

Fortgeschrittenen-Praktikum

I-U-Kennlinien an Halbleitern

Diego Semmler, Nils Höres

Inhaltsverzeichnis

Motivation.....	2
Aufgabenstellung.....	2
Energiebandstruktur.....	2
Elektrische Eigenschaften.....	2
Temperaturabhängigkeit.....	3
pn-Übergang.....	3
Die Diodengleichung.....	4
Halbleiterbauelemente.....	4
Diode.....	4
Transistor.....	5
Feldeffekttransistor.....	5
Transistorschaltungen.....	6
Emitterschaltung.....	6
Kollektorschaltung.....	6
Basisschaltung.....	6
Transistorkennlinie.....	7
Eingangskennlinienfeld.....	7
Ausgangskennlinienfeld.....	7
Rückwirkungskennlinienfeld.....	7
Stromsteuerkennlinienfeld.....	7
Vierpolparameter.....	8
Arbeitsbereich.....	8
Durchführung.....	9
Diode.....	9
Transistor.....	10
Vierquadrant-Kennlinie.....	12
FET.....	13

Motivation

Diode, Transistor und Feldeffekttransistor sind elektrische Bauteile die aus der modernen Welt praktisch nicht mehr wegzudenken sind. Allein die Zahlen der Transistoren in einem üblichen Computer-Prozessor übersteigen heute leicht die 500-Millionen Grenze. Die U-I-Kennlinie liefert zu einem solchen Bauteil charakteristische Informationen die notwendig sind um die Eignung des Bauteils in einer gegebenen Schaltung sicherzustellen.

Aufgabenstellung

Es sollen die charakteristischen Kennlinien einer Diode, eines Bipolartransistors und eines Feldeffekttransistors aufgenommen werden. Anhand dieser Daten soll dann der Typ des jeweiligen Bauteils bestimmt und die Elektronik-relevanten Eigenschaften ermittelt werden. Eigenschaften von Halbleitern

Energiebandstruktur

In einzelnen Atomen haben die Elektronen feste Energieniveaus zwischen denen sie sich nicht aufhalten dürfen. Bringt man jedoch viele Atome zu einem Kristall zusammen, spalten sich die Energieniveaus der einzelnen Atome auf. Die Unterschiede zwischen den aufgespaltenen Energieniveaus liegen im Bereich von 10^{-24} eV und sind daher so klein, dass man sie praktisch nicht unterscheiden kann. Wir können daher mit guter Näherung sagen, dass es sich um ein Kontinuum handelt. Man spricht daher auch von einem Energieband, in dem sich Elektronen aufhalten dürfen.

In einem Kristall gibt es verschiedene Energiebänder, die beim absoluten Nullpunkt bis zu einem bestimmten Niveau, der Fermi-Energie, besetzt sind. Alle darüber liegenden Energieniveaus sind unbesetzt.

Das letzte besetzte Band nennt man Valenzband (türkis); das erste unbesetzte Band Leitungsband (gelb).

Wie gut ein Stoff Strom leitet, hängt von der Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband ab. Befindet sich

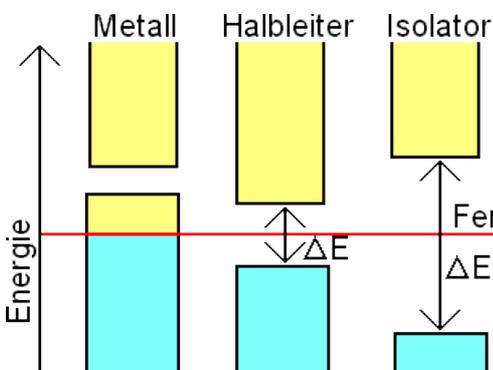


Abbildung 1: Bändermodell

zwischen Valenzband und Leitungsband keine Energielücke, oder liegt die Fermienergie mitten in einem Energieband, können Elektronen mit infinitesimaler Energie auf unbesetzte Zustände angehoben werden und stehen zur Leitung zur Verfügung.

Befindet sich zwischen Valenz- und Leitungsband eine große Energielücke, können selbst bei hohen Temperaturen so gut wie keine Ladungsträger in das Leitungsband angehoben werden. Der Stoff kann keinen Strom leiten und man spricht dann von einem Isolator. Die Elektronen, die im Valenzband sind, können nicht zur Leitung beitragen, da alle Energieniveaus besetzt sind.

Ist zwischen Valenz- und Leitungsband nur eine kleine Energielücke bis ca. 3 eV, können bei Zimmertemperatur (ca. $\frac{1}{40}$ eV) einige Elektronen in das Leitungsband gelangen. Man spricht von einem Halbleiter.

Elektrische Eigenschaften

In einem Halbleiter findet die Leitung sowohl über Elektronen statt, die ins Leitungsband angehoben werden (n), als auch über die dabei entstehenden Löcher im Valenzband (p).

$$\text{Dabei gilt: } n = p = \sqrt{np} = \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot (m_e m_p)^{\frac{3}{4}} \cdot e^{\frac{-\Delta E}{2k_B T}} \approx \text{const.} \cdot e^{\frac{-\Delta E}{2k_B T}} .$$

Wobei m_e für die effektive Masse der negativen Ladungsträger, m_p für die effektive Masse der positiven Ladungsträger und ΔE für die Energie der Bandlücke stehen. Man sieht, dass die Anzahl der Ladungsträger für eine kleine Bandlücke oder hohe Temperaturen exponentiell ansteigt. Diese Näherung ist für eine normale Bandlücke und Zimmertemperatur recht gut.

Neben der eben angesprochenen Selbstleitung gibt es in Halbleitern auch die sog. **Störstellenleitung**. Dabei ersetzt man etwa jedes Millionste Atom des Halbleiters durch ein anderes Material z.B. Arsen (n-

dotierung). Silizium hat 4 Bindungselektronen, Arsen 5. Auf diese Weise bringt man in das Gitter ein zusätzliches Elektron ein, welches sehr leicht ionisiert werden kann. Die Bindungsenergie ist im Bereich der Zimmertemperatur, sodass unter Normalbedingungen bereits viele dieser Störstellen ionisiert wurden und der Stromleitung zur Verfügung stehen.

Man kann einen Stoff auch p-dotieren, indem man ein Material mit drei Außenelektronen nimmt, z.B. Aluminium.

