

Versuch 45

Kennlinien elektrischer Leiter und Bauelemente

Protokoll des Anfänger-Praktikums II



Gruppe 14

Durchgeführt am
28.02.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziel	3
2	Physikalische Grundlagen	3
3	Versuchsaufbau	4
3.1	A. Messung der Kennlinien von Zweipolen	4
3.2	B. Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors	4
4	Versuchsdurchführung	5
4.1	Teil A	5
4.2	B. Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors	6
5	Auswertung	7
5.1	Teil A	7
5.1.1	Widerstand	7
5.1.2	Glühlampe	8
5.1.3	Diode	10
5.2	Teil B	13
6	Zusammenfassung und Diskussion	14
6.1	Teil A	14
6.2	Teil B	15
7	Literatur	17
8	Anhang	18
8.1	Lineare Regression	18

1 Versuchsziel

Ziel des Versuchs ist es, die Kennlinien eines ohmschen Widerstands, einer Glühlampe sowie einer Halbleiterdiode zu bestimmen und miteinander zu vergleichen, dabei soll vor allem auf charakteristische Unterschiede eingegangen werden.

Der weiteres soll ein pnp-Transistor betrachtet werden. Dabei sollen dessen Kennlinien aufgenommen und deren Bedeutung diskutiert werden.

2 Physikalische Grundlagen

Elektrischer Widerstand

Bei Metallen handelt es sich um einen elektrischen Leiter, was bedeutet, dass sie eine große Anzahl an frei beweglichen Elektronen besitzen.

In Halbleitern dagegen sind die Elektronen durch eine feste Bindung der Atome untereinander im Normalzustand nicht frei beweglich. Sie befinden sich im sogenannten Valenzband und besitzen eine geringe Energie. Wird die Energie der Elektronen beispielsweise durch eine Temperaturerhöhung vergrößert, wechseln diese ab einer bestimmten Energie in das Leitungsband, wo sie nun beweglich sind. Bei Metallen liegen diese beiden Bänder dicht aneinander während bei Halbleitern ein größer energetischer Abstand zwischen ihnen vorhanden ist, genannt Energielücke.

Isolatoren dagegen besitzen nahezu keine frei beweglichen Ladungsträger.

Der elektrische Widerstand spiegelt hier somit die Dichte der freien Elektronen wider.

Dotierung

Als Dotierung wird das Ersetzen von Atomen eines Halbleiters durch Atome, die ein Elektron mehr oder weniger in der Valenzschale besitzen, bezeichnet. Dabei ist somit entweder ein Elektron zu viel vorhanden oder es fehlt eins, sodass "Löcher" vorhanden sind, die sich genauso wie freie Elektronen fortbewegen können. Um in die Gitterstruktur des Halbleiters zu passen, werden die hinzugefügten Atome ihre überschüssigen Elektronen oder Löcher los, sodass sie danach geladen sind. Dabei werden zwei Fälle unterschieden: Sind überschüssige Elektronen vorhanden, wird der Einbau der Atome Donator genannt und das dotierte Material als n-leitend bezeichnet, wobei das n für negativ steht. Fehlen Elektronen, sodass Löcher vorhanden sind, wird dies Akzeptor genannt und es handelt sich um ein p-leitendes Material. Das p steht hierbei für positiv.

Diode

Eine Diode setzt sich aus einer p- und einer n-leitenden Schicht zusammen. An der Grenzschicht diffundieren die Elektronen aus der n-Schicht in die Löcher der p-Schicht und andersrum, sodass hier die Dichte der freien Ladungsträger enorm abnimmt. Dieser Bereich wird Sperrschicht genannt. Durch das Fortbewegen der Elektronen aus der n-Zone bleiben die Donatoren dort als positive Raumladung zurück, während die Akzeptoren in der p-Zone dort als negative Raumladung verbleiben. Es kommt zur Entstehung eines elektrischen Feldes, das der momentanen Bewegung der Ladungsträger entgegenwirkt und eine weitere Diffusion dieser verhindert.

Wird eine äußere Spannung angelegt, die dem in der Sperrschicht vorherrschenden elektrischen Feld entgegenwirkt, wird dieses abgeschwächt und die Hemmung der Diffusion geringer, sodass die Leitfähigkeit wieder steigt.

Transistor

Ein Transistor besteht aus drei abwechselnd dotierten Schichten, entweder npn oder pnp. Im folgenden wird ein pnp-Transistor beschrieben. Für einen npn-Transistor ist das vorgehen analog, lediglich die Vorzeichen vertauschen sich, sodass statt den Löchern als Ladungsträger dann die Elektronen betrachtet werden.

Die Anschlüsse des Transistors werden Emittor (E), Basis (B) und Kollektor (C) genannt. Zwischen diesen Schichten gibt es zwei Übergangszonen. Wichtig ist, dass die Basis sehr dünn ist, sodass die beiden p-Schichten dicht aneinander liegen und die Ladungsträgerdichte fast nur aus den beiden Grenzschichten besteht. Es kommt somit auch zur Überlagerung der elektrischen Felder der beiden Teil-Dioden.

Wie oben beschrieben bilden sich an den Grenzschichten E-Felder, die hier jeweils von der n-Schicht in Richtung der p-Schichten zeigen. Damit die Löcher die erste Grenzschicht überwinden können, wird eine Spannung U_{BE} an Emittor und Basis angelegt, die dem E-Feld dort entgegenwirkt und einen Strom I_B der Ladungsträger vom Emittor über die Sperrschicht in die Basis erzeugt. Dieser Strom ist dabei von der angelegten Spannung abhängig. Dabei muss erst eine gewisse Eingangsspannung erreicht werden, damit diese zum Überwinden der Sperrschicht ausreicht.

Durch die Geschwindigkeit, welche die Elektronenlöcher durch die Basisspannung in der Basis haben, können sich die Elektronenlöcher über die zweite Sperrschicht hinweg bewegen und werden dahinter von der Kollektorspannung U_{CE} stark beschleunigt. Die Kollektorspannung ist dabei deutlich höher als die Basis-Emittor-Spannung.

Transistoren sind empfindlich gegenüber Temperaturänderungen. Bei zu viel Wärme gibt es zu viele leitfähige Ladungsträger, sodass es zum Durchschlag kommen kann, weswegen eine gute Kühlung notwendig ist.

3 Versuchsaufbau

3.1 A. Messung der Kennlinien von Zweipolen

In diesem ersten Versuchsteil besteht der Aufbau aus einem Steckbrett, einem Netzgerät mit einem Ausgang, Verbindungskabeln, einer Glühlampe, einer Halbleiterdiode, analogen und digitalen Messgeräten für Spannung und Stromstärke und zwei Widerständen. Diese Bauteile werden in der Versuchsdurchführung entsprechend eingesetzt.

3.2 B. Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors

Beim zweiten Versuchsteil gibt es ein Netzgerät mit zwei Ausgängen, in dem auch ein digitales Strommessgerät für den Kollektorstrom eingebaut ist. Der Ausgang für die Basis-Emittor-Spannung geht bis maximal 1 V und der Ausgang für die Kollektorspannung kann bis 5 V aufgedreht werden. Des weiteren gibt es einen pnp-Transistor, ein Steckbrett, ein digitales Voltmeter und ein separates, empfindliches Drehspulinstrument zur Messung des Basisstroms. Daraus wird der Versuch wie in Abbildung 1 aufgebaut. Der Taster muss gedrückt werden, damit der Stromkreis geschlossen wird. Dieses Teil ist dort eingebaut, um eine Überhitzung des Bauteils zu vermeiden.

