

Physiklabor für Anfänger*innen 2
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

Versuch 45: Kennlinien elektrischer Leiter und Bauelemente

(durchgeführt am 06. März 2019 bei)

06. März 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	4
2	Physikalische Grundlagen	4
3	Aufbau und Durchführung	4
3.1	Messung der Kennlinien von Zweipolen	4
3.2	Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors	6
4	Messung	6
4.1	Messung der Kennlinien von Zweipolen	6
4.1.1	Messung der Kennlinie eines ohmschen Widerstands	6
4.1.2	Messung der Kennlinie einer Glühlampe	7
4.1.3	Messung der Kennlinie einer Diode	8
4.1.4	Direkte Widerstandsmessung	8
4.2	Messung der Kennlinie eines pnp-Transistors	9
4.2.1	Eingangskennlinie	9
4.2.2	Steuerkennlinie	10
5	Auswertung	10
5.1	Kennlinien von Zweipolen	10
5.1.1	Kennlinie eines ohmscher Widerstand	10
5.1.2	Kennlinie einer Glühlampe	12
5.1.3	Kennlinie einer Diode	13
5.2	Messung der Kennlinie eines pnp-Transistors	15
6	Diskussion	18
6.1	Messung der Kennlinien von Zweipolen	18
6.2	Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors	19
A	Anhang	20
A.1	Lineare Regression	20
A.2	Laborheft	22

In Tabelle 1 ist eine Übersicht über alle in diesem Versuchsprotokoll verwendeten Symbole gegeben.

Größensymbol	Bedeutung
U	Spannung
I	Stromstärke
R	Elektrischer Widerstand
B	Signalverstärkung
β	Kleinsignalverstärkung
N, \square	Regressionsparameter
s_x	Unsicherheit auf (Mess-) Größe x

Tabelle 1: Symbole, die in diesem Versuchsprotokoll verwendet wurden.

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch sollen die Kennlinien einer Glühlampe und einer Halbleiterdiode untersucht und miteinander verglichen werden. Die Kennlinien für einen pnp-Transistor in Emitterschaltung sollen außerdem aufgenommen und ihre Bedeutung diskutiert werden.

2 Physikalische Grundlagen

Für diesen Versuch sind das ohmsche Gesetz [1]

$$U = RI \quad (1)$$

und der Zusammenhang zwischen Kollektor- und Basisstrom

$$I_C = B \cdot I_B \quad (2)$$

von Belange. Wenn man nur kleine Änderungen von Strömen um einen bestimmten Wert herum betrachtet, verwendet man die Gleichung:

$$\delta I_C = \beta \cdot \delta I_B. \quad (3)$$

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Messung der Kennlinien von Zweipolen

Bei der Messung der Kennlinien von Zweipolen verwendeten wir die in Abbildung 1 gezeigte Schaltung. Dabei haben wir an einem ohmschen Widerstand

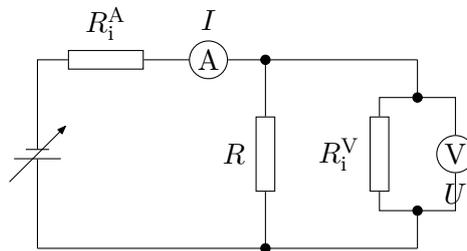


Abbildung 1: Schaltbild zur Bestimmung der Kennlinie eines ohmschen Widerstands R und einer Glühlampe (der Widerstand R ist mit dieser im Schaltplan zu ersetzen).

mit einem elektrischen Widerstand von $100\ \Omega$, einer Glühlampe und einer Halbleiterdiode in Durchlassrichtung jeweils eine Messreihe aufgenommen, bei der wir schrittweise die Ausgangsspannung U , die wir an einem digitalen Multimeter (siehe Abb. 1) gemessen haben, von $0\ \text{V}$ auf $2\ \text{V}$ erhöht haben und währenddessen mehrere Wertepaare für diese Spannung U und die Stromstärke I an einem Amperemeter (siehe Abb. 1) abgelesen haben. Zu Beginn jeder Messreihe haben wir den maximalen Strom bestimmt, um so einen einheitlichen Messbereich beizubehalten. Die selbe Messung haben wir anschließend mit der Halbleiterdiode in Sperrrichtung durchgeführt. Dafür verwendeten wir die zwei in Abbildung 2 gezeigten Schaltungen, wobei beide Messungen ebenso wie die obigen abliefen. Während der gesamten

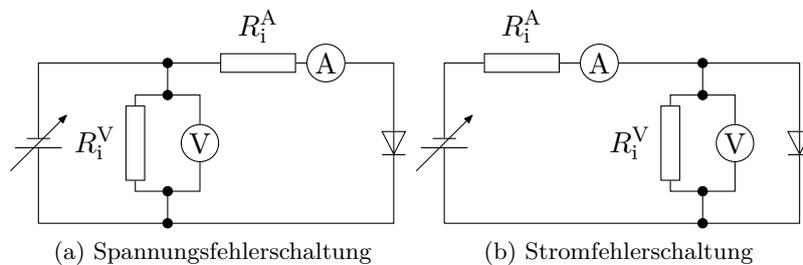


Abbildung 2: Zwei Schaltungen zur Bestimmung der Kennlinie einer Diode in Sperrrichtung

Messung war es wichtig, darauf zu achten, dass wir jeden Messbereichswechsel protokollieren, um so die für den jeweiligen Messbereich spezifischen Unsicherheiten korrekt miteinbeziehen zu können.

Nach Aufnahme dieser Messreihen haben wir mit der Ohmfunktion eines Digitalmultimeters die Widerstände von der Glühlampe und der Diode bestimmt.

3.2 Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors

Für die Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors haben wir die in Abbildung 3 gezeigte Schaltung auf einem Steckbrett aufgebaut. Dann haben

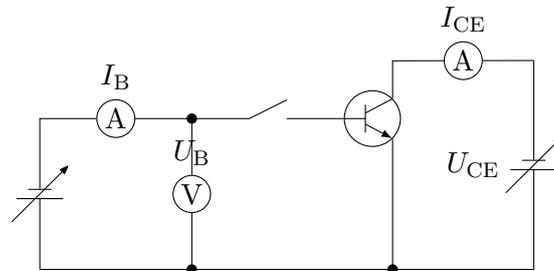


Abbildung 3: Schaltung zur Bestimmung der Kennlinien eines pnp-Transistors

wir die Kollektorspannung U_{CE} auf etwa einen Volt eingestellt. Unser Ziel war es, die Eingangskennlinie I_B als Funktion von U_{BE} bei konstanter Kollektorspannung zu messen, indem wir die Spannung schrittweise erhöhen.

Als zweite Messung untersuchten wir die Steuerkennlinie I_C als Funktion von I_B . Dabei sollte die Kollektorspannung U_{CE} ebenfalls auf einem konstanten Wert eingestellt bleiben.

Der letzte Teil dieses Versuchs behandelte die Messung der Ausgangskennlinie I_C als Funktion von U_{CE} für verschiedene I_B . Da innerhalb einer Messreihe I_B konstant sein soll, musste vor dem Aufnehmen jedes Wertepaars die Basisspannung manuell konfiguriert werden, dass I_B seinen Wert beibehält.

4 Messung

4.1 Messung der Kennlinien von Zweipolen

Im Folgenden sind die Messungen zu Versuchsteil A aufgeführt.