Die **Beweglichkeit** der Ladungsträger ist definiert durch $\mu = \frac{|\bar{v}|}{E} = e \frac{\tau}{m_{eff}}$, wobei $\bar{v} = e \vec{E} \frac{\tau}{m_{eff}}$ die durch das Elektrische Feld hervorgerufene Driftgeschwindigkeit ist und τ die mittlere Zeit, die der Ladungsträger zwischen zwei Stößen verbringt.

Die **Leitfähigkeit** setzt sich in einem Halbleiter zusammen aus der Leitfähigkeit der Löcher und der Elektronen: $\sigma = \sigma_p + \sigma_n = pe\mu_p + ne\mu_n$

Temperaturabhängigkeit

Während die Leitfähigkeit in Metallen bei zunehmender Temperatur abnimmt, da inelastische Stöße mit Phononen häufiger werden, nimmt die Leitfähigkeit in Halbleitern, wie an der Formel oben bereits gezeigt wurde, exponentiell zu, da der Anstieg der Ladungsträger die Abnahme der Beweglichkeit in aller Regel mehr als kompensiert.

pn-Übergang

Bringt man einen p-dotierten und einen n-dotierten Halbleiter zusammen, so werden an der Berührungsstelle zunächst die Löcher mit den freien Elektronen rekombinieren. Dieser Vorgang ist mit dem Transport von Ladung verbunden, sodass sich ein elektrisches Feld aufbaut, dass der Rekombination entgegen wirkt und diese nach kurzer Zeit zum Stillstand bringt. Die Berührungsstelle verarmt durch diese Vorgang an Ladungsträgern, da es hier keine Störstellenleitung mehr gibt, sondern nur noch die sehr viel geringere Selbstleitung.

Legt man ein elektrisches Feld in pn-Richtung an (a), werden durch das Feld Ladungsträger in die verarmte Zone hinein gedrückt. Diese verkleinert sich und es kann Strom fließen.

Legt man ein Feld in die entgegengesetzte Richtung an (b), werden die Ladungsträger herausgezogen, wodurch sich die ladungsträgerarme Zone vergrößert und sperrt.

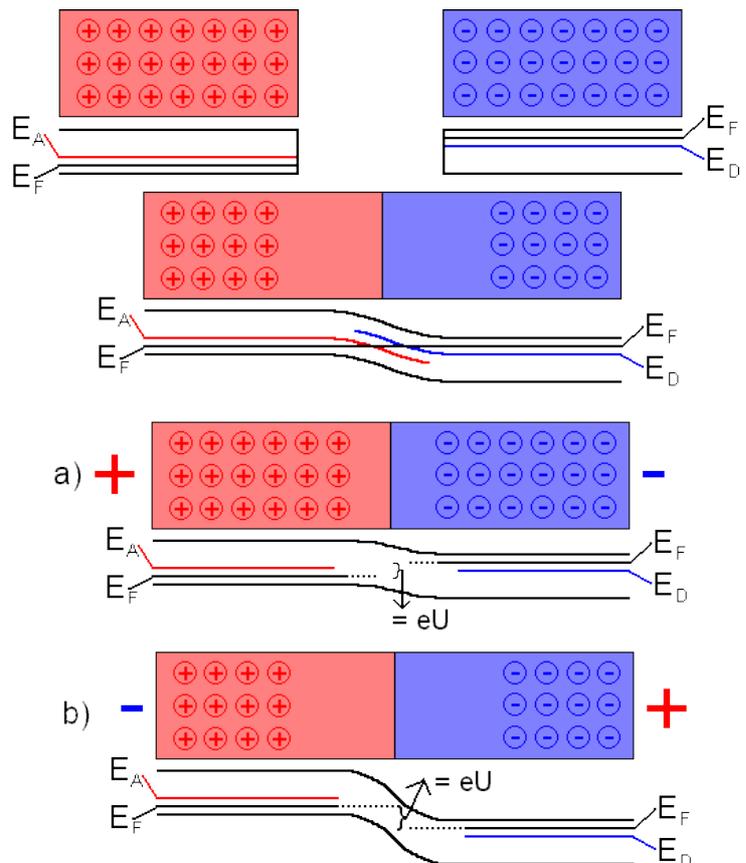


Abbildung 2: pn-Übergang

Die Diodengleichung

Die IU-Kennlinie einer Diode ist näherungsweise gegeben durch $I = I_S(T) \left(e^{\frac{qU}{n k_B T}} \right) \cdot$

$I_S(T)$ ist der Referenzstrom in Abhängigkeit von der Temperatur, q die Elementarladung und n der Emissionskoeffizient, der bei einer Idealen Diode 1 ist, in der Praxis meistens zwischen 1 und 2 liegt.

Weiterhin gibt es eine ganze Reihe von Effekten, die im Realfall für Abweichungen von der idealen Diode sorgen, auf die hier im einzelnen aber nicht näher eingegangen werden soll:

- Der **Hochstromeffekt**, der bei großen Strömen durch eine Zunahme der Ladungsträgerkonzentration den Emissionskoeffizienten n auf $2n$ ansteigen lässt.
- Der **Leck- bzw. Diffusionsstrom**, der durch Ladungsträgerrekombination in der Sperrschicht verursacht wird
- Der **Durchbruch**, der bei zu starken Sperrspannungen auftritt. Dieser wird verursacht, wenn die Ladungsträger aus der Selbstleitung so stark beschleunigt werden, dass sie durch Ionisation weitere Ladungsträger erzeugen.
- Der **Bahnwiderstand** in den Zuleitungen, auch innerhalb der Diode.
- Die **Sperrschichtkapazität** sowie die **Diffusionskapazität**, die bei hochfrequenten Wechselströmen Bedeutung erlangt.

