

Physiklabor für Anfänger*innen
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

Versuch 45:
Kennlinien elektrischer Leiter und
Bauelemente

(durchgeführt am 20.03.2019)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Ziel des Versuchs	1
2 Versuchsaufbau und Durchführung	1
2.1 Kennlinien verschiedener Bauteile	1
2.2 Direkte Messung der Widerstände	1
2.3 Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors	2
3 Physikalische Zusammenhänge	3
4 Auswertung und Fehleranalyse	5
4.1 Kennlinie des Widerstands	5
4.2 Kennlinie der Glühlampe	6
4.3 Kennlinie der Diode	8
4.4 Direkte Widerstandsmessung per Multimeter	9
4.5 Kennlinien eines Transistors	9
5 Diskussion der Ergebnisse	11
5.1 Kennlinien unterschiedlicher elektrischer Bauteile	11
5.2 Direkte Widerstandsmessung per Multimeter	12
5.3 Kennlinien eines Transistors	12
5.3.1 Bestimmung des Eingangswiderstands und der Signalverstärkung . .	13
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	14
Literatur	14
6 Anhang	15
6.1 Messfehler und Gerätefehler	15

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch sollen die Kennlinien verschiedener elektrischer Bauteile aufgenommen werden um damit einen Überblick über ihre Eigenschaften zu erhalten.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Kennlinien verschiedener Bauteile

Im ersten Teil des Versuches sollten die Kennlinien einer Glühlampe, Diode und eines ohmschen Widerstands aufgenommen werden. Dafür stand ein Steckbrett und verschiedene Bauteile zur Verfügung, mit denen die Schaltungen aus ?? aufgebaut werden konnten.

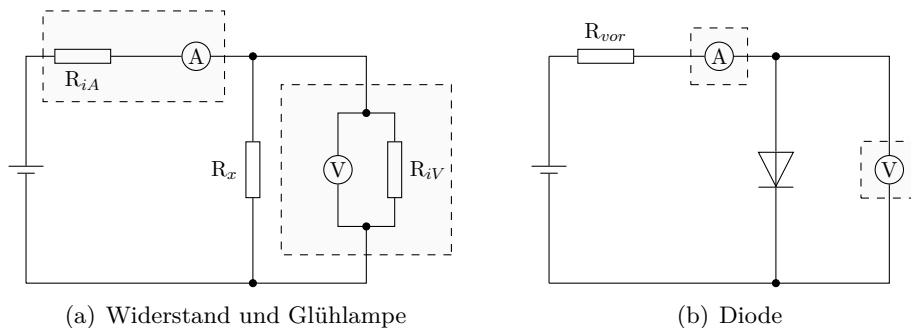


Abbildung 1: Schaltung zur Messung der Kennlinien

Die gestrichelten, grau unterlegten Boxen sollen den Innenwiderstand, den jedes Messgerät hat, verdeutlichen.

Zur Messung der Kennlinie wird für jedes Bauteil der Strom bei unterschiedlichen Spannungen aufgenommen. Dafür wurde die Spannung schrittweise erhöht und der dazugehörige Strom notiert. Besonders bei Messung der Glühlampe und der Diode wurde darauf geachtet, dass die Bereiche mit starkem Stromanstieg aufgenommen und nicht durch zu groß gewählte Spannungsschritte übersprungen wurden.

Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass (außer bei Messung der Diode) der Messbereich der Geräte während der Messung nicht verändert wurde.

Außerdem wurde noch eine Messung der Diode in umgekehrte Richtung (dh. in Sperrrichtung) durchgeführt, wobei wie erwartet kein Strom gemessen wurde. Diese Messung wurde also nur beispielhaft und nicht ausführlich durchgeführt.

2.2 Direkte Messung der Widerstände

Mit der Ohm-Funktion des Metex-Multimeters wurde ebenfalls versucht der Widerstand der Bauteile direkt zu bestimmen. Dafür kann man das Bauteil einfach in das Messgerät einstecken und verschiedene Messbereiche austesten, um einen sinnvollen Wert zu erhalten. Die Ergebnisse der Messbereiche, die einen sinnvollen Wert geliefert haben, wurden notiert.

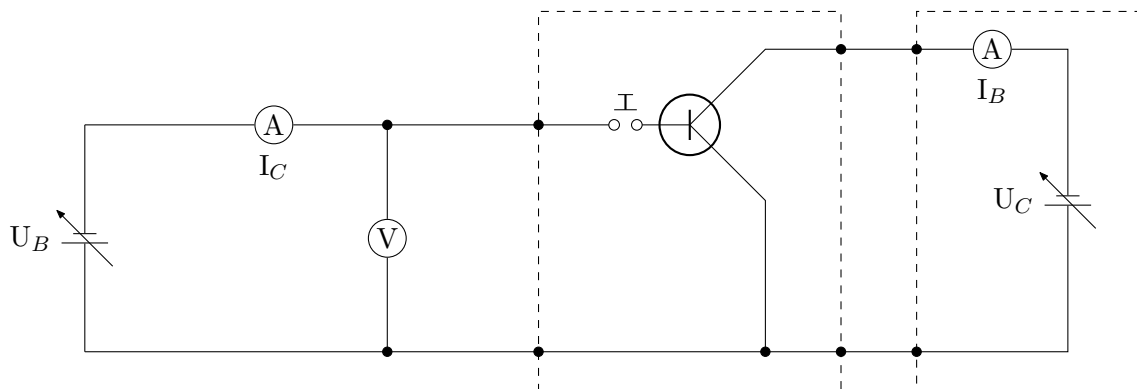


Abbildung 2: Schaltung zur Messung der Kennlinien eines Transistors

2.3 Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors

Um die Kennlinien des pnp-Transistors zu messen wurde er, wie in Abb. 7 in die Schaltung eingebaut. Um die Reaktionen des Transistors zu testen wurde zunächst die Kollektorspannung auf ungefähr 1,5 V gestellt und die Basisspannung erhöht. Durch Bedienen des Tasters wurde bei unterschiedlichen Werten der Transistor in den Stromkreis eingebracht und wir konnten uns einen groben Überblick über die Reaktion verschaffen.