4.1.1 Messung der Kennlinie eines ohmschen Widerstands

Bei der Bestimmung der Kennlinie eines einfachen ohmschen Widerstands mit angegebenem Wert von $R = 100\ \Omega$ maßen wir zunächst einen maximalen Strom von 19,58 mA bei einer maximalen Spannung von 1,970 V, weswegen wir als Messbereich am Multimeter 20 mA auswählten, was mit einer Unsicherheit von $1,0\% \cdot \text{Messwert} + 0,01\ \text{mA}$ verbunden ist. Für das Voltmeter verwendeten wir einen Messbereich von 2 V und eine Unsicherheit von $0,5\% \cdot \text{Messwert} + 0,001\ \text{V}$. Die Spannung erhöhten wir schrittweise von 0 V auf 2 V in Schritten von ca. 0,1 Volt. Die Messwerte sind in Tabelle 2 dargestellt.

I in mA	U in V	I in mA	U in V
$0,07 \pm 0,01$	$0,007 \pm 0,001$	$10,90 \pm 0,12$	$1,098 \pm 0,006$
$0,99 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,02$	$11,86 \pm 0,13$	$1,193 \pm 0,007$
$2,02 \pm 0,03$	$0,202 \pm 0,002$	$12,93 \pm 0,14$	$1,301 \pm 0,008$
$2,99 \pm 0,04$	$0,301 \pm 0,003$	$13,86 \pm 0,15$	$1,395 \pm 0,008$
$3,92 \pm 0,05$	$0,394 \pm 0,003$	$14,86 \pm 0,16$	$1,493 \pm 0,008$
$4,93 \pm 0,06$	$0,496 \pm 0,003$	$15,89 \pm 0,17$	$1,60 \pm 0,09$
$5,97 \pm 0,07$	$0,601 \pm 0,004$	$16,91 \pm 0,18$	$1,702 \pm 0,010$
$6,95 \pm 0,08$	$0,699 \pm 0,004$	$17,82 \pm 0,19$	$1,794 \pm 0,010$
$7,93 \pm 0,09$	$0,798 \pm 0,005$	$18,87 \pm 0,20$	$1,899 \pm 0,010$
$8,93 \pm 0,10$	$0,899 \pm 0,005$	$19,78 \pm 0,21$	$1,991 \pm 0,011$
$9,89 \pm 0,11$	$0,995 \pm 0,006$		

Tabelle 2: Stromstärke I und Spannung U an einem ohmschen Widerstand $R = 100 \Omega$.

4.1.2 Messung der Kennlinie einer Glühlampe

Zur Messung von der Glühlampe verwendeten wir ein anderes Netzteil als bei der Messung der Kennlinie vom ohmschen Widerstand und der Diode und erhöhten die Spannung erst bis $0,4 \text{ V}$ in Schritten von 50 mV , danach wählten wir eine Schrittweite von $0,1 \text{ V}$. Als maximalen Strom maßen wir $151,8 \text{ mA}$, weswegen wir den 200 mA -Messbereich des Amperemeters benutzten, was mit einer Unsicherheit von $1,5\% \cdot \text{Messwert} + 0,1 \text{ mA}$ verbunden war. Die maximale Spannung betrug $1,998 \text{ V}$, weswegen wir die gleiche Unsicherheit wie in Abschnitt 4.1.1 ansetzten. Unsere Messwerte sind in Tabelle 3 zu finden.

I in mA	U in V	I in mA	U in V
$0,0 \pm 0,1$	$0,000 \pm 0,001$	$103,8 \pm 1,7$	$0,903 \pm 0,006$
$17,5 \pm 0,4$	$0,051 \pm 0,001$	$108,3 \pm 1,7$	$0,999 \pm 0,006$
$31,8 \pm 0,6$	$0,096 \pm 0,001$	$113,4 \pm 1,8$	$1,105 \pm 0,007$
$47,4 \pm 0,8$	$0,149 \pm 0,002$	$118,3 \pm 1,9$	$1,207 \pm 0,007$
$59,6 \pm 1,0$	$0,199 \pm 0,002$	$122,4 \pm 1,9$	$1,299 \pm 0,007$
$68,6 \pm 1,1$	$0,246 \pm 0,002$	$127,2 \pm 2,0$	$1,403 \pm 0,008$
$76,0 \pm 1,2$	$0,301 \pm 0,003$	$131,5 \pm 2,1$	$1,500 \pm 0,009$
$80,2 \pm 1,3$	$0,352 \pm 0,003$	$135,6 \pm 2,1$	$1,595 \pm 0,009$
$82,9 \pm 1,3$	$0,404 \pm 0,003$	$140,2 \pm 2,2$	$1,706 \pm 0,010$
$86,5 \pm 1,4$	$0,504 \pm 0,004$	$144,2 \pm 2,3$	$1,803 \pm 0,010$
$90,2 \pm 1,5$	$0,603 \pm 0,004$	$148,1 \pm 2,3$	$1,899 \pm 0,010$
$94,3 \pm 1,5$	$0,700 \pm 0,004$	$152,0 \pm 2,4$	$1,999 \pm 0,011$
$98,9 \pm 1,6$	$0,800 \pm 0,005$		

Tabelle 3: Kennlinie einer Glühlampe

4.1.3 Messung der Kennlinie einer Diode

Bei der Messung der Diode in Durchlassrichtung maßen wir bis zum Einsetzen eines deutlichen Stromes bei etwa 400 mV in Schritten von 50 mV. Die weitere Messung bis zum Erreichen der maximal möglichen Spannung führten wir in Schritten von etwa 20 mV durch. Da die maximale Stromstärke bei 18,78 mA und der maximale Strom bei 0,720 V lag, verwendeten wir die gleichen Unsicherheiten wie bei der Vermessung des Widerstands in Abschnitt 4.1.4. Die Messwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

I in mA	U in V	I in mA	U in V
$0,00 \pm 0,10$	$0,008 \pm 0,001$	$0,17 \pm 0,10$	$0,500 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,052 \pm 0,001$	$0,27 \pm 0,10$	$0,520 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,102 \pm 0,002$	$0,40 \pm 0,10$	$0,540 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,151 \pm 0,002$	$0,63 \pm 0,11$	$0,561 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,200 \pm 0,002$	$0,93 \pm 0,11$	$0,580 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,250 \pm 0,002$	$1,44 \pm 0,11$	$0,600 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,300 \pm 0,003$	$2,15 \pm 0,12$	$0,620 \pm 0,004$
$0,00 \pm 0,10$	$0,348 \pm 0,003$	$3,28 \pm 0,13$	$0,640 \pm 0,004$
$0,01 \pm 0,10$	$0,401 \pm 0,003$	$4,96 \pm 0,15$	$0,660 \pm 0,004$
$0,02 \pm 0,10$	$0,422 \pm 0,003$	$7,62 \pm 0,18$	$0,680 \pm 0,004$
$0,04 \pm 0,10$	$0,442 \pm 0,003$	$11,97 \pm 0,22$	$0,700 \pm 0,004$
$0,07 \pm 0,10$	$0,462 \pm 0,003$	$18,61 \pm 0,29$	$0,720 \pm 0,005$
$0,11 \pm 0,10$	$0,482 \pm 0,003$		

