

Fakultät für Physik

**SS 14**

**Physikalisches Praktikum  
für das Bachelorstudium**

**PROTOKOLL**

**Experiment (Nr., Titel):**

PS08 Halbleiter 2 - Transistoren und  
Verstärkungsschaltungen

**Datum:** 03.04.2014

**Namen:** Patrick Braun, Johannes Kurz

**Kurstag/Gruppe:** DO/4

**Betreuer:** Johanna Akbarzadeh

In PS08 wird die Funktionsweise und das Verhalten von Transistoren untersucht, sowie konkret diverse Kennlinien einerseits eines bipolaren Transistors und andererseits eines Feldeffekttransistors gemessen und dargestellt.

Ein Transistor ist ein Bauteil in dem eine Eingangsspannung ein Ausgangssignal steuert, also ein steuerbarer (genauer "übertragender") Widerstand. Sowohl als elektronische Bauelemente (wie zum Beispiel in den Messungen dieser Experimente) wie auch innerhalb von integrated circuits oder Mikrochips, in Mengen bis zu einer Größenordnung von  $10^{10}$  Transistoren pro Chip, sind verschiedene Typen ausgeführt.

# 1 Bipolartransistor

## 1.1 Grundlagen

In bipolaren Transistoren sind sowohl positive als auch negative Ladungsträger am Ladungstransport beteiligt (daher der Name).

Ein Transistor ist aus 3 Schichten aufgebaut, der Basis  $B$ , dem Emitter  $E$  und dem Kollektor  $C$ , jeweils mit einem Anschluss. Man unterscheidet, je nach der Dotierung der Außen- bzw der Innenschicht zwischen npn- und pnp-Transistoren, abgesehen von der Polarität der Spannungen und dem Vorzeichen der Ladungen funktionieren diese identisch. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine Situation, ähnlich 2 Dioden, die sich eine gemeinsame Anode (npn) oder Kathode (pnp) teilen (die Basis), wobei Emitter und Kollektor unterschiedlich stark do-

tiert sind (Abb 1).

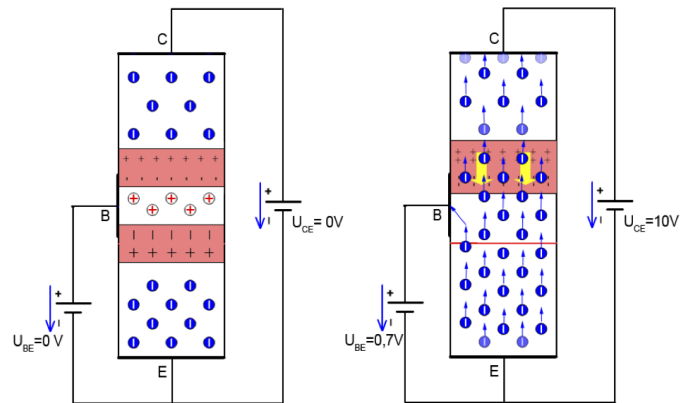


Abbildung 1: Funktionsweise eines bipolaren npn-Transistors

Am linken Teil der Skizze liegt keine Spannung  $U_{BE}$  an der Base-Emitter-Schleife an. Beide Sperrschichten im Transistor sind geschlossen und kein Strom fließt.

Sobald eine Spannung an diesem Kreis anliegt, verschwindet die Sperrschicht Base-Emitter (wie bei einer Diode). Elektronen aus dem Emitter gelangen in die Basis (und Löcher aus der Basis pflanzen sich umgekehrt fort - daher "bipolar").

Hier kommt zum tragen, dass die Basis sehr dünn ist und schwach dotiert. Das führt dazu, dass nur ein sehr kleiner Teil der Ladungen ( $< 1\%$ ) mit den Löchern der Basis rekombiniert und zu einem Basisstrom führt. Der überwiegende Teil der Ladungen geht über die dünne Basis-schicht, angezogen vom großen Potential des Kollektors in die Schleife zwischen Kollektor und Emitter, zur Spannungsquelle  $U_{CE}$ .

