

---

# GP1 Versuch 5: Strom- und Spannungsmessung

---

Lehrkräfte des Instituts für Experimentalphysik,  
Universität Innsbruck

Version: 2021 - 09.1 (iOLab)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Aufgabe 0: Benötigte Materialien</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Aufgabe 1: Steckplatine</b>	<b>4</b>
4.1	Verbindungsmuster . . . . .	4
4.2	Leitungen über die Steckplatine . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Aufgabe 2: Kalibrierung der Spannungsquellen</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Aufgabe 3: Überprüfung des Ohmschen Gesetz</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Aufgabe 4: Widerstandsnetzwerk mit einer Spannungsquelle</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>Aufgabe 5: Widerstandsnetzwerk mit zwei Spannungsquellen</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>Punktevergabe</b>	<b>10</b>
9.1	Aufgabe 2 (2 Punkte) . . . . .	11
9.2	Aufgabe 3 (1,5 Punkte) . . . . .	11
9.3	Aufgabe 4 (3,5 Punkte) . . . . .	12

9.4	Aufgabe 5 (3 Punkte) . . . . .	12
-----	--------------------------------	----

# 1 Einleitung

Grundlegendes Wissen im Bereich der Elektronik ist für eine/n Physiker/in essentiell. Praktisch jedes Experiment enthält heutzutage eine Vielzahl komplexer elektrischer Schaltungen. Viele der heutigen elektrischen Geräte sind zu komplex, um sie ohne spezielle Ausbildung vollständig zu verstehen, häufig ist es allerdings notwendig diese Geräte um einfache Schaltungen zu erweitern, die oft auch selbst entworfen werden müssen. Typische Beispiele sind Spannungsversorgungen, Filter zur Beseitigung von Störsignalen oder regelbare Spannungsteiler zur Steuerung von elektronischen Geräten. Zudem ist es extrem hilfreich in der Lage zu sein auch komplexere Schaltungen analysieren zu können, einerseits um deren Funktionsweise nachzuvollziehen andererseits zur Fehlerbeseitigung. Dieser Versuch soll dazu den Grundstein legen, indem wir uns anhand einfacher Schaltungen mit dem Ohmschen Gesetz und den Kirchhoffschen Regeln beschäftigen. Wir beschränken uns hier auf Gleichspannungen. In späteren Versuchen wird dieses Wissen um den Umgang mit zeitlich veränderlichen Strömen und Spannungen erweitert. Die Ziele dieses Versuchs sind: den Umgang mit Steckplatine einüben, die Überprüfung des Ohmschen Gesetz und der Kirchhoffschen Regeln sowie das Erlernen der Analyse von Schaltkreisen.

**Da in diesem Versuch viele einzelne Messungen durchgeführt werden müssen, wollen wir, dass ihr nur für eine der Aufgaben die aufgezeichneten Messdaten auf das Repositorium ladet.**

Alle Messungen sollen mit den Sensoren des iOLab durchgeführt werden. Um deren Gebrauch zu üben, werden in den Laborräumen allerdings eine Reihe an Multimetern bereit liegen. Diese dürft ihr gerne verwenden, um die Messwerte zu überprüfen. Die Messwerte vom Multimeter sollen allerdings nicht für die Datenauswertung verwendet werden. Ein kurzer Vergleich in der Datenauswertung zwischen den Ergebnissen des iOLab und des Multimeters kann ohne Bewertung aufgeführt werden. Falls die Verwendung der Multimeter unklar sein sollte, könnt ihr euch gerne an die Betreuer wenden. Da vermutlich nicht genug Multimeter für alle da sind, bitten wir euch die Multimeter nach Gebrauch zu desinfizieren und zurück zu legen.

## 2 Theorie

Für die Durchführung dieses Versuchs musst man mit dem Ohmschen Gesetz, den Kirchhoffschen Regeln sowie mit Widerstandsnetzwerken (Parallel- und Reihenschaltung) vertraut sein. Eine mögliche Quelle ist Demtröder [1]. Mache dich zusätzlich Vertraut mit der Funktionsweise von digitalen Spannungs- und Strommessgeräten. Vergleiche ideale mit realen Messgeräten. Worauf müssen wir als Konsequenz daraus achten, wenn wir möglichst genau Ströme und Spannungen messen wollen?