Tabelle 4: Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung

Unsere Messung der Abhängigkeit des Stromes von der Spannung einer Diode in Sperrichtung verlief im Vergleich zu den anderen Messungen relativ ereignisarm. Da sich kein größerer Strom bemerkbar machte, verwendeten wir den 200 μ A-Messbereich des Amperemeters und variierten die Spannung zwischen 0 V und 1 V. Als Unsicherheit auf die Stromstärke verwendeten wir wegen der Skala $1,0\% \cdot \text{Messwert} + 0,1 \mu\text{A}$. Die Messergebnisse beider Schaltungen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

4.1.4 Direkte Widerstandsmessung

Die Messung der Widerstände von Glühbirne und Diode mit dem Digitalmultimeter ergab

$$\begin{aligned} R_{\text{Glühbirne}} &= (1,6 \pm 0,3) \Omega \\ R_{\text{Diode}} &= (12,48 \pm 1,30) \text{M}\Omega. \end{aligned} \tag{4}$$

Für niedrigere Messbereiche konnten wir keine Werte messen. Die angegebenen Unsicherheiten kommen durch die Messbereiche von 200 Ω , bzw. 20 M Ω , wodurch sich Unsicherheiten von $0,5\% \cdot \text{Messwert} + 3 \Omega$, bzw. $1,0\% \cdot \text{Messwert} + 0,1 \text{M}\Omega$, ergeben.

I in μA	U in V	I in μA	U in V
$0,0 \pm 0,1$	$0,008 \pm 0,001$	$0,2 \pm 0,1$	$0,008 \pm 0,001$
$0,0 \pm 0,1$	$0,201 \pm 0,002$	$0,1 \pm 0,1$	$0,203 \pm 0,002$
$0,0 \pm 0,1$	$0,398 \pm 0,003$	$0,1 \pm 0,1$	$0,400 \pm 0,003$
$0,0 \pm 0,1$	$0,601 \pm 0,004$	$0,0 \pm 0,1$	$0,603 \pm 0,004$
$0,0 \pm 0,1$	$0,801 \pm 0,005$	$0,0 \pm 0,1$	$0,800 \pm 0,005$
$0,0 \pm 0,1$	$1,000 \pm 0,006$	$0,0 \pm 0,1$	$1,002 \pm 0,006$

(a) Spannungsfehlerschaltung

(b) Stromfehlerschaltung

Tabelle 5: Stromstärke in Abhängigkeit von der Spannung bei einer Diode in Sperrrichtung

4.2 Messung der Kennlinie eines pnp-Transistors

Im zweiten Versuchsteil waren die Kennlinien eines pnp-Transistors zu untersuchen. Die drei verschiedenen Messungen sind im Folgenden aufgeführt.

4.2.1 Eingangskennlinie

Zunächst galt es, die Eingangskennlinie des Transistors zu bestimmen, i. e. die Basisstromstärke I_B in Abhängigkeit von der Basisspannung U_{BE} zu messen. Zuvor war die Kollektorspannung U_{CE} auf ca. 1 V eingestellt worden. Die Basisspannung regelten wir dann von 0 V auf 1 V in einer Schrittweite von zunächst 0,1 V, nach Einsetzen eines Stromes bei 0,6 V mit einer Schrittweite von 0,05 V. Da die Basisspannung mit dem Digitalmultimeter in einem Messbereich von 2 V gemessen wurde, lässt sich die Unsicherheit wie bereits in Abschnitt 4.1.1 berechnen. Das Drehspulinstrument, mit dem wir die Basisstromstärke maßen, besaß keine verzeichnete Unsicherheit, weswegen wir diese aufgrund der Skalierung in $2 \mu\text{A}$ bei einer Gesamtskala von $200 \mu\text{A}$ auf $1 \mu\text{A}$ schätzten. Die Messwerte der Eingangskennlinie ist in Tabelle 6 dargestellt.

I_B in μA	U_{CE} in V	I_B in μA	U_{CE} in V
0 ± 1	$0,000 \pm 0,001$	4 ± 1	$0,650 \pm 0,004$
0 ± 1	$0,103 \pm 0,002$	12 ± 1	$0,705 \pm 0,005$
0 ± 1	$0,208 \pm 0,002$	24 ± 1	$0,748 \pm 0,005$
0 ± 1	$0,306 \pm 0,003$	38 ± 1	$0,795 \pm 0,005$
0 ± 1	$0,404 \pm 0,003$	56 ± 1	$0,849 \pm 0,005$
0 ± 1	$0,502 \pm 0,004$	78 ± 1	$0,903 \pm 0,006$
2 ± 1	$0,607 \pm 0,004$	96 ± 1	$0,947 \pm 0,006$

Tabelle 6: Messdaten der Eingangskennlinie des Transistors

4.2.2 Steuerkennlinie

Bei der Bestimmung der Steuerkennlinie war die Kollektorstromstärke I_C in Abhängigkeit von der Basisstromstärke I_B zu messen. Wie vorhin maßen wir die Basisstromstärke mit dem Drehspulinstrument, weswegen die Unsicherheiten aus Abschnitt 4.2.1 diesbezüglich zu übernehmen sind. Die Kollektorstromstärke hingegen war am Netzteil mit einer Digitalanzeige abzulesen. Als Unsicherheit nahmen wir deshalb für I_C einen Ablesefehler von 0,03 mA an. Die Messergebnisse sind in Tabelle 7 auffindbar.

I_B in μA	I_C in mA	I_B in μA	I_C in mA
0 ± 1	$0,00 \pm 0,03$	38 ± 1	$7,13 \pm 0,03$
0 ± 1	$0,08 \pm 0,03$	46 ± 1	$8,82 \pm 0,03$
4 ± 1	$0,77 \pm 0,03$	54 ± 1	$10,30 \pm 0,03$
10 ± 1	$1,74 \pm 0,03$	62 ± 1	$11,78 \pm 0,03$
14 ± 1	$2,71 \pm 0,03$	72 ± 1	$13,61 \pm 0,03$
18 ± 1	$3,29 \pm 0,03$	82 ± 1	$15,28 \pm 0,03$
26 ± 1	$4,97 \pm 0,03$	92 ± 1	$16,92 \pm 0,03$
32 ± 1	$6,08 \pm 0,03$	94 ± 1	$17,40 \pm 0,03$
36 ± 1	$7,04 \pm 0,03$		

Tabelle 7: Messdaten der Steuerkennlinie des Transistors

Der letzte Teil dieses Versuchs behandelte die Messung der Ausgangskennlinie I_C als Funktion von U_{CE} für verschiedene I_B . Wir führten die Messung für Basisströme mit einer Stärke von 20 μA , 40 μA , 60 μA , 80 μA und 100 μA durch. Dabei kontrollierten wir vor jeder Messung von I_C den Wert von I_B und regelten ihn ggf. nach. Da wir wieder das Drehspulinstrument von Abschnitt 4.2.2 und Abschnitt 4.2.1 verwendeten, lässt sich die Unsicherheit vollkommen gleich berechnen. Die Kollektorspannung stellten wir dabei mit einem Rädchen am Netzgerät ein. Da die Unsicherheit auch hier nicht am Netzteil angegeben wurde, schätzten wir diese auf 0,02 V. Die Messergebnisse sind in Tabelle 8 abgebildet.