Halbleiterbauelemente

Diode

Eine Diode ist im Prinzip nichts anderes als ein pn-Übergang mit Anschlussleitungen, wie wir ihn oben beschrieben haben. Man kann sie entweder in (a) Durchlassrichtung oder (b) Sperrichtung betreiben. Es gibt viele verschiedene Arten von Dioden für unterschiedliche Anwendungen:

- Schaltdiode
- Gleichrichterdiode
- Schottky-Diode
- Zener-Diode oder Z-Diode
- Kapazitätsdiode
- pin-Diode
- Fotodiode
- LED
- Laserdiode
- Tunneldiode
- Avalanchediode

Transistor

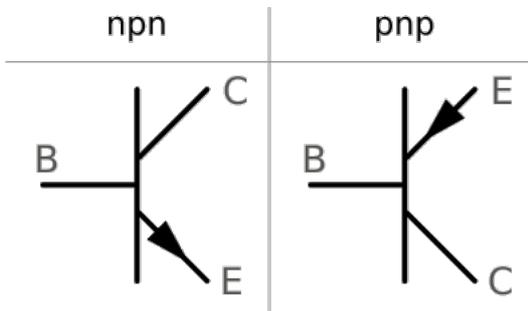


Abbildung 3: npn- und pnp Transistor (Quelle: Wikipedia)

Ein Transistor (hier genauer Bipolartransistor) besteht schematisch aus 2 Dioden die entweder in pnp- oder npn-Orientierung angebracht sind. Im ersten Fall spricht man vom pnp- im zweiten Fall vom npn-Transistor. Die dotierten Schichten sind jeweils mit einem Anschluss versehen die man wie folgt benennt : (B)asis,(E)mitter (lat. emittiere: Aussenden),(C)ollector (lat. collegere: Sammeln).

Folgend ein Beispiel für einen npn-Transistor:

Werden lediglich Kollektor und Emitter angeschlossen (+ am Kollektor, - am Emitter) entspricht die Schaltung zwei Dioden, von denen eine gesperrt ist. Es fließt also nur ein kleiner Strom, welcher betragsgleich mit dem Sperrstrom der B-C-Diode ist. Die angelegte Spannung verkleinert zwar die

B-E-Sperrschicht, vergrößert jedoch die C-B-Sperrschicht.

Durch Schließen des Basis-Emitter-Stromkreises (+ an der Basis, - am Emitter) wird die Basis-Emitter-Diode leitend. Es gelangen Elektronen aus dem Emitter in die Basiszone. Wegen der geringen Weite der Basis können die meisten Elektronen in die Kollektor-Basis-Sperrschicht diffundieren zumal diese für sie keinen Potenzialwall, sondern ein Gefälle darstellt. Bei positiv geladenem Kollektoranschluss werden die Elektronen in Richtung Kollektor beschleunigt. Dort werden sie abgeführt. Somit fließt ein Strom im Kollektor-Emitter-Stromkreis.

Da der zwischen Basis und Emitter fließende Strom nur die Basis-Emitter-Sperrschicht leitend machen muss, genügt hier eine kleine Spannung an der Basis. Die einmal in die Basis gelangten Elektronen fließen zum größten Teil (ca. 99 %) weiter zum Kollektor. Es wird also durch den kleinen Basistrom ein viel größerer Kollektorstrom gesteuert. Das Verhältnis der Ströme ist vom Typ abhängig, man bezeichnet es als den Stromverstärkungsfaktor β . Er beträgt etwa 4 bis 1000, je nach Konstruktion des Transistors und der Größe des Kollektorstroms.

Feldeffekttransistor

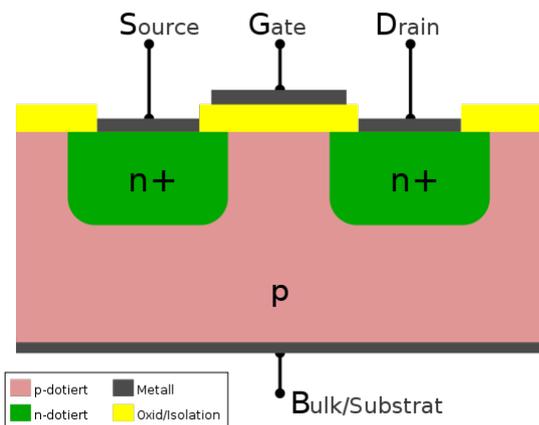


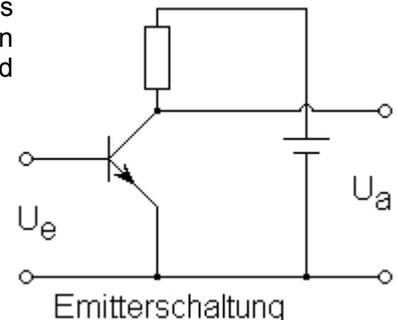
Abbildung 4: Querschnitt: Metalloxid Feld-Effekt Transistor (Quelle: Wikipedia)

Die Funktionsweise des Feldeffekttransistors (i.F. FET) beruht entgegen dem Bipolartransistor auf der Steuerung per Spannung statt Strom. Hierbei dient die Gate-Source Spannung zur Regulierung des Halbleiter-Widerstand um darüber die Stärke des elektrischen Stroms zu steuern. Die Anschlüsse des FET nennen sich (s. Abb. 4) Source (Quelle), Gate (Tor,Gatter) und Drain (Senke, Abfluss). Ein MOSFET verfügt darüber hinaus noch über einen Bulk Anschluss. Beim FET wird die Verstärkung des Stroms zwischen Source und Drain dadurch gesteuert das das dotierte Material, durch das elektrische Feld der angelegten Spannung, entweder mit Ladungsträgern angereichert oder verarmt wird. Der Vorteil des FET liegt hier im Vergleich zum Bipolartransistor in der nahezu stromlosen Steuerung des Transistors der somit sehr Energie sparend arbeitet.

Transistorschaltungen

Emitterschaltung

Die Emitterschaltung spiegelt die gewöhnliche Funktionsweise eines Transistors wieder. Der Basis-Emitter Strom steuert den, um den Stromverstärkungsfaktor β größeren Kollektor-Emitter Strom. Eingesetzt wird die Schaltung z.B. als Schalter oder Kleinsignal-Verstärkern.



Kollektorschaltung

Die Kollektorschaltung (auch Emitterfolger), liefert einen hohen Eingangs- und einen niedrigen Ausgangswiderstand. Die Ausgangsspannung am Emitter folgt annähernd der Eingangsspannung.

Einsatzgebiet sind z.B. Impedanzwandler.

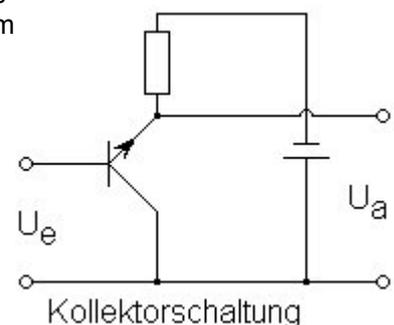


Abbildung 5: (Quelle Wikipedia.de)

Basisschaltung

Die Basisschaltung gleicht der Emitterschaltung bis auf den Unterschied, das hier die Basis auf Masse oder einer konstanten Spannung liegt. Somit wird die Stromverstärkung 1.