### 3 Aufgabe 0: Benötigte Materialien

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind: eine Steckplatine, Drahtbrücken, drei AAA Batterien im Batteriegehäuse, zwei  $10\text{ k}\Omega$  Widerstände, zwei  $4,7\text{ k}\Omega$  Widerstände und drei  $1\Omega$  Widerstände. Identifiziere diese Widerstände und bestimme deren Toleranz (Unsicherheit). Der Sollwert und deren Toleranz (Unsicherheit) von elektrischen Widerständen ist meistens durch eine Farbkodierung von farbigen Ringen angegeben. Es gibt eine Vielzahl von (Internet-)Quellen für diese Farbcodetabellen, z.B. [https://de.wikipedia.org/wiki/Widerstand\\_\(Bauelement\)#Farbkodierung\\_auf\\_Widerständen](https://de.wikipedia.org/wiki/Widerstand_(Bauelement)#Farbkodierung_auf_Widerständen). Für diese Aufgabe gibt es keine Punkte, allerdings benötigt man die Werte und Toleranzen der Widerstände als Voraussetzung für die volle Punktezahl in den folgenden Aufgaben.

### 4 Aufgabe 1: Steckplatine

Viele der kommenden Versuche erfordern es elektrische Schaltungen aufzubauen. Ein sehr nützliches Hilfsmittel schnell und übersichtlich mehr oder weniger komplizierte Schaltungen aus Kabeln, Widerständen, Kondensatoren, Motoranschlüssen, integrierten Schaltungen (eng. integrated circuit, kurz IC) und viele andere Komponenten zu konzipieren und aufzubauen ist die Steckplatine (eng. Breadboard), mit der wir uns in dieser Aufgabe vertraut machen wollen. Einige der Löcher der Steckplatine sind elektrisch miteinander verbunden und als kleine Aufwärmübung wollen wir das Muster der Verbindungen herausfinden. Als Nächstes ahmen wir eine etwas komplizierte Schaltung nach, bei der die internen Verbindungen des Steckbretts nicht ausreichen, indem wir einen Stromkreis mithilfe mehrerer „Sprünge“ von Drahtbrücken über die Steckplatine aufbauen. Zu guter Letzt ist es essentiell, dass die aufgebauten Schaltungen dokumentiert und nachvollziehbar dargestellt werden. **Achtung:** Aufgabe 1 ist nur zur Übung und soll nicht in der Datenauswertung inkludiert werden, es gibt hier keine Punkte.

#### 4.1 Verbindungsmuster

Zunächst brauchen wir eine Methode zu messen, ob eine elektrische Verbindung zwischen zwei Punkten besteht. Dazu werden wir den Sensoreingang „Analog 7“ (A7) und die  $3,3\text{ V}$  Spannungsquelle des iOLab verwenden. Sobald eine Verbindung zwischen den Beiden besteht, misst der Sensor die anliegenden  $3,3\text{ V}$ . Teste dies, indem du, mit einer der Drahtbrücken (den etwa  $18\text{ cm}$  langen, farbigen Kabel mit Steckern an beiden Enden) die  $3,3\text{ V}$  Spannungsquelle des iOLab mit dessen A7 Sensor verbindest. Beachte, dass, wenn die Verbindung offen ist, der Sensor etwa  $1,5\text{ V}$  anzeigt.<sup>1</sup> Da die Steckplatine viele

---

<sup>1</sup>Hintergrund: Das heißt, dass der Sensoreingang intern so geschaltet ist, dass, wenn nichts von außen angeschlossen wird, das Potential von  $1,5\text{ V}$  anliegt. Es gibt allerdings auch Sensoren, die keinen definierten Wert anzeigen, wenn nichts an deren Eingang angeschlossen wird. Dies ist insbesondere bei binären Eingängen ein großes Problem, also bei Sensoren, die messen sollen, ob ein Stromkreis offen oder geschlossen ist, z.B. über einen Schalter. Um auch bei offenem Schaltkreis einen definierten Wert am Eingang des Sensors zu haben, wird der Sensoreingang über einen sog. **pull-up oder pull-**