5 Auswertung

5.1 Kennlinien von Zweipolen

5.1.1 Kennlinie eines ohmscher Widerstand

Die in Tabelle 2 gemessenen Werte sind zunächst zusammen in einem I - U -Diagramm aufzutragen. Dieses ist in Abbildung 4 dargestellt. Für einige Stromstärke-Spannungspaare sind dabei exemplarische Fehlerbalken eingezeichnet.

U_{CE} in V	I_C in mA				
	$I_B = 20 \mu A$	$I_B = 40 \mu A$	$I_B = 60 \mu A$	$I_B = 80 \mu A$	$I_B = 100 \mu A$
$0,00 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,03$
$0,03 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,03$				
$0,05 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,03$	$1,19 \pm 0,03$	$1,66 \pm 0,03$	$2,29 \pm 0,03$	$2,32 \pm 0,03$
$0,07 \pm 0,02$	$1,23 \pm 0,03$				
$0,10 \pm 0,02$	$2,12 \pm 0,03$	$4,32 \pm 0,03$	$6,17 \pm 0,03$	$7,64 \pm 0,03$	$8,93 \pm 0,03$
$0,12 \pm 0,02$	$3,02 \pm 0,03$				
$0,15 \pm 0,02$	$3,43 \pm 0,03$	$6,65 \pm 0,03$	$9,50 \pm 0,03$	$11,87 \pm 0,03$	$13,86 \pm 0,03$
$0,17 \pm 0,02$	$3,59 \pm 0,03$				
$0,20 \pm 0,02$	$3,62 \pm 0,03$	$7,40 \pm 0,03$	$10,68 \pm 0,03$	$13,72 \pm 0,03$	$16,41 \pm 0,03$
$0,23 \pm 0,02$	$3,79 \pm 0,03$				
$0,25 \pm 0,02$	$3,82 \pm 0,03$	$7,55 \pm 0,03$	$11,10 \pm 0,03$	$14,30 \pm 0,03$	$17,21 \pm 0,03$
$0,28 \pm 0,02$	$3,82 \pm 0,03$				
$0,30 \pm 0,02$	$3,84 \pm 0,03$	$7,60 \pm 0,03$	$11,22 \pm 0,03$	$14,48 \pm 0,03$	$17,51 \pm 0,03$
$0,33 \pm 0,02$	$3,84 \pm 0,03$				
$0,35 \pm 0,02$	$3,85 \pm 0,03$	$7,64 \pm 0,03$	$11,28 \pm 0,03$	$14,58 \pm 0,03$	$17,66 \pm 0,03$
$0,40 \pm 0,02$		$7,66 \pm 0,03$	$11,33 \pm 0,03$	$14,65 \pm 0,03$	$17,78 \pm 0,03$
$0,45 \pm 0,02$		$7,69 \pm 0,03$	$11,38 \pm 0,03$	$14,71 \pm 0,03$	$17,87 \pm 0,03$
$0,50 \pm 0,02$			$11,42 \pm 0,03$	$14,78 \pm 0,03$	$17,95 \pm 0,03$
$0,55 \pm 0,02$			$11,47 \pm 0,03$	$14,85 \pm 0,03$	$18,04 \pm 0,03$
$0,60 \pm 0,02$			$11,51 \pm 0,03$	$14,93 \pm 0,03$	$18,12 \pm 0,03$
$0,65 \pm 0,02$				$14,99 \pm 0,03$	$18,20 \pm 0,03$

Tabelle 8: Messergebnisse der Ausgangskennlinien eines Transistors für verschiedene Basisströme I_B

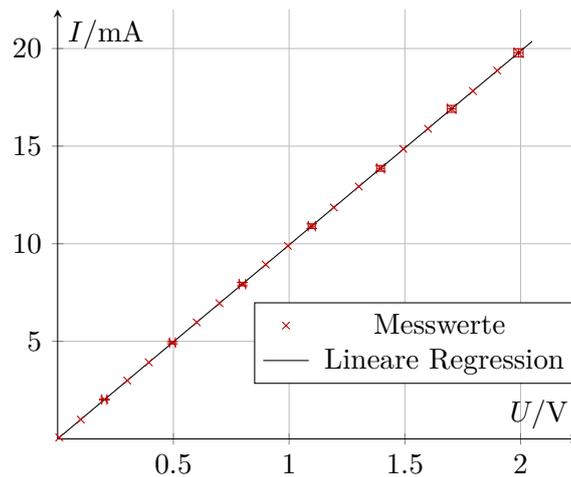


Abbildung 4: Messwerte für Stromstärke und Spannung an einem Ohmschen Widerstand von $R = 100 \Omega$. An einigen Wertepaaren sind in beiden Größen exemplarische Fehlerbalken eingezeichnet.

Nach einer kurzen Betrachtung der Messwerte liegt ein linearer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung an einem ohmschen Widerstand nahe. Um den linearen Zusammenhang zu quantifizieren, versuchen wir, mittels linearer Regression eine Ausgleichsgerade zu finden. Mit den im Anhang befindlichen Formeln finden wir für eine Ausgleichsgerade der Form

$$I(U) = \varkappa \cdot U + \beth \quad (5)$$

gerade

$$\varkappa = (9,934\,85 \pm 0,002\,74) \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad (6)$$

$$\beth = (0,0026 \pm 0,0032) \text{ mA.}$$

Die Ausgleichsgerade ist in Abbildung 4 eingezeichnet. Mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung erhalten wir unter der Annahme $R = \varkappa^{-1}$ für den elektrischen Widerstand des ohmschen Widerstands einen Wert von

$$R = (100,66 \pm 0,03) \Omega. \quad (7)$$

5.1.2 Kennlinie einer Glühlampe

Ebenso sollen die Strom-Spannungs-Wertepaare der Glühlampe in ein Diagramm eingetragen werden. Dieses ist in Abbildung 5 dargestellt.

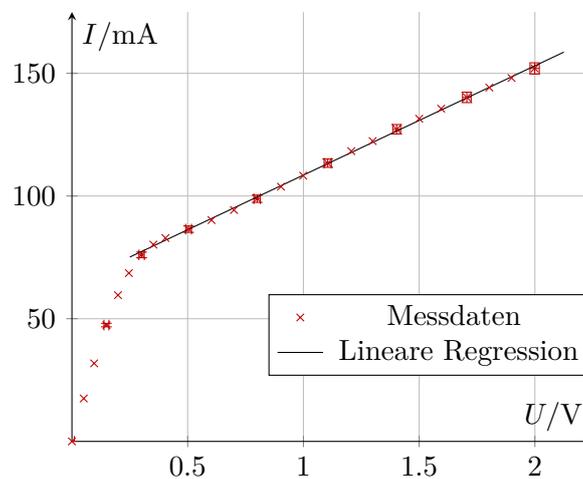


Abbildung 5: Kennlinie einer Glühlampe. Von einigen Messwerten sind exemplarisch Fehlerbalken in beiden Messgrößen eingetragen.