Einsatzgebiet sind z.B. Hochfrequenz-Stufen und Hochfrequenz-Oszillatoren.

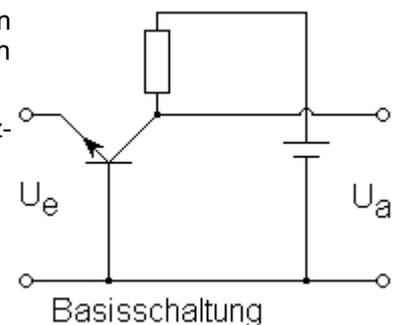
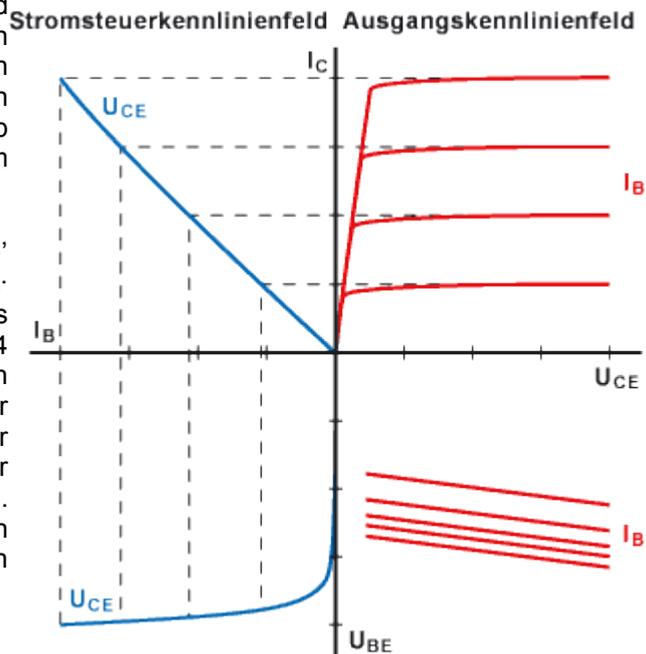


Abbildung 6: (Quelle Wikipedia.de)

Transistorkennlinie

Transistoren legen bzgl. ihrer Ein- und Ausgangssignale in Abhängigkeit vom verwendeten Strom- und Spannungsbereich keinen linearen Zusammenhang an den Tag. Um diesen Zusammenhang darzustellen nutzt man deshalb eine Darstellung der Kennlinien in einem sogenannten Vierquadrant-Kennlinienfeld.

Bipolare Transistoren haben die Stromgrößen I_E , I_C , I_B und die Spannungsgrößen U_{CE} , U_{BE} , U_C (CB). Sofern man einen bipolaren Transistor als Verstärker oder Schalter verwendet, erhält man 4 charakteristische Kennlinienfelder. Je nach Grundschaltung sehen diese Kennlinienfelder anders aus. Die Beschreibungen dieser Kennlinienfeldern beziehen sich auf die hier dargestellte Emittergrundschaltung. Die gestrichelten Linien in den Kennlinienfeldern zeigen den Zusammenhang zwischen den einzelnen Strömen und Spannungen.



Eingangskennlinienfeld Rückwirkungskennlinienfeld

Eingangskennlinienfeld

Die relevanten Größen sind hier der Basisstrom I_B und die Basis-Emitter Spannung U_{BE} . Der dargestellte Zusammenhang ist die Durchlasskennlinie des pn-Übergangs. Das Verhältnis $r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$ nennt sich differentieller Eingangswiderstand und ist der Widerstand der an der Steuerspannungsquelle anliegt.

Abbildung 7: 4-quadrant Kennlinienfeld

Ausgangskennlinienfeld

Im Ausgangskennlinienfeld wird bei konstantem I_B die Spannung U_{CE} verändert und der Kollektorstrom I_C gemessen. Das Verhältnis $r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}$ gibt den differentiellen Ausgangswiderstand an.

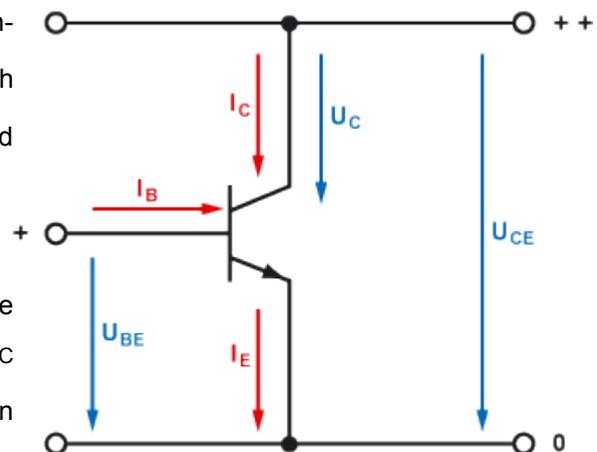


Abbildung 8: Emittergrundschaltung

Rückwirkungskennlinienfeld

Die Rückwirkung von Kollektor-Emitter Spannung auf die Basis-Emitter Spannung wird hier aufgetragen wobei sich die Kennlinie immer auf einen bestimmten Basisstrom bezieht. Die Rückwirkung sollte hier möglichst klein gehalten werden, was allerdings nicht schaltungstechnisch beeinflusst werden kann sondern dem Transistorhersteller vorbehalten bleibt.

Das Verhältnis $D = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$ nennt man den differentiellen Rückwirkungsfaktor.

Stromsteuerkennlinienfeld

Die Stromsteuerkennlinie ergibt sich aus dem Zusammenhang von Kollektorstrom und Basisstrom und gilt für eine bestimmte Kollektor-Emitter Spannung. Aus der Steilheit der Kurve kann die Gleichstromverstärkung B und der differentielle Stromverstärkungsfaktor β abgelesen werden.

Vierpolparameter

Der Vierpol ist ein abstraktes Modell eines unbekanntes Bauteils mit zwei Ein- und Ausgängen. Das Verhalten des Bauteils gilt als eindeutig bestimmt wenn die Abhängigkeiten der vier Größen U_1, U_2, I_1 und I_2 bekannt sind. An Stelle dieser Größen können auch die Verhältnisse derselben bestimmt werden, welche dann Vierpolparameter heißen.