Als erstes wurden die Eingangskennlinie I_B als Funktion von U_{BE} und die Steuerkennlinie I_C als Funktion von I_B aufgenommen. Die Kollektorspannung wurde dabei auf einen Wert von $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$ gestellt und der Wert mit dem Multimeter überprüft. Dann wurde die Basisspannung in kleinen Schritten erhöht und die Werte der beiden Stromstärken und auch die Spannung abgelesen, während der Taster des Transistors gedrückt wurde.

Außerdem wurde noch Ausgangskennlinien I_C als Funktion von U_{CE} für verschiedene Basisströme I_B gemessen. Wir haben als Basisströme $I_{B1} = 20 \mu\text{A}$, $I_{B2} = 40 \mu\text{A}$ und $I_{B3} = 60 \mu\text{A}$ gewählt. Bei der Messung wurde die Kollektorspannung schrittweise erhöht und beim Drücken des Tasters die Basisspannung korrigiert und dann die Kollektorspannung abgelesen.

3 Physikalische Zusammenhänge

Elektrischer Widerstand und ohmsche Leiter

Ein elektrischer Leiter hat eine ausreichende Anzahl von frei beweglichen Ladungsträgern. In einem elektrischen Feld erfahren die Ladungsträger wegen $\vec{F} = q\vec{E}$ eine Kraft in Richtung des elektrischen Feldes. In einem Leiter kommt es zu einem Drift entlang des Leiters und man sagt, es fließt ein Strom. Dem Strom wird, über die elektrische Leitfähigkeit und das elektrische Feld, eine Dichte $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ zugeordnet. Bei ohmschen Leitern ist die Leitfähigkeit σ eine temperatur- und spannungsunabhängige Materialkonstante. Um zu überprüfen, ob es sich bei einem Material um einen ohmschen Leiter handelt nutzt man

$$U = \int \vec{E} d\vec{r} = \frac{1}{\sigma} \int \vec{j} d\vec{r} = \frac{j l}{\sigma} \\ \Rightarrow U = \frac{l}{\sigma A} I = R I \quad ,$$

wobei l die Länge des Leiterstücks und A dessen Querschnittsfläche bezeichnet. Misst man nun den Strom I in Abhängigkeit von der angelegten Spannung U , so entsteht bei ohmschen Leitern und Widerständen ein linearer Zusammenhang.

Nicht-ohmsche Leiter

Bei nicht-ohmschen Leitern ist die Leitfähigkeit und damit auch der Widerstand abhängig von äußeren Einflüssen wie Temperatur oder angelegter Spannung. Bei einer Glühlampe steigt, auf Grund des Temperaturanstiegs im Glühfaden, der Widerstand mit zunehmender Betriebsdauer und bei steigendem Strom stark an. Der Zusammenhang von Strom und Spannung ist also in diesem Fall nicht linear.

Halbleiter

In Halbleitern sind alle Valenzelektronen für die direkten Bindungen zu Nachbaratomen verantwortlich, sie stehen also nicht zum Ladungstransport zur Verfügung. Diese gebundenen Elektronen befinden sich im Valenzband des Halbleiters. Führt man nun Energie von außen hinzu, so können gebundene Elektronen die Bindungskräfte überwinden und vom Valenzband ins Leiterband übergehen. Diese benötigte Energie kann in Form von Wärmeenergie oder auch durch ein starkes äußeres Feld übertragen werden. Auch andere Formen der Energieübertragung sind möglich. Befinden sich Elektronen im Leiterband, so kann ein Strom fließen.

Dotierung

Nimmt man einen Halbleiter, wie oben beschrieben und ersetzt einige Atome durch solche, die ein Elektron mehr oder weniger in der Valenzschale haben, so erhält man entweder freie Elektronen oder Löcher, in denen Elektronen fehlen. Dieser Vorgang des Austauschs von einigen Atomen heißt Dotierung und führt zu einer deutlichen Steigerung der Leitfähigkeit. Beim Hinzufügen von Elektronen dotiert man mit einem Elektronendonator, entstehen Löcher, wurde mit einem Elektronenakzeptor dotiert. Elektronen, die in Bindungen nahe eines Loches sind, können in dieses Loch springen und hinterlassen dann an einer neuen Stelle ein Loch. In einem elektrischen Feld verhalten sich die Löcher wie positive Ladungen. Ein durch Elektronen dotiertes Material heißt n-leitend, ein elektronenakzeptorendotiertes Material heißt p-leitend.

Diode

Eine Halbleiterdiode besteht aus zwei unterschiedlich dotierten Materialien, einer n- und einer p-Schicht. Bringt man beide Schichten in Kontakt, so entsteht eine Grenzschicht, in der die Elektronen aus der n-Schicht in die Löcher der p-Schicht diffundieren. Die Ladungsträgerdichte in der Grenzschicht sinkt deutlich ab, man nennt diese Schicht deshalb auch Sperrschicht. Außerhalb der Sperrschicht bleiben Akzeptorionen in der p-Schicht und Donatorionen in der n-Schicht zurück, die ein elektrisches Feld im Material aufbauen. Das elektrische Feld ist dem Dichtegefälle entgegengesetzt und unterbindet somit im Gleichgewicht die Diffusion weiterer freier Ladungsträger.