Wie wir im Diagramm sehen, steigt die Kennlinie der Glühbirne im Gegensatz zum ohmschen Widerstand erst bis etwa 0,2 V stark an. Zwischen 0,2 V und 0,5 V ist die Kennlinie nahezu gesättigt, darauf hin steigt sie aber näherungsweise linear an. Im Versuchskonvolut [1] wird dazu angeregt, den

absoluten Widerstand der Glühlampe bei 2 V zu berechnen. Manuelles Ablesen des Wertes bringt uns

$$R_{\text{absolut}} = \frac{1,999 \text{ V}}{152,0 \text{ mA}} = 13,15 \Omega. \quad (8)$$

Der Fehler auf diesen Wert ist mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung schnell berechnet:

$$\begin{aligned} s_{R_{\text{absolut}}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_{\text{absolut}}}{\partial U} s_U\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{\text{absolut}}}{\partial I} s_I\right)^2} \\ &= 0,22 \Omega \end{aligned} \quad (9)$$

Wir erhalten somit $R_{\text{absolut}} = (13,15 \pm 0,22) \Omega$. Wie oben bereits angesprochen, nimmt der Verlauf der Kennlinie ab ca. 0,2 V einen linearen Verlauf an. Um den differentiellen Widerstand der Glühlampe zu erhalten, benötigen wir die Steigung der Kennlinie in diesem Kurvenverlauf. Eine lineare Regression der Form (5) liefert uns (analog zu oben berechnet) die Regressionsparameter

$$\begin{aligned} \aleph &= (44,546 \pm 0,315) \frac{\text{mA}}{\text{V}} \\ \beth &= (93,986 \pm 0,409) \text{ mA}. \end{aligned} \quad (10)$$

Die Regression wurde dabei ab dem neunten Wertepaar durchgeführt. Der differentielle Widerstand lässt sich wie oben einfach ausrechnen: Da $I(U) = \aleph U + \beth$, ist $R_{\text{diff}} = \frac{dU}{dI} = \aleph^{-1}$, also

$$R_{\text{diff}} = 22,45 \Omega. \quad (11)$$

Der Fehler auf diesen Wert lässt sich ebenfalls mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung einfach berechnen:

$$s_{R_{\text{diff}}} = \frac{1}{\aleph^2} s_{\aleph} = 0,16 \Omega \quad (12)$$

Damit erhalten wir $R_{\text{diff}} = (22,45 \pm 0,16) \Omega$.

5.1.3 Kennlinie einer Diode

Ähnlich wie die Messdaten für ohmschen Widerstand und Glühbirne zu verarbeiten waren, ist mit der Auswertung der Diodenmessreihe vorzugehen: Zunächst tragen wir die Messwerte aus Tabelle 4 in einem linearen I - U -Diagramm auf. Dieses ist in Abbildung 6 zu sehen.

Man erkennt recht schnell, dass die Wertepaare einen exponentiellen Kennlinienverlauf nahelegen. Daher tragen wir die Messpunkte in einem halb-logarithmischen Maßstab erneut auf. Dieser ist in Abbildung 7 dargestellt. In

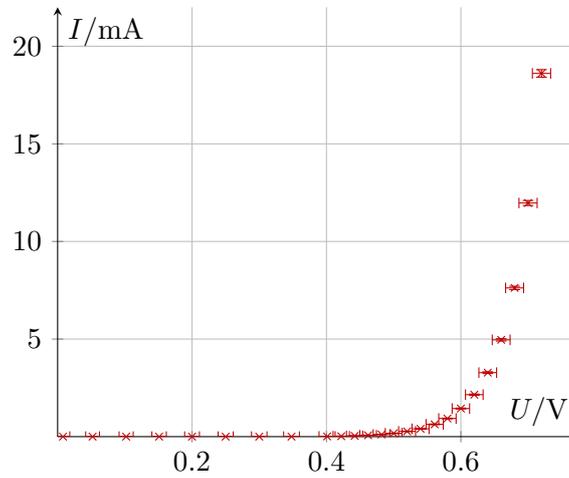


Abbildung 6: Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung in einem linearen Maßstab, basierend auf Tabelle 4. In beiden Größen sind Fehlerbalken eingetragen.

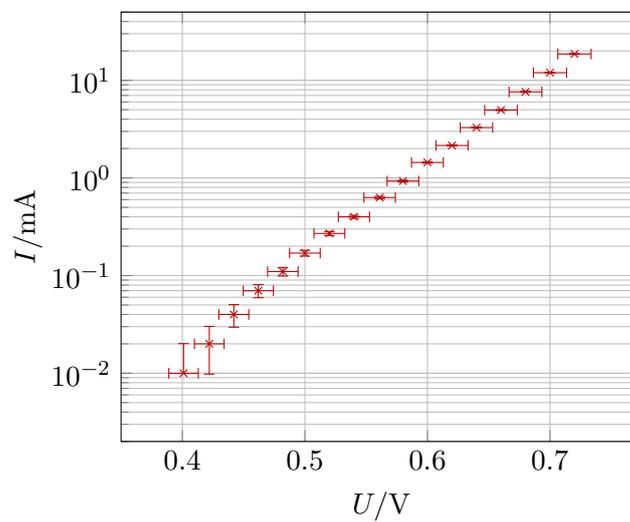


Abbildung 7: Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung in einem halb-logarithmischen Maßstab, basierend auf Tabelle 4. In beiden Größen sind Fehlerbalken eingetragen.

diesem Maßstab steigt die Kennlinie grob linear an, was bedeutet, dass die Kennlinie in unserem Messbereich annähernd exponentiell verläuft.

In den Ergebnissen Tabelle 5 erkennt man, dass wir bei einer Diode in Sperrrichtung weder in der Spannungsfehlerschaltung (siehe Abb. 2a) noch in der Stromfehlerschaltung (siehe Abb. 2b) bei keinem Spannungswert einen signifikanten Stromfluss messen konnten.

5.2 Messung der Kennlinie eines pnp-Transistors

Um den zweiten Versuchsteil auszuwerten, sind die Messwerte aus Tabellen 6 bis 8 in einem gemeinsamen Kennlinienfeld aufzutragen. Dieses ist in Abbildung 8 zu sehen. Da diese Darstellungsform recht ungewöhnlich ist, sind einige Anmerkungen zu dem gezeigten Diagramm zu treffen: Für die Ausgangskennlinien wurde zur reinen Anschauung eine Bezier-Kurve zwischen Messdaten gleicher Messreihen gelegt. Diese Kurve dient nur der besseren Trennung der einzelnen Datenpunkte, weist allerdings auch eine große Ähnlichkeit zur schematischen Darstellung eines Transistorkennlinienfeldes aus dem Theorieteil der Versuchsbeschreibung [1] auf. Die Wahl von Bezierkurven anstelle einer anderen analytischen Funktion kann dadurch gerechtfertigt werden, dass uns keine analytische Form von Ausgangskennlinien bekannt sind, sodass ein Fit (wie z. B. über die Methode kleinster Quadrate) nicht möglich war. Somit geschah die Anlegung der Bezierkurve ausschließlich graphisch. Die gestrichelten Linien hingegen sind lineare Regressionen, auf die wir nun eingehen wollen.

Zu bestimmen sei der differentielle Eingangswiderstand $r_{BE} := \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B}$ auf graphische Weise. Das Versuchskonvolut [1] weist an, diesen bei einem mittleren Basisstrom zu bestimmen. Da die Eingangskennlinie auf der Mitte des von uns verwendeten Basisstrom-Messbereichs recht linear verläuft, kann mit einer linearen Regression der Form

$$U_{BE}(I_B) = \aleph \cdot I_B + \beth \quad (13)$$

die Steigung durch Miteinbeziehen der letzten fünf Datenpunkte (ganz links unten in Abb. 8) gut approximiert werden¹. Die lineare Regression (wie genau diese bestimmt wurde, ist im Anhang verzeichnet) liefert uns

$$\begin{aligned} \aleph &= (2,738\,36 \pm 0,106\,52) \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\mu\text{A}} \\ \beth &= (0,688\,48 \pm 0,006\,81) \text{ V}. \end{aligned} \quad (14)$$

Der differentielle Widerstand berechnet sich aus Gleichung (13) dann nach Vereinfachung zu

$$r_{BE} = (2738 \pm 107) \Omega. \quad (15)$$

¹Eine graphische Bestimmung wäre bei fünf Datenpunkten mit genug Geschick etwa ebenso genau; die Wahl einer Regression ist hier eher persönliche Präferenz.