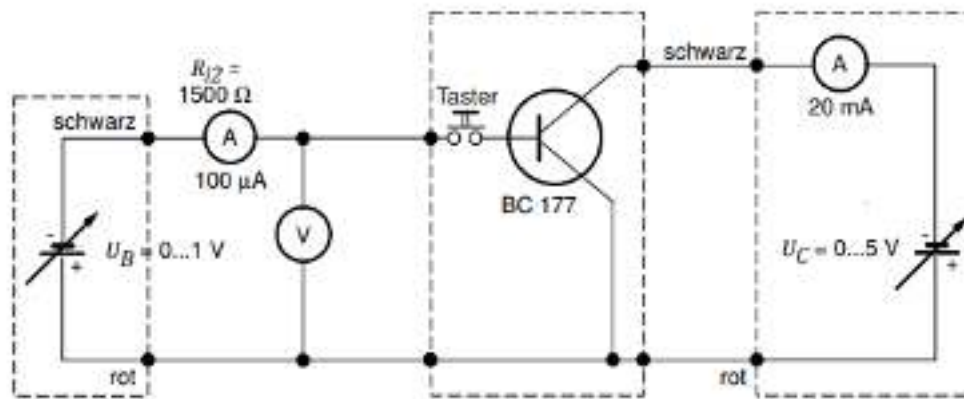


Abbildung 1: Schaltung zur Messung der Kennlinien des eingebauten Transistors. Die beiden Spannungsquellen befinden sich dabei im selben Gerät [1]

4 Versuchsdurchführung

4.1 Teil A

Zunächst wurde zur Messung an einem einfachen ohmschen Widerstand und einer Glühlampe folgende Schaltung (siehe Abbildung 2) aufgebaut.

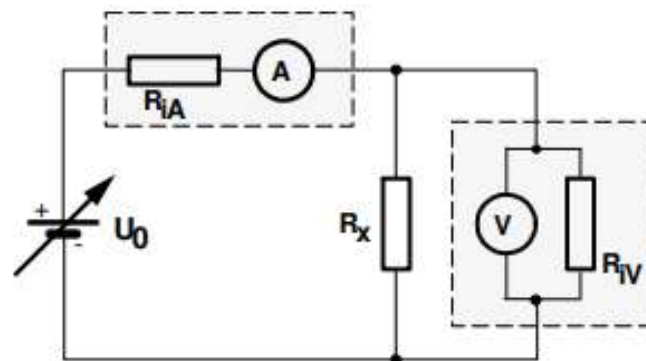


Abbildung 2: Schaltung zur Messung eines einfachen ohmschen Widerstands und einer Glühlampe. Dabei sind die Innenwiderstände des Voltmeters und des Amperemeters extra eingezeichnet [1]

Dabei wurde für den ohmschen Widerstand die Spannung mit einem digitalen Messgerät, das im Messbereich bis 20 V eingestellt war, und die Stromstärke mit einem analogen Messgerät, mit einem Messbereich bis 0,06 A, gemessen. Auf dem Gerät war dabei eine Skala von 0 bis 30 angegeben, wobei die 30 den 0,06 A entsprechen. Die abgelesenen Werte mussten demnach für die Auswertung dementsprechend umgerechnet werden. Die Messbereiche wurden während der Messung nicht verändert. Nun wurde die Spannung langsam von null bis zur maximalen Spannung am Netzgerät erhöht. Dabei wurden die verschiedenen Stromstärken abgelesen und dokumentiert.

Für die Glühlampe wurde dieselbe Schaltung wie beim ohmschen Widerstand verwendet. Außerdem wurde die Messung mit denselben Messgeräten durchgeführt, allerdings wurde der Messbereich des Voltmeters auf 2 V verringert und der des Amperemeters auf 0,3 A erhöht. Während der Messung wurden die Messbereiche abermals nicht verändert. Zu Beginn der Messung wurde

die Spannung bis 0,4 V zunächst in 50 mV-Schritten erhöht. Danach wurde zuerst in 0,1 V und dann in 0,2 V-Schritten weitergemessen. Dies wurde bis etwa 1,6 V weitergeführt, da das Netzteil keine größere Spannung mehr ausgeben konnte.

Für die Messungen an der Diode wurde die Schaltung etwas verändert. Man fügte noch einen Widerstand ($R = 100\Omega$) vor das Amperemeter ein, um sicher zu gehen, dass das Halbleiterbauelement keinen Schaden nimmt. Aufgrund des hohen Innenwiderstands des Voltmeters entschied man sich bei der Messung in Durchlassrichtung für folgende Schaltung in Abbildung 3.

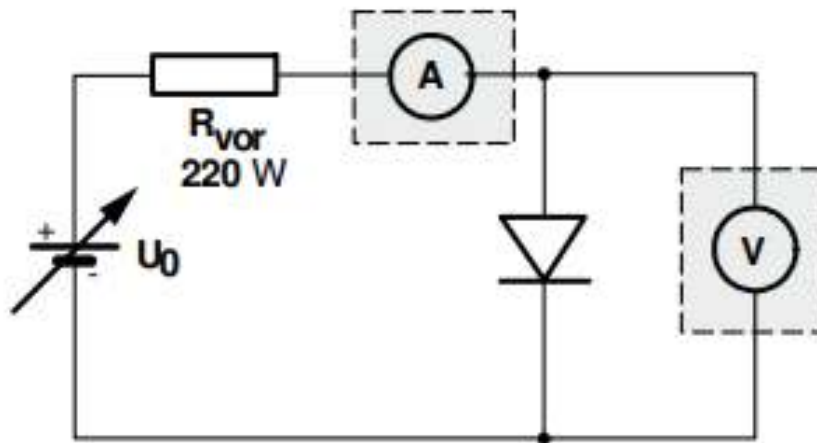


Abbildung 3: Schaltung zur Messung einer Diode in Durchlassrichtung. Die verwendeten Messgeräte haben einen Innenwiderstand, der im gestrichelten Kasten dargestellt ist

Die Messung wurde mit einer Spannung von 0 V begonnen. Diese wurde in 50 mV-Schritten erhöht, bis bei einer Spannung von etwa 500 mV ein deutlicher Strom einsetzte. Von da an wurde in 20 mV-Schritten bis zur maximalen Spannung von 690 mV weitergemessen.

Bei der anschließenden Messung der Diode in Sperrrichtung wurde zunächst eine ähnliche Schaltung wie in Durchlassrichtung verwendet. Lediglich der zusätzliche Widerstand wurde entfernt. Damit konnte auch mit hohen Spannungen nur ein sehr kleiner Wert erreicht werden. Danach wurde noch eine andere Schaltung verwendet, bei der das Amperemeter mit der Diode in Reihe und mit dem Voltmeter parallel geschaltet wurde. Allerdings konnte auch mit diesem Aufbau kein Strom erreicht werden.

Die direkten Messungen der Widerstände wurden mit einem digitalen Messgerät (Pierron UT51, Eichtoleranz: $\pm(0,8\%v\text{-}M.)$) durchgeführt. Bei der Glühlampe wurde mit einem Messbereich bis 200Ω gemessen.

Bei der Diode wurden verschiedene Messbereiche ausprobiert, allerdings erhielt man nur bei einem Messbereich von $2M\Omega$ oder höher einen Wert für den Widerstand.