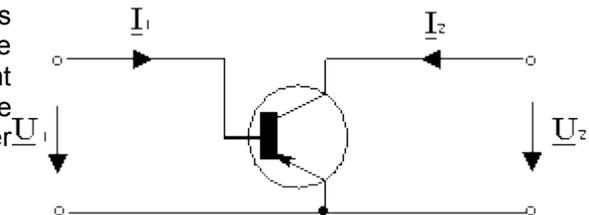


Abbildung 9: Transistor als Vierpol (Quelle: FH-Gießen)

Als Parameter schreibt man:

Z-Parameter (Widerstand):
$$z_{11} = \frac{u_1}{i_1}, z_{22} = \frac{u_2}{i_2}, z_{12} = \frac{u_1}{i_2}, z_{21} = \frac{u_2}{i_1}$$

Y-Parameter (Admittanz):
$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1}, y_{22} = \frac{i_2}{u_2}, y_{12} = \frac{i_1}{u_2}, y_{21} = \frac{i_2}{u_1}$$

h-Parameter (vorwärts-Hybrid):
$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}, h_{12} = \frac{u_1}{u_2}, h_{21} = \frac{i_2}{i_1}, h_{22} = \frac{i_2}{u_2}$$

Arbeitsbereich

Da der Bipolartransistor aus zwei pn-Übergängen besteht kann er je nach angelegter Spannung in verschiedenen Arbeitsmodi betrieben werden, den sogenannten Arbeitsbereichen (s. Abb. 8 gestrichelte Linien). Hierzu wird am Kollektor ein Widerstand R_C angebracht welcher zusammen mit dem Emitter mit der zu U_{CE} gleichgerichteten Spannung U_S belastet wird. Aus dem Zusammenhang dieser Werte erhält man die Formel für die Arbeitsgerade:
$$I_C = \frac{U_S - U_{CE}}{R_C}$$

Auf dieser Geraden liegen die Arbeitsbereiche des Transistors:

1. Sperrbereich

Im Sperrbereich leitet der Transistor wegen $I_B \leq 0$ (theoretisch) keinen Strom und entspricht einem offenen (nicht-idealen) Schalter.

2. Verstärkungsbereich

Entspricht dem Normalbetrieb des Transistors in dem $I_C = \beta I_B$ ist.

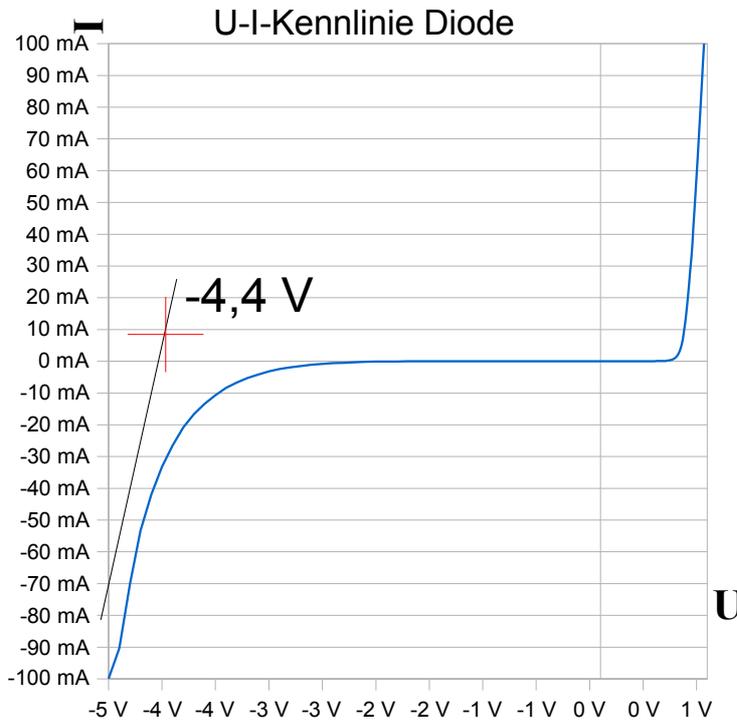
3. Sättigungsbereich

Wenn I_B eine Transistor-spezifische Grenze erreicht hat stellt sich ein Maximalstrom am Kollektor ein, der nicht mehr wesentlich von I_B bestimmt wird.

Durchführung

Beim Versuch werden, nach einstecken des Bauteils in die Apparatur, automatisch Messwerte von einem Labview-Programm ermittelt, welche dann in einer Datei auf dem Messcomputer gespeichert werden.