Legt man nun eine äußere Spannung an, die dem im Material entstandenen elektrischen Feld entgegenwirkt, so kann wieder Diffusion stattfinden und die Leitfähigkeit der Sperrschicht steigt wieder, dh. der Widerstand wird kleiner.

Legt man eine Spannung an, die das elektrische Feld im Material unterstützt, so wird die Diffusion noch stärker unterbunden und der Widerstand der Sperrschicht wird noch größer.

Betrachtet man nun also den Zusammenhang des Stromflusses durch eine Diode in Abhängigkeit von der angelegten Spannung, so sollte bei zu geringer Spannung kein Strom messbar sein. Erreicht man die Grenzspannung, bei der die Sperrschicht der Diode verschwindet, so sollte der gemessene Strom danach exponentiell steigen.

Misst man die Diode in Sperrichtung, so sollte, solange die Diode nicht aus Versehen zerstört wurde, kein Strom fließen.

Transistoren

Transistoren bestehen aus drei abwechselnd dotierten Schichten. In unserem Fall wurde im Versuch ein pnp-Transistor benutzt.

Die Basis eines Transistors ist sehr dünn und gering dotiert (hier n-dotiert). Wenn durch die Basis kein Strom fließt, so ist die Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors nicht leitend und es fließt kein Strom. In diesem Fall hat der Transistor also einen sehr großen Widerstand.

Fließt ein kleiner Strom durch die Basis, so ist die Kollektor-Emitter-Strecke leitfähig und es kann ein Strom fließen. In diesem Fall wird ein Vielfaches des Basisstroms durchgelassen und der Kollektorstrom ist deutlich größer als der Basisstrom. Für den Transistor gilt:

$$r_{BE} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \text{ ist der differentielle Eingangswiderstand,}$$

$$I_C = B \cdot I_B \text{ mit } B \text{ als Stromverstärkung und}$$

$$\delta I_C = \beta \delta I_B \text{ mit } \beta \text{ als Kleinsignal-Stromverstärkung.}$$

4 Auswertung und Fehleranalyse

Die im Folgenden verwendeten Ables- und Messgerätefehler sind zu Gunsten der Lesbarkeit in Tabelle 2 nachzulesen und sind daher in den folgenden Abschnitten nicht nochmal separat aufgelistet.

4.1 Kennlinie des Widerstands

Im ersten Teil des Versuchs wurde die Kennlinie eines Widerstands aufgenommen, welcher mit $100\,\Omega$ gekennzeichnet war. Gemessen wurden Spannung und Stromstärke nach dem Aufbau aus ??(a). Der gemessenen Verlauf, wird in Abb. 3 dargestellt. Die dargestellten

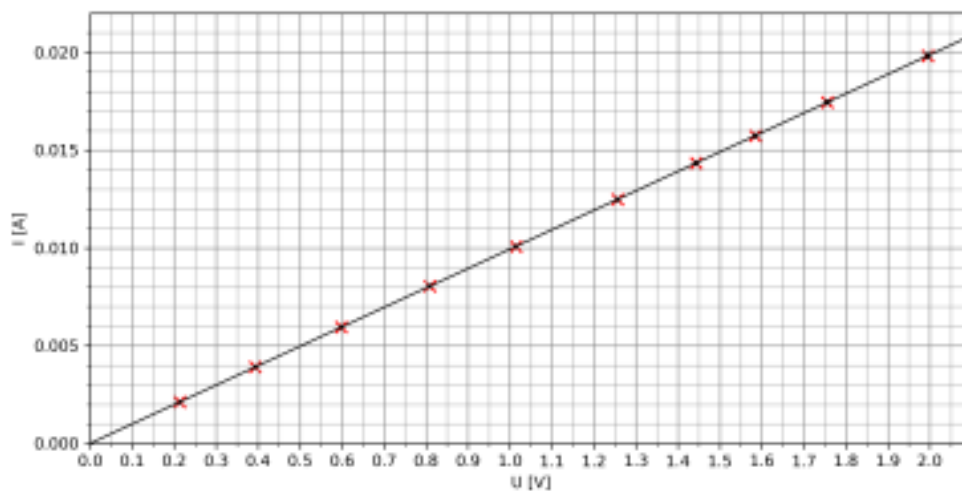


Abbildung 3: Kennlinie eines Widerstands

Fehler wurden, der uns gegebenen Tabelle mit 1 digit auf Strom und ebenfalls 1 digit auf die Spannung entnommen. Der prozentuale systematische Fehler wurde hier nicht berücksichtigt. Die dargestellte ungewichtete lineare Regression erfolgte unter Zuhilfenahme der folgenden Rechenvorschriften.

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

für $y = a + bx$

Die Fehler auf die Parameter ergeben sich durch die folgenden Formeln.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2}$$

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

Die so berechneten Parameter ergaben

$$a = (5 \pm 3) \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$b = (9936 \pm 2) \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Unter der Annahme, dass das Ohmsche Gesetz gültig ist, gilt

$$I = \frac{1}{R} \cdot U \quad .$$

Daraus folgt, dass $b = 1/R$. Die Rechenvorschrift für den Fehler auf R ergibt sich dann mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung. Man erhält

$$s_R = \frac{s_b}{b^2} \quad .$$

Somit erhält man für den Widerstand

$$R = (100,64 \pm 0,02) \Omega$$

4.2 Kennlinie der Glühbirne

Im zweiten Teil wurde die Kennlinie einer Glühbirne gemessen. Hierbei wurde ebenfalls die Schaltung aus ??(a) verwendet (anstelle des Widerstands wurde natürlich die Glühbirne eingebaut). Der gemessene Verlauf wird in Abb. 4 dargestellt. Die Fehler ergeben sich analog zur Kennlinie des Widerstands. Auch hier wurde eine lineare Regression durchgeführt allerdings nur über das augenscheinlich lineare Intervall der Messdaten. Die lineare