Alternativ ließe sich der differentielle Widerstand auch grob graphisch approximieren:

$$r_{\text{BE}} \approx \frac{\Delta U_{\text{BE}}}{\Delta I_{\text{B}}} = \frac{0,947 \text{ V} - 0,795 \text{ V}}{96 \mu\text{A} - 38 \mu\text{A}} \approx 2621 \Omega \quad (16)$$

Da dies auch im Vergleich zur Regression eine sehr grobe Schätzung ist², wäre ein Ausrechnen des Fehlers auf diesen Wert nicht gerade sinnvoll.

Schließlich sei noch die Signalverstärkung β bei einer mittleren Kollektorspannung zu bestimmen. Der Kurvenverlauf im zweiten Quadranten von Abbildung 8 suggeriert dabei einen linearen Verlauf im gesamten von uns abgedeckten Messbereich: Anstelle der lokalen Signalverstärkung β ließe sich auch eine lineare Regression der Form

$$I_{\text{C}}(I_{\text{B}}) = \aleph \cdot I_{\text{B}} + \beth \quad (17)$$

über den gesamten Messbereich anwenden, der die Signalverstärkung gut approximieren sollte. Ausführen dieser Regression in allen Wertepaaren $(I_{\text{B}}, I_{\text{C}})$ liefert uns die Regressionsparameter

$$\begin{aligned} \aleph &= (0,185\,865 \pm 0,001\,225) \cdot 10^3, \\ \beth &= (9,01 \pm 6,17) \cdot 10^{-2} \text{ mA}. \end{aligned} \quad (18)$$

Unter der Approximation von β mit \aleph erhalten wir damit $\beta = 185,57 \pm 1,22$.

²Messwerte in der Mitte bspw. bleiben unberücksichtigt

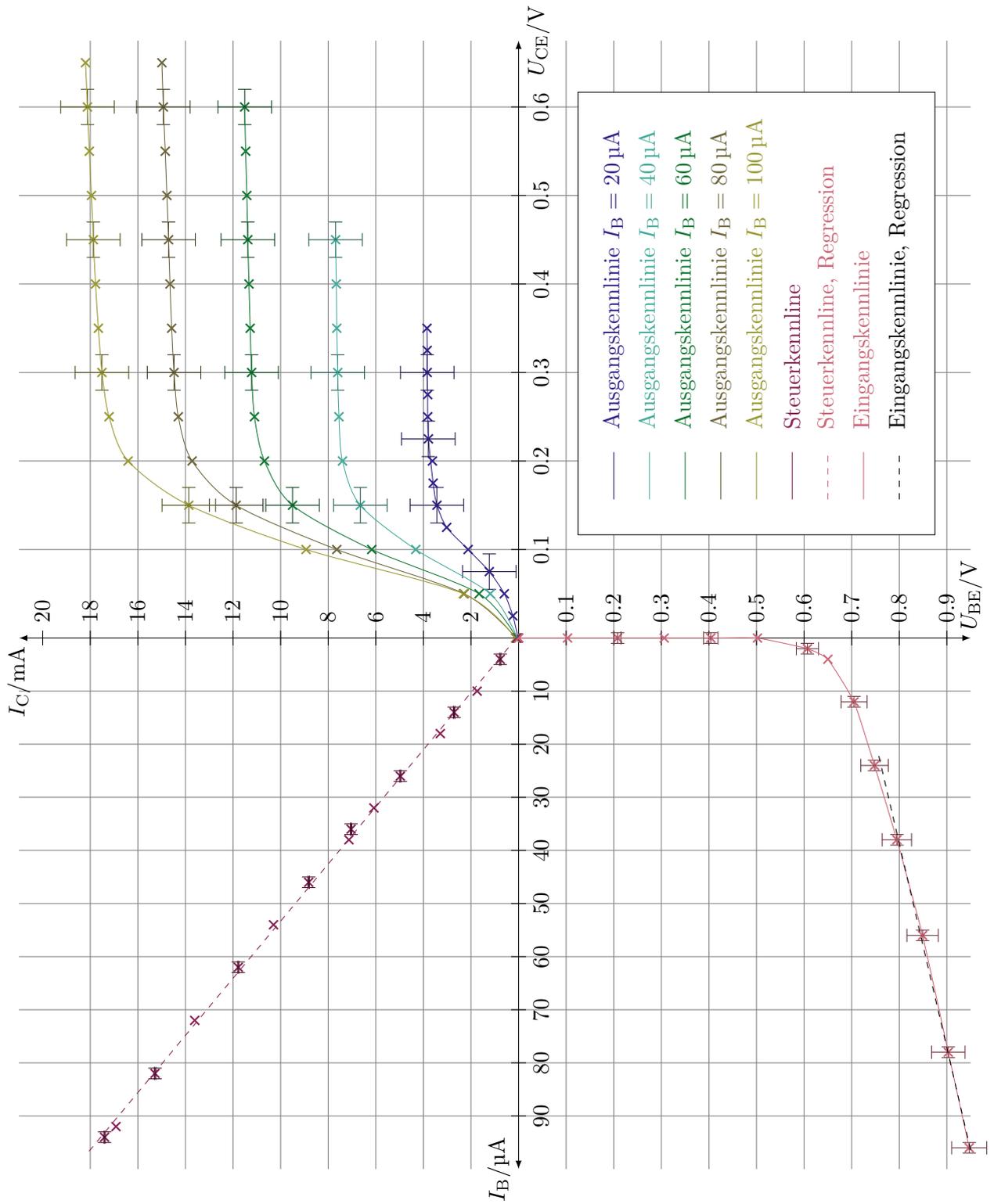


Abbildung 8: Kennlinienfeld basierend auf Tabellen 6 bis 8. Lediglich die gestrichelten Kurven sind lineare Regressionen, der Rest dient lediglich der Anschauung.

6 Diskussion

6.1 Messung der Kennlinien von Zweipolen

Aus dem Verlauf von Abbildung 4 sowie der berechneten Steigung mit geringem Fehler (siehe Gleichung (7)) konnten wir erkennen, dass der Widerstand wie erwartet dem ohmschen Gesetz folgt und somit im Vergleich zur Glühlampe, deren Verlauf (siehe Abb. 5) nicht überall linear ist, einen ohmschen Widerstand bildet. Mit einem geringen Fehler ist die Abweichung vom beschrifteten Wert von $100\ \Omega$ auch nach Berücksichtigung signifikanter Stellen vermutlich nicht mit statistischen Schwankungen verbunden, sondern es handelt sich hier wahrscheinlich um einen zugrunde liegenden systematischen Fehler. Auch könnte die Beschriftung nicht akkurat sein (eine Konfidenzintervall war schließlich am Widerstand nicht angegeben).