Diode

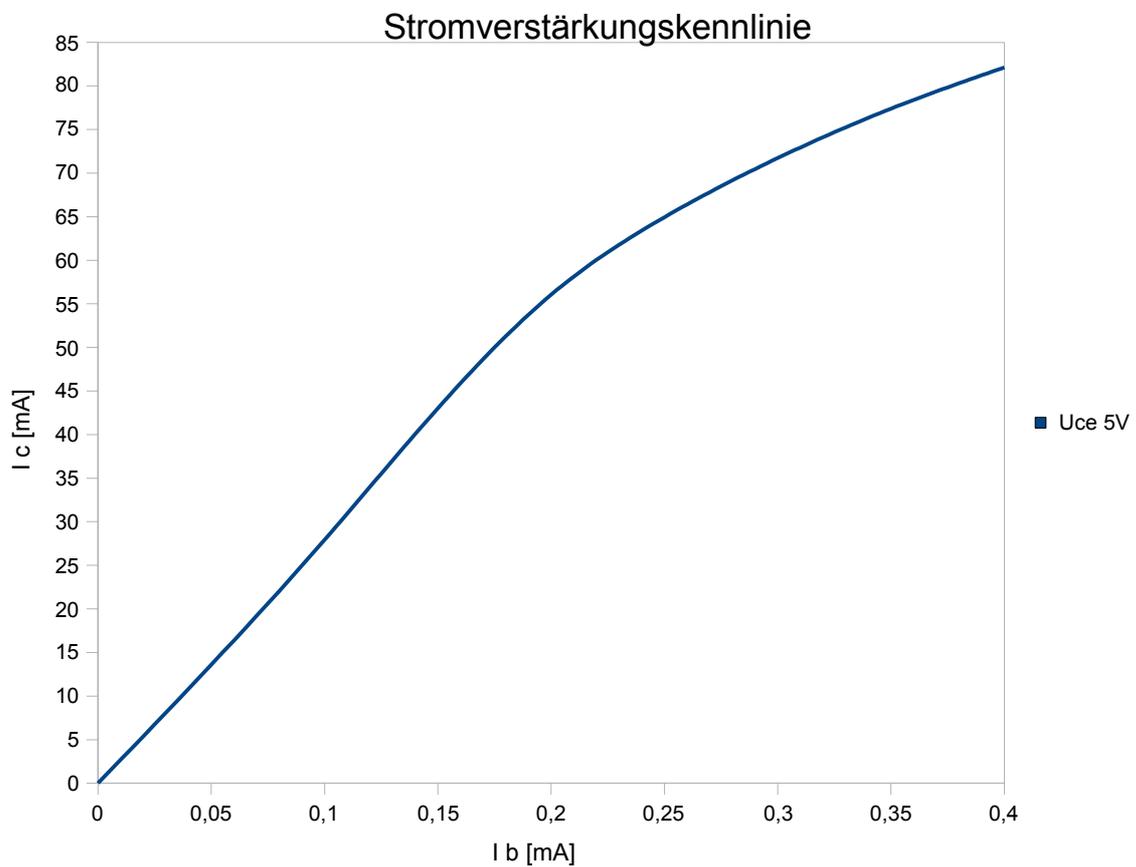
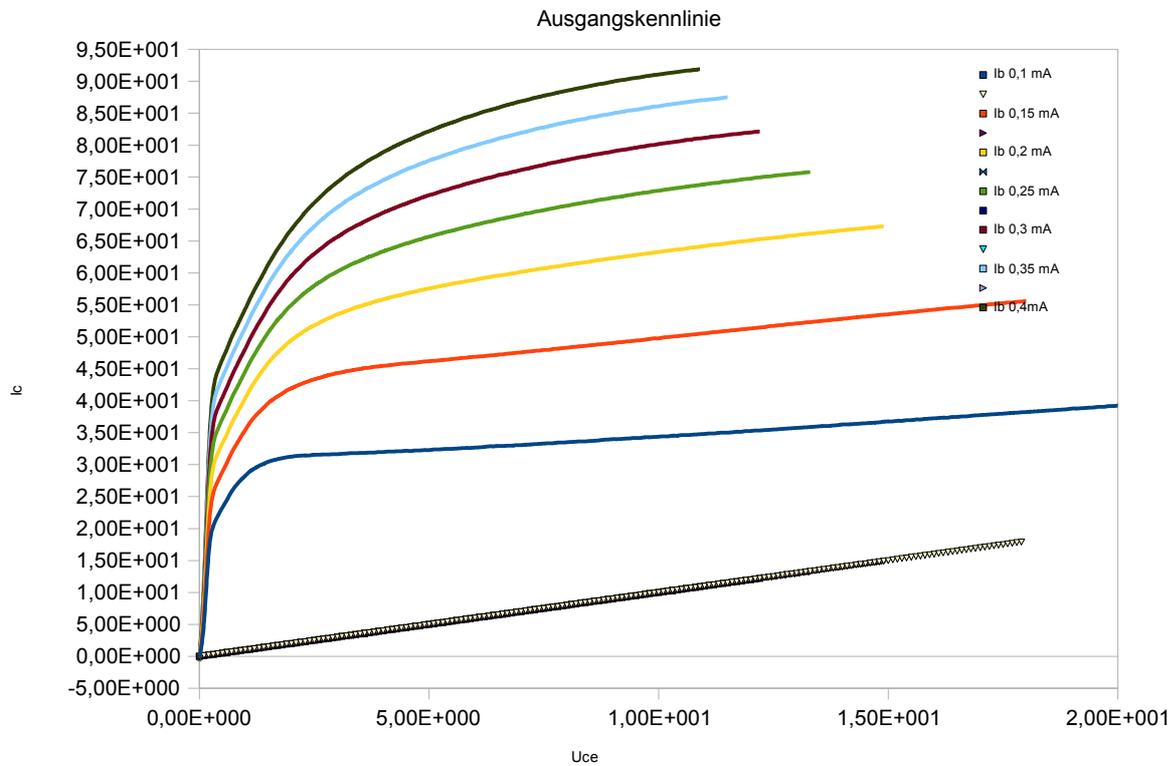


Die Durchbruchspannung liegt bei $-4,396 \approx -4,4$ V. Vermutlich ist die Diode im Versuch eine Zenerdiode, da sie sonst während des Versuches kaputtgegangen wäre. Normale Dioden halten einen Durchbruch auch bei geringen Strömen nicht aus, da sich der Strom in diesem Fall nicht gleichmäßig auf die Diode verteilt, sondern an einigen Stellen zu einer lokalen Überhitzung und dadurch zur Zerstörung der kompletten Diode führt.

