

Versuch 45: Kennlinien



durchgeführt am 25.03.2021

Assistent:



Inhaltsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs	3
2 Versuchsaufbau und Durchführung	4
2.1 Versuchsteil A: Kennlinien von Zweipolen	4
2.2 Versuchsteil B: Kennlinien eines pnp-Transistors	6
3 Auswertung und Fehleranalyse	7
3.1 Versuchsteil A: Kennlinien von Zweipolen	7
3.1.1 Kennlinie eines Ohmschen Widerstands	7
3.1.2 Kennlinie einer Glühlampe	8
3.1.3 Kennlinie einer Halbleiterdiode	10
3.1.4 Widerstände von Glühlampe und Halbleiterdiode	12
3.2 Versuchsteil B: Kennlinien eines pnp-Transistors	13
4 Zusammenfassung und Diskussion	15
4.1 Versuchsteil A	15
4.2 Versuchsteil B	17
Literaturverzeichnis	19
Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	20
5 Anhang	22



1 Ziel des Versuchs

Thema dieses Versuchs sind die elektrischen Eigenschaften, vor allem die Strom-Spannungs-Kennlinien, verschiedener elektrischer Bauelemente, besonders Halbleiterbauelemente.

Im Versuch werden zunächst jeweils die Kennlinien eines Ohmschen Widerstands, einer Glühlampe und einer Halbleiterdiode aufgenommen und miteinander verglichen. Dabei werden auch die Widerstände von Glühlampe und Halbleiterdiode untersucht.

Außerdem wird ein pnp-Transistor betrachtet, dessen Eingangs- und Steuerkennlinie und Ausgangskennlinien ebenfalls aufgenommen werden, anschließend wird deren Bedeutung diskutiert.



2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Versuchsteil A: Kennlinien von Zweipolen

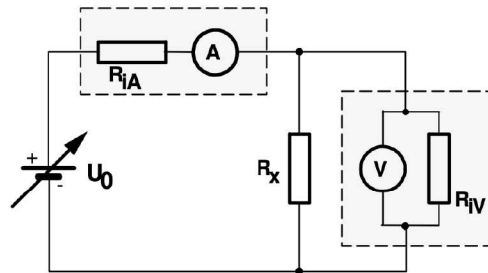


Abb. 2.1: Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinien für einen Ohmschen Widerstand und eine Glühlampe.

Zur Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Ohmschen Widerstands R_x mit dem nominalen Wert $100\ \Omega$ wird die Schaltung in Abbildung 2.1 benötigt. Diese wird auf ein Steckbrett gesteckt, Strom- und Spannungsmesser sind dabei jeweils Digitalmultimeter (Amperemeter: Pieron UT 51, Voltmeter: Metex 3800). Auch für die Messung der Strom-Spannungskennlinie einer Glühlampe wird diese Schaltung verwendet, wobei R_x durch die Glühlampe ersetzt wird.

Gemessen wird der Strom I als Funktion der Spannung U . U wird also am Netzgerät jeweils schrittweise von $0\ \text{V}$ bis $2\ \text{V}$ erhöht und für jeden Schritt der zugehörige Strom abgelesen. Dies wird sowohl einmal für R_x als auch einmal für eine Glühlampe durchgeführt.

Da bei R_x aufgrund des Ohmschen Gesetzes ein linearer Verlauf erwartet wird, ist die Größe der Schritte hier nicht sehr entscheidend, je mehr Messpunkte aufgenommen werden, desto genauer wird jedoch die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte, die später bestimmt wird. Bei der Glühlampe ist der Verlauf anfangs jedoch nicht linear, daher sollte U bis zu einer Spannung von $0,4\ \text{V}$ in etwa $0,05\ \text{V}$ -Schritten erhöht werden, danach reichen Schritte von $0,1\ \text{V}$ bis $0,2\ \text{V}$ aus. Wichtig ist bei beiden Messungen jedoch, dass die Messbereiche an den Digitalmultimetern über die gesamte Messreihe nicht verändert werden. Dabei muss bei der Glühlampe ein größerer Strommessbereich als beim Ohmschen Widerstand eingestellt werden.

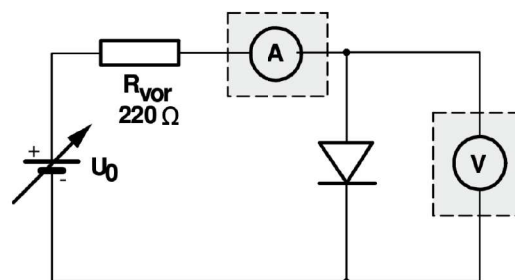


Abb. 2.2: Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinie für eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung.

Außerdem wird die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Halbleiterdiode aufgenommen. Verwendet wird dabei zur Messung in Durchlassrichtung die Schaltung in Abbildung 2.2. Als Strom- und Spannungsmesser werden wieder Digitalmultimeter verwendet (Amperemeter: KT 2210, Voltmeter: Pierron UT 51). Das Voltmeter ist hier parallel zur Diode eingebaut, da es einen relativ hohen Innenwiderstand hat und relativ hohe Ströme fließen. Vor das Amperemeter wird außerdem noch ein Zusatzwiderstand $R_{\text{vor}} = 220 \Omega$ eingebaut, damit die Ströme dennoch nicht zu groß werden und die Diode keinen Schaden nimmt.

Wieder wird die Spannung U am Netzgerät bei 0 V beginnend schrittweise erhöht und für jeden Schritt der zugehörige Strom I notiert. Bis zum Einsetzen eines deutlichen Stroms bei etwa 0,5 V erhöht man dabei in etwa 0,05 V-Schritten, anschließend in 0,02 V-Schritten, bis die maximal am Netzgerät einstellbare Spannung (etwa 0,69 V) erreicht ist. Anders als bei den vorangegangenen Messungen mit R_x und der Glühlampe wird hier jedoch der Strommessbereich während der Messung verändert. Begonnen wird mit einem Messbereich von 200 μA , sobald der Strom größer ist, wird auf 20 mA umgeschaltet und zuletzt auf 200 mA. Die Messbereichswechsel sollten dabei unbedingt notiert werden.

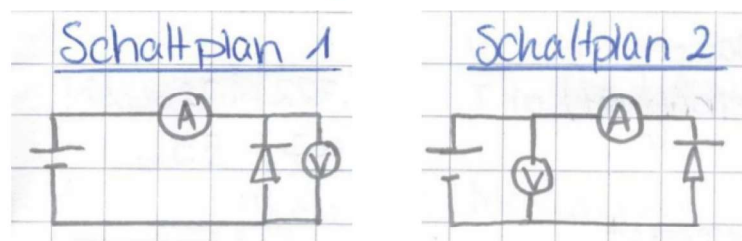


Abb. 2.3: Versuchsaufbauten zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinie für eine Halbleiterdiode in Sperrrichtung.

Außerdem wird die selbe Messung mit der Diode in Sperrichtung durchgeführt. Als Volt- und Amperemeter werden wieder die selben Digitalmultimeter verwendet. Da diesmal keine hohen Ströme fließen, wird, wie in Abbildung 2.3 zu sehen, die Messung nicht nur mit einer Schaltung mit dem Voltmeter parallel zur Diode (Schaltplan 1), sondern auch mit einer Schaltung mit dem Voltmeter parallel zur Spannungsquelle (Schaltplan 2) durchgeführt.

Hier genügen außerdem sehr viel weniger Messpunkte (etwa drei bis vier pro Schaltung), da selbst bei hohen Spannungen kein signifikanter Strom erwartet wird. Der Messbereich des Amperemeters wird dementsprechend auch kleinstmöglich (200 μA) eingestellt.

Außerdem werden die Widerstände der Glühlampe und der Halbleiterdiode zuletzt noch direkt mit einem der Digitalmultimeter (Pierron UT 51) gemessen. Besonders der Widerstand der Diode sollte dabei unbedingt in verschiedenen Messbereichen gemessen und für jede Messung der Messbereich notiert werden.

verwendet das SI unit X-package
 $\rightarrow \text{\textbackslash SI}\{200\}\{\text{microampere}\}$

2.2 Versuchsteil B: Kennlinien eines pnp-Transistors

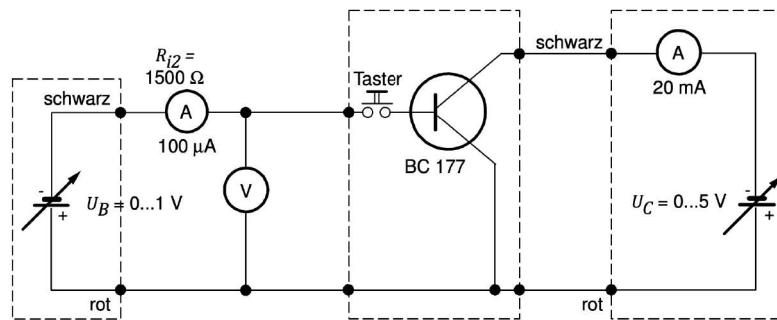


Abb. 2.4: Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinien für einen pnp-Transistor

Im zweiten Teil des Versuchs werden die Strom-Spannungs-Kennlinien eines pnp-Transistors aufgenommen. Die zugehörige Schaltung ist in Abbildung 2.4 zu sehen und wird wieder auf ein Steckbrett gesteckt. Das Netzgerät ist dabei zweigeteilt und liefert zum einen die Basisspannung U_{BE} von bis zu 1 V (links), zum anderen die Kollektorspannung U_{CE} von bis zu 5 V (rechts) – in diesen Teil des Netzgerätes ist außerdem noch ein Strommessgerät (Messbereich 20 mA) eingebaut, das den Kollektorstrom I_C misst. Die Basisstromstärke I_B wird außerdem mit einem Drehspulmessinstrument (Messbereich 100 μ A) gemessen. Zudem werden je nach Kennlinie die Kollektorspannung U_{CE} und die Basisspannung U_{BE} gemessen, dazu wird ein Digitalmultimeter (Pierron UT 51) als Voltmeter an den entsprechenden Stellen in den Stromkreis geschaltet. Damit der Transistor nicht überhitzt, ist in das Transistor-Bauteil ein Tastknopf eingebaut, der während den Messungen gedrückt werden muss.