4.2 B. Messung der Kennlinien eines pnp-Transistors

Nachdem der Aufbau der Schaltung abgeschlossen war, musste zunächst eine Kollektorspannung von einem Volt eingestellt werden. Dafür wurde das Amperemeter zu den Ausgängen von Emitter und Kollektor parallel geschaltet. Im Anschluss wurde diese Spannung nicht mehr verändert und das Messgerät wieder an seinen ursprünglichen Platz angeschlossen.

Zunächst wurde der Basisstrom in Abhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung gemessen. Dabei war es wichtig, zum Messen den Taster zu drücken, da sonst der Stromkreis nicht geschlossen war. Außerdem veränderte sich die Spannung durch Drücken des Tasters bei höheren Spannungen aufgrund des Widerstands des Transistors. Es musste unbedingt die Spannung beim Drücken notiert werden und nicht die vorher eingestellte.

Bei der zweiten Messung wurde die Spannung U_{CE} erneut bei dem zuvor eingestellten Wert belassen. Dabei wurden nun verschiedene Werte für den Basisstrom durch Änderung der Basis-Emitter-Spannung eingestellt (die exakte Spannung U_{BE} war dabei irrelevant und musste nicht notiert werden) und die zugehörige Kollektorspannung I_C am Netzgerät, mit eingebauten Messgerät, abgelesen. Dies wurde für Werte von I_B im Bereich $(0 - 100)\mu A$ durchgeführt. Auch bei diesen Messungen musste zum Ablesen der Taster gedrückt gehalten werden.

Zuletzt sollte I_C als Funktion der Kollektorspannung gemessen werden. Dabei wurde zunächst ein Wert für den Basisstrom I_B ausgewählt. Man drehte im Anschluss die Spannung U_{BE} so auf, dass der gewünschte Wert von I_B vorhanden war. Danach wurde die Kollektorspannung langsam erhöht und verschiedene Werte für I_C notiert. Bei jedem gemessenen I_C musste zuerst überprüft werden, ob der Basisstrom noch dem gewünschten Wert entspricht und ansonsten durch Änderung von U_{BE} wieder richtiggestellt werden. Erst dann konnte der Kollektorstrom korrekt abgelesen werden.

Diese dritte Messung wurde noch mit zwei anderen festen Werten für I_B wiederholt.

5 Auswertung

Alle gemessenen Werte sind im Anhang zu finden.

5.1 Teil A

5.1.1 Widerstand

Zunächst werden zur Ermittlung der Kennlinie eines einfachen Widerstands die für die Spannung und den Strom gemessenen Werte in ein Diagramm aufgetragen, wobei die Spannung U auf der x-Achse und die Stromstärke I auf der y-Achse aufgetragen wird. Dies ist in Abbildung 4 zu sehen.

Da hier das analoge Amperemeter verwendet wurde, musste aus den abgelesenen Werten noch die Stromstärke über

$$I = \frac{0,06}{30} \cdot I_{\text{abgelesen}} \quad (5.1)$$

berechnet werden.

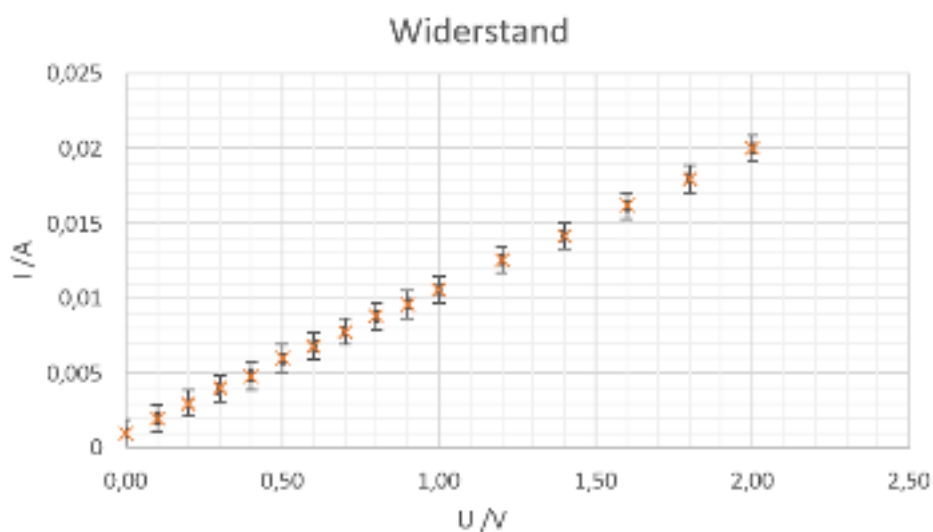


Abbildung 4: Kennlinie eines ohmschen Widerstands

Bei den hier eingezeichneten Fehlern handelt es sich dabei nur um die Ablesefehler vom Messgerät, da die Eichtoleranz der Messgeräte lediglich einen systematischen Fehler darstellt, der bei den Fehlerbalken nicht berücksichtigt werden muss. Der systematische Fehler kann dabei vernachlässigt werden, da es hier nur um den qualitativen Verlauf der Kennlinie geht. Der Ablesefehler wurde für alle digitalen Messgeräte auf $\pm 0,5$ digits abgeschätzt. Das entspricht in dieser Messung $s_U = 0,005$ V. Der Ablesefehler der Stromstärke ist dabei

$$s_I = 0,5 \text{ A} \cdot \frac{0,06}{30} = 0,001 \text{ A.} \quad (5.2)$$

5.1.2 Glühlampe

Dasselbe sollte mit der Glühlampe durchgeführt werden. Die über den Strom aufgetragene Spannung kann dabei Abbildung 5 entnommen werden.

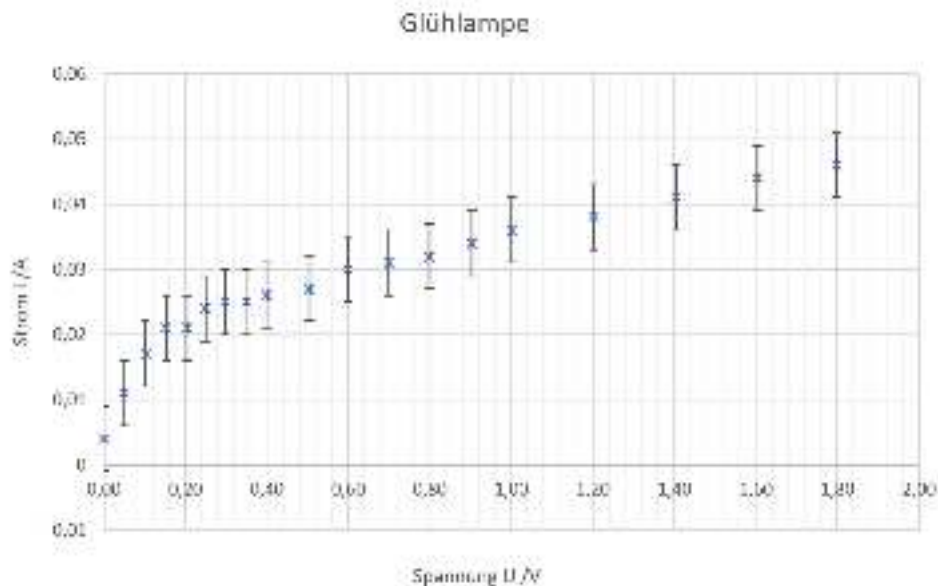


Abbildung 5: Kennlinie einer Glühlampe

In diesem Fall sind wieder lediglich die Ablesefehler vom Messgerät als Fehlerbalken eingezeichnet, der in diesem Fall

$$s_I = 0,5 \text{ A} \cdot \frac{0,3}{30} = 0,005 \text{ A} \quad (5.3)$$

beträgt.