Im Fall einer Verstärkung beispielsweise lässt sich so also durch ein Signal  $U_{BE}$ , mit kleinen Amplituden, der Spannungsverlauf in  $U_{CE}$ , mit wesentlich höheren Spannungen, steuern.

## 1.2 Versuchsaufbau

In diesem Versuch werden verschiedene Kennlinien eines bipolaren Transistors ("BC 548B", npn) vermessen. Dazu wird das RC2000-System verwendet, ein Modulsystem, bestehend aus Software zur Messung und Darstellung der Daten, einem Steckbrett mit Anschlüssen für Untermodule. Hier werden ein Modul mit fest verdrahteten Anschlüssen, passend zum

Vermessen von Transistoren, eine Gleichspannungsquelle, ein Wavegenerator und dazu ein Verstärkermodul verwendet.

Mit dem RC2000 können gleichzeitig 2 Spannungen gemessen werden, wobei eine vom System direkt gesteuert wird und in einem definierten Bereich einen Sweep durchführt, um eben eine Kennlinie zu messen. Ströme werden indirekt gemessen, indem die Software aus einer Spannungsmessung an einem bekannten Widerstand den Strom direkt berechnet.

## 1.3 Resultate

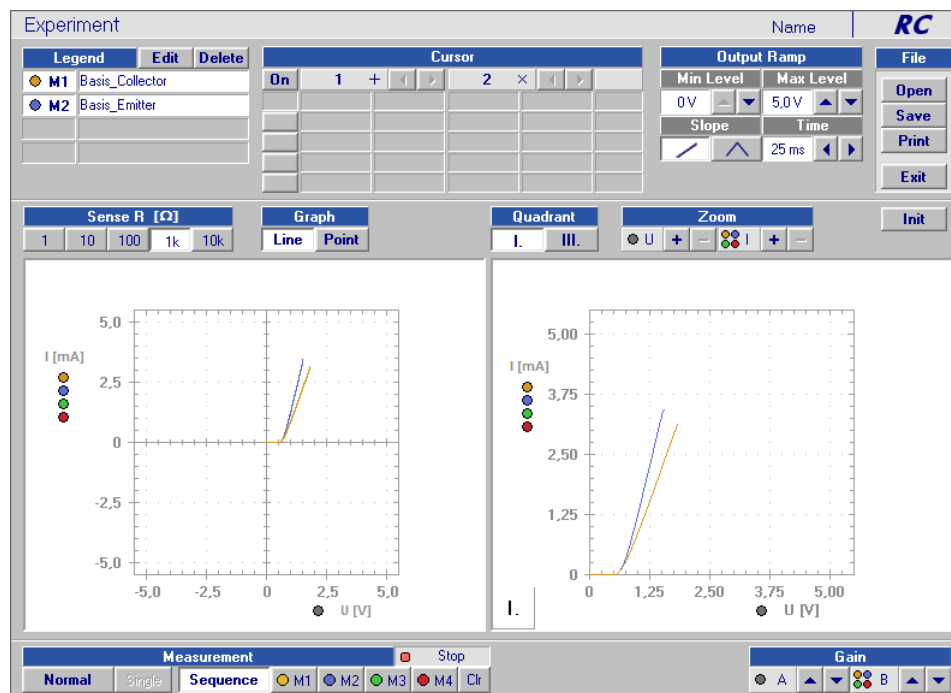


Abbildung 2: Kennlinie zwischen Base und Emitter sowie Base und Collector

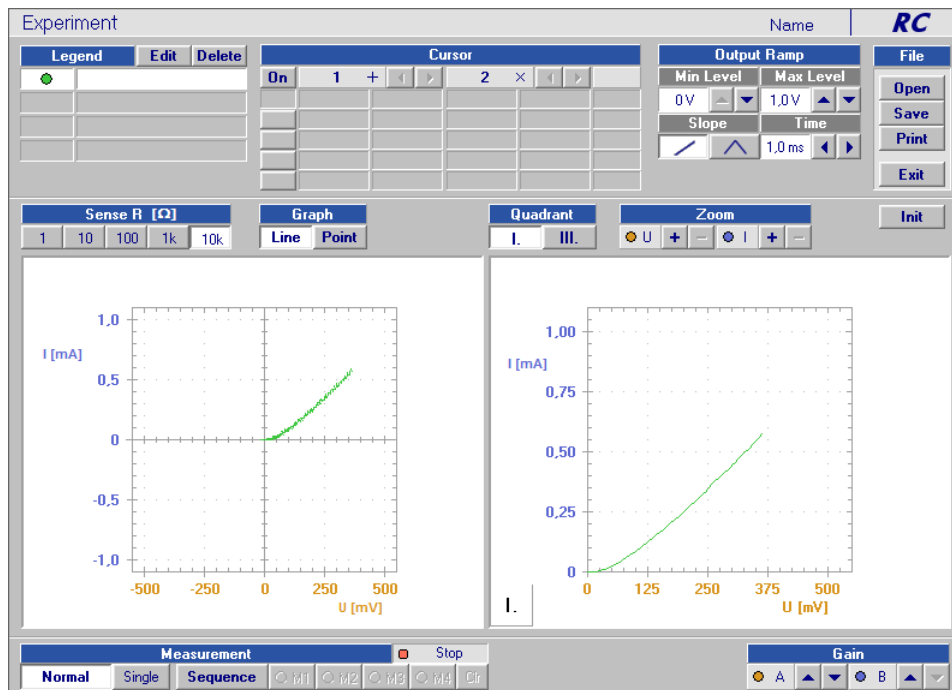


Abbildung 3: Eingangskennlinie für die Gleichstromverstärkung

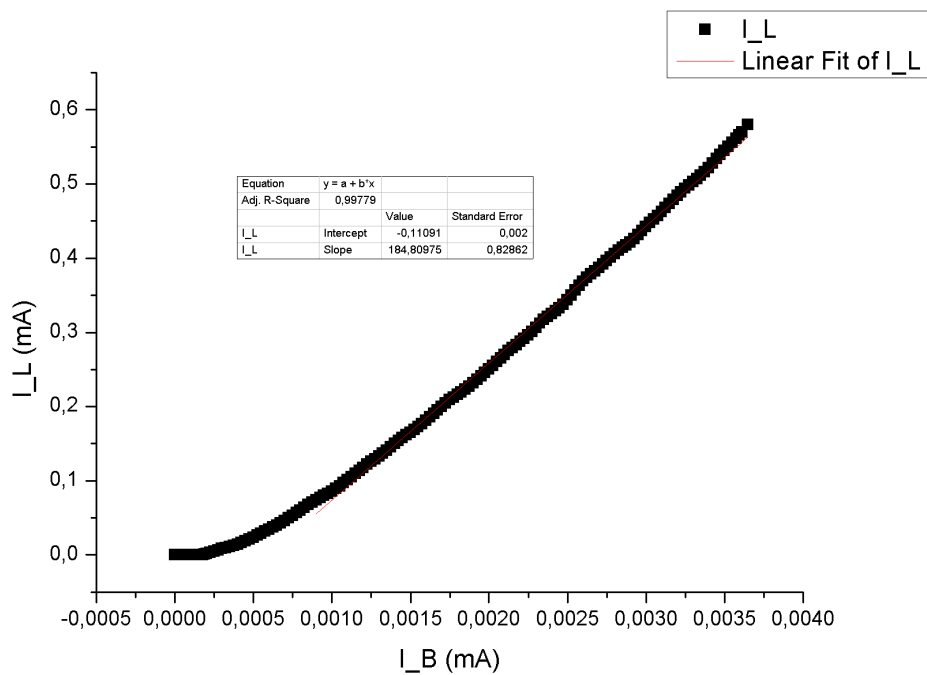


Abbildung 4: Verstärkungsfaktor Gleichstromverstärker

Verstärkungsfaktor  $I_{BE}/I_{BC} = 1 : (185 \pm 2)$

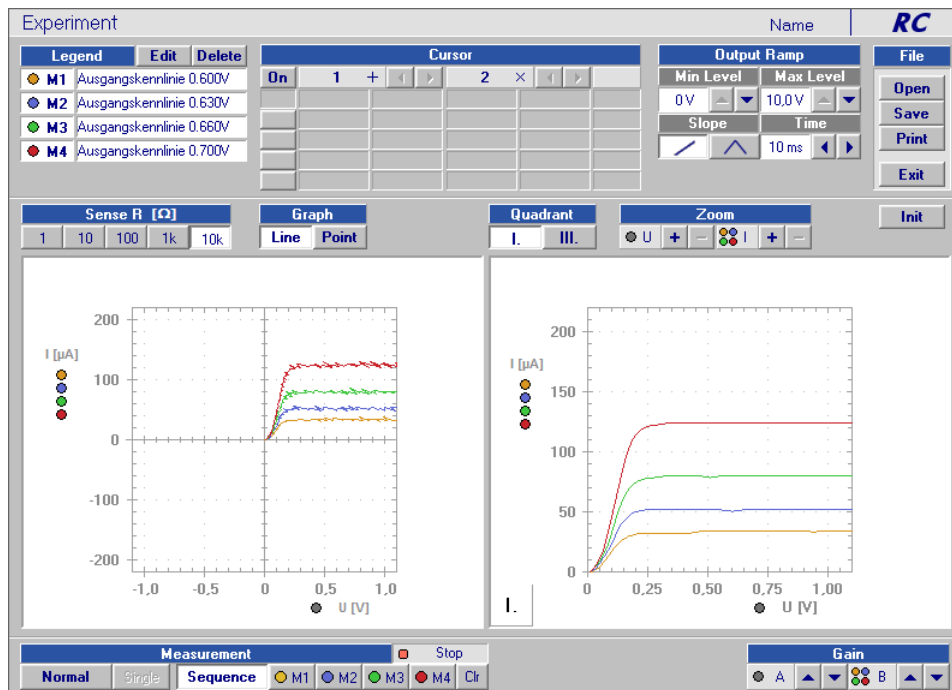


Abbildung 5: Ausgangskennlinienfeld für die Gleichstromverstärkung

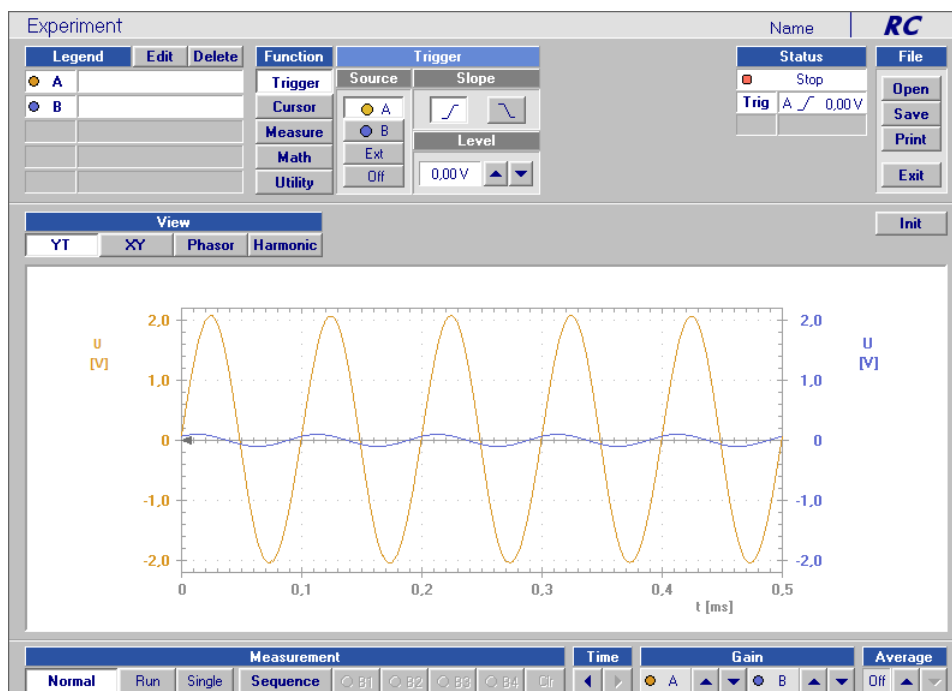


Abbildung 6: Kleinsignalverstärkung

Verstärkungsfaktor:  $u_a/u_e = 1 : (20 \pm 0.5)$

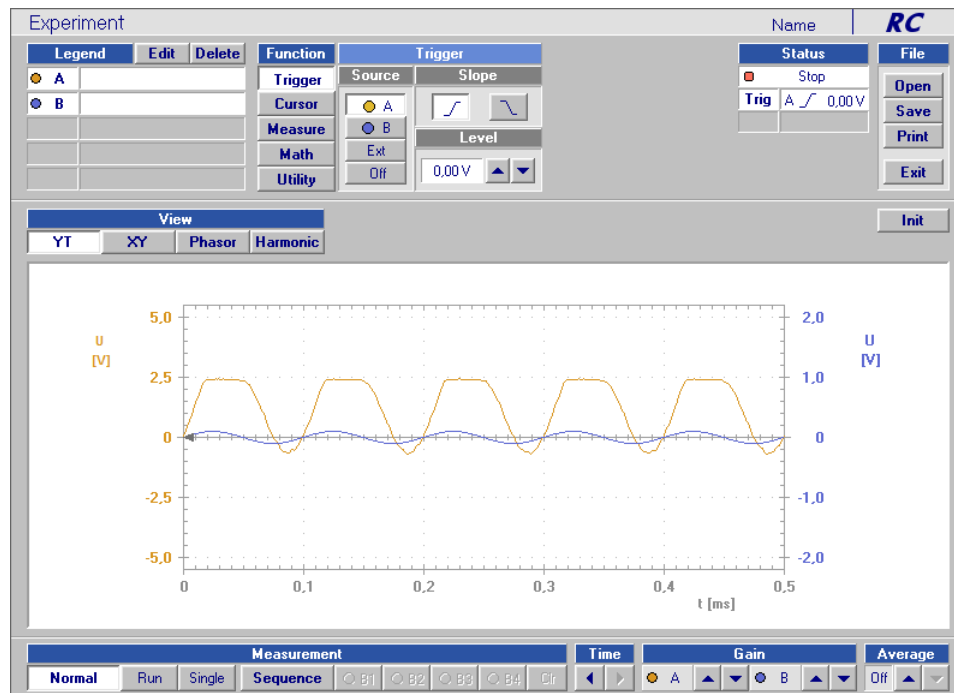