Anschlusslöcher hat, würde es unglaublich lange dauern jedes Lochpaar auf der Platine auf eine Verbindung zu überprüfen. Das Verbindungsmuster muss daher auf intelligente Weise mit ausreichend Verbindungstests bestimmt werden. Ziel ist es eine „Karte“ der Verbindungen, mithilfe von Linien in einem Foto einer Steckplatine, zu zeichnen. Weitere Informationen finden sich hier: <https://www.youtube.com/embed/ERCLlfAnSZ4>.

## 4.2 Leitungen über die Steckplatine

Für diese kleine Übung soll der A7 Sensor über 4 in Serie geschaltete Kabel bzw. Drahtbrücken (exklusive der Kabel vom iOLabs zur Steckplatine) in der Steckplatine mit der 3,3 V Spannungsquelle verbunden werden. Man muss in einer Skizze darauf achten, dass die Verbindungen eindeutig zu erkennen sind, selbst wenn die Kabel sich kreuzen würden. Die beste Methode dafür ist es, die individuellen Verbindungen in verschiedenen Farben einzuzeichnen. Weitere Informationen finden sich hier: <https://www.youtube.com/embed/cIYAm4R4IzE>.

## 5 Aufgabe 2: Kalibrierung der Spannungsquellen

Da es sich bei unseren Spannungsquellen um Batterien handelt, ist nicht garantiert, dass sie die angegebene Spannung tatsächlich ausgeben. Daher müssen wir unsere Spannungsquellen kalibrieren. Dazu verwenden wir ebenfalls den analogen Sensor A7. Dieser kann allerdings nur Spannungen zwischen 0 V und 3,3 V messen. Achtung: Da nicht klar ist ob der Sensor auch negative Spannungen verkraftet, nur positive Spannungen anlegen! Da die Spannung unserer Quellen am oder über dem oberen Limit des Messbereichs des Sensors liegt, werden wir die Spannung über einen Spannungsteiler messen. Dazu verbinden wir den negativen und positiven Pol der Spannungsquelle mit zwei in Reihe geschalteten  $10\text{ k}\Omega$  Widerständen, die wir mit  $R_1$  und  $R_2$  bezeichnen, siehe Abbildung 1. Beachte, dass Abbildung 1b nur einen möglichen Aufbau der Schaltung zeigt. Da die beiden Widerstände gleiche Werte haben, misst man entsprechend der Kirchhoffschen Regeln die Hälfte der Spannung der Spannungsquelle.

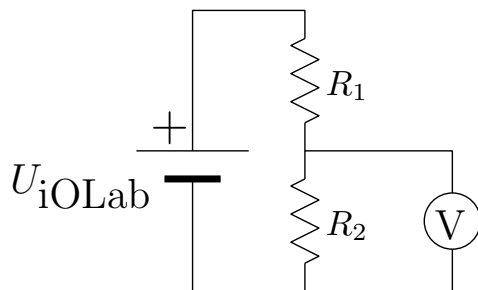
Beachte, dass, wie ihr bereits gelernt habt, eine reale Spannungsquelle als ideale Spannungsquelle mit einem Widerstand in Serie beschrieben werden kann. Im Allgemeinen müsste man diesen Innenwiderstand ebenfalls berücksichtigen, in diesem Versuch werden wir ihn allerdings vernachlässigen.

Beachte, dass, da immer Potentialunterschiede gemessen werden, der Sensor sowie die Spannungsquelle zum gleichen Potential referenziert sein müssen. Im Falle der 3,3 V Spannungsquelle hat diese und der Sensor bereits einen gemeinsamen Bezugspunkt (GND). Im Falle der Batterie muss zusätzlich eine geeignete Verbindung zum Bezugspunkt des Sensors (GND) hergestellt werden.