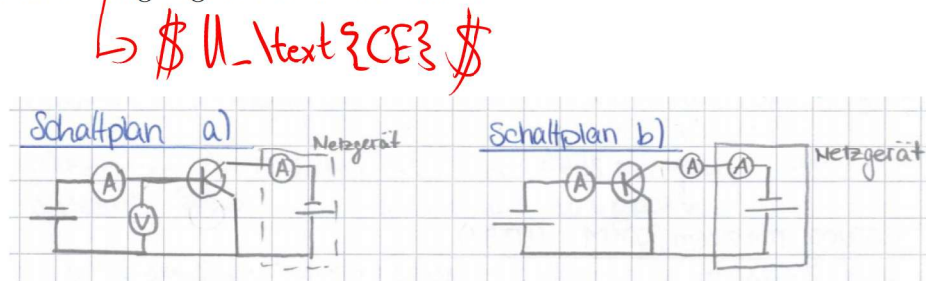


Abb. 2.5: Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Eingangskennlinie (a) und der Steuerkennlinie (b) eines pnp-Transistors

Als erstes wird die Eingangskennlinie des Transistors gemessen, also die Basisstromstärke I_B als Funktion der Basisspannung U_{BE} . Verwendet wird Schaltplan a) in Abbildung 2.5. Da die Eingangskennlinie weitestgehend unabhängig von der Kollektorspannung U_{CE} ist, wird diese auf einen festen Wert von 1 V oder höher eingestellt.

Auch die Steuerkennlinie ist weitestgehend unabhängig von U_{CE} , der soeben fest eingestellte Wert wird daher zur Messung dieser Kennlinie beibehalten. Gemessen wird der Kollektorstrom I_C als Funktion des Basisstroms I_B , wobei Schaltplan b) in Abbildung 2.5 verwendet wird.

Außerdem werden zuletzt noch mehrere Ausgangskennlinien, also der Kollektorstrom I_C als Funktion der Kollektorspannung U_{CE} , gemessen. Diese sind jeweils abhängig von der Basisspannung I_B , welche für die verschiedenen Ausgangskennlinien je einen unterschiedlichen festen Wert haben sollte. Es wird also ein Wert für I_B festgelegt, U_{CE} schrittweise erhöht und für jeden Schritt I_C abgelesen. Beim Erhöhen von U_{CE} kann es dabei sein, dass sich I_B mit ändert, dann muss vor dem Ablesen von I_C die Basisspannung noch einmal nachjustiert werden. Insgesamt sollten so mindestens drei Ausgangskennlinien des pnp-Transistors gemessen werden.

Super!

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Versuchsteil A: Kennlinien von Zweipolen

3.1.1 Kennlinie eines Ohmschen Widerstands

Die mit dem Versuchsaufbau in Abbildung 2.1 gemessenen Wertepaare aus Stromstärke I und Spannung U für einen Ohmschen Widerstand R_x (nominell $10\ \Omega$) sind in Tabelle 5.1 aufgelistet, und außerdem in einem gemeinsamen U - I -Diagramm als Kennlinie in Abbildung 3.1 aufgetragen.

Die Unsicherheiten der Stromstärken I und Spannungen U setzen sich dabei jeweils aus einem statistischen und einem systematischen Fehler zusammen. Der systematische Fehler entsteht durch die Eichtoleranz der verwendeten Digitalmultimeter, fließt jedoch nicht in die Fehlerbalken ein, da der Messbereich während der gesamten Messreihe nicht gewechselt wurde und es hier auch nur um den prinzipiellen Kennlinienverlauf geht. Die statistische Unsicherheit wurde aufgrund von Schwankungen der Anzeige der Digitalmultimeter zu

$$s_U(\text{stat}) = 0,001\text{V} \text{ und } s_I(\text{stat}) = 0,01\text{mA}$$

geschätzt. Diese Unsicherheiten sind auch als Fehlerbalken in Abbildung 3.1 eingezeichnet. Sie sind jedoch zu klein, um sie zu erkennen.

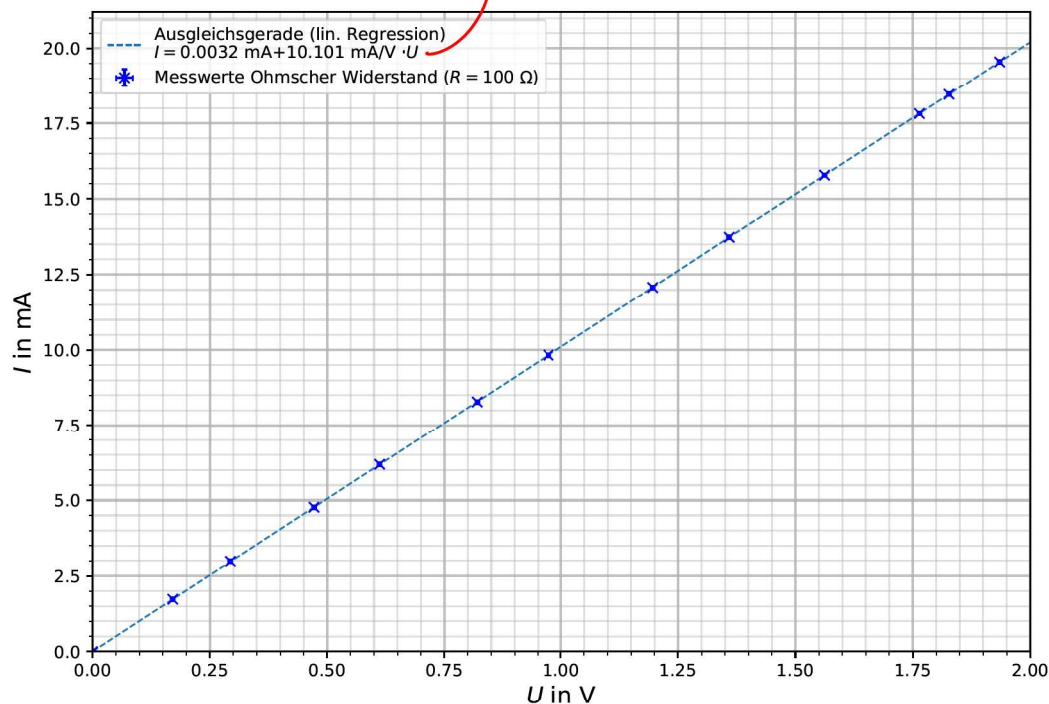


Abb. 3.1: Strom-Spannungs-Kennlinie des Ohmschen Widerstands R_x (nominell $R = 100\ \Omega$) und mit linearer Regression (ohne Gewichtung) bestimmte Ausgleichsgerade.

Der Widerstand R des verwendeten ohmschen Widerstands kann aus einer Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte in Abbildung 3.1 bestimmt werden, da nach dem Ohmschen Gesetz für diesen Widerstand

$$U = R \cdot I \quad (3.1)$$

gilt. R entspricht somit dem Kehrwert der Steigung der Ausgleichsgeraden $I = a + b \cdot U$, welche mit linearer Regression ohne Gewichtung, da die Unsicherheiten der Messwerte alle gleich groß sind, berechnet werden kann. Es ergeben sich die Parameter:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{13} U_i^2 \sum_{i=1}^{13} I_i - \sum_{i=1}^{13} U_i \sum_{i=1}^{13} U_i I_i}{13 \sum_{i=1}^{13} U_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{13} U_i\right)^2} = 0,0032 \text{ mA} \quad (3.2)$$

$$b = \frac{13 \cdot \sum_{i=1}^{13} U_i I_i - \sum_{i=1}^{13} U_i \sum_{i=1}^{13} I_i}{13 \cdot \sum_{i=1}^{13} U_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{13} U_i\right)^2} = 10,101 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad (3.3)$$

Damit ergibt sich als Streuung um das Modell

$$s = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{13} (I_i - (a + b \cdot U_i))^2} = 0,004 \text{ mA} \quad (3.4)$$

woraus sich die Standardunsicherheiten der Parameter berechnen lassen:

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} U_i^2}{13 \cdot \sum_{i=1}^{13} U_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{13} U_i\right)^2}} = 0,0019 \text{ mA} \quad (3.5)$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{13}{13 \cdot \sum_{i=1}^{13} U_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{13} U_i\right)^2}} = 0,0016 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad (3.6)$$

Der Widerstand R_x des ohmschen Widerstands berechnet sich somit zu

$$R_x = \frac{1}{b} = (99,000 \pm 0,016) \Omega \quad (3.7)$$

wobei sich die Unsicherheit aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet:

$$s_{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_x}{\partial b} s_b\right)^2} = \frac{s_b}{b^2} \quad (3.8)$$

3.1.2 Kennlinie einer Glühlampe

Mit dem Versuchsaufbau in Abbildung 2.1 wurden außerdem die Strom-Spannungs-Wertepaare für eine Glühlampe gemessen, die ebenfalls in Tabelle 5.1 aufgelistet sind. Auch diese sind in einem gemeinsamen U - I -Diagramm als Kennlinie in Abbildung 3.2 aufgetragen. Die Fehlerbalken ergeben sich analog zu Abschnitt 3.1.1 nur aus den statistischen Unsicherheiten, welche zu

$$s_U(\text{stat}) = 0,001 \text{ V und } s_I(\text{stat}) = 0,1 \text{ mA}$$

geschätzt werden, da für die Stromstärke I ein größerer Messbereich verwendet wurde. Auch hier sind die Fehlerbalken jedoch wieder zu klein, um erkennbar zu sein.

