricht deshalb von spannungsgesteuerten Widerständen.

## II. VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

### A. Bipolartransistor

Die Schaltung wird gemäß der Versuchsanleitung aufgebaut. Die Strom- und Spannungsbegrenzungen werden ebenfalls gesetzt um eine Überhitzung des Transistors zu verhindern.

*Durchführung:* Es wird bei konstanter Emitter-Kollektor-Spannung  $U_{EC}$  von 10 V die Basis-Spannung  $U_B$  durchgeföhren. Zunächst werden Basisstrom  $I_B$ , Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  und Kollektorstrom  $I_C$  von Hand notiert. Im Anschluss wird ein LabVIEW-Programm verwendet, das die Werte vollautomatisch durchföhrt.

Im nächsten Versuchsteil soll die Ausgangskennlinie des Bipolartransistors bei den Basisströmen  $I_B = 3 \mu\text{A}$ ,  $10 \mu\text{A}$ ,  $30 \mu\text{A}$  gemessen werden. Dazu wird in den Messwerten aus dem vorangegangenen Versuchsteil geschaut, bei welchen Steuerspannungen  $U_{St}$  die entsprechenden Basisströme auftreten. Außerdem wird LabVIEW entsprechend angepasst, sodass der Kollektorstrom  $I_C$  gegen die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  aufgetragen wird.

## B. Feldeffekttransistor

An der Schaltung wird nun der Bipolartransistor mit dem Feldeffekttransistor ausgetauscht und die Polarität der Basisspannung umgepolt.

*Durchführung:* Die Durchführung läuft analog. Zuerst werden die Messwerte für die Eingangskennlinie von Hand aufgenommen, anschließend mit Hilfe von LabVIEW. Dann wird bei drei verschiedenen Werten der Gate-Source-Spannung  $U_{GS}$ , der Drainstrom  $I_D$  in Abhängigkeit von der Drain-Source-Spannung  $U_{DS}$  mit LabVIEW gemessen.

## III. FORMELN

Die folgenden Zeichen und Einheiten wurden im Weiteren verwendet

- $P$  in Watt (W): Leistung
  - Index  $V$ : Verlustleistung
  - Index therm: Über therm. Kontakt fließende Leistung
- $U_{CE}$  in Volt (V): Kollektor-Emitter-Spannung
- $I_C$  in Watt (W):
- $I_B$  in Ampere (A): Basistrom
- $\mathcal{B}$  ohne Einheit: Stromverstärkung
- $I_D$  in Ampere (A): Drainstrom
- $U_{GS}$  in Volt (V): Gate-Source-Spannung
- $\mathcal{S}$  in Ampere pro Volt ( $A V^{-1}$ ): Steilheit

**Leistung:** Die im Bipolartransistor verbrauchte Leistung  $P_V$  berechnet sich nach:

$$P_V = U_{CE} \cdot I_C \quad (1)$$

**Stromverstärkung:** Für die Stromverstärkung  $\mathcal{B}$  des Bipolartransistors gilt:

$$\mathcal{B} = \frac{I_C}{I_B} \quad (2)$$

**Steilheit:** Für die Steilheit des Feldeffekttransistors gilt:

$$\mathcal{S} = \left. \frac{\delta I_D}{\delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}} \quad (3)$$

## IV. MESSWERTE

Die handschriftlich aufgenommenen Messwerte sind nochmals in den Tabellen I und II dargelegt. Ein handschriftliches Original befindet sich im Anhang.

Basisstrom $I_C$ [ $\mu A$ ]	$U_{BE}$ [V] <sup>a</sup>	Kollektorstrom $I_C$ [mA]
1	0.609	0.285
3	0.634	0.779
10	0.662	2.584
30	0.680	8.328
100	0.625	31.000
165	0.611	50.000

<sup>a</sup> Dabei ist  $U_{BE}$  die Basis-Emitter-Spannung.

TAB. I. Manuell gemessene Werte zur Bestimmung der Stromverstärkung bis zum Erreichen des maximalen Kollektorstroms.