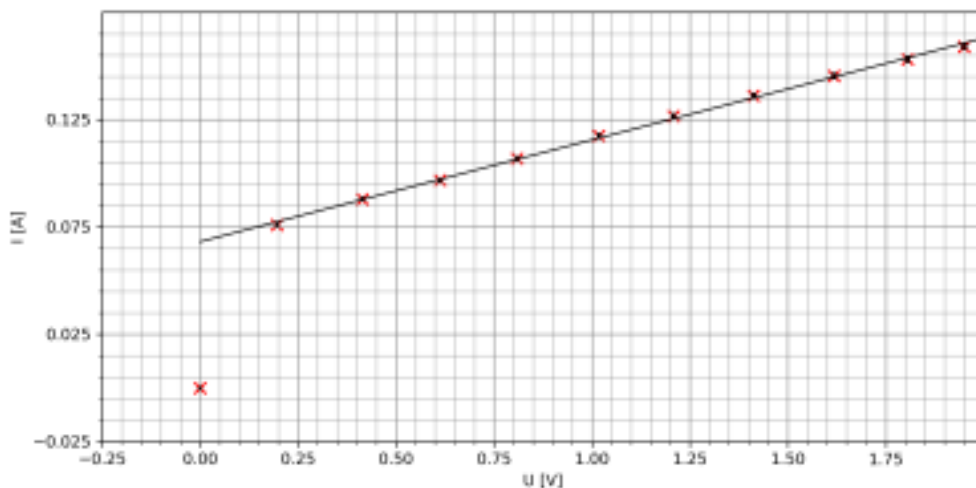


Abbildung 4: Kennlinie der Glühbirne

Regression erfolgte mit Hilfe derselben Rechenvorschriften wie in dem vorhergegangenen Abschnitt. Wir erhalten für die Parameter

$$a = (0,0681 \pm 0,0007) \text{ A}$$

$$b = (0,0474 \pm 0,0006) \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

Aus der Steigung lässt sich analog zum Vorhergegangenen der differentielle Widerstand bestimmen, da

$$\begin{aligned} I(U) &= a + b \cdot U \\ \Rightarrow R_{\text{diff.}} &= \frac{dU}{dI} = \frac{1}{b} \end{aligned}$$

Man erhält so mit dem Fehler einen differentiellen Widerstand von

$$R_{\text{diff.}} = (21,1 \pm 0,3) \, \Omega$$

Außerdem sollte der absolute Widerstand bei $U = 2 \text{ V}$ berechnet werden. Da unser letzter Messpunkt allerdings bei $U = 1,95 \text{ V}$ liegt, wurde dass bei eben jenem Wert gemacht. Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes

$$R_{\text{abs.}} = \frac{U}{I}$$

lässt sich der absolute Widerstand berechnen. Für den Fehler auf den absoluten Widerstand erhält man, durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung, folgende Rechenvorschrift.

$$s_{R_{\text{abs.}}} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} s_U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} s_I\right)^2}$$

Die Fehler auf die Messwerte s_U & s_I ergeben sich hier jedoch aus dem statistischen und dem angegebenen systematischen Fehler, welche aus der, uns dafür zur Verfügung gestellten, Tabelle entnommen wurden. Diese Fehler wurden durch die folgende Rechenvorschrift bestimmt.

$$s_{\text{mess.}} = \sqrt{\left(\frac{s_{\text{Prozent}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{s_{\text{digit}}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Man erhält für den so bestimmten Widerstand

$$R_{\text{abs.}} = (12,3 \pm 0,1) \, \Omega$$

4.3 Kennlinie der Diode

Nun sollte die Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung aufgenommen werden. Unter Verwendung der Schaltung aus ??(b), wurden der Strom und die Spannung gemessen. Bei den Fehlern war hier zu beachten, dass der vom Hersteller angegebene Fehler vom Messintervall abhängig ist. Auch hier wurde in der Darstellung nur der statistische Fehler verwendet. Der Verlauf ist in Abb. 5 zu sehen. Betrachtet man diese Kennlinie, so lässt sich

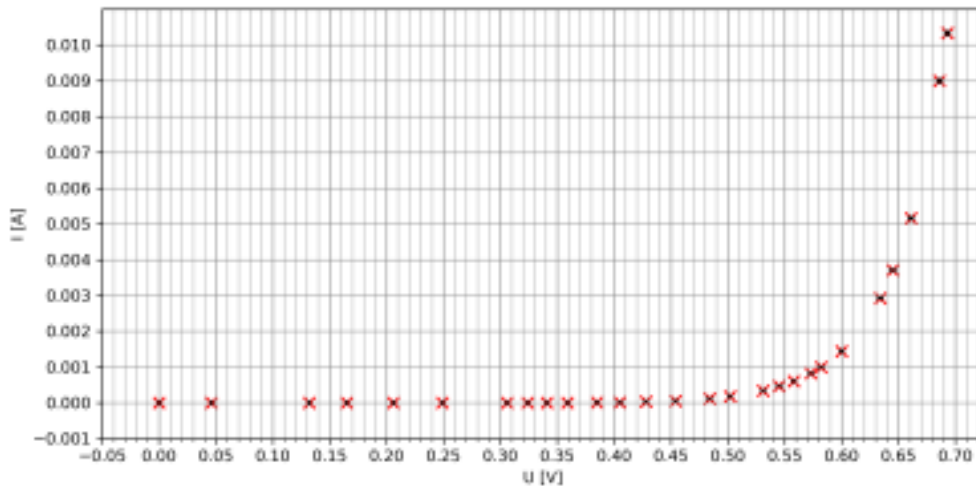


Abbildung 5: Kennlinie der Diode

doch relativ gut erkennen, dass es sich hierbei um einen exponentiellen Verlauf handeln könnte, daher wurde in Abb. 6 der Verlauf noch einmal halblogarithmisch aufgetragen.