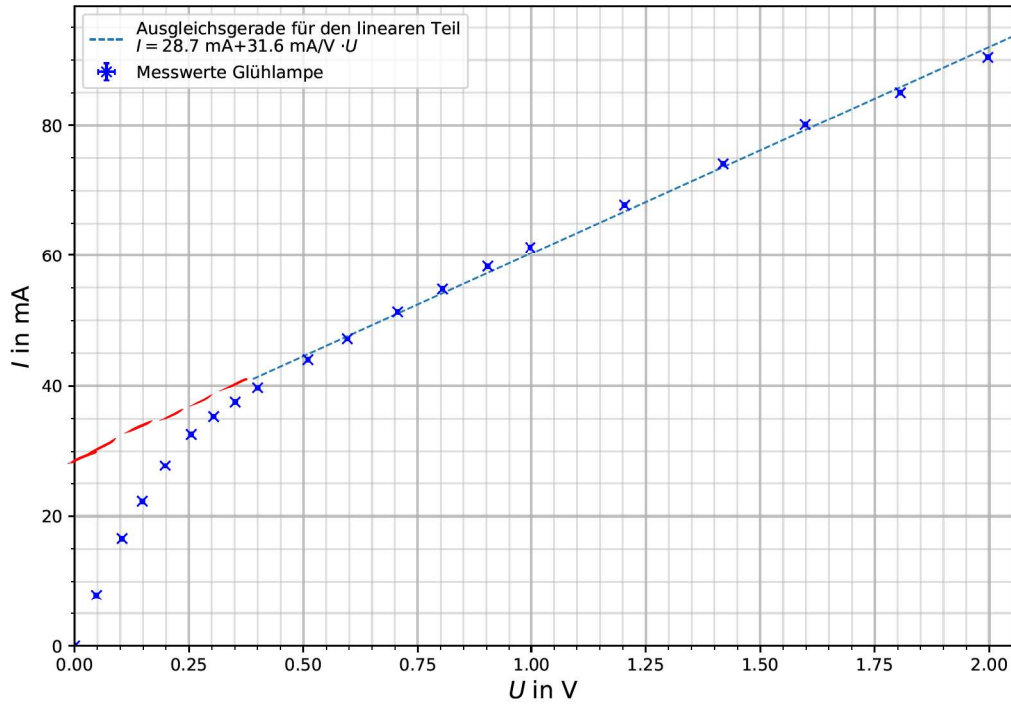


Abb. 3.2: Strom-Spannungs-Kennlinie der Glühlampe und mit linearer Regression (ohne Gewichtung) bestimmte Ausgleichsgerade des linearen Teils

Die in Abbildung 3.2 dargestellte Kennlinie der Glühlampe unterscheidet sich von der des Ohmschen Widerstandes. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Widerstand für kleine Spannungen abhängig von der Stromstärke ist. Erst für größere Spannungen, etwa ab dem neunten Messpunkt, wird der Verlauf nahezu linear und es kann durch diesen Teil eine Ausgleichsgerade gelegt werden. Mit einer linearen Regression ohne Gewichtung lässt sich diese Ausgleichsgerade $I = a + b \cdot U$ berechnen. Die Parameter ergeben sich zu:

$$a = \frac{\sum_{i=9}^{20} U_i^2 \sum_{i=9}^{20} I_i - \sum_{i=9}^{20} U_i \sum_{i=9}^{20} U_i I_i}{12 \cdot \sum_{i=9}^{20} U_i^2 - \left(\sum_{i=9}^{20} U_i\right)^2} = 28,7 \text{ mA} \quad (3.9)$$

$$b = \frac{12 \cdot \sum_{i=9}^{20} U_i I_i - \sum_{i=9}^{20} U_i \sum_{i=9}^{20} I_i}{12 \cdot \sum_{i=9}^{20} U_i^2 - \left(\sum_{i=9}^{20} U_i\right)^2} = 31,6 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad (3.10)$$

Dabei ist die Streuung um das Modell

$$s = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=9}^{20} (I_i - (a + b \cdot U_i))^2} = 1,1 \text{ mA} \quad , \quad (3.11)$$

woraus sich die Standardunsicherheiten der Parameter berechnen lassen:

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=9}^{20} U_i^2}{12 \cdot \sum_{i=9}^{20} U_i^2 - \left(\sum_{i=9}^{20} U_i\right)^2}} = 0,7 \text{ mA} \quad (3.12)$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{12}{12 \cdot \sum_{i=9}^{20} U_i^2 - \left(\sum_{i=9}^{20} U_i\right)^2}} = 0,6 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad (3.13)$$

Der differentielle, aus der Ausgleichsgerade bestimmte Widerstandswert R_{diff} der Glühlampe im linearen Bereich lässt sich analog zu Abschnitt 3.1.1 mit Formel (3.7) und Formel (3.8) zu

$$R_{\text{diff}} = (31,6 \pm 0,6) \, \Omega \quad (3.14)$$

berechnen.

Zusätzlich wird außerdem noch der absolute Widerstand R_{abs} bei einer Spannung von 2 V aus dem dazugehörigen Messpunkt berechnet. Da im Versuch eine Spannung von 2 V nicht exakt einstellbar war, wird der Messpunkt bei $U = (1,997 \pm 0,001) \, \text{V}$ mit einer zugehörigen Spannung von $I = (90,4 \pm 0,1) \, \text{mA}$ verwendet (siehe Tabelle 5.1). In Abbildung 3.2 ist außerdem zu sehen, dass der lineare Teil der Strom-Spannungs-Kennlinie der Glühlampe keine Ursprungsgerade ist – von I muss als noch der mit der linearen Regression bestimmte Achsenabschnitt $a = (28,7 \pm 0,7) \, \text{mV}$ abgezogen werden. Es gilt daher

$$R_{\text{abs}} = \frac{U}{I - a} = (32,4 \pm 0,4) \, \Omega \quad (3.15)$$

Der Fehler berechnet sich dabei aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung:

$$\begin{aligned} s_{R_{\text{abs}}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_{\text{abs}}}{\partial U} s_U\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{\text{abs}}}{\partial I} s_I\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{\text{abs}}}{\partial a} s_a\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{s_U}{I - a}\right)^2 + \left(\frac{U s_I}{(I - a)^2}\right)^2 + \left(\frac{U s_a}{(I - a)^2}\right)^2} = \sqrt{\frac{s_U^2 (I - a)^2 + U^2 s_I^2 + U^2 s_a^2}{(I - a)^4}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.1.3 Kennlinie einer Halbleiterdiode

Die mit dem Versuchsaufbau in Abbildung 2.2 gemessenen Wertepaare aus Stromstärke I und Spannung U für eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung sind in Tabelle 5.2 aufgelistet, und außerdem in einem gemeinsamen U - I -Diagramm in Abbildung 3.3 als Kennlinie aufgetragen.

Da hier, anders als bei den vorherigen Messungen, der Messbereich der Stromstärkemessung während der Messreihe zweimal gewechselt wurde, werden bei der Auswertung dieser Messreihe sowohl die systematischen Fehler, welche sich aus den Eichtoleranzen der Messgeräte ergeben, und auch die statistischen Fehler, welche sich durch Schwankungen beim Ablesen an den Messgeräten ergeben, berücksichtigt.