Es wurde bereits oben erwähnt, dass das Kennliniendiagramm der Glühlampe (siehe Abb. 5) keinen linearen Verlauf auf dem ganzen Messbereich nahelegt. Erst nach einer bestimmten Schwelle (der Schwellwert ist nach qualitativer Beobachtung in etwa beim Einsetzen des Leuchtens der Birne überschritten) ist der Strom-Spannungsverlauf gut linear approximierbar: Obwohl nicht alle Fehlerbalken eingezeichnet sind (nach Anleitung sollte das Einzeichnen nur exemplarisch geschehen), verläuft die Ausgleichsgerade im Gültigkeitsintervall durch mehr als 68% der angegebenen Fehlerbalken, weswegen wir die Glühlampe in diesem Bereich guten Gewissens als ohmsch ansehen können.

Das I - U -Diagramm der Diode (siehe Abb. 6) hingegen zeigt einen exponentiellen Anstieg des Stromes mit zunehmender Spannung. Der Grund dafür ist, dass auf Atomgitterebene mit größerer Spannung das durch Rekombination gebildete elektrische Feld in der Neutralisationsebene zwischen p-Schicht und n-Schicht weiter abgeschwächt und die Sperrschicht leitend wird. Das hat eine Abnahme des Widerstandes zur Folge.

Nach einer Betrachtung der Diodenkennlinie im logarithmischen Maßstab (siehe Abb. 7), stellten wir (rein qualitativ) fest, dass sich die Messdaten trotz einer geringen Wölbung in etwa auf einer Geraden befinden. Dies suggeriert einen tatsächlich exponentiellen Verlauf der Stromstärke im linearen I - U -Diagramm.

Bei beiden Messungen des Stromflusses durch die Diode in Sperrrichtung messen wir keinen signifikanten Strom. In den Fällen, wo wir einen sehr geringen Stromfluss von 0,1 V bis 0,2 V gemessen haben, ist dieser wegen Schwankungen des Messgerätes, Ungenauigkeiten der Anzeige des Messgerätes und wegen der Unsicherheit von 0,1 V vernachlässigbar. Das bedeutet, dass es keine Rolle spielt, welche Art von Schaltung wir verwenden und dass durch die Diode in Sperrrichtung kein von uns messbarer Strom fließt.

Die Messung der Widerstände von Glühbirne und Diode mit dem Digi-

talmultimeter ergab

$$\begin{aligned} R_{\text{Glühbirne}} &= (1,6 \pm 0,3) \Omega \\ R_{\text{Diode}} &= (12,48 \pm 1,30) \text{ M}\Omega. \end{aligned} \tag{19}$$

Weil wir für niedrigere Messbereiche keine Werte messen konnten, können wir darauf schließen, dass der gemessene Wert stark vom Messbereich abhängt. Der Grund dafür sind die verschiedenen spezifischen Messströme und -spannungen, die unterschiedliche Werte der Kennlinie reproduzieren, was beispielsweise in Abbildung 7 anschaulich nachzuvollziehen ist. Deswegen können wir nicht einfach „den“ Widerstand einer Diode oder Glühbirne messen.

Hauptursache statistischer Fehler in diesem Versuchsteil bildeten unserer Ansicht nach Ablesefehler von Messgeräten. Vermutlich signifikanter sind dagegen hier die systematischen Fehler: Dazu gehören Innenwiderstände der verwendeten Schaltungen und Leiter, vernachlässigte Innenwiderstände der Messgeräte sowie möglicherweise ein leicht fehlerhaftes Netzteil, was trotz Nulleinstellung eine Spannung von 0,008 V lieferte³. Allerdings wurde auch in der Auswertung die Vereinfachung bei der linearen Regression getroffen, dass alle Datenpaare mit dem gleichen Fehler belastet waren. Da die Unsicherheiten im Vergleich zu den Messwerten sehr gering abgeschätzt wurden, ist somit auch die lineare Regression möglicherweise mit fehlerhaften Unsicherheiten belastet.

6.2 Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors

In Abbildung 8 erkennt man die Eingangs-, Steuer- sowie die Ausgangskennlinien des pnp-Transistors.

Die Steuerkennlinie ist durch ?? charakterisiert. Da $B = \text{konst.}$, steuert der Basisstrom, ohne große Abhängigkeit von $U_{\text{CE}} = 1 \text{ V} = \text{konst.}$ den Kollektorstrom nahezu vollständig linear.

Die Eingangskennlinie ist quasi unabhängig von U_{CE} und ähnelt der Kennlinie einer Diode (siehe Abb. 6), die sie beschreibt. In einem Transistor muss die Spannung zwischen Kollektor und Emitter höher sein als zwischen Basis und Emitter. Deswegen steigen die Ausgangskennlinien (mit starker I_{B} -Abhängigkeit) erst bis zu einer Mindestspannung stark an. Danach wächst I_{C} nur noch langsam mit U_{CE} . Der Grund dafür ist, dass die Dichte der Sperrschicht von der Spannung beeinflusst wird. Da der Kollektor nicht mehr Ladungsträger aufnehmen kann als vom Emitter in die Basis gelangen, tritt eine Sättigung auf.

Die Kollektorstromstärke I_{C} hängt nahezu vollständig von dem Wert der Basisstromstärke I_{B} ab, wie man an Abbildung 8 einfach sieht. Von der Güte der Anpassung überzeugt man sich erneut, indem man abschätzt, durch wie

³Dies ist gut in Tabelle 4 und in Tabelle 2 ersichtlich.

viele Fehlerbalken die Ausgleichsgerade prozentual verläuft, was in unserem Fall über 68% sind.

An Abbildung 8 erkennt man ebenfalls sehr gut, wie die Kollektorstromstärke I_C von der Kollektorspannung U_C abhängt: Für eine stetig wachsende Spannung wächst I_C zunächst wenig, dann sehr rapide an und nähert sich dann schließlich einem linearen Verlauf an. Ein wenig überraschen mag bei diesen Messreihen der nicht unsignifikante Fehler, der exemplarisch an einigen Stellen eingezeichnet wurde: Obwohl der eingezeichneten Bezierkurve nicht dieselbe Bedeutung wie eine lineare Regression o. Ä. zukommt, spiegelt diese den aus dem Versuchsheft [1] erwarteten Verlauf relativ gut wieder, ohne dabei Rücksicht auf Unsicherheiten zu nehmen: Daher gehen wir davon aus, dass wir den statistischen Fehler dieser Messreihe unterschätzt haben.

Was an unserem Vorgehen an mehr als einer Stelle in diesem Versuch zu kritisieren ist, ist die eher fahrlässige Verwendung einer linearen Regression: Bei dieser sind wir stets davon ausgegangen, dass die Unsicherheiten auf die Messwerte abhängig ist von der statistischen Streuung der Datenpunkte um den Fit, ohne dabei auf die individuellen Fehler Rücksicht zu nehmen. Da unsere Punkte (möglicherweise zufällig) nah an unserem Fit liegen, könnte es daher sein, dass wir die Unsicherheit aller durch Regression bestimmten Werte unterschätzt haben.