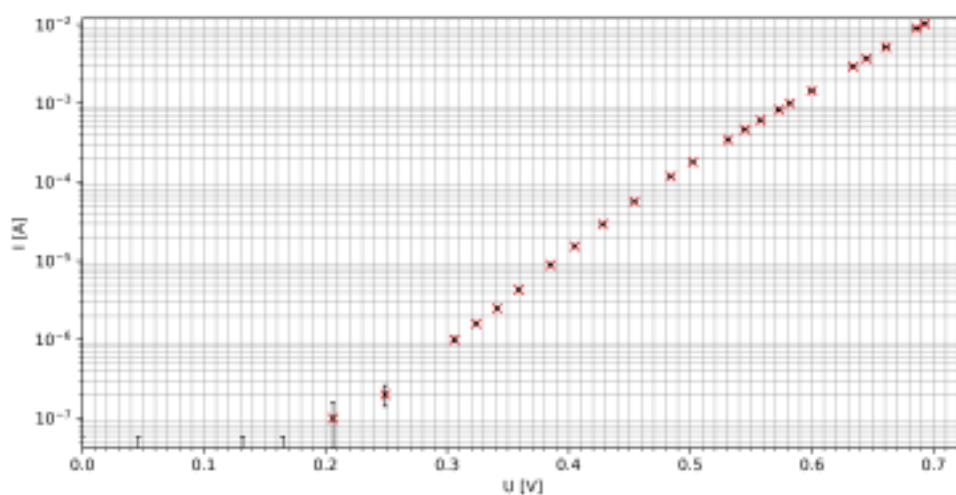


Abbildung 6: Halblogarithmische Kennlinie der Diode

In der halblogarithmischen Darstellung ist der Verlauf augenscheinlich linear, was den Verdacht auf einen exponentiellen Verlauf untermauert.

Es sollten außerdem Messwerte in Sperrrichtung aufgenommen werden, dies wurde auch getan, da allerdings selbst für die maximal zugelassene Spannung kein Strom geflossen ist, werden diese Punkte hier nicht graphisch aufgetragen. Man sieht jedoch, dass die Diode offensichtlich in Sperrrichtung bei den verwendeten Messspannungen nicht leitend ist.

4.4 Direkte Widerstandsmessung per Multimeter

Mit Hilfe eines Multimeters wurden die Widerstände der Diode und der Glühlampe zusätzlich zu den vorhergegangenen Verfahren direkt gemessen. Unter Annahme der aus der Tabelle entnommenen Fehlern erhielten wir die folgenden Werte.

$$R_{\text{Glühlampe,dir.}} = (2,1 \pm 0,2) \Omega$$

$$R_{\text{Diode,dir.}} = (12,77 \pm 0,07) \text{ M}\Omega$$

Die Kombination des systematischen und des statistischen Fehlers wurde wie bereits beschrieben für das jeweilige Messintervall durchgeführt.

4.5 Kennlinien eines Transistors

Im zweiten Teil des Versuchs wurden die Eingangskennlinie, die Steuerkennlinie und drei Ausgangskennlinien gemessen. Diese wurden dann in eine gemeinsame Grafik aufgetragen.

Die Messungenauigkeit wurde über eine Kombination des Gerätefehlers und des Ablesfehlers berechnet. Allgemein kann man folgende Formel nutzen:

$$s_{\text{Messwert}} = \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{s_{\text{Prozent}}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{s_{\text{digit}}}{\sqrt{3}} \right)^2} \right)^2 + s_{\text{Ablesef.}}^2} \quad .$$

Da in diesem Fall nur der statistische Fehler betrachtet werden sollte, fällt s_{Prozent} weg, da dies einen systematischen Fehler beschreibt. Tatsächlich genutzt wurde in der Auswertung also:

$$s_{\text{Messwert}} = \sqrt{\left(\frac{s_{\text{digit}}}{\sqrt{3}} \right)^2 + s_{\text{Ablesef.}}^2} \quad .$$

Dies ergibt mit den geschätzten und den aus der Tabelle entnommenen Fehlern für die drei gemessenen Größen:

Tabelle 1: Messfehler auf Basis- und Kollektorstrom, sowie Basisspannung

Messgröße	Fehler
I_C	$5 \cdot 10^{-6} \text{ A}$
I_B	$1 \cdot 10^{-6} \text{ A}$
U_B	$0,010 \text{ V}$

Eingangswiderstand r_{BE}

Wie bereits in Abb. 7 zu sehen ist, wurde über die linear erscheinenden Messpunkte der Eingangskennlinie eine lineare Regression durchgeführt. Die Parameter und ihre Fehler erhält man mit den bereits in Abschnitt 4.1 beschriebenen Rechenvorschriften. Wir erhalten somit

$$\begin{aligned}a &= (0,681 \pm 0,007) \text{ V} \\b &= (0,000\,72 \pm 0,000\,12) \text{ V}/\mu\text{A}\end{aligned}$$

Da hier nun direkt $U_{BE}(I_B)$ aufgetragen wurde, kann man aus der Steigung direkt den Eingangswiderstand r_{BE} berechnen (man muss natürlich auf die Einheiten achten). Den Fehler erhält man dann direkt aus dem Fehler auf die Steigung. Man erhält

$$r_{BE} = (7200 \pm 120) \Omega$$

Signalverstärkung β

Wie ebenfalls in Abb. 7 dargestellt, wurde auch über die Messdaten der Steuerkennlinie eine lineare Regression durchgeführt, die dafür verwendeten Rechenvorschriften sind in Abschnitt 4.1 nachzulesen. Man erhält für die Parameter

$$\begin{aligned}a &= (0,058 \pm 0,026) \text{ mA} \\b &= (0,1396 \pm 0,0006) \cdot 10^3\end{aligned}$$

Daraus folgt, da hier wieder direkt $I_C(I_B)$ aufgetragen wurde, über die in Abschnitt 3 beschriebene Definition der Signalverstärkung

$$\beta = 139,6 \pm 0,6 \quad .$$

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Kennlinien unterschiedlicher elektrischer Bauteile

Im ersten Teil des Versuchs wurden Kennlinien von unterschiedlichen elektrischen Bauteilen gemessen.