Die statistischen und systematischen Fehler für die einzelnen Strommessbereiche sind dabei:

Messbereich	$s_I(\text{stat})$	$s_I(\text{stat})$
200 μA	0,1 μA	$0,01 \cdot I + (0,1 \, \mu\text{A})$
2 mA	0,001 mA	$0,01 \cdot I + (0,001 \, \text{mA})$
20 mA	0,01 mA	$0,01 \cdot I + (0,01 \, \text{mA})$

Tab. 3.1: Statistische und systematische Fehler der Strommessbereiche

Für alle drei Strommessbereiche ist die Unsicherheit für das Digitalmultimeter dabei als $\pm(1\% + 1 \text{ Digit})$ angegeben, die statistischen Unsicherheiten wurden aufgrund der Schwankungen der Anzeige des Digitalmultimeters geschätzt. Die in Abbildung 3.3 aufgetragenen Fehlerbalken setzen sich dann aus diesen Unsicherheiten zusammen zu

$$s_I = \sqrt{(s_I(\text{stat}))^2 + (s_I(\text{sys}))^2} \quad (3.17)$$

↳ ich würde $s_{I, \text{stat}}$ als Notation verwenden

Die Messbereichswechsel sind in Tabelle 5.2 und Abbildung 3.3 durch gestrichelte Linien markiert.

Für die Spannung U , die im Messbereich 2 V gemessen wurde, ist die Unsicherheit des Digitalmultimeters als $\pm(0,5\% + 1 \text{ Digit})$ angegeben, also gilt $s_U(\text{sys}) = 0,005 \cdot U + (0,001 \text{ V})$, als statistische Unsicherheit aufgrund von Schwankungen des Messgeräts wurde $s_U(\text{stat}) = 0,001 \text{ V}$ abgeschätzt. Die Unsicherheit s_U , die in Tabelle 5.2 und als Fehlerbalken in Abbildung 3.3 aufgetragen ist, berechnet sich analog wie bei der Stromstärke mit

$$s_U = \sqrt{(s_U(\text{stat}))^2 + (s_U(\text{sys}))^2} . \quad (3.18)$$

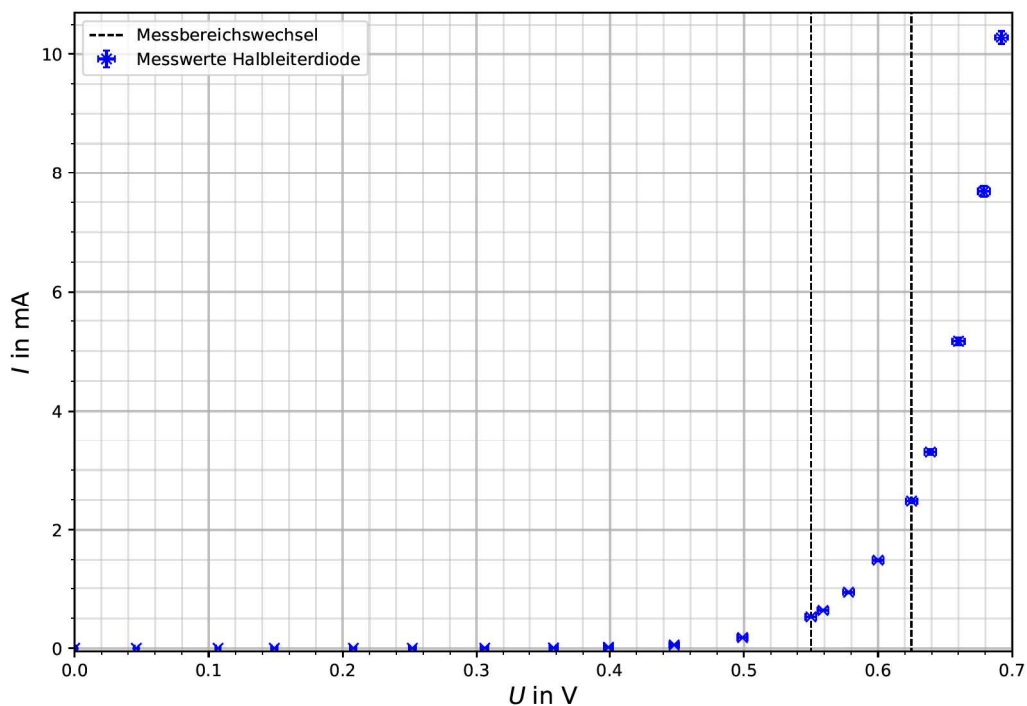


Abb. 3.3: Strom-Spannungs-Kennlinie der Halbleiterdiode

Da die Kennlinie offensichtlich einem exponentiellen Verlauf folgt, ist sie in Abbildung 3.4 außerdem noch mit logarithmischer y-Achse aufgetragen.

Nice

Schreibt hier noch die Messbereiche dazu

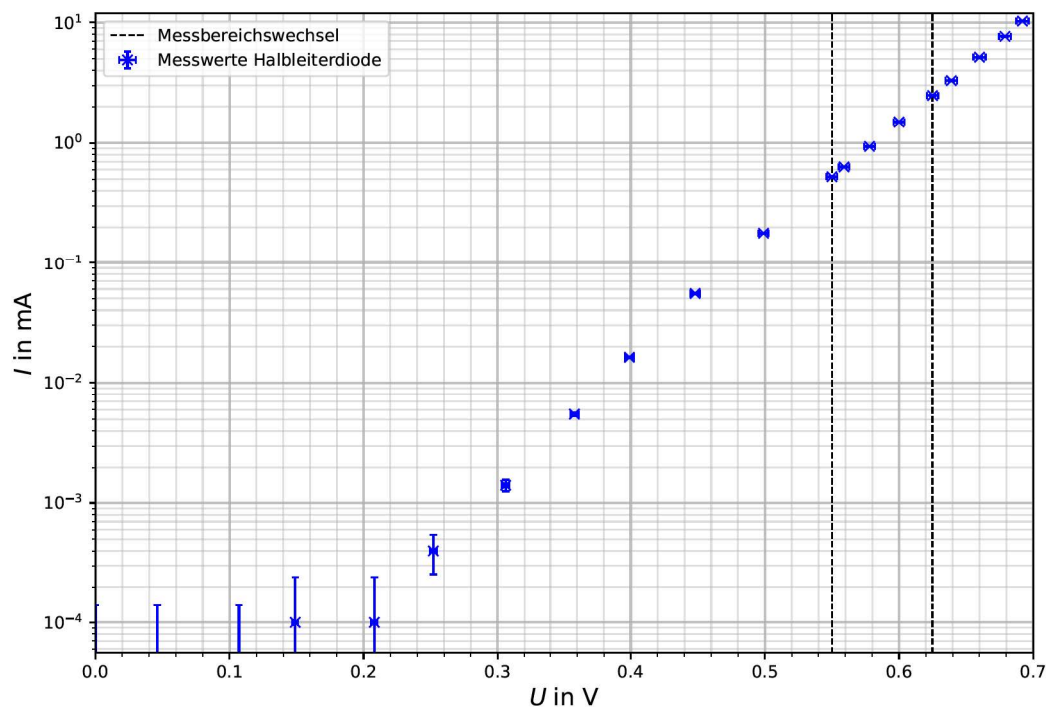


Abb. 3.4: Strom-Spannungs-Kennlinie der Halbleiterdiode (halblogarithmisch).

Außerdem wurden Strom-Spannungs-Messpunkte für die Diode in Sperrrichtung aufgenommen, einmal für eine Schaltung mit dem Voltmeter parallel zur Diode, einmal für eine Schaltung mit dem Voltmeter parallel zum Netzgerät. Die so gemessenen Werte für U und I sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Da jedoch selbst für relativ hohe Spannungen kein Strom messbar ist, wurden diese Datenpunkte nicht als Kennlinie aufgetragen.

3.1.4 Widerstände von Glühlampe und Halbleiterdiode

Die Widerstände von Glühlampe und Halbleiterdiode sind außerdem jeweils zusätzlich mit einem Digitalmultimeter gemessen worden.

Für die Glühlampe ergibt sich dabei im Messbereich $200\ \Omega$ ein Widerstand von $R_{\text{Glüh,mess}} = 5,3\ \Omega$, für die anderen Messbereiche ist dieser Widerstand jedoch zu klein und wird als $0\ \Omega$ angezeigt.

Für die Halbleiterdiode ergeben sich allerdings in verschiedenen Messbereichen verschiedene Widerstandswerte. Diese sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Messbereich	Widerstand R
200 k Ω	139,7 k Ω
2 M Ω	0,793 M Ω
20 M Ω	4,14 M Ω
200 M Ω	1,1 M Ω

Tab. 3.2: Mit einem Digitalmultimeter in verschiedenen Messbereichen gemessene Widerstände der Halbleiterdiode

*ihm hat mathrm{} verwendet, oder?
Das ignoriert Leerzeichen -> \text{}*

3.2 Versuchsteil B: Kennlinien eines pnp-Transistors

In diesem Versuchsteil wurden die Eingangs- und die Steuerkennlinie und drei Ausgangskennlinien eines pnp-Transistors gemessen. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 zu finden, zudem sind alle Kennlinien in einem gemeinsamen Diagramm in Abbildung 5.1 im Anhang aufgetragen.

Da es hier wieder nur um die prinzipiellen Kennlinienverläufe geht, fließen die Eichtoleranzen der Messgeräte nicht in die Fehlerbalken ein, gerade da auch während keiner Messung die Messbereiche der Messgeräte gewechselt wurden. Die Fehlerbalken in Abbildung 5.1 entsprechen daher wieder nur den statistischen Fehlern, die sich beim Basisstrom I_B aus der Ablesegenauigkeit an der Skala des Drehspulmessinstruments und für alle anderen Werte aus den Schwankungen auf den digitalen Anzeigen der Werte (Digitalmultimeter und Anzeige am Netzgerät) ergeben.