A Anhang

A.1 Lineare Regression

Im Folgenden soll die Berechnung der linearen Regression nahe gelegt werden. Für n Beobachtungen (x_i, y_i) , für die wir einen linearen Zusammenhang

$$y(x) = \aleph \cdot x + \beth \quad (20)$$

vermuten, verwenden wir die folgenden Schätzer:

$$\begin{aligned} \hat{\aleph} &= \frac{\overline{xy} - \overline{x}\overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2} \\ \hat{\beth} &= \overline{y} + \frac{\overline{xy} - \overline{x}\overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2} \overline{x} \end{aligned} \quad (21)$$

Dabei bezeichnen

$$\begin{aligned}\bar{x} &:= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \\ \bar{y} &:= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \\ \overline{xy} &:= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ \overline{x^2} &:= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2.\end{aligned}\tag{22}$$

Die Varianzen der Schätzer schätzen wir über die Streuung der Messwerte um das Modell. Ist

$$s^2 := \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + \varrho)]^2,\tag{23}$$

so lassen sich die Standardfehler auf die Schätzer \hat{k} und $\hat{\varrho}$ berechnen als:

$$\begin{aligned}s_{\hat{k}}^2 &= \frac{s^2}{n} \frac{\overline{x^2}}{x^2 - \overline{x^2}}, \\ s_{\hat{\varrho}}^2 &= \frac{s^2}{n} \frac{1}{x^2 - \overline{x^2}}.\end{aligned}\tag{24}$$

Literatur

- [1] o.V.: *Versuchsanleitungen zum Physiklabor für Anfänger*innen, Teil 2.* 2019

A.2 Laborheft

Versuch 45: Kennlinien elektrischer Leiter und Bauelemente 06.03.18

1. Kennlinien ^{10/±10 Digit} ^{0,5V ± 1 Digit für alle Bereiche}
 max. Strom 19,58 mA 1,970 V
 ohmscher Widerstand 100 Ω

I / mA	U / V	U / V	I / mA
0,07	0,002	10,90	1,098
0,10	0,009	11,86	1,193
0,99	0,100	12,93	1,301
2,02	0,202	13,88	1,395
2,99	0,301	14,86	1,493
3,92	0,394	15,89	1,600
4,93	0,496	16,91	1,702
5,97	0,601	17,82	1,794
6,95	0,699	18,87	1,899
7,93	0,798	19,78	1,991
8,93	0,899		
9,89	0,995		

← Spannungsquelle

2) Glühlampe max. Strom 151,8 mA 1,998 V ^{1,5V ± 10 Digit} ^{200 mA} ^{2V}

I (mA)	U (V)	I (mA)	U (V)	I (mA)	U (V)
0	0	86,5	0,504	122,4	1,299
17,5	0,051	90,2	0,603	123,2	1,403
31,8	0,096	94,3	0,700	131,5	1,500
47,4	0,149	98,9	0,800	135,6	1,595
59,6	0,199	103,8	0,903	140,2	1,706
68,6	0,246	108,3	0,999	144,2	1,803
76,0	0,301	113,4	1,105	148,1	1,899
80,2	0,352	118,3	1,207	152,0	1,999
82,9	0,404				

← anderes Netzteil als bei 1) und 3)

3) Diode max. Strom 18,78 mA 0,720 V ^{20 mA} ^{10 ± 10 Digit} ^{2V}

I (mA)	U (V)	I (mA)	U (V)
0,00	0,008	0,27	0,520
0,00	0,052	0,40	0,540
0,00	0,102	0,63	0,561
0,00	0,151	0,93	0,580
0,00	0,200	1,44	0,600
0,00	0,250	2,15	0,620
0,00	0,300	3,28	0,640
0,00	0,348	4,96	0,660
0,001	0,409	7,62	0,680
0,05	0,459	11,97	0,700
0,17	0,500	18,61	0,720
0,27	0,521		
0,41	0,540		
0,02	0,422		
0,04	0,442		
0,07	0,462		

4.) Diode in Sperrrichtung

max. Strom $0,2 \mu A$

I (mA)	U (V)
0,00	0,008
0,00	0,201
0,00	0,398
0,00	0,601
0,00	0,801
0,00	1,000

endes Messgerät
 $200 \mu A$
 $1,0\% \pm 1 \text{ Digit}$
 $2V$

I (mA)	U (V)
0,00	0,008
0,00	0,200
0,0	0,401
0,1	0,599
0,1	0,802
0,1	1,001

max. Strom $0,0 \mu A$

I (mA)	U (V)
0,002	0,008
0,001	0,203
0,001	0,400
0,000	0,603
0,000	0,800
0,000	1,002

$200 \mu A$
 $1,0\% \pm 1 \text{ Digit}$
 $2V$

2. Messung Widerstände

Gühlbirne 200Ω $1,6 \Omega$ $0,5\% \pm 3 \text{ Digits Melex}$
 Diode $20M\Omega$ $12,48M\Omega$ $1,0\% \pm 2 \text{ Digits}$

B. Transistor

keine Angabe $\rightarrow \pm 1 \mu A$

I_B (mA)	U_{BE} (V)
0	0
0	0,10
0	0,20
0	0,30
0	0,40
0	0,50
2	0,61
12	0,70
41	0,80

$U_{CE} \approx 1V$

$20V$
 $2V \rightarrow$ Rädchen $\pm 0,02V$

I_B (mA)	U_{BE} (V)
0	0
0	0,103
0	0,208
0	0,306
0	0,404
0	0,502
2	0,607
12	0,705
38	0,795
56	0,849
78	0,903
96	0,947

4 0,650
 24 0,748

keine Angabe $\rightarrow \pm 1$
 Wertteil $\pm 0,05$

$20mA$

I_C	I_B
0	0
0,08	0
0,77	4
1,74	10
2,71	14
3,29	18
4,97	26
6,08	32
7,04	36
7,13	38
8,82	46
10,30	54
11,78	62
13,61	72
16,92	92
15,28	82

$U_{CE} \approx 1V$

3.) $I_B = 20 \mu A$

I_C (mA)	U_{CE} (V)
0,02	0,05
0,60	0,05
2,12	0,1
3,43	0,15
3,62	0,2
3,82	0,25
3,84	0,3
3,85	0,35

sehr kleines Rädchen
 $0,24 \mid 0,025$
 $4,23 \mid 0,275$
 $3,02 \mid 0,125$

$I_B = 40 \mu A$

I_C (mA)	U_{CE} (V)
0,05	0
1,19	0,05
4,32	0,1
6,65	0,15
7,40	0,2
7,55	0,25
7,60	0,3
7,64	0,35
7,66	0,4
7,69	0,45

$I_B = 60 \mu A$

I_C (mA)	U_{CE} (V)
0,08	0
1,66	0,05
6,17	0,1
9,50	0,15
10,68	0,2
11,10	0,25
11,22	0,3
11,28	0,35
11,33	0,4
11,38	0,45
11,42	0,5
11,47	0,55
11,51	0,6

$I_B = 80 \mu A$

I_C (mA)	U_{CE} (V)
0,11	0
2,29	0,05
7,64	0,1
11,87	0,15
13,72	0,2
14,30	0,25
14,48	0,3
14,58	0,35
14,65	0,4
14,71	0,45
14,78	0,5
14,85	0,55
14,93	0,6
14,99	0,65

$I_B = 100 \mu A$

I_C (mA)	U_{CE} (V)
0,13	0
2,32	0,05
8,93	0,1
13,86	0,15
16,41	0,2
17,21	0,25
17,57	0,3
17,66	0,35
17,78	0,4
17,87	0,45
17,95	0,5
18,04	0,55
18,12	0,6
18,20	0,65

06. 03. 2015

J. Kuntze