Abbildung 7: Kleinsignalverstärkung mit erhöhter Temperatur und sichtbarem Cut



Abbildung 8: Kleinsignalverstärkung mit erhöhter Temperatur und Gegenspannung

Verstärkungsfaktor:  $u_a/u_e = 1 : (20 \pm 1)$

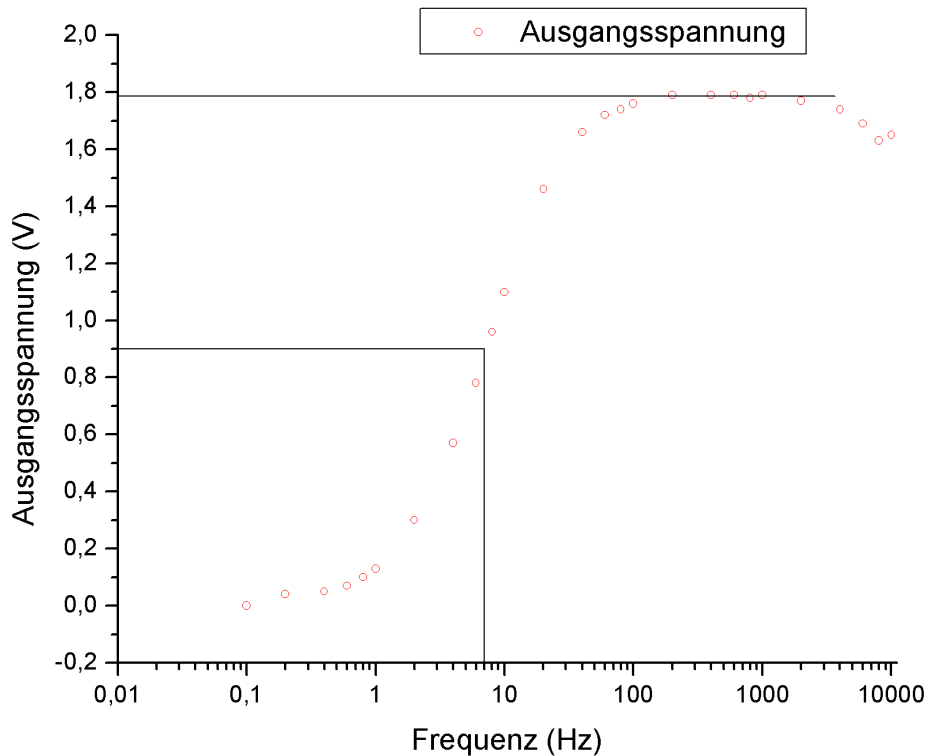


Abbildung 9: Frequenzabhängigkeit von Verstärkung und Phasenlage

untere Grenzfrequenz:  $(7 \pm 1)$  Hz

maximale Verstärkung im Bereich von etwa 110 Hz - 1200 Hz

## 1.4 Diskussion

Im Gegensatz zu den meisten anderen Praktikumsaufgaben ist, bedingt durch das vollständig konzipierte Messsystem, wenig Spielraum für Verbesserungen im Messaufbau und dem Versuch, höhere Genauigkeiten zu erzielen.

Im Folgenden werden daher vor allem die Messresultate vor allem kommentiert und etwas genauer erläutert.

In Abb. 2 sind die Kennlinien der Basis-Emitter-Diode (blau, M2) und der Basis-Kollektor-Diode (gelb, M1) dargestellt.