Auch hier wurde der Ablesewert mithilfe von Messbereich und Skalenendwert in den Wert für die Stromstärke I über

$$I = \frac{0,3}{30} \cdot I_{\text{abgelesen}} \quad (5.4)$$

umgerechnet.

Die Kennlinie der Glühlampe unterscheidet sich dabei deutlich von der des einfachen Widerstands, da es sich bei einer Glühlampe nicht um einen ohmschen Widerstand handelt. Dies

bedeutet, dass der Widerstand abhängig von der Stromstärke ist. Erst für höhere Stromstärken kommt es zu einem annähernd linearen Verlauf, während der ohmsche Widerstand in jedem Bereich einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom zeigt.

Betrachtet man den hinteren, nahezu linearen Verlauf der Messergebnisse, lässt sich über lineare Regression die Geradengleichung der Ausgleichsgeraden bestimmen. Die dazu verwendeten Formeln der linearen Regression sind im Anhang zu finden. Man erhält dadurch eine Geradengleichung von

$$y = 0,0143 \cdot x + 0,0209. \quad (5.5)$$

Die Steigung b beträgt damit

$$b = 0,0143 \frac{\text{A}}{\text{V}} \quad (5.6)$$

mit einer Unsicherheit von

$$s_b = 0,0009 \frac{\text{A}}{\text{V}}, \quad (5.7)$$

sodass die Steigung insgesamt

$$b = (0,0143 \pm 0,0009) \frac{\text{A}}{\text{V}} \quad (5.8)$$

beträgt. Der Achsenabschnitt hat den Wert

$$a = (0,0209 \pm 0,0011) \text{A}. \quad (5.9)$$

Aus der Steigung lässt sich der Widerstand mit $R = 1/b$ bestimmen. Dieser ergibt sich zu

$$R = 70,01 \Omega. \quad (5.10)$$

Den Fehler darauf kann man über

$$s_R = s_{1/b} = \frac{s_b}{b^2} = 4,32 \Omega \quad (5.11)$$

berechnen, was zu einem insgesamt berechneten Widerstand von

$$R = (70,01 \pm 4,32) \Omega \quad (5.12)$$

führt.

Zusätzlich wird noch der Wert ermittelt, den man bei einer angelegten Spannung von $U = 2\text{V}$ durch Berechnung über $R = U/I$ erhält, wobei hier der Achsenabschnitt berücksichtigt werden muss. Der lineare Zusammenhang, den man bei der Glühlampe für größere Spannungen erhält, ist jedoch keine Ursprungsgerade, sodass der durch die lineare Regression berechnete Achsenabschnitt vom gemessenen Wert des Stroms subtrahiert werden muss. Da bei der Versuchsdurchführung nicht bis zu einer Spannung von 2V gemessen werden konnte, wurde der höchste erreichte Wert genommen. Dies führt zu einem Ergebnis von

$$R = \frac{U}{I - a} = \frac{1,798\text{V}}{0,0251\text{A}} = 71,58 \Omega. \quad (5.13)$$

Der Fehler lässt sich über Fehlerfortpflanzung berechnen:

$$s_R = \sqrt{\left(\frac{s_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{s_I^2 + s_a^2}}{I - a}\right)^2} = 0,27\Omega, \quad (5.14)$$

wobei a der in 5.9 berechnete Achsenabschnitt und s_a der dazugehörige Fehler ist. Die Fehler auf Strom und Spannung setzen sich hier aus den Fehlern der Messgeräte und den Ablesefehlern zusammen, die sich über

$$s_U = \sqrt{\left(\frac{0,5 \cdot U/100 + 1 \text{ digit}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (0,5 \text{ digits})^2} \quad (5.15)$$

und

$$s_I = \sqrt{\left(\frac{1,5 \cdot 0,3}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,3}{30} \cdot 0,5\right)^2} \quad (5.16)$$

berechnen lassen.

Die auf das Gerät angegebene Unsicherheit der Spannung ist dabei $\pm(0,5\%$ vom Messwert + 1 digit) und die des Strommessgeräts ist 1,5% des Skalenendwerts, der hier 0,3 war.

Somit erhält man einen absoluten Widerstand von

$$R = (71,58 \pm 0,27)\Omega. \quad (5.17)$$

5.1.3 Diode

Für die Betrachtung der Dioden wird der Strom als Funktion der Spannung aufgetragen. Dies geschieht einmal linear und einmal halblogarithmisch. In Abbildung 6 ist dabei die lineare Abbildung zu sehen und in Abbildung 7 die halblogarithmische, wobei die Spannung weiterhin linear und die Stromstärke logarithmisch skaliert ist. In beiden Diagrammen sind die Messbereichswechsel durch gepunktete Linien dargestellt.