Für I_B beträgt die Unsicherheit daher also $s_{I_B}(\text{stat}) = 1 \mu\text{A}$, für I_C wurde sie zu $s_{I_C}(\text{stat}) = 0,02 \text{ mA}$ abgeschätzt, für U_{BE} zu $s_{U_{BE}}(\text{stat}) = 0,001 \text{ V}$ und für U_{CE} ebenfalls zu $s_{U_{CE}}(\text{stat}) = 0,001 \text{ V}$.

Differentieller Eingangswiderstand

Der differentielle Eingangswiderstand

$$r_{BE} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \quad (3.19)$$

des pnp-Transistors lässt sich aus der Steigung der Eingangskennlinie in Abbildung 5.1 bestimmen. Da diese etwa ab dem 12. Messpunkt einigermaßen linear verläuft¹, wurde für diesen Teil der Kennlinie eine lineare Regression durchgeführt. Die so bestimmte Ausgleichsgerade $I_B = a + b \cdot U_{BE}$ ist ebenfalls im Diagramm eingezeichnet. Für die Parameter gilt dabei

$$a = \frac{\sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2 \sum_{i=12}^{26} I_{B_i} - \sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} I_{B_i}}{15 \cdot \sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2 - \left(\sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \right)^2} = -1102 \mu\text{A} \quad (3.20)$$

$$b = \frac{15 \cdot \sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} I_{B_i} - \sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \sum_{i=12}^{26} I_{B_i}}{15 \cdot \sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2 - \left(\sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \right)^2} = 1600 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}}, \quad (3.21)$$

die Streuung um das Modell ist

$$s = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=12}^{26} (I_{B_i} - (a + b \cdot U_{BE_i}))^2} = 6 \mu\text{A}, \quad (3.22)$$

damit sind die Unsicherheiten der Parameter

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2}{15 \cdot \sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2 - \left(\sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \right)^2}} = 71 \mu\text{A} \quad (3.23)$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{15}{15 \cdot \sum_{i=12}^{26} (U_{BE_i})^2 - \left(\sum_{i=12}^{26} U_{BE_i} \right)^2}} = 98 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}}. \quad (3.24)$$

¹Genaugenommen folgt die Eingangskennlinie den exponentiellen Verlauf der Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung, da nach Versuchsanleitung jedoch der Eingangswiderstand für einen mittleren Basisstrom bestimmt werden soll, wurde dennoch eine Gerade durch die Messpunkte gelegt.

Der differentielle Eingangswiderstand entspricht nun also dem Kehrwert der Steigung $b = (1600 \pm 98) \mu\text{A/V}$, es gilt daher

$$r_{BE} = \frac{1}{b} = (625 \pm 38) \Omega \quad , \quad \checkmark \quad (3.25)$$

wobei sich die Unsicherheit aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung mit $s_{r_{BE}} = s_b/b^2$ berechnet. ✓

Kleinsignal-Stromverstärkung

Die Kleinsignalverstärkung

$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \quad \checkmark \quad (3.26)$$

des pnp-Transistors lässt sich dagegen aus der Steigung der Steuerkennlinie in Abbildung 5.1 bestimmen. Diese hat auch in der Nähe des Ursprungs einen nahezu linearen Verlauf, weshalb die Ausgleichsgerade $I_C = a + b \cdot I_B$ mittels linearer Regression mit allen Messpunkten bestimmt wurde. Für die Parameter gilt

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2 \sum_{i=1}^{19} I_{C_i} - \sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \sum_{i=1}^{19} I_{B_i} I_{C_i}}{19 \cdot \sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \right)^2} = 0,08 \text{ mA} \quad (3.27)$$

$$b = \frac{19 \cdot \sum_{i=1}^{19} I_{B_i} I_{C_i} - \sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \sum_{i=1}^{19} I_{C_i}}{19 \cdot \sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \right)^2} = 139,0 \quad , \quad (3.28)$$

die Streuung um das Modell ist

$$s = \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=1}^{19} (I_{C_i} - (a + b \cdot I_{B_i}))^2} = 0,11 \text{ mA} \quad , \quad (3.29)$$

damit sind die Unsicherheiten der Parameter:

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2}{19 \cdot \sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \right)^2}} = 0,04 \text{ mA} \quad \checkmark \quad (3.30)$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{19}{19 \cdot \sum_{i=1}^{19} (I_{B_i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{19} I_{B_i} \right)^2}} = 0,8 \quad (3.31)$$

Die Kleinsignalverstärkung β entspricht also der Steigung b der Ausgleichsgeraden, es gilt

$$\beta = b = 139 \pm 0,8 \quad . \quad \checkmark \quad (3.32)$$

4 Zusammenfassung und Diskussion

4.1 Versuchsteil A

Kennlinie des Ohmschen Widerstands R_x

Wie in Formel (3.7) zu sehen ist, ist die Strom-Spannungs-Kennlinie für den Ohmschen Widerstand R_x , wie aus dem Ohmschen Gesetz erwartet, linear und beginnt im Ursprung. Der verwendete Widerstand ist also definitiv ohmsch, also unabhängig von der Stromstärke. Auf dem Widerstandsbauteil angegeben war ein nomineller Wert von

$$R_{x,\text{nom}} = 100 \, \Omega \quad \checkmark$$

Aus der mittels linearer Regression bestimmten Ausgleichsgerade ließ sich der Widerstand ebenfalls bestimmen, dabei ergab sich ein Wert von

$$R_x = (99,000 \pm 0,016) \, \Omega \quad \checkmark$$

Der nominelle Wert liegt also nur in der 63-fachen Standardunsicherheit des experimentell bestimmten Werts. Die relative Unsicherheit von R_x ist jedoch mit etwa 0,016 % sehr gering, und die absolute Abweichung der beiden Werte beträgt ebenfalls nur 1 Ω . Aus diesem Grund kann man davon ausgehen, dass die Abweichung nicht aus Messfehlern oder dergleichen folgt. Womöglich entsteht sie aufgrund systematischer Unsicherheiten! in der Spannungs- und/oder Strommessung, da sie jedoch aus der Steigung der Kennlinie bestimmt wurde, ist auch das nicht sehr wahrscheinlich. Vermutlich ist $R_x = 99 \, \Omega$ einfach der tatsächliche Wert des Widerstands und der nominelle, auf dem Bauteil angegebene Wert stimmt nicht exakt. Dass die Ausgleichsgerade in Formel (3.7) sehr genau durch alle Messpunkte verläuft, spricht auch dafür, dass $R_x = 99 \, \Omega$ der tatsächliche Wert des Widerstands ist.

Bei 63 σ , 0,016% $\rightarrow$ 100% syst. Fehler als Ursache

Kennlinie der Glühlampe

Wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, ist die Strom-Spannungskennlinie der Glühlampe für kleine Spannungen und Stromstärken im Gegensatz zu der für den Ohmschen Widerstand nicht linear. Das Ohmsche Gesetz gilt also nicht, der Widerstand ist abhängig von der Stromstärke.

Es ist also zunächst ein starker Anstieg der Stromstärke zu erkennen, anschließend ab ca. 0,4 V scheint die Kennlinie jedoch einem linearen Verlauf zu folgen. Aus diesem linearen Bereich lässt sich der differentielle Widerstandswert

$$R_{\text{diff}} = (31,6 \pm 0,6) \, \Omega \quad \checkmark$$

aus der Steigung der mit linearer Regression bestimmten Ausgleichsgeraden des linearen Teils bestimmen. Außerdem kann durch einen Messpunkt der absolute Widerstand

$$R_{\text{abs}} = (32,4 \pm 0,4) \, \Omega \quad \checkmark$$

bei einer Spannung von 2 V berechnet werden, hierbei wurde zusätzlich der Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden berücksichtigt. Vergleicht man diese zwei Widerstände miteinander so ergibt sich in Einheiten der kombinierten Standardunsicherheit eine Abweichung von

$$t = \frac{|R_{\text{abs}} - R_{\text{diff}}|}{\sqrt{(R_{\text{abs}})^2 + (R_{\text{diff}})^2}} = 1,1 \quad \checkmark \quad (4.1)$$

Die auf unterschiedliche Weise bestimmten Widerstände sind somit auf einem Signifikanzniveau von 5% verträglich. Für größere Spannungen und Stromstärken scheint also auch für die Glühlampe das Ohmsche Gesetz zu gelten. ✓

Vergleicht man die aus der Kennlinie bestimmten Widerstände jedoch mit dem Widerstand, der mit einem Digitalmultimeter direkt gemessen wird, ist eine deutliche Abweichung zu erkennen. Der direkt gemessene Widerstand liegt bei

$$R_{\text{mess}} = 5,3 \, \Omega , \quad \checkmark$$

was überhaupt nicht mit den experimentell bestimmten Widerständen der Glühlampe übereinstimmt. Dies erklärt sich dadurch, dass im Digitalmultimeter zur Messung des Widerstands ein Messstrom fließt, der nicht im linearen Bereich der Kennlinie liegt. Es wird somit deutlich, dass sich für die Glühlampe nicht ein Widerstand für alle angelegten Spannungen ermitteln lässt. Grund hierfür könnte die enorme Erwärmung des Glühfadens und die daraus entstehende Steigung des elektrischen Widerstandes bei wachsendem Strom sein. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Glühlampe ein nicht-ohmscher Leiter ist. ✓