$U_{St}$ [V] <sup>a</sup>	$U_{GS}$ [V] <sup>b</sup>	$I_D$ [mA] <sup>c</sup>	$I_G$ [mA] <sup>d</sup>
0.5	-0.5	9.9	0.000 01
1.0	-0.99	7.5	0.000 01
1.5	-1.49	5.4	0.000 01
2.0	-1.99	3.58	0.000 01
2.5	-2.49	1.98	0.000 02
3.0	-2.99	0.74	0.000 03
3.5	-3.49	0.0001	0.000 03
4.0	-3.98	0.0001	0.000 03
4.5	-4.48	0.0001	0.000 04
5.0	-4.98	0.0001	0.000 05
5.5	-5.48	0.0001	0.000 05
6.0	-5.97	0.0001	0.000 06

<sup>a</sup>  $U_{St}$ : Steuerspannung

<sup>b</sup>  $U_{GS}$ : Gatespannung

<sup>c</sup>  $I_D$ : Drainstrom

<sup>d</sup>  $I_G$ : Gestrom

TAB. II. Manuell erfasste Messwerte vom Feldeffekttransistor.

## V. AUSWERTUNG

### A. Bipolartransistor

#### 1. Stromverstärkung

Wird die Stromverstärkung  $\mathcal{B}$  nach Formel (2) mit den von Hand aufgenommenen Werten (siehe Tabelle I) in jedem Messpunkt berechnet und der Mittelwert gebildet, ergibt sich:

$$\mathcal{B} = 282$$

Die mit LabVIEW aufgenommenen Werte werden mit **gnuplot** in ABB. 4 geplottet,  $\mathcal{B}$  ist dann die Steigung der an die Messpunkte gelegten Fitgeraden. Die Fitfunktion lautet

$$\mathcal{F}_B = \mathcal{B} \cdot I_B$$

Der Fitparameter  $\mathcal{B}$  ergibt sich zu

$$\mathcal{B} = 288.186 \pm 0.693$$

Dieser Wert stimmt bis auf eine Abweichung von ca. 2% mit dem manuell bestimmten überein.

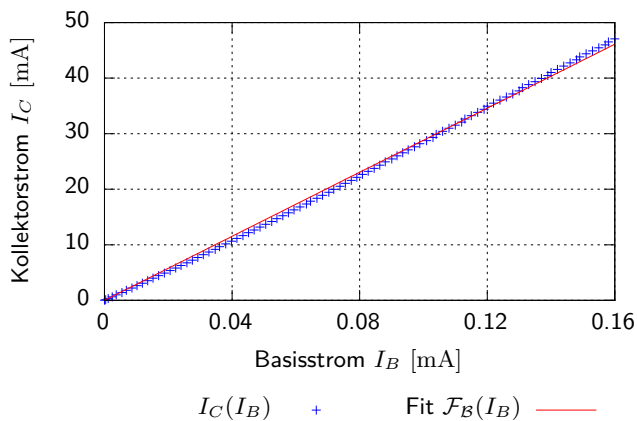


ABB. 4. (LabVIEW-Daten) Für die Stromverstärkung wurde der Kollektorstrom über dem Basisstrom aufgetragen.

Die am Transistor dissipierte elektrische Leistung  $P_V$  berechnet sich nach Formel (1). Die dissipierte Leistung wird über den Basisstrom  $I_B$  aufgetragen, es ergibt sich das Schaubild in ABB. 5.

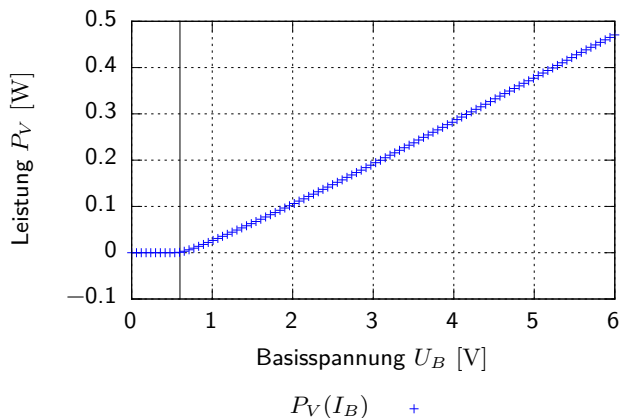


ABB. 5. (LabVIEW-Daten) Die Leistung wurde berechnet unter der Voraussetzung, dass  $U_{CE} = 10 \text{ V}$  ist.