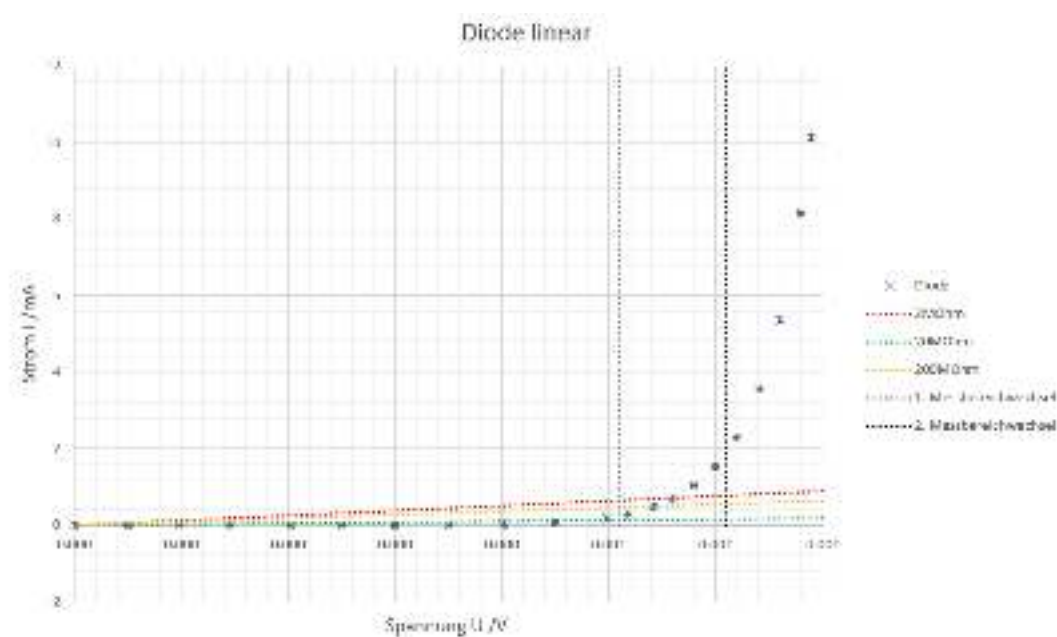


Abbildung 6: Kennlinie der Diode mit linearer Skalierung

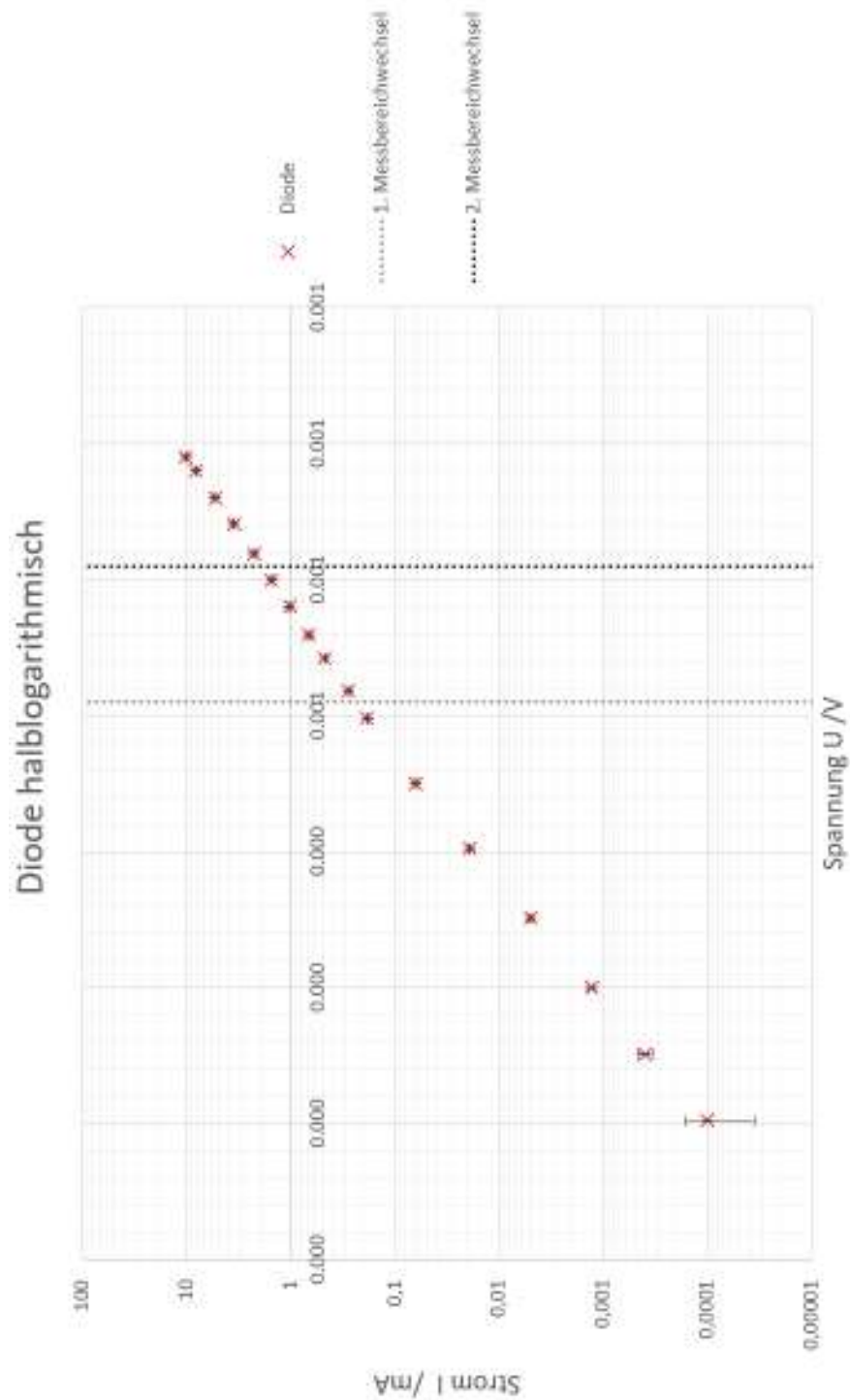


Abbildung 7: Kennlinie der Diode mit halblogarithmischer Skalierung

Da in diesem Versuchsteil bei der Messung der Stromstärke mehrmals der Messbereich geändert wurde, ist es sinnvoll, hier die vollständigen Fehler für die Stromstärke einzuzichnen, also den Gerätefehler mit zu berücksichtigen. Dabei ist für die Geräte die Toleranz gegeben. Um daraus die Standardabweichung zu erhalten, muss dabei durch $\sqrt{3}$ geteilt werden, da davon ausgegangen wird, dass die Abweichung normalverteilt ist.

Das Messgerät für die Strommessung hat einen Fehler von 1,0% vom Messwert ± 1 digit, zu

dem noch ein Ablesefehler von 0,5 digits kommt. Der Gesamtfehler ergibt sich somit zu

$$s_I = \sqrt{\left(\frac{I/100}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1 \text{ digit}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (0,5 \text{ digits})^2}, \quad (5.18)$$

wobei beachtet werden muss, dass die Fehler, die digits beinhalten, für die unterschiedlichen Messbereiche unterschiedlich ausfallen. Die verwendeten Messbereiche sind dabei 200A, 20mA und 20mA.

Der Fehler auf die Spannung bleibt der Ablesefehler, da hier der Messbereich nicht geändert wurde

In dieser Schaltung befand sich die Diode in Durchlassrichtung, sodass ein Strom geflossen ist, sobald die angelegte Spannung groß genug war, dass das elektrische Feld der Sperrschicht überwunden werden kann. Dies lässt sich in Abbildung 6 daran erkennen, dass es für kleinere Spannungen noch keinen Strom gab, erst als die angelegte Spannung groß genug war, konnte ein Strom gemessen werden, der dann exponentiell ansteigt.

Bei der halblogarithmischen Skalierung sieht man dann den exponentiellen Zusammenhang der angelegten Spannung und des resultierenden Stroms.

Wird die Diode dagegen in Sperrichtung betrieben, fließt kein Strom. Selbst bei einer hohen angelegten Spannung von $U = 3,04\text{V}$ ist lediglich eine Stromstärke von $I = 0,2\text{A}$ messbar.

Wahl der Schaltung

Des Weiteren musste überlegt werden, ob das Amperemeter vor die Parallelschaltung von Voltmeter und Diode geschaltet wird oder in die Parallelschaltung direkt vor die Diode gebaut wird, sodass das Voltmeter parallel zu beidem ist. Bei relativ hohen Strömen wird dabei eher ersteres verwendet, wohingegen man bei geringeren Strömen eher letzteres benutzt, da man sonst eventuell lediglich den Strom durch das Voltmeter misst. Bei letzterem ist der Nachteil jedoch, dass dabei meist die Spannung falsch gemessen wird, da der Spannungsabfall an den Strommessgeräten in vergleichbaren Größenordnungen wie der Spannungsabfall an der Diode ist.

Letztendlich wurde hier die Schaltung verwendet, bei der das Amperemeter vor der Parallelschaltung steht, da der Innenwiderstand des verwendeten Spannungsmessgeräts relativ hoch ist. Zusätzlich wurde zum Schutz der Diode für die Messung in Durchlassrichtung ein Widerstand in Reihe vor das Amperemeter geschaltet.

Direkte Messung des Widerstands

Bei der direkten Messung des Widerstands der Diode mit dem Multimeter wurden verschiedene Messbereiche verwendet. Dabei konnten bei den Messbereichen unter $2\text{M}\Omega$ keine Werte gemessen werden. Die Werte für die höheren Messbereiche von $2\text{M}\Omega$ bis $200\text{M}\Omega$ unterscheiden sich deutlich voneinander. Dies liegt unter anderem daran, dass das Multimeter für die verschiedenen Messbereiche einen anderen Innenwiderstand hat und somit der gemessene Spannungsabfall an der Diode unterschiedliche Werte hat. Da bei der Diode erst eine gewisse Spannung erreicht werden muss, damit ein messbarer Strom fließt, wird hier bei den niedrigen Messbereichen daher nichts angezeigt. Bei den höheren Messbereichen reicht die angelegte Spannung dann aus, um einen Strom zu erhalten.

