Protokoll zum Versuch 532
Transistorkennlinien

Tim Paehler Frank Wöckener

5. Juli 1996

Inhaltsverzeichnis

1 Theorie

1.1 Halbleiter

Halbleiter bestehen hauptsächlich aus den Elementen Silizium und Germanium. Bei ihnen ist der Energie-Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband so beschaffen, daß bereits bei geringer Temperatur Elektronen in das Leitungsband befördert werden können, wodurch das Material leitend wird.
Dotiert man nun diese Halbleiter mit Materialien, die gegenüber der reinen Halbleiterbindung im Kristall ein freies Elektron oder ein freies Defektelektron (ein 'Loch') besitzen, welches am Leitvorgang teilnimmt, so nennt man das resultierende Material einen n-Halbleiter bzw. einen p-Halbleiter.
Grenzen nun eine p- und eine n-leitende Schicht aneinander so diffundieren freie Elektronen von dem n- in den p-Bereich und Defektelektronen von dem p- in den n-Bereich. Die sich infolgedessen aufbauende Potentialdifferenz zeichnet damit eine bestimmte Leitungsrichtung gegenüber der anderen aus. Eine so konstruierte *Diode* leitet nur dann, wenn ein dem inneren Sperrpotential entgegenwirkendes äußeres Potential angelegt wird, also der Minuspol am n-Leiter anliegt.

1.2 Der Transistor

Transistoren bestehen nun im wesentlichen aus drei Halbleiterschichten, dem Emitter, der Basis und dem Kollektor, wobei die Basis gegenüber den beiden anderen Schichten äußerst dünn ist. Legt man nun an Emitter und Kollektor eine Spannung an, so verhält sich der Transistor wie zwei hintereinandergeschaltete n-p- und p-n-Dioden: Er sperrt. Wenn man allerdings auch die Basis gegenüber dem Emitter auf ein entsprechendes Potential legt, so wird die Sperrschicht zwischen diesen so weit verringert, daß (aufgrund der geringen Schichtdicke der Basis) ein sehr viel größerer Strom zwischen Emitter und Kollektor fließt. Die quantitativen Beschreibung dieses Effektes soll in dem vorliegenden Versuch untersucht werden.

1.3 Kennlinien

Um einen Transistor zu vermessen, ist es nötig, verschiedene Kennlinien aufzunehmen, die die Abhängigkeiten folgender vier Größen beschreiben:

- Die Basisspannung U_{BE}
- Der Basisstrom I_N
- Die Kollektorspannung U_{CE}
- Der Kollektorstrom I_C

Eingangskennlinie: Die Eingangskennlinie beschreibt I_B als Funktion von U_{BE},und U_{CE}. Da die Basis mit dem Emitter eine Diode bildet, ist der Kurvenverlauf von $I_B(U_{BE})$ bei festem U_{CE} entsprechend exponentiell.

Stromverstärkungskennlinie: Die Stromverstärkungskennlinie kennzeichnet das Verhältnis zwischen I_B und I_C. Bei konstantem U_{CE} ist dieser nahezu linear.

Ausgangskennlinie: Die Ausgangskennlinie beschreibt I_C als Funktion von U_{CE} bei jeweils festem I_B. Da der Basisstrom für die Bereitstellung der vom Kollektor abgesaugten Elektronen verantwortlich ist, erhöht sich der I_C bei steigendem U_{CE} nur bis zu einer bestimmten Sättigung, von wo an sie keinen weiteren nennenswerten Zuwachs erfährt.

Rückwirkungskennlinie: Die Rückwirkungskennlinie beschreibt die Einwirkung der Kollektorspannung U_{CE} auf die Basisspannung U_B. Dieser ist jedoch äußerst gering und wird daher auch nicht gemessen.

Diese vier Kennlinien werden im Versuch in ein *Vierquadranten-Kennlinienfeld* eingetragen.

1.4 Hybridparameter

Wählt man nun in diesem Kennlinienfeld einen durch die zwischen Basis und Emitter angelegte Spannung U_{BE} charakterisierten Arbeitspunkt, so läßt sich der Transistor in diesem Arbeitsbereich durch die Steigungen der einzelnen Kennlinien beschreiben, die als *Hybridparameter* bezeichnet werden. Diese sind im Folgenden:

Eingangswiderstand: $h_{11} = r_{BE} = \left.\frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B}\right|_{U_{CE}=konstant}$
Entspricht dem Kehrwert der Steigung der Eingangskennlinie im Arbeitspunkt. Der Eingangswiderstand hat die Einheit $[R_{BE}] = \Omega$.