Gut erkennbar sind die verschiedenen Anstiege, bedingt durch die unterschiedlichen Dotierungen (der Emitter ist stärker do-

tiert als der Kollektor).

Abb. 3 und 4 zeigen die Stromsteuerkennlinie bzw. Gleichstromverstärkung in einer Emitterschaltung. Der Gleichstrom wird um einen Faktor von  $185 \pm 2$  verstärkt, wobei eine näherungsweise gute lineare Verstärkung nicht sofort eintritt.

Abb. 5 zeigt die Verstärkung von 4 Signalen mit diskreter Spannung, bei einer Betriebsspannung zwischen 0V und 10V. Gut erkennbar ist, dass die Verstärkung ab etwa 0,25V Betriebsspannung für alle Input-Spannungen stabil wird.

In Abb. 6 wird eine sinusförmige Wechselspannung, um einen Faktor von etwa

20, verstärkt (Output A, gelb, Input B, blau). Ein leichter Phasenversatz ist erkennbar. Das Signal wird, im Rahmen der Darstellung, sauber wiedergegeben.

Danach wurde der Transistor erhitzt. Seine Temperaturabhängigkeit führt zu einer Verzerrung des Signals. Die Spitzen werden einseitig 'abgeschnitten', da sich der Arbeitspunkt verschiebt (Abb. 7).

Um diesen Effekt zu kompensieren, wird nun eine Stromgegenkopplung eingebaut (Abb. 8). Das Signal wird nun, trotz Erhitzung, wiedergegeben, nur um den Verstärkungsfaktor verändert. Durch die Stromgegenkopplung entstehen jedoch Fluktuationen in einem höher frequenten Bereich.

Abb. 9 zeigt die Abhängigkeit der Kleinsignalverstärkung, von der Frequenz des Input-Signals.

Die maximale Verstärkung wird dabei in einem Bereich von etwa 110Hz - 1200 Hz erreicht. Die untere Grenzfrequenz, also die Frequenz an der die Verstärkung auf -3dB der maximalen Verstärkung abfällt,

liegt bei  $(7 \pm 1)\text{Hz}$ , die obere Grenzfrequenz über dem Bereich, der mit dem Frequenzgenerator des RC2000 erreichbar ist.