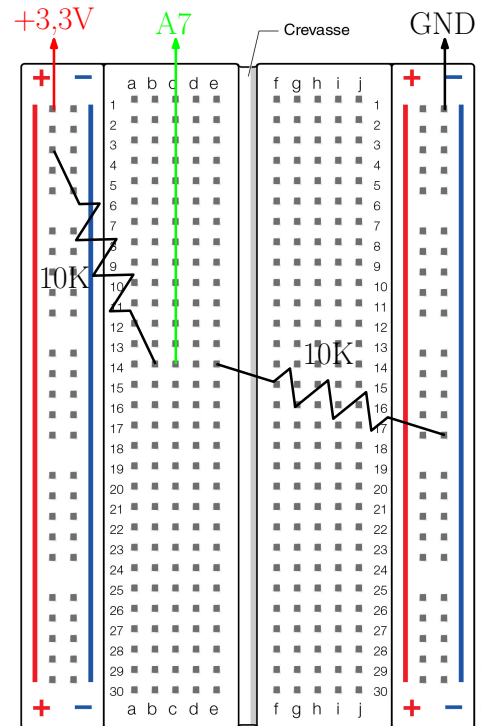
**Bestimme die Ausgangsspannung  $U_{\text{iOLab}}$  der 3,3 V Spannungsquelle des iOL-**

---

down Widerstand auf ein bestimmtes Potential gezogen. Dabei sind die Widerstände so hochohmig, dass deren Einfluss bei geschlossenem Stromkreis vernachlässigt werden kann.



(a) Ersatzschaltbild mit dem Spannungsmessgerät V und den Widerständen  $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$ .



(b) Skizze des Aufbaus.

Abbildung 1: Aufgabe 2: Zur Messung der Spannung der Spannungsquellen wird ein Spannungsteiler verwendet, da die Spannungen zu groß sind, um direkt mit dem Sensor A7 gemessen zu werden.

**abs sowie  $U_{\text{Batterie}}$  der drei AAA Batterien in Reihenschaltung<sup>2</sup>.** Die Angabe der Spannungen benötigt eine aussagekräftige Angabe der Unsicherheit. Berücksichtige insbesondere die Unsicherheit der Widerstände und Schwankungen des Messwerts. Hinweis: um die Unsicherheiten der Widerstände zu berücksichtigen, muss die Fehlerrechnung zunächst auf eine allgemeine Formel für die zu bestimmende Ausgangsspannung mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  angewendet werden. Die Unsicherheit des A7 Sensors ist nicht direkt bekannt, allerdings wissen wir, dass die digitale Auflösung des Sensor A7 (Analog-Digital-Konverter (ADC)) im Messbereich von 0 V bis 3,3 V 12 bit beträgt. Typischerweise beträgt die Unsicherheit eines digitalen Geräts wenige Vielfache der Auflösung. Wirkt sich diese Unsicherheit auf unser Endergebnis aus? Welche Unsicherheit ist hier dominant?

<sup>2</sup>Verwende dafür das im Experimentierset beiliegende Batteriegehäuse, sodass die Batterien in Reihe geschaltet werden.

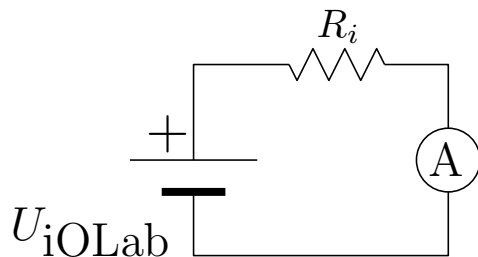
## 6 Aufgabe 3: Überprüfung des Ohmschen Gesetz