Kennlinie der Halbleiterdiode

Die aufgenommene Kennlinie der Halbleiterdiode in Durchlassrichtung in Abbildung 3.3 entspricht sehr gut dem theoretischen Verlauf. Es muss zunächst eine gewisse Spannung angelegt werden, damit ein Strom durch die Diode fließen und die Sperrschicht überwunden werden kann. Ist diese Spannung überwunden, so steigt die Stromstärke mit der Spannung stark an und es ist ein exponentieller Zusammenhang zu erkennen. Um diesen Zusammenhang zu verifizieren, ist die Strom-Spannungs-Kennlinie in Abbildung 3.4 halblogarithmisch aufgetragen. Darin kann man erkennen, dass der Verlauf linear erscheint. Lediglich die ersten Messpunkte scheinen vom linearen Verlauf abzuweichen. Dies ist jedoch zu erwarten, da zu Beginn kein Strom durch die Diode fließt. Der erste Messpunkt, bei welchem eine deutliche Stromstärke messbar und in Abbildung 3.4 erkennbar ist, weicht jedoch ebenfalls vom linearen Verlauf ab. Hier gilt es zu hinterfragen, ob bei diesem Messwert die Sperrschicht der Halbleiterdiode überhaupt schon überwunden ist. Stattdessen könnte es sein, dass durch die verwendete Schaltung für geringe Ströme nur der Strom durch das Voltmeter gemessen worden ist. Außerdem ist ein leichter „Knick“ im linearen Verlauf zu erkennen. Dieser kann jedoch durch den Wechsel des Messbereichs der Stromstärke am Digitalmultimeter erklärt werden, da dieser genau bei einem der markierten Wechsel des Messbereichs liegt. Perfekt! ✓

Um Fehler durch die Schaltung zu vermeiden und zu erkennen, werden zur Messung der Halbleiterdiode in Sperrrichtung zwei unterschiedliche Schaltungen verwendet, da dort im Gegensatz zur Durchlassrichtung nur sehr geringe Ströme fließen. Bei der Messung, bei der das Voltmeter parallel zum Netzgerät angeschlossen ist, kann für keine Spannung ein Strom gemessen werden. Bei der Messung, bei der das Voltmeter parallel zur Diode angeschlossen ist, kann für größere Spannungen eine kleine Stromstärke gemessen werden. Das Problem der erstgenannten Schaltung ist häufig, dass die Spannung signifikant falsch gemessen wird. Da lediglich untersucht wird, ob überhaupt ein Strom bei unterschiedlichen Spannungen gemessen werden kann, spielt es deshalb keine große Rolle, ob die richtigen Spannungswerte protokolliert werden. Die zweite Schaltung birgt dagegen die Gefahr, nur den Strom durch das Voltmeter zu messen. Da mit der ersten Schaltung keine Ströme messbar sind, kann vermutet werden, dass die zweite Messung tatsächlich die Ströme durch das Voltmeter gemessen hat. Aus der kompletten Messung kann somit geschlussfolgert werden, dass durch die Diode auch für steigende Spannungen kein Strom fließt, wenn diese in Sperrrichtung in den Stromkreis eingebaut wird. ✓

Die Messreihen mit der Halbleiterdiode zeigen zusammenfassend die Abhängigkeit des Widerstands von der angelegten Spannung und deren Polung. Es ist somit nicht verwunderlich, dass das Digitalmultimeter bei der direkten Messung des Widerstands der Halbleiterdiode bei unterschiedlichen Messbereichen unterschiedliche Widerstände liefert. Grund hierfür könnten in unterschiedlichen Messbereichen unterschiedlich angelegte Spannungen und Messströme im Digitalmultimeter und die Tatsache, dass eine Halbleiterdiode nicht dem Ohmschen Gesetz folgt, sein.

4.2 Versuchsteil B

In Abbildung 5.1 sind die Eingangs-, die Steuer- und drei Ausgangskennlinien des benutzten pnp-Transistors aufgetragen.

Die Eingangskennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung U_{BE} zwischen Basis und Emitter und dem Basisstrom I_B . Beim so betrachteten Stromkreis wird somit das Verhalten einer Diode bestehend aus Basis (n-dotiert) und Emitter (p-dotiert) untersucht. In Abbildung 5.1 wird deutlich, dass eine gewisse Spannung U_{BE} nötig ist, um einen Strom I_B messen zu können. Anschließend steigt wie erwartet die Stromstärke I_B steil mit wachsender Spannung U_{BE} an. Die Kennlinie entspricht somit der einer Diode in Durchlassrichtung. Der differentielle Eingangswiderstand bei einem mittleren Basisstrom kann graphisch durch eine lineare Regression durch die letzten Messpunkte der Eingangskennlinie, da diese näherungsweise linear verlaufen, zu

$$r_{BE} = (625 \pm 38) \, \Omega$$

bestimmt werden. Für $r_{BE} = \partial U_{BE} / \partial I_B$ kann durch den Kennlinienverlauf vermutet werden, dass r_{BE} mit steigendem Basisstrom größer wird, da die Steigung der Kennlinie größer wird. Prinzipiell ist die Bestimmung des differentiellen Eingangswiderstands mittels linearer Regression sicher kein besonders genaues Verfahren, da der Verlauf ja nicht tatsächlich linear ist, wodurch in jedem Fall systematische Fehler entstehen.

Die Steuerkennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Basisstrom I_B und dem Kollektorstrom I_C bei einer konstanten Kollektorspannung. Es ist ein eindeutiger linearer Verlauf der Kennlinie ersichtlich. Der Kollektorstrom I_C ist somit linear vom Basisstrom abhängig, wie aus der Theorie ($I_C = B \cdot I_B$, wobei B die Stromverstärkung des Transistors ist) erwartet. Die Änderung des Basisstrom δI_C wird durch einen Transistor mit einem festen Faktor (Kleinsignalverstärkung $\beta = \partial I_C / \partial I_B$) verstärkt. Durch eine lineare Regression kann die Kleinsignalverstärkung des verwendeten pnp-Transistors zu

$$\beta = 139,0 \pm 0,8$$

bestimmt werden.

Die Ausgangskennlinien beschreiben den Zusammenhang zwischen der angelegten Kollektorspannung U_{CE} und dem Kollektorstrom I_C für unterschiedliche konstante Basisstromstärken I_B . Bei allen drei Kennlinien steigen die Kollektorstromstärken I_C zunächst steil mit steigender Spannung U_{CE} an und nähern sich anschließend ihrer Sättigung. Dieser maximale Kollektorstrom ist abhängig von der angelegten Basisstromstärke I_B . Der größte maximale Kollektorstrom kann bei der Messung mit der größten Basisstromstärke I_B gemessen werden, der kleinste beim geringsten Basisstrom. Der steile Anstieg des Kollektorstroms zu Beginn der Ausgangskennlinien entsteht durch die Erhöhung der Kollektorspannung im Vergleich zur Basis-Emitter-Spannung, da für die normale Funktion des Transistors die Spannung zwischen Kollektor und Emitter höher

sein muss als zwischen Basis und Emitter. Die Sättigung kann durch die Ladungsträger erklärt werden, da der Kollektor nicht mehr Ladungsträger einsammeln kann, als überhaupt durch den Emitter in die Basis gelangen. Bei einem festen mittleren Basisstrom hat die Kollektorspannung U_{CE} also vor allem im Bereich geringer Kollektorströme einen großen Einfluss auf I_C , sobald die Sättigung erreicht wird hat U_{CE} jedoch kaum mehr Einfluss auf I_C . ✓

Super!

Literaturverzeichnis

- [1] Versuchsaufbauten: *Versuchsanleitungen Physik-Labor für Anfänger*innen, Teil II* (Stand: 02/2021) (Versuch 45: Kennlinien), S. 18, 19, 21

\caption [kurzer Titel fürs Verzeichnis] {langer Titel}

Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinien für einen Ohmschen Widerstand und eine Glühlampe	4
2.2	Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinie für eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung	4
2.3	Versuchsaufbauten zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinie für eine Halbleiterdiode in Sperrrichtung	5
2.4	Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Strom-Spannungs-Kennlinien für einen pnp-Transistor	6
2.5	Versuchsaufbau zum Aufnehmen der Eingangskennlinie (a) und der Steuerkennlinie (b) eines pnp-Transistors	6
3.1	Strom-Spannungs-Kennlinie des Ohmschen Widerstands R_x (nominell $R = 100 \Omega$) und mit linearer Regression (ohne Gewichtung) bestimmte Ausgleichsgerade . . .	7
3.2	Strom-Spannungs-Kennlinie der Glühlampe und mit linearer Regression (ohne Gewichtung) bestimmte Ausgleichsgerade des linearen Teils	9
3.3	Strom-Spannungs-Kennlinie der Halbleiterdiode	11
3.4	Strom-Spannungs-Kennlinie der Halbleiterdiode (halblogarithmisch)	12
5.1	Kennlinien des pnp-Transistors	24
5.2	Laborheft Seite 1	27
5.3	Laborheft Seite 2	28
5.4	Laborheft Seite 3	29
5.5	Laborheft Seite 4	30