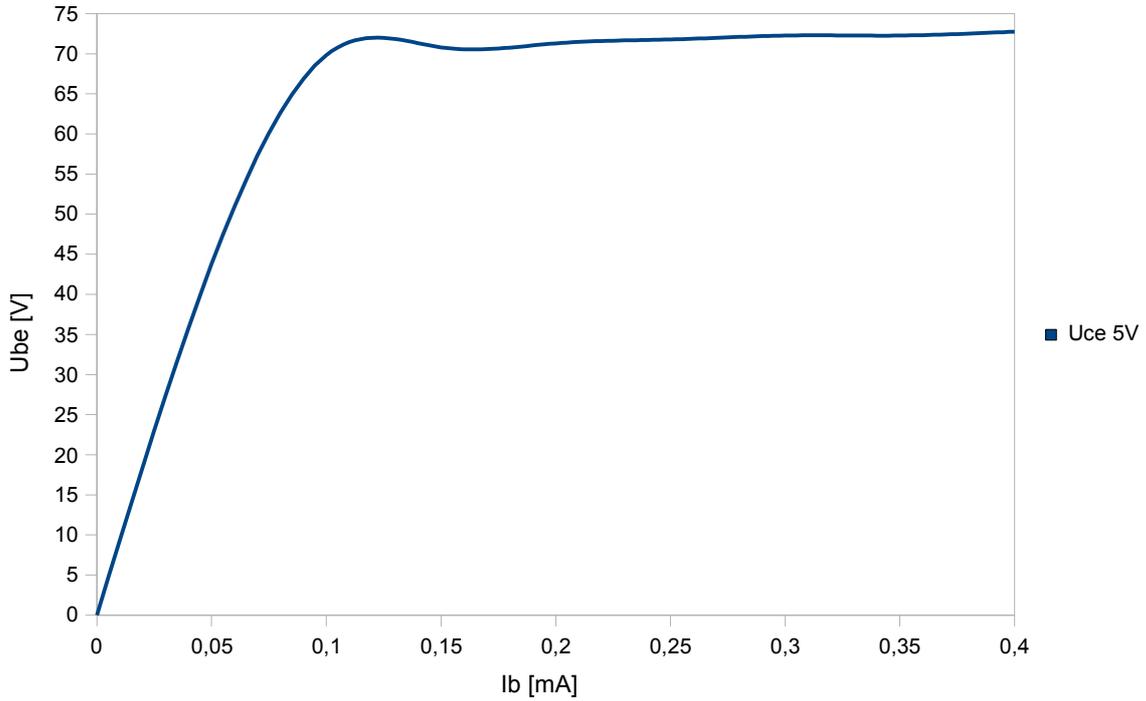
U	I	U	I
-4,60 V	-99,9512 mA	0,25 V	0,0488 mA
-4,50 V	-90,3320 mA	0,26 V	0,0488 mA
-4,40 V	-70,0195 mA	0,27 V	0,0488 mA
-4,30 V	-53,3203 mA	0,28 V	0,0488 mA
-4,20 V	-41,9922 mA	0,29 V	0,0488 mA
-4,10 V	-33,2520 mA	0,30 V	0,0488 mA
-4,00 V	-26,4648 mA	0,31 V	0,0488 mA
-3,90 V	-20,7520 mA	0,32 V	0,0488 mA
-3,80 V	-16,6016 mA	0,33 V	0,0488 mA
-3,70 V	-13,3301 mA	0,34 V	0,0488 mA
-3,60 V	-10,6934 mA	0,35 V	0,0488 mA
-3,50 V	-8,3496 mA	0,36 V	0,0488 mA
-3,40 V	-6,6406 mA	0,37 V	0,0488 mA
-3,30 V	-5,2734 mA	0,38 V	0,0488 mA
-3,20 V	-4,1504 mA	0,39 V	0,0488 mA
-3,10 V	-3,1738 mA	0,40 V	0,0488 mA
-3,00 V	-2,4414 mA	0,41 V	0,0488 mA
-2,90 V	-1,9043 mA	0,42 V	0,0488 mA
-2,80 V	-1,4648 mA	0,43 V	0,0488 mA
-2,70 V	-1,0742 mA	0,44 V	0,0488 mA
-2,60 V	-0,7813 mA	0,45 V	0,0488 mA
-2,50 V	-0,5859 mA	0,46 V	0,0488 mA
-2,40 V	-0,4395 mA	0,47 V	0,0488 mA
-2,30 V	-0,2930 mA	0,48 V	0,0488 mA
-2,20 V	-0,1953 mA	0,49 V	0,0488 mA
-2,10 V	-0,0977 mA	0,50 V	0,0488 mA
-2,00 V	-0,0488 mA	0,51 V	0,0488 mA
-1,90 V	-0,0488 mA	0,52 V	0,0977 mA
-1,80 V	0,0000 mA	0,53 V	0,0977 mA
-1,70 V	0,0000 mA	0,54 V	0,0977 mA
-1,60 V	0,0488 mA	0,55 V	0,0977 mA
-1,50 V	0,0488 mA	0,56 V	0,0977 mA
-1,40 V	0,0488 mA	0,57 V	0,0977 mA
-1,30 V	0,0488 mA	0,58 V	0,0977 mA
-1,20 V	0,0488 mA	0,59 V	0,1465 mA
-1,10 V	0,0488 mA	0,60 V	0,1465 mA
-1,00 V	0,0488 mA	0,61 V	0,1465 mA
-0,90 V	0,0488 mA	0,62 V	0,1953 mA
-0,80 V	0,0488 mA	0,63 V	0,2441 mA
-0,70 V	0,0488 mA	0,64 V	0,2930 mA
-0,60 V	0,0488 mA	0,65 V	0,3418 mA
-0,50 V	0,0488 mA	0,66 V	0,4395 mA
-0,40 V	0,0488 mA	0,67 V	0,5371 mA
-0,30 V	0,0488 mA	0,68 V	0,6336 mA
-0,20 V	0,0488 mA	0,69 V	0,7899 mA
-0,10 V	0,0488 mA	0,70 V	1,0742 mA
0,00 V	0,0488 mA	0,71 V	1,4160 mA
0,00 V	0,0488 mA	0,72 V	1,8555 mA
0,01 V	0,0488 mA	0,73 V	2,4414 mA
0,02 V	0,0488 mA	0,74 V	3,1738 mA
0,03 V	0,0488 mA	0,75 V	4,1016 mA
0,04 V	0,0488 mA	0,76 V	5,3711 mA
0,05 V	0,0488 mA	0,77 V	6,9336 mA
0,06 V	0,0488 mA	0,78 V	8,8379 mA
0,07 V	0,0488 mA	0,79 V	11,0352 mA
0,08 V	0,0488 mA	0,80 V	13,7695 mA
0,09 V	0,0488 mA	0,81 V	16,8945 mA
0,10 V	0,0488 mA	0,82 V	20,3613 mA
0,11 V	0,0488 mA	0,83 V	24,1699 mA
0,12 V	0,0488 mA	0,84 V	28,3203 mA
0,13 V	0,0488 mA	0,85 V	32,7637 mA
0,14 V	0,0488 mA	0,86 V	37,4023 mA
0,15 V	0,0488 mA	0,87 V	42,1387 mA
0,16 V	0,0488 mA	0,88 V	47,3633 mA
0,17 V	0,0488 mA	0,89 V	52,7344 mA
0,18 V	0,0488 mA	0,90 V	58,2520 mA
0,19 V	0,0488 mA	0,91 V	63,8672 mA
0,20 V	0,0488 mA	0,92 V	69,7266 mA
0,21 V	0,0488 mA	0,93 V	75,6348 mA
0,22 V	0,0488 mA	0,94 V	81,6895 mA
0,23 V	0,0488 mA	0,95 V	87,7441 mA
0,24 V	0,0488 mA	0,96 V	94,2383 mA
		0,97 V	100,0000 mA

Abbildung 10: Messwerte in 2x2 Spalten (Platzgründe)