## 2 Feldeffekt-Transistor (FET)

### 2.1 Grundlagen

Auch ein FET ist ein Widerstand, der durch eine (geringe) Spannung gesteuert werden kann, und damit eben als Schalter für einen Leiter oder eben als signalverstärkendes Bauteil verwendet werden kann.

Wie der bipolare Transistor hat auch der FET 3 Anschlüsse, die Funktionsweise ist aber komplett verschieden:

Der Widerstand einer Leitung (deren Eingang 'Source *S*' und Ausgang 'Drain *D*' genannt werden) wird durch ein transversales elektrisches Feld erzeugt. Dieses wird wiederum von einer kleinen Steuerungsspannung am 'Gate *G*'-Anschluss gesteuert (Abb. 10).

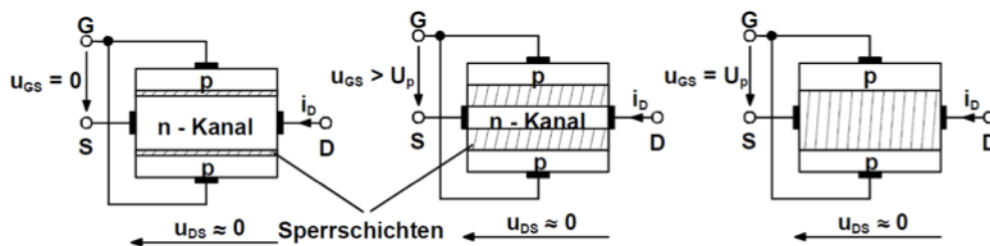


Abbildung 10: Funktionsweise eines Feldeffekt-Transistors

Dabei ist die Spannung, die am Gate anliegt, im Gegensatz zum bipolartransistor, in keiner leitenden Verbindung mit dem S-D-Kanal. Die Trennung kann durch verschiedene Bauweisen realisiert

werden, in Abb. 10 geschieht dies durch die pn-Sperrschicht (daher 'Sperrschicht-FET' bzw. junction-field-effect 'J-FET'). Das elektrische Feld steuert also die Stärke der Sperrschicht, und das mit sehr kleinem



Spannungsbedarf, da ja kein Strom fließt zwischen Gate und SD-Kanal.

Bei FETs wird unterschieden zwischen solchen, die ohne anliegende Gate-Spannung im SD-Kanal offen, und denen die ge-

schlossen sind.

Wie auch beim bipolaren Transistor, wird zur Messung das RC2000-System verwendet.