Tabellenverzeichnis

3.1	Statistische und systematische Fehler der Strommessbereiche	10
3.2	Mit einem Digitalmultimeter in verschiedenen Messbereichen gemessene Widerstände der Halbleiterdiode	12
5.1	Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien des Ohmschen Widerstands R_x und der Glühlampe	22
5.2	Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien der Halbleiterdiode in Durchlass- richtung (Messbereiche Stromstärke: 200 μ A, 20 mA und 200 mA – Messbereichs- wechsel sind jeweils durch die gestrichelte Linie markiert)	23
5.3	Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien der Halbleiterdiode in Sperrrichtung	23
5.4	Messdaten für die Eingangs- und Steuerkennlinie des pnp-Transistors	25
5.5	Messdaten für die Ausgangskennlinien des pnp-Transistors	26

5 Anhang

Ohmscher Widerstand		Glühlampe	
U in V	I in mA	U in V	I in mA
0.000	0.00	0.000	0.0
0.171	1.73	0.048	7.9
0.294	2.98	0.104	16.6
0.472	4.77	0.148	22.3
0.612	6.19	0.198	27.8
0.820	8.28	0.255	32.6
0.973	9.83	0.304	35.3
1.196	12.08	0.351	37.5
1.359	13.73	0.400	39.7
1.562	15.78	0.510	44.0
1.764	17.82	0.596	47.2
1.827	18.46	0.706	51.3
1.935	19.55	0.804	54.8
		0.903	58.3
		0.997	61.3
		1.204	67.8
		1.419	74.1
		1.598	80.1
		1.806	85.0
		1.997	90.4

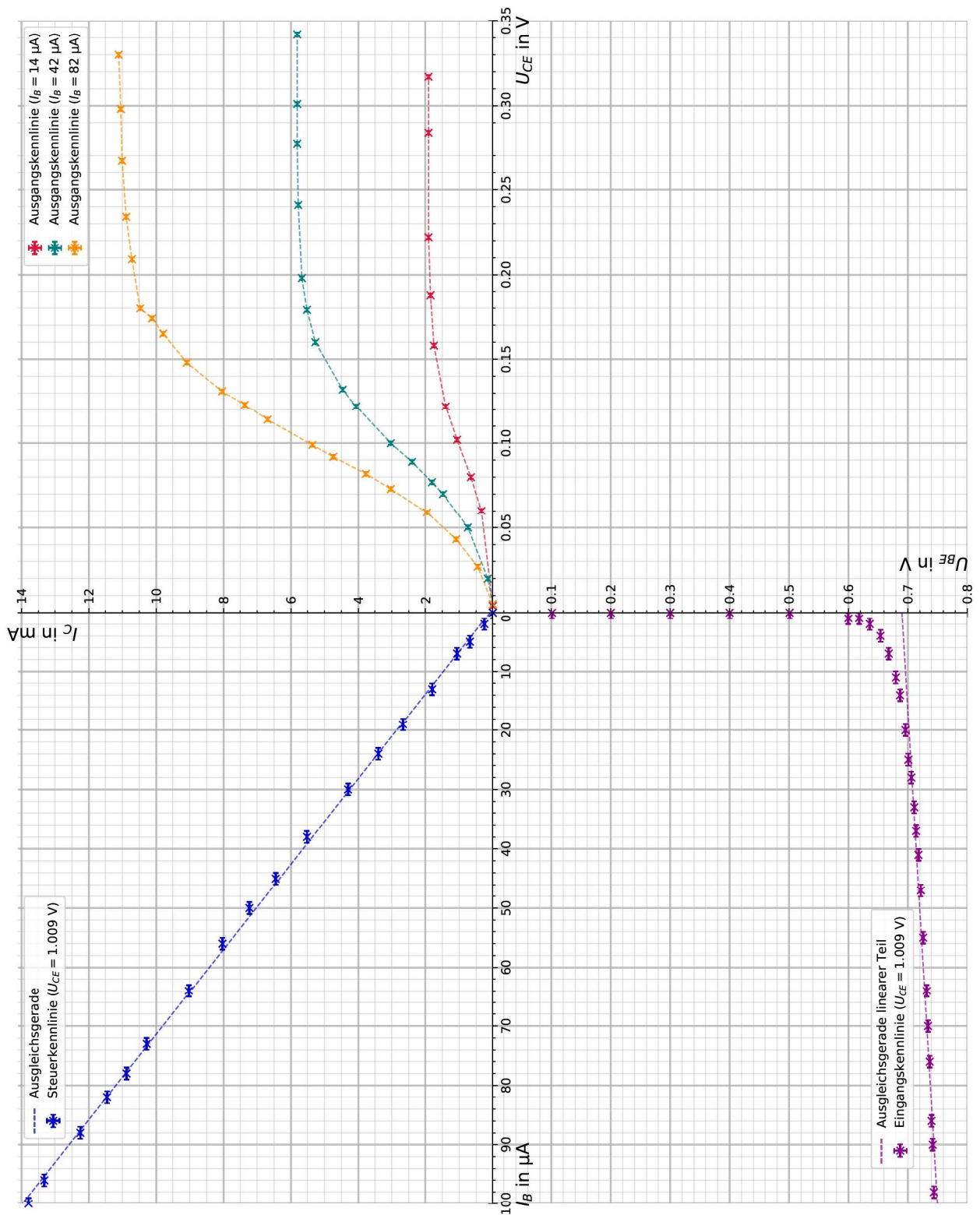
Tab. 5.1: Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien des Ohmschen Widerstands R_x und der Glühlampe

U in V	I in mA
0.000 ± 0.001	0.000 ± 0.000
0.046 ± 0.002	0.000 ± 0.000
0.107 ± 0.002	0.000 ± 0.000
0.149 ± 0.002	0.000 ± 0.000
0.208 ± 0.002	0.000 ± 0.000
0.252 ± 0.002	0.000 ± 0.000
0.306 ± 0.003	0.001 ± 0.000
0.358 ± 0.003	0.005 ± 0.000
0.399 ± 0.003	0.016 ± 0.000
0.448 ± 0.003	0.055 ± 0.001
0.499 ± 0.004	0.178 ± 0.002
0.550 ± 0.004	0.524 ± 0.006
0.559 ± 0.004	0.632 ± 0.007
0.578 ± 0.004	0.936 ± 0.010
0.600 ± 0.004	1.494 ± 0.016
0.625 ± 0.004	2.48 ± 0.04
0.639 ± 0.004	3.30 ± 0.04
0.660 ± 0.004	5.16 ± 0.06
0.679 ± 0.005	7.68 ± 0.09
0.692 ± 0.005	10.28 ± 0.11

Tab. 5.2: Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien der Halbleiterdiode in Durchlassrichtung (Messbereiche Stromstärke: $200 \mu\text{A}$, 20 mA und 200 mA – Messbereichswechsel sind jeweils durch die gestrichelte Linie markiert)

Schaltplan 1 (Voltmeter parallel zu Diode)		Schaltplan 2 (Voltmeter parallel zu Netzgerät)	
U in V	I in μA	U in V	I in μA
0.000	0.0	0.000	0.0
0.397	0.0	0.599	0.0
0.709	0.1	1.244	0.0
1.064	0.1	1.866	0.0
1.807	0.2		

Tab. 5.3: Messdaten für die Strom-Spannungskennlinien der Halbleiterdiode in Sperrrichtung



Sehr schön

Abb. 5.1: Kennlinien des pnp-Transistors

Eingangskennlinie ($U_{CE} = 1.009 \text{ V}$)		Steuerkennlinie ($U_{CE} = 1.009 \text{ V}$)	
U_{BE} in V	I_B in μA	I_B in μA	I_C in mA
0.101	0	0	0.00
0.200	0	2	0.25
0.300	0	5	0.68
0.400	0	7	1.06
0.501	0	13	1.80
0.600	1	19	2.67
0.618	1	24	3.40
0.636	2	30	4.30
0.654	4	38	5.52
0.668	7	45	6.45
0.680	11	50	7.23
0.687	14	56	8.03
0.696	20	64	9.03
0.701	25	73	10.28
0.706	28	78	10.88
0.711	33	82	11.46
0.714	37	88	12.25
0.718	41	96	13.32
0.722	47	100	13.79
0.726	55		
0.732	64		
0.734	70		
0.737	76		
0.740	86		
0.742	90		
0.744	98		

Tab. 5.4: Messdaten für die Eingangs- und Steuerkennlinie des pnp-Transistors

$I_B = 14 \mu\text{A}$		$I_B = 42 \mu\text{A}$		$I_B = 82 \mu\text{A}$	
U_{CE} in V	I_C in mA	U_{CE} in V	I_C in mA	U_{CE} in V	I_C in mA
0.004	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
0.060	0.34	0.020	0.15	0.027	0.45
0.080	0.65	0.050	0.74	0.043	1.09
0.102	1.06	0.070	1.48	0.059	1.96
0.122	1.40	0.077	1.81	0.073	3.03
0.158	1.75	0.089	2.40	0.082	3.77
0.188	1.85	0.100	3.03	0.092	4.74
0.222	1.91	0.122	4.06	0.099	5.36
0.284	1.91	0.132	4.46	0.114	6.69
0.317	1.91	0.160	5.27	0.123	7.37
		0.179	5.52	0.131	8.04
		0.198	5.67	0.148	9.09
		0.241	5.78	0.165	9.79
		0.277	5.81	0.174	10.12
		0.301	5.81	0.180	10.47
		0.342	5.81	0.209	10.72
				0.234	10.89
				0.267	11.01
				0.298	11.05
				0.330	11.11