Die gemessenen Widerstände entsprechen dabei dem Kehrwert der Steigung, daher kann für jeden der gemessenen Widerstände eine Ursprungsgerade eingezeichnet werden, und durch den Schnittpunkt mit der eingezeichneten Kennlinie dieser zugeordnet werden. Dies ist in Abbil-

dung 7 dargestellt.

Wichtig ist dabei, dass es sich bei der Glühlampe und der Diode um nicht-ohmsche Widerstände handelt, bei denen der Widerstand abhängig vom Strom ist. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung ist hierbei nicht linear. Da der Widerstand zunimmt, ist es nicht möglich, einfach einen Wert zu messen und ihn als den repräsentativen Widerstand zu bezeichnen, da der Wert des Widerstands nicht konstant ist.

Bedeutung der Fehlerquellen

Die Fehler der Messgeräte sind die angegebenen Eichtoleranzen. Diese stellen einen systematischen Fehler da, der bei der qualitativen Diskussion der des Zusammenhangs der Messwerte vernachlässigt werden kann, da der systematische Fehler sich auf alle Messergebnisse gleichermaßen auswirkt und nichts am Zusammenhang dieser ändert. Lediglich bei der Berechnung von Werten ist er relevant und muss berücksichtigt werden. Der auf die Geräte abgeschätzte Ablesfehler stellt dagegen einen statistischen Fehler dar, der berücksichtigt werden muss, da er eine Schwankung der einzelnen Messwerte wiedergibt und für den Zusammenhang dieser relevant ist.

5.2 Teil B

1.

Die Kennlinien des Transistors sind im Anhang auf Abbildung 8 zu sehen. Alle dafür verwendeten Werte sind im Laborbuch im Anhang enthalten. Bei diesem Diagramm wird die Eichtoleranz des Voltmeters, wie in der Anleitung vorgegeben, vernachlässigt. Der relevante Ablesfehler für die Spannungen beträgt 0,005 V. Der Spannungsfehler ist dabei aufgrund der sehr kleinen Unsicherheiten im Diagramm kaum zu erkennen. Der Fehler auf I_B berechnet man über den Ablesfehler $s_{I_{B_{ablese}}} = 0,001\text{mA}$ und den Fehler des Geräts $s_{Gerät} = 0,0025\text{mA}$. Über Fehlerfortpflanzung ergibt sich für den exemplarisch eingetragenen Fehlerbalken die Unsicherheit

$$s_{I_B} = \sqrt{s_{I_{B_{ablese}}}^2 + s_{Gerät}^2} = 0,003\text{mA}. \quad (5.19)$$

Im ersten Quadranten der des Diagramms sind die festen Basisströme, welche bei den drei Messreihen verwendet wurden, 0,015mA, 0,04mA und 0,07mA. Bei allen Messungen zum Transistor waren keine Messbereichswechsel nötig. Für die Spannungsmessungen wurde dabei immer mit dem Messbereich bis 20 V gemessen.

2.

Die Eingangskennlinie gibt die Abhängigkeit des Stromes I_B vom Emitter in die Basis von der angelegten Spannung U_{BE} an. Dabei muss erst eine gewisse Spannung erreicht werden, damit die Sperrschicht überwunden werden kann und ein Strom fließt. Der Verlauf des Diagramms entspricht demnach dem Verlauf bei einer Diode in Durchlassrichtung.

Die Steuerkennlinie zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C vom Basisstrom I_B an. Der Kollektorstrom ist dabei in der Regel um ein Vielfaches größer als der Basisstrom. Es gilt der Zusammenhang $I_C = B \cdot I_B$, wobei B die Stromverstärkung des Transistors bezeichnet. Bei kleinen Änderungen der Ströme gilt $\delta I_C = \beta \cdot \delta I_B$. Dabei ist β die Kleinsignalstromverstärkung mit $\beta = \delta I_C / \delta I_B$. Der lineare Zusammenhang gilt nur im normalen Verstärkungsbereich des Transistors (in welchem man sich in diesem Versuch immer bewegt). Denn es fließt kein Kollektorstrom mehr, wenn die Kollektorspannung im Verhältnis zur Basis-Emitter-Spannung zu klein ist. Außerdem muss die Basis-Emitter-Spannung für die Funktion des Transistors einen gewissen Wert aufweisen, damit überhaupt ein Strom fließt. Demnach darf die Kollektorspannung nie klein und in keinem Fall kleiner als die Basis-Emitter-Spannung sein.

Die Ausgangskennlinie zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstroms I_C von der angelegten äußeren Spannung U_{CE} . Der maximal erreichbare Kollektorstrom ist dabei vom Basisstrom abhängig. Denn egal wie groß die Kollektorspannung angelegt wird, es entscheidet die Beschleunigung der Ladungsträger durch den Basisstrom, wie groß der Kollektorstrom maximal werden kann. Der starke Anstieg am Anfang der Ausgangskennlinien ist dadurch zu erklären, dass sich die Kollektorspannung im Vergleich zur Basis-Emitter-Spannung vergrößert und dadurch ein immer größerer Kollektorstrom fließen kann.

3.

Wie aus der Abbildung 8 im Anhang entnommen werden kann ergibt sich bei einem mittleren Basisstrom für den Eingangswiderstand r_{BE} folgender Wert:

$$r_{BE} = 13,3 \frac{\text{V}}{\text{mA}} \quad (5.20)$$

Für β ergibt über die Steigung im zweiten Quadranten der Abbildung 8 im Anhang bei mittlerem Basisstrom etwa

$$\beta = 150 \quad (5.21)$$

Beide Werte wurden über ein Steigungsdreieck bei Werten mit mittlerem Basisstrom bestimmt. Eine grafische Bestimmung der Fehler ist dabei nicht sinnvoll, da die Fehlerbalken nur sehr klein sind und kaum Platz für eine solche Bestimmung vorhanden ist. Eine analytische Bestimmung der Fehler wäre bei einer grafischen Bestimmung des Wertes ebenfalls nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden der Eingangswiderstand und die Kleinsignalverstärkung hier ohne Unsicherheiten angegeben.

6 Zusammenfassung und Diskussion

6.1 Teil A

Widerstand

Die Kennlinie des einfachen Widerstands ist eine Gerade. Dieser lineare Zusammenhang des Stroms und der Spannung kommt daher, da es sich beim verwendeten Widerstand um einen ohmschen Widerstand handelt, dessen Widerstand nicht von der Stromstärke abhängt.

Glühlampe

Der Zusammenhang zwischen Spannung und Strom ist bei der Glühlampe zunächst nicht linear. Erst bei höheren Stromstärken nähert sich der Verlauf einer Geraden. Der absolute Wert des Widerstands bei einer Spannung nahe an 2V ist

$$R = (70,01 \pm 4,32)\Omega \quad (6.1)$$

Der durch die Steigung des hinteren, fast linearen Teils der Kennlinie berechnete Widerstand hat den Wert

$$R = (71,58 \pm 0,27)\Omega \quad (6.2)$$

wobei hier der Achsenabschnitt der Geraden berücksichtigt wurde. Die beiden Werte stimmen innerhalb einer 1σ -Umgebung überein.

Diode

Bei der Betrachtung der Diode in Durchlassrichtung erkennt man, dass erst eine gewisse Spannung erreicht werden muss, um einen Strom zu erhalten. Diese muss groß genug sein, dass die Ladungsträger die Sperrschicht zwischen den beiden Schichten der Diode überwinden können, sodass ein Strom beobachtet werden kann.