## 2. Ausgangskennlinie

Nun wird die Ausgangskennlinie für 3 verschiedene Basisströme  $I_B$  gemessen. Aus den Messdaten des vorherigen Versuchteils, kann die zugehörige Steuerspannung ablesen:

- $I_B = 3 \mu\text{A}$ ,  $U_{St} = 0.74 \text{ V}$
- $I_B = 10 \mu\text{A}$ ,  $U_{St} = 1.0 \text{ V}$
- $I_B = 30 \mu\text{A}$ ,  $U_{St} = 1.71 \text{ V}$

Das Ausgangskennlinienfeld erhält man, indem man den Kollektorstrom  $I_C$  über die Kollektor-Emitter-Spannung plottet, siehe dazu ABB. 6.

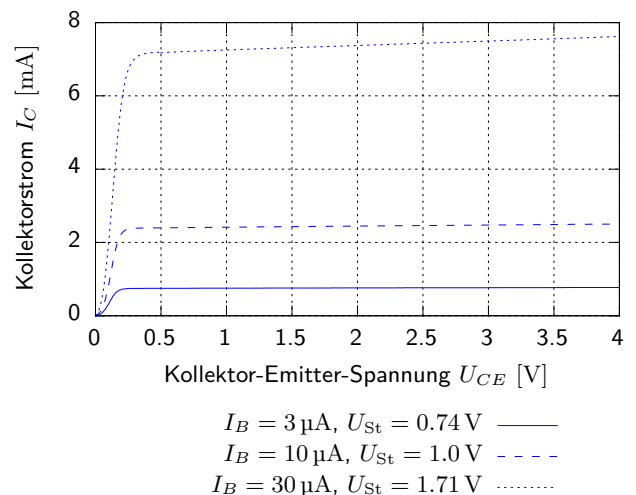


ABB. 6. (LabVIEW-Daten) Für die Ausgangskennlinie wurde der Kollektorstrom  $I_C$  gegen die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  aufgetragen.

## B. Feldeffekttransistor

### 1. Eingangskennlinie

Die Eingangskennlinie des Feldeffekttransistors ist in Abbildung 7 abgebildet. Es gibt zwei Möglichkeiten die Steilheit der Eingangskennlinie zu bestimmen.

1. Die Eingangskennlinie selbst kann gefittet werden, z. B. mit einer Fitfunktion der Form

$$\mathcal{F}_{a,b,c}(U_{GS}) = a \left( 1 + \frac{U_{GS}}{b} \right)^2 + c.$$

Leitet man diese Fitfunktion ab, so erhält man die Steilheit in jedem Punkt durch einsetzen.

$$\mathcal{F}'_{a,b}(U_{GS}) = 2 \cdot \frac{a}{b} \left( 1 + \frac{U_{GS}}{b} \right)$$

2. Die Eingangskennlinie kann stückweise durch lineare Fits der Form

$$\mathcal{F}_S(U_{GS}) = \mathcal{S} \cdot U_{GS} + c$$

angenähert werden. Für die Linearisierung wurde die Funktion an ein Intervall  $[U_{GS}^* - 0.1, U_{GS}^* + 0.1]$  gefittet.

Zum besseren Vergleich wurden die durch die beiden unterschiedlichen Fitfunktionen erhaltenen Steilheiten in Tabelle III gegenübergestellt.

### 2. Ausgangskennlinie

In ABB. 8 sind Ausgangskennlinien für die Gatespannungen  $\{0 \text{ V}, -0.83 \text{ V}, -1.96 \text{ V}\}$  geplottet. Man erkennt,

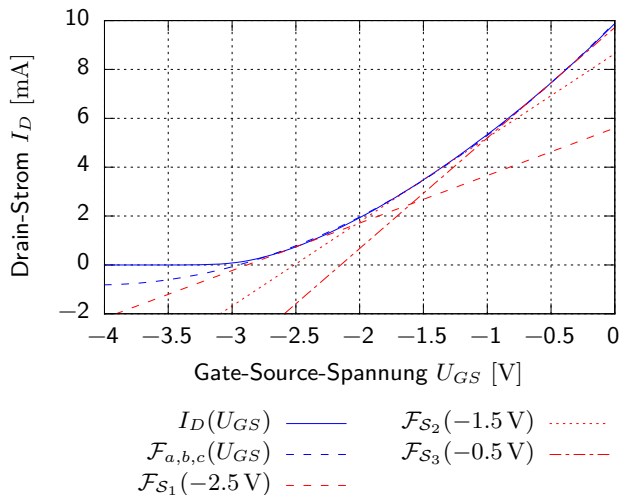


ABB. 7. (LabVIEW-Daten) Eingangskennlinie  $I_D(U_{GS})$  des JFETs.