Tab. 5.5: Messdaten für die Ausgangskennlinien des pnp-Transistors

Versuch 45: Kennlinien

25.03.21

Messung 1: Ohmscher Widerstand: $R_x = 100 \Omega$

U in V	0	0,171	0,284	0,472	0,612	0,820	0,973	1,196	1,359	1,562	1,764	1,827	1,935
I in mA	0	1,73	2,98	4,77	6,19	8,28	9,83	12,08	13,73	15,78	17,82	18,46	19,55

Messbereiche: für I: 20mA (UT51) und für U: 2V (Metex)
 Statistischer Fehler: $\Delta I = 0,01 \text{ mA}$ und $\Delta U = 0,001 \text{ V}$

Schaltplan



mit $X = R_x$ und $x = \text{Glühlampe}$

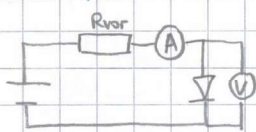
Messung 2: Glühlampe

Messbereiche: für I: 200mA (UT51) und für U: 2V (Metex)
 Statistischer Fehler: $\Delta I = 0,1 \text{ mA}$ und $\Delta U = 0,001 \text{ V}$

U in V	0	0,048	0,104	0,148	0,188	0,255	0,304	0,351	0,400	0,510	0,586	0,706	0,804
I in mA	0	7,9	16,6	22,3	27,8	32,6	35,3	37,5	39,7	44,0	47,2	51,3	54,8
U in V	0,903	0,897	1,204	1,419	1,598	1,806	1,997						
I in mA	58,3	61,3	67,8	74,1	80,1	85,0	90,4						

Messung 3: Halbleiterdiode

Schaltplan: In Durchlassrichtung



Messbereiche: für U: 2V (UT51)

für I: ① 200 μA
 ② 2 mA
 ③ 20 mA } (KT-2210)

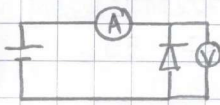
U in V	0	0,046	0,107	0,149	0,208	0,252	0,306	0,358	0,399	0,448	0,499		
① I in μA	0	0	0	0,1	0,1	0,4	1,4	5,5	16,3	55,1	178,1		
U in V	0,550	0,558	0,578	0,600			0,625	0,639	0,660	0,679	0,692		
② I in mA	0,524	0,632	0,936	1,494			③ I in mA	2,48	3,30	5,16	7,68	10,28	

Statistische Fehler: für U: 0,001V und für I: ① 0,1 μA und ③ 0,01mA
 ② 0,001mA

Abb. 5.2: Laborheft Seite 1

In Sperrrichtung

Schaltplan 1



I in μA	U in V
0	0
0	0,397
0,1	0,709
0,1	1,064
0,2	1,807

Messbereiche:

für U : 2V (UT51)

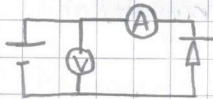
für I : 200 μA (KT-2210)

Statistische Fehler:

für U : $\Delta U = 0,001V$

für I : $\Delta I = 0,1 \mu A$

Schaltplan 2



I in μA	U in V
0	0
0	0,599
0	1,244
0	1,866

Messbereiche wie oben

statistische Fehler wie oben

Direkte Messung mit einem DMM (UT51)

<u>Diode</u> :	Messbereich	200 $k\Omega$	2 $M\Omega$	20 $M\Omega$	200 $M\Omega$
	R in Ω	139,7 $k\Omega$	0,793 $M\Omega$	4,14 $M\Omega$	1,1 $M\Omega$

Glühlampe : $R = 5,3 \Omega$ mit Messbereich 200 Ω

Messung 4 : pnp-Transistor

a) Eingangskennlinie I_B als Funktion von U_{BE}

$U_{CE} = 1,009$ mit UT51 Messbereich : 2V

I_B in μA	0	0	0	0	0
U_{BE} in V	0,010	0,021	0,031	0,041	0,052

I_B in μA	0	0	0	0	0	1	1	2	4	7	11	14
U_{BE} in V	0	0,101	0,205	0,309	0,412	0,512	0,616	0,619	0,640	0,660	0,680	0,700

U_{BE} in V	0,721	0,7
I_B in μA	16	

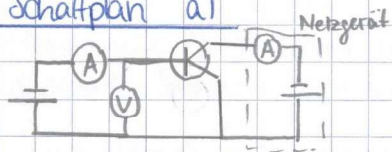
Abb. 5.3: Laborheft Seite 2

U_{BE} in V	0,101	0,200	0,390	0,400	0,501	0,600	0,618	0,636	0,654	0,668
I in μA	0	0	0	0	0	1	1	2	4	7

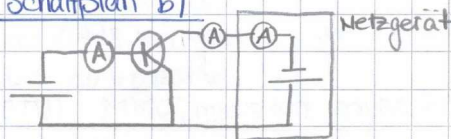
U_{BE} in V	0,680	0,687	0,696	0,701	0,706	0,711	0,714	0,718	0,722	0,726
I in μA	11	14	20	285	28	33	37	41	47	55
U_{AE} in V	0,732	0,734	0,737	0,740	0,742	0,744				
I in μA	64	70	76	86	90	98				

Messbereiche: U_{BE} : 2V (UT5.1) und I_B : 100 μA (Drehspulamperemeter)
 statistische Fehler: $\Delta U_{BE} = 0,001V$ und $\Delta I_B = \pm 1 \mu A$ (Ablesegenauigkeit)

Schaltplan a)



Schaltplan b)



b) Steuerkennlinie I_C als Funktion von I_B

$U_{CE} = 1,008 V$ mit UT5.1

I_B in μA	0	2	5	7	13	19	24	30	38	45	50
I_C in μA	0	0,25	0,68	1,06	1,80	2,667	3,40	4,30	5,52	6,45	7,283

I_B in μA	56	64	73	78	82	88	96	100
I_C in μA	8,03	9,03	10,25	10,88	11,46	12,25	13,32	13,79

Messbereiche: für I_C : 20mA (UT5.1) für I_B : 100 μA (Drehspulamperemeter)
 statistische Fehler: $\Delta I_B = \pm 1 \mu A$; $\Delta I_C = 0,02 mA$

c) Ausgangskennlinien I_C als Funktion von U_{CE}

Messung 1: $I_B = 14 \mu A$

U in V	0,004	0,060	0,122	0,102	0,158	0,188	0,222	0,284	0,317	0,080
I_C in mA	0	0,34	1,40	1,06	1,75	1,85	1,91	1,91	1,91	0,65

Messung 2: $I_B = 42 \mu A$

U in V	0,005	0,050	0,020	0,070	0,089	0,077	0,100	0,122	0,132	0,160	0,179
I_C in mA	0	0,74	0,15	1,48	2,40	1,81	3,03	4,06	4,46	5,27	5,52

Abb. 5.4: Laborheft Seite 3

U_c in V	0,138	0,241	0,277	0,301	0,342
I_c in mA	5,67	5,78	5,81	5,81	5,81

Messung 3: $I_B = 8 \mu A$

U_c in V	0,005	0,027	0,043	0,059	0,073	0,082	0,092	0,099	0,114	0,123
I_c in mA	0	0,45	1,09	1,96	3,03	3,77	4,74	5,36	6,69	7,37

U in V	0,131	0,148	0,165	0,174	0,180	0,209	0,284	0,267	0,298	0,330
I in mA	8,04	9,09	9,79	10,12	10,47	10,72	10,89	11,01	11,05	11,11

Messbereich: für U_c : 2V (UT51) & für I_c : 20mA (Netzgerät)
 statistischer Fehler: $\Delta U_c = 0,001V$ und $\Delta I_c = 0,01mA$

Unsicherheiten Digitalmultimeter

Metex 3800: Messbereich 2V: $\pm(0,5\% + 1\text{Digit})$

UT51: Messbereich: 2V: $\pm(0,5\% + 1\text{Digit})$: $R_T = 10M\Omega$
 200mA: $\pm(1,5\% + 1\text{Digit})$: ~~0,2A~~
 20mA: $\pm(1,3\% + 1\text{Digit})$
 2mA: $\pm(1\% + 1\text{Digit})$
 200 μA : $\pm(1\% + 1\text{Digit})$
 200 Ω : $\pm(1\% + 2\text{Digits})$
 2k Ω : $\pm(0,8\% + 2\text{Digits})$
 200k Ω : "
 2M Ω : "
 20M Ω : $\pm(2\% + 4\text{Digits})$

KT-2210: Messbereich:

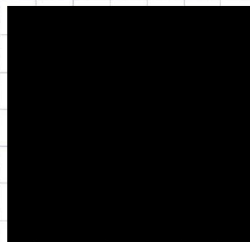


Abb. 5.5: Laborheft Seite 4