Der Aufbau und der allgemeine Eindruck während der Durchführung ließen in diesem Versuchsteil einigermaßen gute Daten vermuten. Die sichtbaren Schwankungen der Messgeräten waren sehr gering und ein systematisches Offset hätte keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Lediglich die Einstellung der gewünschten Spannung erwies sich als schwierig, was zu weniger signifikanten Messpunkten führte, als geplant.

Widerstand

Die Kennlinie, die vom ohmschen Widerstand aufgenommen wurde zeigt einen sehr linearen Verlauf und entspricht somit den Erwartungen vollständig. Mit Hilfe von einer linearen Regression wurde der genutzte Widerstand bestimmt. Bei uns ergab sich

$$R = (100,64 \pm 0,02) \, \Omega \quad .$$

Auf dem Widerstand selbst waren $100 \, \Omega$ angegeben. Betrachtet man die Werte absolut und vergleicht sie, so lässt sich sagen, dass der Widerstand gut gemessen wurde, nur der Fehler ist deutlich zu klein. Da der Fehler aber nicht von den im Versuch geschätzten Fehlern abhängt, sondern sich nur aus der linearen Regression ergibt, liegt dies nicht an falscher Schätzung der Fehler, sondern an "zu linearen" Daten. Man sieht weiterhin, dass der verwendete Widerstand dem ohmschen Gesetz sehr gut folgt, da der Fit sehr genau zu den Messdaten passt.

Glühbirne

Auch die Kennlinie der Glühbirne zeigt den erwarteten Verlauf mit einem starken Anstieg des Stroms bei geringer Spannung und darauf folgendem linearen Verhalten. Der, über eine lineare Regression bestimmte, Widerstand liegt bei

$$R_{\text{diff.}} = (21,1 \pm 0,3) \, \Omega \quad ,$$

während der, mit zwei einzelnen Messwerten bestimmte Widerstand bei

$$R_{\text{abs.}} = (12,3 \pm 0,1) \, \Omega$$

liegt. Direkt mit einem Multimeter wurde ein Widerstand von

$$R_{\text{Multi.}} = (2,1 \pm 0,2) \, \Omega \quad .$$

Da der Widerstand einer Glühbirne abhängig von der angeschlossenen Spannung ist, lässt sich nicht einfach "der eine" Widerstand einer Glühbirne bestimmen. Mit unterschiedlichen Methoden und daraus folgend unterschiedlichen Spannungen und Strömen wird man unterschiedliche Widerstände erreichen.

Bei einer Glühbirne handelt es sich also nicht um einen ohmschen Widerstand.

Diode

Die aufgenommene Kennlinie entspricht sehr gut dem erwarteten Zusammenhang zwischen Strom und Spannung bei einer Diode. Der Zusammenhang ist exponentiell und trägt man die Daten auf einer halblogarithmischen Skala auf, so erscheinen diese linear. Lediglich die ersten aufgenommenen Datenpunkte folgen diesem Verlauf nicht, dies war aber auch zu erwarten, da eine Diode erst ab einer bestimmte Grenzspannung Strom durchlässt.

Die Wahl der Schaltung sollte in diesem Fall keinen Unterschied gemacht haben, da der Strom schlagartig sehr stark angestiegen ist und es kein Messintervall gab, in dem eventuell mehrmals nur der Strom durch das Voltmeter gemessen wurde.

In Sperrrichtung ließ die Diode, auch bei unterschiedlichen Spannungen, wie erwartet keinen Strom durch.

Mit dem Multimeter wurde in Durchlassrichtung ein Widerstand von

$$R_{\text{Diode}} = (12,77 \pm 0,07) \Omega$$

gemessen. In Sperrrichtung ließ sich, wie erwartet, mit dieser Funktion kein Zahlenwert für den Widerstand bestimmen.

5.2 Direkte Widerstandsmessung per Multimeter

Neben der Bestimmung der Kennlinien wurde eine direkte Widerstandsmessung mit dem Multimeter durchgeführt. Die sich ergebenden Daten wurden bereits in den vorherigen zwei Absätzen verglichen aufgeschrieben, an dieser Stelle soll nur kurz die Methode diskutiert werden.

Die direkte Widerstandsmessung hat zwar in beiden Fällen, also bei der Diode und bei der Glühbirne zu einem Ergebnis geführt, eine Aussage über die Sinnhaftigkeit lässt sich aber auf Grund von weiteren fehlenden Daten nicht treffen.

Man kann allerdings sagen, dass die Messung eines nicht-ohmschen Widerstandes, was Glühbirne und Diode beide sind, bei einem festen Strom oder einer festen Spannung wenig Sinn ergibt, da beide Widerstände spannungsabhängig ihre Größe ändern. Es lässt sich mit dieser Messmethode also höchstens eine Aussage über den Widerstand eines solchen Bauteils bei ganz bestimmten Bedingungen treffen.

5.3 Kennlinien eines Transistors

Im zweiten Teil des Versuchs wurde eine Transistorschaltung, mit der man die drei Kennlinien eines Transistors aufnehmen kann, aufgebaut. In diesem Teil kam es während der Versuchsdurchführung zu großen Schwankungen der gemessenen Größen, was ein Ablesen teilweise sehr schwierig gestaltet hat.