$U_{GS}$ [V]	$\mathcal{F}'_{a,b}$ [ $A V^{-1}$ ]	$\mathcal{F}_S$ [ $A V^{-1}$ ]
-0.5	4.63	4.52
-1.5	3.33	3.44
-2.5	2.04	1.94

TAB. III. Die Steilheit  $\mathcal{S}$  wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden bestimmt.

dass je kleiner die Steuerspannung am Gate  $U_G$  ist, desto größer ist der Drain-Strom  $I_D$ . Für kleine Drain-Source-Spannungen  $U_{DS}$  steigt der Drain-Strom  $I_D$  nahezu linear an, während er für große  $U_{DS}$  gegen einen konstanten Grenzwert strebt. Auf Grund des linearen Verhaltens bei kleinen Drain-Source-Spannungen  $U_{DS}$  kann der Feldeffekttransistor in diesem Bereich als verstellbarer ohmscher Widerstand verwendet werden.

## VI. FEHLERRECHNUNG

Die im mit der Versuchsanleitung mitgelieferten Datenblatt aufgeführten Literaturwerte können nicht reproduziert werden, da das dafür erforderliche Setup nicht nachgebildet werden kann. Trotz der ansonsten qualitativen Natur des Versuches sind die folgenden Fehlerquellen zu berücksichtigen:

- Die Messgeräte und das Netzgerät haben eine unbekannte Anzeigenauigkeit.
- Die Leitfähigkeit des Halbleiters im Transistor ist temperaturabhängig und die Raumtemperatur ist unbekannt.

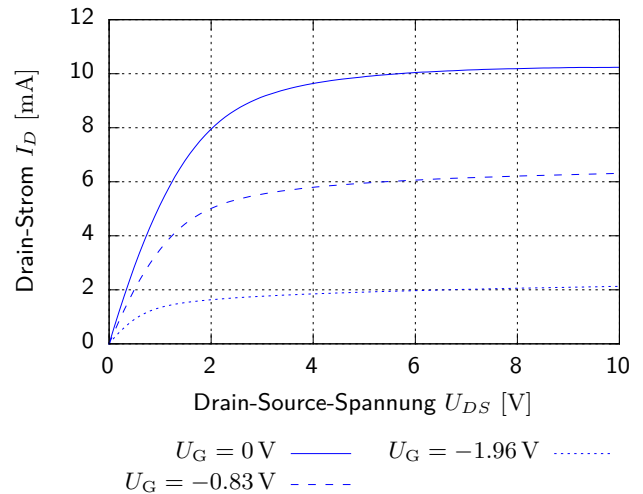


ABB. 8. (LabVIEW-Daten) Ausgangskennlinie  $I_D(U_{DS})$  des JFETs.

## VII. ZUSAMMENFASSUNG

Im Versuch wurden ein npn-Bipolartransistor und ein JFET-Feldeffekttransistor untersucht.

Für den Bipolartransistor wurden die Stromverstärkung berechnet, sowie die Verlustleistung und die Ausgangskennlinie geplottet. Die Stromverstärkung ergab sich aus der manuellen Messung zu  $\mathcal{B} = 282$  und mit einem Fit an die LabVIEW-Messung zu  $\mathcal{B} = 288$ . Die Ausgangskennlinien wurden bei Basisströmen von  $3 \mu A$ ,  $10 \mu A$  und  $30 \mu A$  geplottet, wobei die Form der Kurven der Erwartung entspricht.

Für den Feldeffekttransistor wurden die Eingangskennlinie und einige Ausgangskennlinien aufgezeichnet. Aus der Eingangskennlinie wurde deren Steilheit ermittelt. Die Ausgangskennlinien wurden für  $0 \mu A$ ,  $-0.83 \mu A$  und  $-1.96 \mu A$  geplottet. Es ist klar zu erkennen, dass mit (betragsmäßig) steigender Gatespannung der Drain-Strom abnimmt.

[1] Wikipedia, "Bipolartransistor," (2013), accessed 2013-09-30.

[2] Versuchsanleitung, Universität Stuttgart (2013).