Trägt man Strom und Spannung halblogarithmisch auf, wird deren exponentieller Zusammenhang ersichtlich.

Baut man die Diode dagegen in Sperrichtung ein, kann kein Strom gemessen werden, unabhängig davon, wie groß die angelegte Spannung ist.

Wahl der Schaltung

Die Wahl der Schaltung war dabei relevant, da bei einer ungünstigen Position des Amperemeters innerhalb der Parallelschaltung des Voltmeters und der Diode lediglich der durch das Voltmeter fließende Strom gemessen werden würde und nicht der, der den Weg über die Diode nimmt. Deshalb und aufgrund des hohen Innenwiderstand des Spannungsmessgeräts wurde eine Schaltung gewählt, bei der das Amperemeter vor die Parallelschaltung des Voltmeters und des Widerstands geschaltet wurde.

Direkte Messung des Widerstands

Bei der direkten Messung des Widerstands fallen die unterschiedlichen Ergebnisse für eine unterschiedliche Wahl der Messbereiche am Messgerät auf. Dies liegt an den unterschiedlichen Spannungen, die vom Messgerät angelegt werden, um über den resultierenden Strom den Widerstand zu messen. Bei zu kleinen Messbereichen mit einer zu kleinen Spannung kann daher kein Strom gemessen werden, da der Widerstand nicht ausreicht, damit die Ladungsträger die Sperrschicht der Diode überqueren und ein Strom gemessen werden kann. Daher war eine Widerstandsmessung für diese Bereiche nicht möglich.

Bedeutung der Fehlerquellen

Für die qualitative Interpretation des Zusammenhangs von Spannung und Strom kann der systematische Fehler der Messgeräte vernachlässigt werden, da sich dieser nicht auf den Zusammenhang auswirkt. Nur der statistische Ablesefehler von den Messgeräten ist dafür relevant. Lediglich bei der Berechnung von Messwerten müssen sowohl der systematische Fehler der Messgeräte wie auch der statistische Ablesefehler berücksichtigt werden.

6.2 Teil B

Für den Eingangswiderstand wurde für einen mittleren Basisstrom der Wert

$$r_{BE} = 12,9 \frac{\text{V}}{\text{mA}} \quad (6.3)$$

erhalten. Dieser steigt qualitativ bei einem geringeren Strom stark an und sinkt bei einem höheren Strom mit immer geringerer Steigung ab.

Für die Kleinsignalverstärkung ergab sich bei mittlerem Strom und mittlerer Kollektorspannung (etwa 1 V)

$$\beta = 150 \quad (6.4)$$

Bei einem festen mittleren Basisstrom hängt der Kollektorstrom I_C bei geringen Werten stark von der Kollektorspannung ab. Er steigt dabei stark an. Bei größeren Spannungen (ab etwa 0,5 V) steigt der Kollektorstrom trotz starker Erhöhung der Spannung nur noch schwach an

und scheint sich einem maximalen Grenzwert anzunähern.

Aufgrund der Ablese- und Zeichenungenauigkeit ist anzunehmen, dass die Werte für β und r_{BE} mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Zusätzlich war es überaus schwer und ungenau den Zusammenhang zwischen der Basis-Emitter-Spannung und demm Basisstrom grafisch bestimmen, weshalb dieser Wert weniger konstistent ist, als der für die Kleinwinkelverstärkung.

7 Literatur

- [1] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Teil A, Versuchs 45, S.79-83.*

8 Anhang

8.1 Lineare Regression

Der Ansatz der linearen Regression ist die Geradengleichung

$$y(x) = a + bx, \quad (8.1)$$

wobei es sich bei b um die Steigung und bei a um den Achsenabschnitt handelt. Die Steigung wird über die Formel

$$b = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.2)$$

berechnet. $\bar{x}$ bezeichnet dabei den arithmetischen Mittelwert der x-Werte, der über

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.3)$$

ermittelt werden kann, und x_i bzw. y_i die einzelnen x bzw. y-Werte. Der Achsenabschnitt kann über die Gleichung

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (8.4)$$

bestimmt werden.

Des Weiteren wird noch die Standardabweichung der Einzelwerte benötigt, die sich über folgenden Zusammenhang herausfinden lassen:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i (y_i - a - bx_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i v_i^2}, \quad (8.5)$$

wobei die Varianz mit

$$v_i := y_i - a - bx_i \quad (8.6)$$

berechnet werden kann.

Die Unsicherheit der Steigung beträgt dabei

$$s_b = s \sqrt{\frac{1}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (8.7)$$

und die des Achsenabschnitts

$$s_a = s \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (8.8)$$

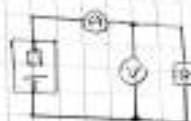
Versuch 45

G1A

Ohmscher Widerstand (Widerstand: $R = 100 \Omega$)

U/V	I/mA	U/V	I/mA
0,00	0,5	1,20	6,3
0,10	1,0	1,40	7,1
0,20	1,5	1,60	8,1
0,30	2,0	1,80	9,0
0,40	2,4	2,00	10,0
0,50	3,0		
0,60	3,4		
0,70	3,9		
0,80	4,4		
0,90	4,8		
1,00	5,3		

Fehler

Strom: $\pm 1,5\%$ vom SkalendruckSpannung: $\pm 0,5\%$ vom SkalendruckInnenwiderstand: (Strom analog) $R = 20 \Omega$
(Spannung digital) $R = 10 \Omega$ Einstellung Amperemeter: max 0,66
Voltmeter: (Skala bis 30)
(Einstellung 20)

Messgröße:

Strom: Multimeter II (analog)

Spannung: Pertron UT 51 (digital)

Ablesefehler analoges Strommess-
gerät: $\pm 0,5 \text{ A}$ (muss nicht in
Messbereich angepasst werden)

Glühlampe (Schaltung analog)

U/V	I/mA	U/V	I/mA
0,000	0,4	0,504	2,7
0,080	1,1	0,600	3
0,102	1,7	0,699	3,1
0,154	2,1	0,799	3,2
0,204	2,1	0,903	3,4
0,2501	2,4	1,000	3,6
0,297	2,5	1,202	3,8
0,3849	2,5	1,405	4,1
0,400	2,6	1,604	4,4