Eingangskennlinie I_B

Die Eingangskennlinie zeigt den Zusammenhang zwischen Basisstrom und Basis-Emitter-Spannung. Die Eingangskennlinie sieht für unterschiedliche Kollektor-Emitter-Spannungen unterschiedlich aus. Sie zeigt, wie erwartet, das Verhalten einer einfachen Diode.

Steuerkennlinie

Die Steuerkennlinie zeigt den Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und Basisstrom. Sie gilt nur für die jeweilig genutzte Kollektor-Emitter-Spannung. Aus der Steigung der Steuerkennlinie lässt sich die Verstärkung des Transistors ablesen. Ist die Kennlinie linear, so ist die Verstärkung konstant. Krümmt sie sich, so entstehen Verzerrungen am Ausgang des Transistors.

Ausgangskennlinie

Die Ausgangskennlinie zeigt den Zusammenhang zwischen Kollektor-Emitter-Spannung und Kollektorstrom bei verschiedenen Basisströmen. Der Arbeitsbereich eines liegt innerhalb des linearen Teils der Ausgangskennlinie und ist daher vom Basisstrom abhängig.

Des Weiteren kann man in der graphischen Darstellung der Ausgangskennlinien erkennen, dass unabhängig vom Basisstrom die Steigung der Kennlinie innerhalb des Arbeitsbereichs gegen Null geht. Die Kollektorspannung sollte also bei festem Basisstrom innerhalb des Arbeitsbereichs keinen nennenswerten Einfluss auf den Kollektorstrom haben.

5.3.1 Bestimmung des Eingangswiderstands und der Signalverstärkung

Die Daten aus den aufgenommenen Kennlinien wurden genutzt, um den Eingangswiderstand und die Signalverstärkung des Transistors zu bestimmen.

Aus der Steigung der Eingangskennlinie lässt sich der differentielle Eingangswiderstand bestimmen. Es ergab sich

$$r_{BE} = (7200 \pm 120) \Omega \quad .$$

Die Signalverstärkung wurde über die Steigung der Steuerkennlinie bestimmt und man erhält

$$\beta = (139,6 \pm 0,6) \quad .$$

Abbildungsverzeichnis

1	Schaltung zur Messung der Kennlinien	1
2	Schaltung zur Messung der Kennlinien eines Transistors	2
3	Kennlinie eines Widerstands	5
4	Kennlinie der Glühlampe	6
5	Kennlinie der Diode	8
6	Halblogarithmische Kennlinie der Diode	8
7	Kennlinien eines Transistors	20

Tabellenverzeichnis

1	Messfehler auf Basis- und Kollektorstrom, sowie Basisspannung	9
2	Geräte und Messfehler zu den in der Auswertung angegebenen Formeln . .	15

Literatur

[Quelle 1] *"Versuchsanleitungen zum Physikkolabor für Anfänger*innen, Teil 2"* Stand 02/2019.

6 Anhang

6.1 Messfehler und Gerätefehler

Tabelle 2: Geräte und Messfehler zu den in der Auswertung angegebenen Formeln

	Gerät	Messbereich	Fehler
bigskip	KT2210	20 mA	1 % und 1 digit
	KT2210	2 mA	1 % und 1 digit
	KT2210	200 μ A	1 % und 1 digit
	KT2210	200 mA	1,5 % und 1 digit
	Metex	2 V	0,5 % und 1 digit
	Metex	200 Ω	0,5 % und 3 digits
	Metex	20 M Ω	1 % und 2 digits
	Drehspulamperemeter	alle	2 % und Ablesefehler von $\pm 1 \mu$ A
	Netzteil für I_C	alle	Ablese/rundungsfehler 0,005 mA

20.03

Vorbereitung 45Kennlinie Widerstand R_x 100 Ω

Strom [μA]	Spannung [V]	(20 μA , 2 V) KT-2210 Meter
0	0	
2,12	0,213	
3,91	0,393	
5,95	0,598	
7,05	0,801	
10,08	1,014	
12,48	1,256	
14,34	1,448	
15,24	1,584	
17,45	1,757	
19,83	1,995	

KT 2 μA

Kennlinie Dioden 1N4006

Strom	Spannung [V]	
0	-0,03	0
0	52,5	0,046
0	102,9	0,132
0		0,165
0,1 μA		0,206
0,2 μA		0,249
1,0 μA		0,306
1,6 μA		0,324
2,5 μA		0,341
4,3 μA		0,359
8,9 μA		0,385
15,4 μA		0,405
29,1 μA		0,421
56,4 μA		0,454
118,0 μA		0,484
180,5 μA		0,502

0,344 μA	0,581
0,468 μA	0,545
0,607 μA	0,558
0,826 μA	0,573
0,996 μA	0,582
1,445 μA	0,6
2,92 μA	0,634
3,71 μA	0,645
5,16 μA	0,661
9,00 μA	0,686
10,33 μA	0,693

Leitlinie Endkurve

Strom I [mA]	Spannung U [V]
0	0
76,0	0,190
88,0	0,414
96,7	0,612
106,8	0,804
117,4	1,018
126,6	1,206
136,1	1,418
145,3	1,618
153,1	1,805
159,0	1,950

Diode, umgekehrte Richt.