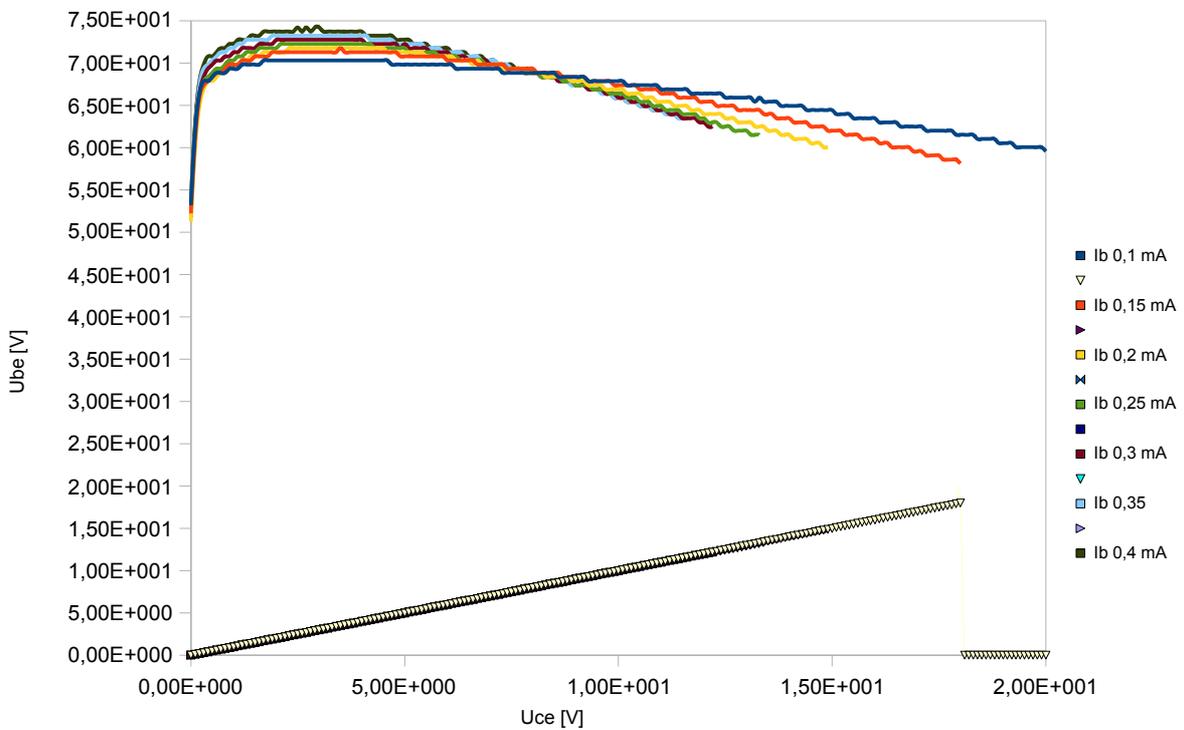
Transistor



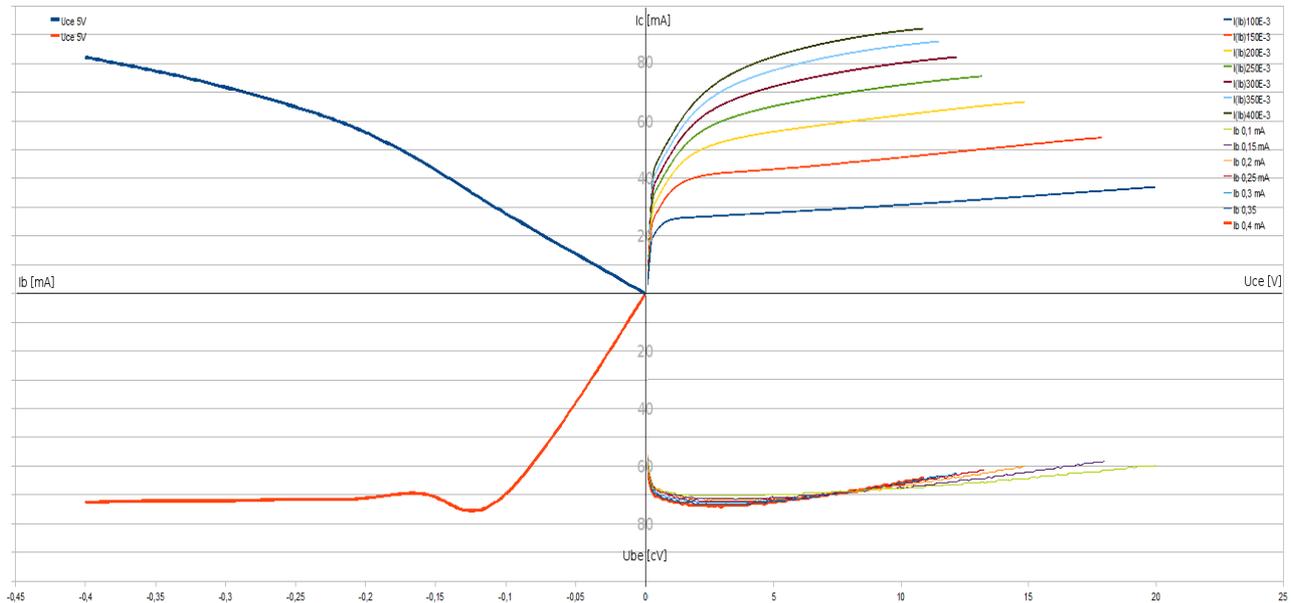
Eingangskennlinie



Rückwirkungskennlinie



Vierquadrant-Kennlinie



Als Arbeitspunkt wird $U_{CE}=5V$ und $I_B=0,25mA$ verwendet woraus $I_C=64,94mA$ und $U_{BE}=0,71V$ folgen.

Die Tangenten-Gleichungen lauten:

$$I_C(U_{CE})=1,7 \cdot U_{CE} + 57,5$$

$$I_C(I_B)=150 \cdot I_B + 27,8$$

$$U_{BE}(I_B)=4,3 \cdot I_B + 71$$

$$U_{BE}(I_B)=0,65 \cdot I_B + 75,3$$

Woraus sich die h-Parameter am Arbeitspunkt ergeben:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \approx 6,61 \Omega$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \approx 0,65$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \approx 150$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \approx 1,105 \frac{1}{\Omega}$$

FET

Wie man an der Strom-Spannungskennlinie ablesen kann fließt erst ab ca. 1,5 V ein Strom der ab 2 V Spannung in eine lineare Steigung übergeht. Es stehen also vorher keine freien Ladungsträger zur Verfügung, was auf einen Anreicherungs-FET schließen lässt.