Einstellung Messgröße

Amperemeter Multimeter II max 0,66
SS 30

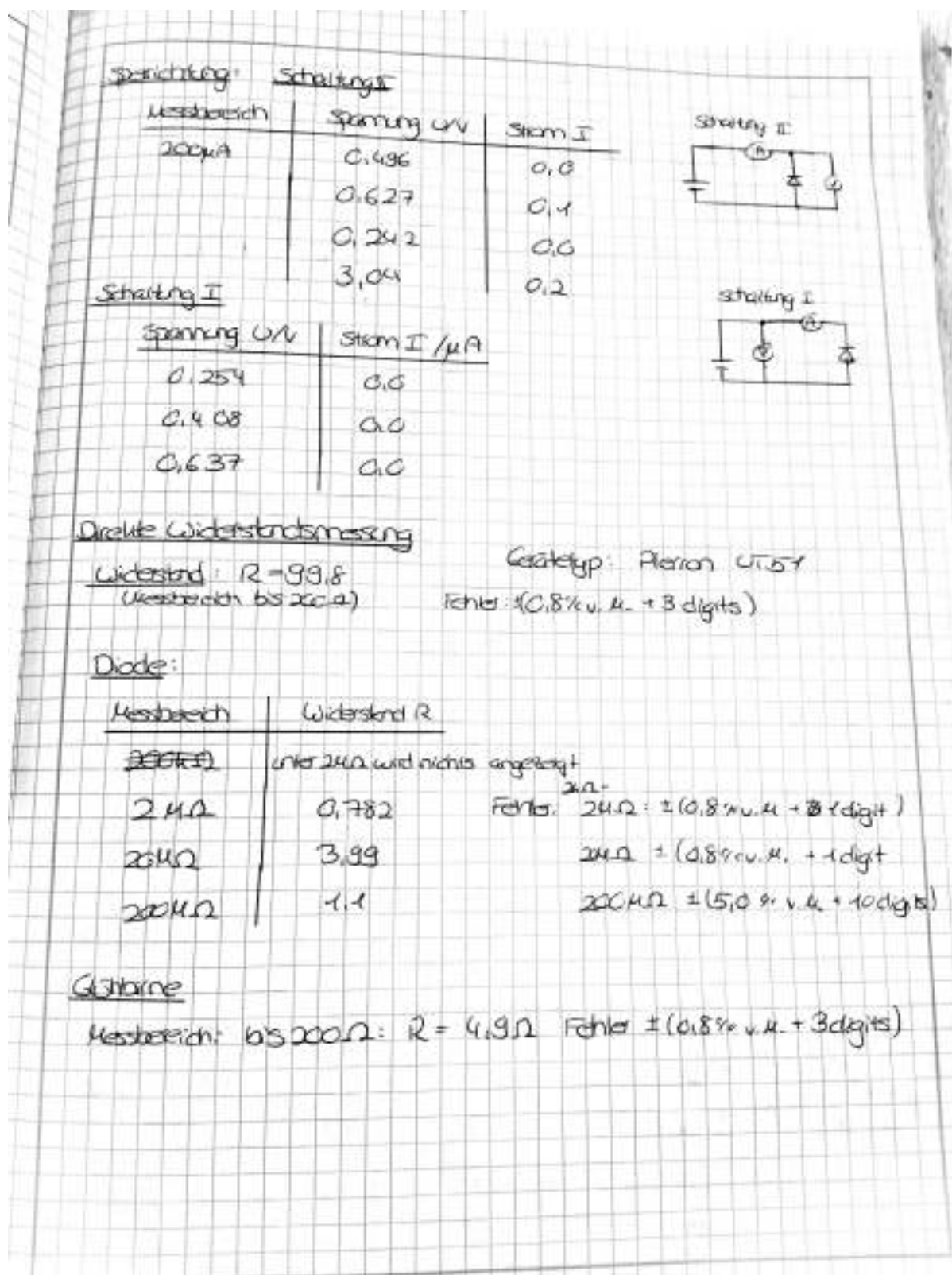
Voltmeter: Einstellung 2

Innenwiderstand Multimeter II: $R = 4 \Omega$
(Strom)Ablesefehler Spannung: $\pm 0,5 \text{ dig}$

U/V	I/mA
1,795	4,6

- danach keine genauere
Messung mehr möglich

Hauptkategorie			Fehler	
in Anschlussrichtung:			Stem: KT-2240	
Messbereich Strom	Spannung U/V	Stem I	1,0 % vom Messw. ± 1 deg.	
200 μ A	0,00	0,0	Spannung: Pieren von vorne	
	0,05	0,0		
	0,099	0,0		
	0,446	0,0		
	0,202	0,1	* Ablesfehler Spannungs- meßgerät: $\pm 0,001$ V	
	0,251	0,4		
	0,300	1,3	Ablesfehler Strom: 1. Teil $\pm 0,001$ mA 2. Teil $\pm 0,001$ mA 3. Teil $\pm 0,01$ mA	
	0,351	5,0		
	0,402	19,2		
	0,450	63,4		
	0,498	185,0		
2 mA	0,520-18	128,4 0,282		
	0,542	0,474		
	0,559	0,673		
	0,580	1,031		
	0,600	1,531		
20 mA	0,620-19	2,28		
	0,641	3,56		
	0,660	5,36		
	0,680	8,14		
	0,690	10,13		



Teil B

Messung des Basisstroms mit Drehspulinstrument
Messung der Spannung mit Piezoelement

Eingangskennlinie $U_{CE} = 1V$

Raus

Einstellung Spannung I_{max}

U_{BE}/V	$I_B/\mu A$
0,0	0
0,10	0
0,21	0
0,30	0
0,40	0
0,50	0
0,60	0
0,70	11
0,80	12
0,75	25
0,85	40
0	0

U_{BE}/V	$I_B/\mu A$
0,60	0
0,68	11
0,70	25
0,73	63
0,74	84
0,74	100
0,74	87
0,74	96
0,73	71
0,72	56

Stromkennlinie

$I_B/\mu A$	$I_C/DCmA$
0	0,00
1	0,11
4	0,47
8	1,19
15	2,12
21	2,98
27	3,84

$I_B/\mu A$	$I_C/\mu A$
34	4,74
40	5,57
44	6,22
51	7,12
59	8,22
65	9,15
69	9,65

$I_B/\mu A$	$I_C/\mu A$
76	10,5
85	11,8
97	13,40
93	12,80

Abgangskennlinienmit $I_{B0} = 16 \mu A = I_B$

U_{CE} / V	I_{CE} / mA
0,01	0,00
0,10	1,50
0,05	0,54
0,15	2,09
0,20	2,22
0,25	2,25

Messung wiederholen $I_B = 34 \mu A$

U_{CE} / V	I_{CE} / mA
0,01	0,02
0,05	0,80
0,10	2,06
0,15	4,08
0,20	4,54
0,25	4,63
0,30	4,66
0,40	4,68
0,50	4,70
0,60	4,72
1,00	4,79
1,50	4,88
2,00	4,98
2,50	5,07
3,00	5,12

 $I_B = 16 \mu A$

U_{CE} / V	I_{CE} / mA
0,01	0,01
0,05	0,00
0,10	1,44
0,15	2,00
0,20	2,25
0,25	2,28
0,30	2,29
0,40	2,29
0,50	2,30
0,60	2,31
1,00	2,33
1,50	2,37
2,00	2,41
2,50	2,44
3,00	2,49

$I_B = 5 \mu A$		$I_B = 15 \mu A$	
U_{CE}/V	$I_C/20 \mu A$	U_{CE}/V	$I_C/20 \mu A$
0,05	0,03	0,05	0,21
0,08	1,08	0,10	1,06
0,05	4,52	0,15	1,83
0,10	6,77	0,20	2,06
0,18	7,69	0,30	2,09
0,20	7,86	0,50	2,17
0,25		0,75	2,18
		1,00	2,20
		2,00	2,26
		3,00	2,32

$I_B = 40 \mu A$		$I_B = 70 \mu A$	
U_{CE}/V	$I_C/20 \mu A$	U_{CE}/V	$I_C/20 \mu A$
0,001	0,01	0,001	0,02
0,05	0,76	0,05	1,00
0,10	2,95	0,10	4,18
0,15	4,87	0,15	6,95
0,20	5,30	0,20	7,94
0,30	5,54	0,30	8,17
0,50	5,60	0,50	8,27
0,75	5,67	0,75	8,33
1,00	5,74	1,00	8,39
2,00	6,00 5,80	2,00	8,59
3,00	6,25 5,97		

Ablesefehler
Strommessgerät II
 $\pm 0,1 \mu A$

Fehler Messgerät I
 $\pm 2,5 \mu A$

Ablesefehler
Spannungsmessgerät
 $\pm 0,001 V$
05