Strom	Spannung U [V]
0	0,691
0	1,006
0	1,534

Widerstand mit Multimeter

Grübler 2,1 Ω (11/10/200)
 Diode 12,77 M Ω (20/11/07)
 Legezeitsrechnung nicht ansetzbar

Transistor

I_{CQ} [mA]	I_C [mA]	U_{CE} [V]
0	0	0
0	0	0,100
0	0	0,300
0	0	0,400
0	0	0,5
0	0,07	0,5599
0,51	0,20	0,625
1,75 3,5	0,55	0,651
4,8	1,18	0,674
7,8 15	2,09	0,686
22	3,13	0,699
34	4,86	0,710
43	6,2	0,729 19
52	7,4	0,740
70	9,9	0,730
82	11,5	0,736
98	13,58	0,742

$U_{CE} = 1,5V$
 $I_{CQ} = 10$

$I_B = 40 \mu A$

I_L [mA]	U_C [V]
0,03	0
5,61	0,50
5,73	1,00
5,85	1,50
6,00	2,00
5,9	2,50
5,95	3,00
5,95	4,00
6,10	4,98
3,54	0,1

$I_B = 60 \mu A$

I_L [mA]	U_C [V]
0,05	0
5,06	0,10
8,48	0,5
8,43	1,00
8,60	2,00
8,45	3,00
9,00	4,00
9,25	4,98
8,15	0,2

$I_B = 80 \mu A$

I_L [mA]	U_C [V]
0,01	0
1,89	0,1
2,81	0,2
2,84	0,3
2,96	0,5
2,82	1,0
3,00	2,0
2,8	3,0
2,97	4,0
3,1	4,98

Gerätefehler

KT 2210: 20 mA: 0,5V Abfall, 1% & 1 digit

2 mA: -"-

200 μA : -"-Metex: 2V: 10 M Ω , 0,5% & 1 digitMetex: 200 Ω : 0,5% & 5 digit20 M Ω : 1% & 2 digitanalog I_B : 2% Skalierung & Ableser: 1 μA I_C Netzteil: Ableser/rund: 0,005 mA

HT 2240 · 20V 10M Ω 0.5% & 1 digit

VT 2003 SSA

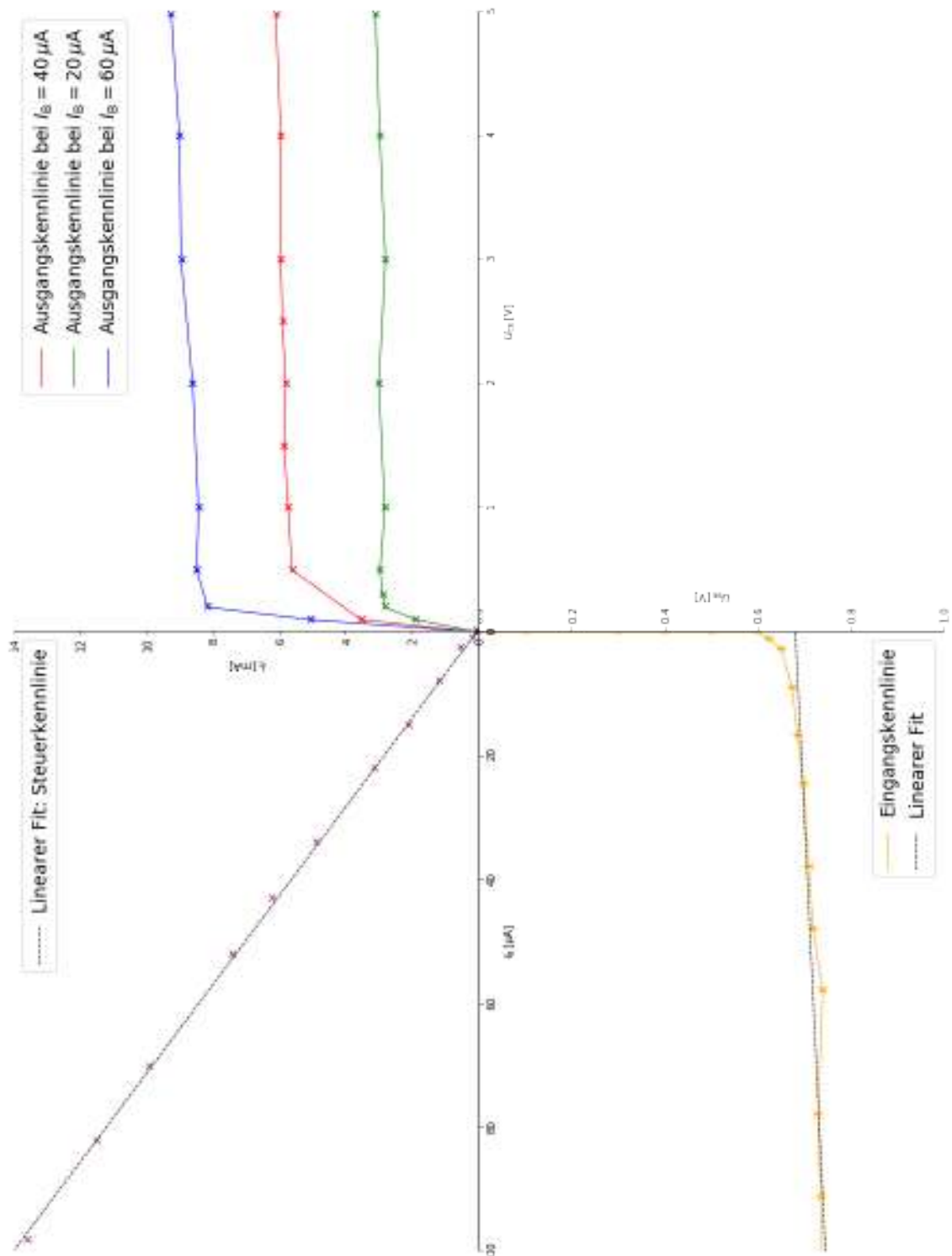


Abbildung 7: Kennlinien eines Transistors, bei der Eingangskennlinie und der Steuerkennlinie wurden lineare Fits für die spätere Auswertung eingefügt. In allen drei Quadranten sind Fehlerbalken eingezeichnet, welche aber kaum zu erkennen sind.