## 2.2 Resultate

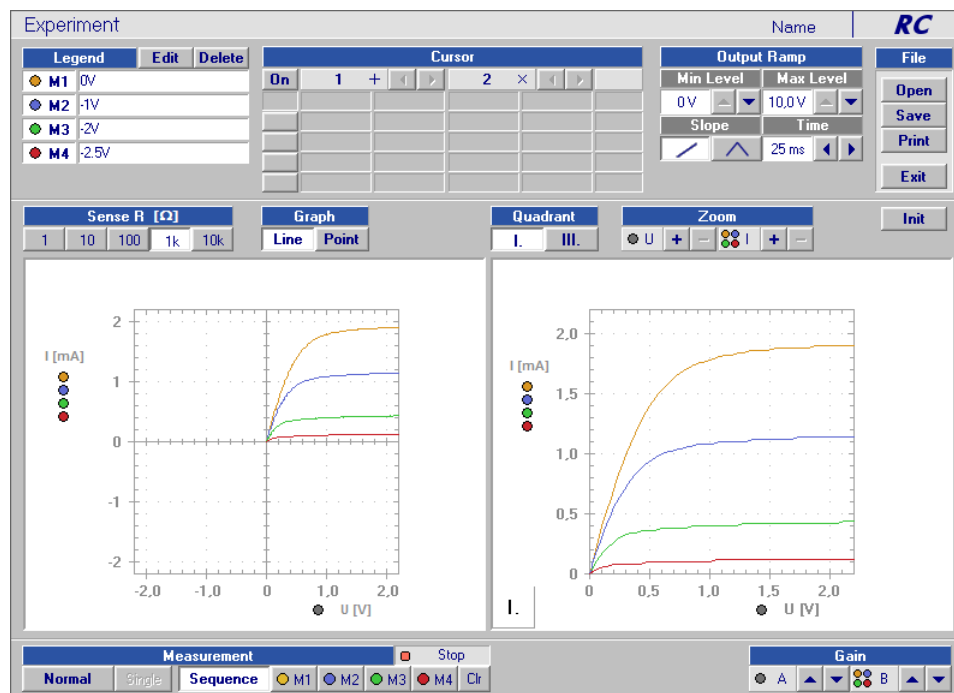


Abbildung 11: Ausgangskennlinienfeld eines Feldeffekt-Transistors

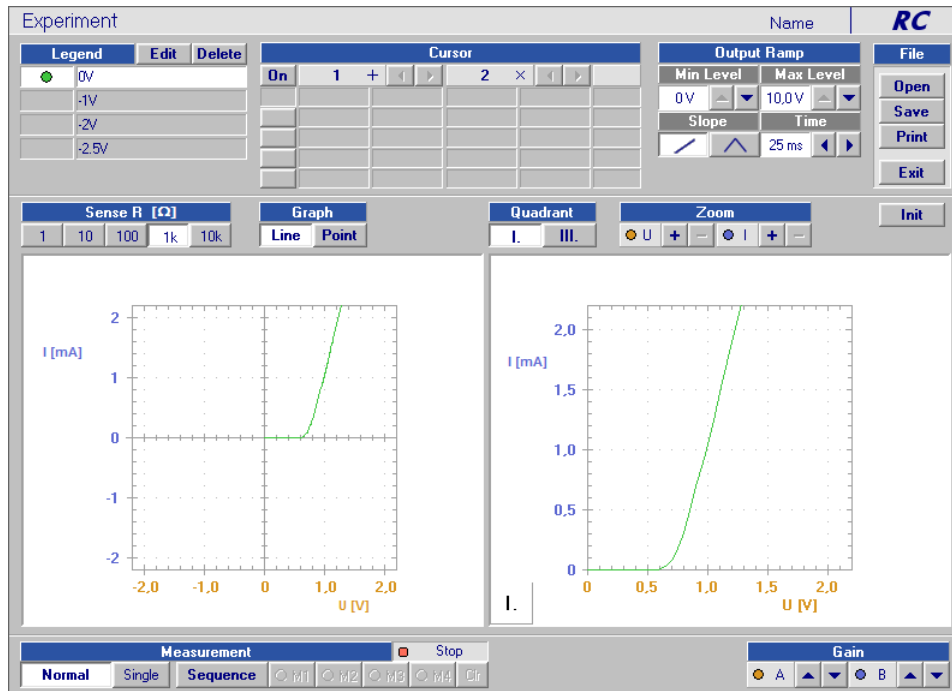


Abbildung 12: Eingangskennlinie eines Feldeffekt-Transistors

## 2.3 Diskussion

In Abbildung 12 ist die Eingangskennlinie des Feld-Effekt-Transistors (FET) zu sehen. Diese weicht kaum vom Verhalten des bipolaren Transistors ab.

Eine Schwierigkeit bei der Ermittlung der Eingangskennlinie des FET war es, die passenden Einstellungen für die Output Ramp (also die Spannungsversorgung, die durch einen Bereich sweep) zu finden. 0V-2V ist der verwendete Bereich.

Die J-FET-Ausgangskennlinie ist in Abbildung 11 ersichtlich. Gemessen bei 0V, -1V, -2V und -2.5V.

Die Ergebnisse der Ausgangskennlinien

stimmen im Verhalten mit denen in [1](p. 21) überein, jedoch ist der Anstieg im ohmschen Bereich stärker ausgeprägt für den hier verwendeten FET. Die negativen Spannungen sind nötig da der verwendete FET beim Anlegen der Spannung den Source-Drain Kanal freilegt (Abb. 10) und somit ein Teil oder die gesamte Sperrschicht leitend wird. Dieser Vorgang wird in den Grundlagen behandelt.

## 3 Quellen

[1] Anleitung, <http://www.univie.ac.at/anfpra/neu1/ps/ps8/PS8.pdf>