Spannungsrückwirkung: $h_{12} = v_r = \left.\frac{\partial U_{BE}}{\partial U_{CE}}\right|_{I_B=konstant}$
Dieser Hybridparameter beschreibt die Beeinflussung der Basisspannung durch U_{CE}. Da $v_r < 10^{-4}$ ist dieser Effekt meist zu vernachlässigen.

Stromverstärkung: $h21 = \beta = \left.\frac{\partial I_C}{\partial I_B}\right|_{U_{CE}=konstant}$
β beschreibt die Stromverstärkung für kleine Änderungen von U_{BE} und I_B um den Arbeitspunkt.

Ausgangsleitwert: $h_{22} = \frac{1}{r_{CE}} = \left.\frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}}\right|_{I_B=konstant}$
Dieser Hybridparameter ist der Kehrwert des Ausgangswiderstandes r_{CE}. Er entspricht der Steigung der Ausgangskennlinie und hat die Einheit $[\frac{1}{r_{CE}}] = \frac{1}{\Omega}$.

1.5 Verstärkungseigenschaft eines Transistors

In der Praxis wird ein Transistor häufig zur Verstärkung von Wechselspannungen eingesetzt. Hierfür legt man in einem gewählten Arbeitspunkt (also einem eingestellten Gleichspannungsoffset) an Basis und Emitter eine Wechselspannung an. Diese wird dann verstärkt über Emitter und Kollektor abgegeben, wobei das Signal je nach Arbeitsbereich und vorliegender Amplitude mehr oder weniger stark verzerrt wird. Die Verstärkung ist ebenfalls von der Größe des am Kollektorkreis anliegendenden Widerstandes abhängig. Die Werte für Strom- und Spannungsverstärkung lassen sich mit Hilfe der Hybridparameter wie folgt berechnen:

Stromverstärkung:

$$v_I = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22}R} \tag{1}$$

Spannungsverstärkung:

$$v_U = \frac{\Delta U_C E}{\Delta U_B E} = -\frac{R \cdot h_{21}}{h_{11} + R(h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})} \tag{2}$$

2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Zur Versuchsdurchführung wurde zunächst die im Anhang abgebildete (Abb. 9) Schaltung aufgebaut. Daraufhin wurden die für die folgenden Kennlinien relevanten Werte aufgenommen: Eingangskennlinie, Stromverstärkungskennlinie, Ausgangskennlinie. Für die ersten beiden wurden jeweils einzelne Paare der relevanten Werte ermittelt, die Ausgangskennlinie wurde für verschiedene Basisströme mit einem x-y-Schreiber aufgenommen.
Im zweiten Versuchsteil, den Wechselspannungsmessungen, wurde die in Abb. 10 dargestellte Schaltung aufgebaut und für jeden der drei verschiedenen Lastwiderstände im Kollektorkreislauf zunächst der optimale Arbeitspunkt ermittelt. Daraufhin wurde für diesen die Spannungsverstärkung gemessen. Es wurde dann ein Vierquadranten-Kennlinienfeld erstellt, in dem sowohl die einzelnen Kennlinien aufgetragen, als auch die Verstärkung der Wechselspannung und die Hybridparameter graphisch aufgetragen und ermittelt wurden.
Aus dem Vierquadranten-Kennlinienfeld sind nun folgende Werte abzulesen:

2.1 Hybridparameter

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0,16(1 \pm 12,5\%)V}{50,4\mu A}$$

$$
\begin{aligned}
&= 3174,6(1 \pm 12,5\%)\Omega \\
h_{21} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{9,7(1 \pm 2,0\%)mA}{50\mu A} \\
&= 194(1 \pm 2,0\%) \\
h_{22} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{1(1 \pm 20\%)mA}{5,7V} \\
&= 1,72 \cdot 10^{-4}(1 \pm 20\%)\Omega^{-1}
\end{aligned}
$$

2.2 Spannungsverstärkung:

Es wurde ein auf der U_{BE}-Achse $2mV$ großer Quader gezeichnet, dem an jeder der drei Kurven (Eingangskennlinie, Stromverstärkungskennlinie und die der Kollektorwiderstandskennlinie entsprechende Arbeitsgerade) jweils die entprechenden Funktionswerte zugeordnet wurden. Da der Arbeitspunkt für alle 3 Widerstände bei etwa gleichem $U_{BE} = (0,655 \pm 0,01)V$ gewählt wurde, konnte man den Linienverlauf bis zum Auftreffen auf die Arbeitsgeraden gemeinsam zeichnen. Da der Schnitt mit diesen außerhalb des Arbeitsbereichs des Papierblattes stattfanden, wurden die Geraden parallel verschoben, was sie für die Ermittlung der Spannungsverstärkung noch nützlich beließ, die Bestimmung der absoluten Werte, sowie die in der Anleitung erwähnte Überprüfung auf eine "gute Messung" hin verhinderte. Angesichts des fehlenden Schnittes von Kennlinie und Arbeitspunktgerade läßt sich allerdings klar sagen, daß keine "gute Messung" vorliegt.
Für die Kollektorwiderstände $R_i = 1000\Omega, 1500\Omega, 2000\Omega$ wurden folgende Spannungen abgelesen:

$$
\begin{aligned}
U_{R_1} &= 0,9(1 \pm 33,3\%)V \\
U_{R_2} &= 1,35(1 \pm 37,0\%)V \\
U_{R_3} &= 1,75(1 \pm 34,2\%)V
\end{aligned}
$$

Dividiert man diese durch $\Delta U_{BE} = 5,7mV$, so erhält man die folgenden Spannungsverstärkungen:

$$
\begin{aligned}
v_{U1} &= 157(1 \pm 33,3\%) \\
v_{U2} &= 237(1 \pm 37,0\%) \\
v_{U3} &= 307(1 \pm 33,3\%)
\end{aligned}
$$

Zusätzlich läßt sich die Spannungsverstärkung nach (2) aus den Hybridparametern und direkt aus den gemessenen Werten für $U_{in,eff}$ und $U_{out,eff}$ berechnen:

1. Über die Hybridparemter

$$
\begin{aligned}
v_{Ui} &= \frac{R_i \cdot h_{21}}{h_{11} + R_i(h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})} \\
v_{U1} &= 52,5(1 \pm 49\%) \\
v_{U2} &= 73,7(1 \pm 49\%) \\
v_{U1} &= 92,19(1 \pm 49\%)
\end{aligned}
$$

2. Direkt über die Effektivspannungen

$$
\begin{aligned}
v_{Ui} &= \frac{U_{in,eff}}{U_{out,eff}} \\
v_{U1} &= 60(1 \pm 10\%) \\
v_{U2} &= 90(1 \pm 10\%) \\
v_{U1} &= 115(1 \pm 10\%)
\end{aligned}
$$

2.3 Stromverstärkung:

Die Stromverstärkung läßt sich auf zwei verschiedenen Wegen ermitteln: Über die Hybridparameter nach (1) und aus den Ausgangskennlinien. Letzterer ist jedoch aufgrund des außerhalb des Blattes liegenden Schnittpunktes zwischen Arbeitsgeraden und Arbeitspunktgeraden nicht möglich, so daß auf diese Methode verzichtet werden muß.

$$
\begin{aligned}
v_{Ii} &= \frac{h_{21}}{1 + h_{22}R_i} \\
v_{I1} &= 165(1 \pm 22\%) \\
v_{I2} &= 154(1 \pm 22\%) \\
v_{I1} &= 144(1 \pm 22\%)
\end{aligned}
$$

3 Diskussion der Meßergebnisse

Vergleicht man die unterschiedlichen Werte für die Spannungsverstärkung so fällt direkt auf, daß der graphisch ermittelte Wert gegenüber den anderen nicht nur über eine größtee Abweichung von den beiden anderen verfügt. Dies ist angesichts der vielfachen Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten beim Zeichnen (Der verwendete Bleistift gehörte nicht gerade zur Spitzenklasse), insbesondere die graphische

Umsetzung des ΔU_{BE}-Intervalls sowie die Anwendung der Eingangskennlinienfunktion auf selbiges ist auch bei sorgfältigerem Zeichnen mit einem hohen Fehler versehen. Bei den über die Hybridparameter errechneten Werte bewirkt der hohe relative Fehler bei der Ermittlung des Ausgangsleitwerts von 20% aufgrund der geringen Steigung der zugehörigen Ausgangskennlinie einen hohen relativen Gesamtfehler. Mit der Genauigkeit der Messung von h_{22} würde damit auch die Genauigkeit der ermittelten Spannungsverstärkung zunehmen.
Den geringsten Fehler und die geringsten Schwierigkeiten beim Messen bereitet schließlich der durch die direkte Messung $U_{in,eff}$ und $U_{out,eff}$ ermittelte Wert. Er darf deshalb gegenüber den anderen beiden als Referenz betrachtet werden, wobei sich dann ergibt, daß der über die Hybridparameter ermittelte Spannungsverstärkungswert mit dieser innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmt, während der grafisch ermittelte Wert dies nicht tut. Für die Stromverstärkung ließen sich ähnliche Betrachtungen anstellen, leider verfügen wir bei dieser jedoch nur über den über die Hybridparameter ermittelten Wert.