Nun wollen wir das Ohmsche Gesetz überprüfen. Dazu legen wir die 3,3 V bzw.  $U_{\text{iOLab}}$  Spannungsquelle an jeweils einen 4,7 k $\Omega$  und 10 k $\Omega$  Widerstand an und messen den Strom, der durch den Widerstand fließt, vgl. Abbildung 2a. Da wir den Strom nicht direkt messen können, müssen wir unseren Aufbau erweitern. Wir schalten zu dem Widerstand einen weiteren niederohmigen Widerstand, hier 1  $\Omega$ , in Reihe, vgl. Abbildung 2b. Obwohl wir es eigentlich überprüfen wollen, nehmen wir hier an, dass das Ohmsche Gesetz stimmt und wissen daher, dass aufgrund des Stroms, der durch den Widerstand fließt, am Widerstand eine dazu proportionale Spannung abfällt, die wir messen können. Um die am niederohmigen Widerstand kleine abfallende Spannung zu messen, verwenden wir nun den hochverstärkenden Sensor  $G_+/G_-$ , in der Software mit High Gain bezeichnet. Dieser Sensor erlaubt es sehr kleine Potentialunterschiede zwischen den Anschlüssen  $G_+$  und  $G_-$  zu messen. Der Messbereich des Sensors ist  $\pm 1$  mV und die Signale an den Anschlüssen dürfen einen maximalen Potentialunterschied von 1 V zur Masse (GND) des iOLabs haben. **Achtung:** Die winzige gemessene Spannung ist stark abhängig von der Temperatur der Stecker der Drahtbrücken, was eine Form der Kontaktspannung darstellt. Versuche es selber: halte während der Messung abwechselnd einen der Stecker der Drahtbrücken, die zum High Gain Sensor gehen, zwischen deinen Fingern und beobachte wie sich die Spannung ändert. Das heißt wir müssen ein paar Minuten warten bevor wir die Messung durchführen. Achte vor der Messung darauf, dass die Spannung nicht mehr driftet. Zudem gibt es einen Offset in der gemessenen Spannung, der entweder durch einen nicht optimal geeichten Sensor oder ebenfalls durch Kontaktspannungen verursacht wird. Um diesen Offset weg zu bekommen, machen wir zwei Messungen, wobei wir die Kabel am Eingang des High Gain Sensors vertauschen und anschließend den Mittelwert der Beträge der zwei Messwerte nehmen.

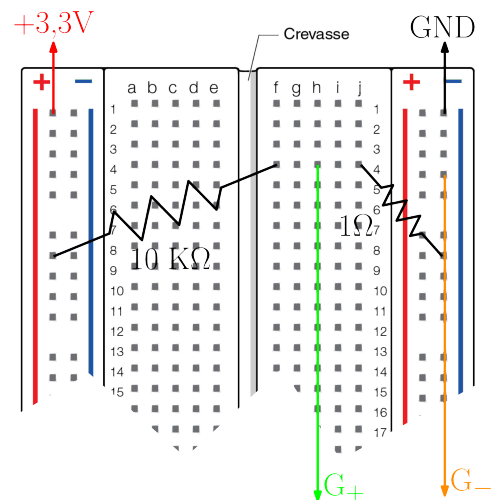
**Bestimme für den 4,7 k $\Omega$  und den 10 k $\Omega$  Widerstand den Strom mit vernünftigen Angaben über dessen Unsicherheit.** Eigentlich ändert der 1  $\Omega$  Widerstand den Gesamtwiderstand des Stromkreis und damit den fließenden Strom. **Argumentiere, warum der Einfluss des Widerstands trotzdem vernachlässigbar ist. Vergleiche den gemessenen Strom mit dem anhand des Ohmschen Gesetz berechneten Strom, um das Ohmsche Gesetz zu überprüfen.**

## 7 Aufgabe 4: Widerstandsnetzwerk mit einer Spannungsquelle

Nachdem wir das Ohmsche Gesetz bestätigt haben, wollen wir uns jetzt den Kirchhoffschen Regeln widmen. Dazu bauen und analysieren wir das in Abbildung 3 dargestellte Widerstandsnetzwerk. Wieder verwenden wir 1  $\Omega$  Widerstände als Shunt-Widerstände zur Messung des Stroms. Die an den Shunt-Widerständen abfallende Spannung wird wieder mit dem Sensor  $G_+/G_-$  gemessen. Achtung: die Signale an den Anschlüssen dürfen einen maximalen Potentialunterschied von etwa 1 V zur Masse (GND) des iOLabs haben



(a) Ersatzschaltbild mit dem „Strommessgerät“ A. der Widerstand beträgt  $R_1 = 4,7\text{ k}\Omega$  bzw.  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ .



(b) Skizze des Aufbaus im Falle des Widerstands  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ .

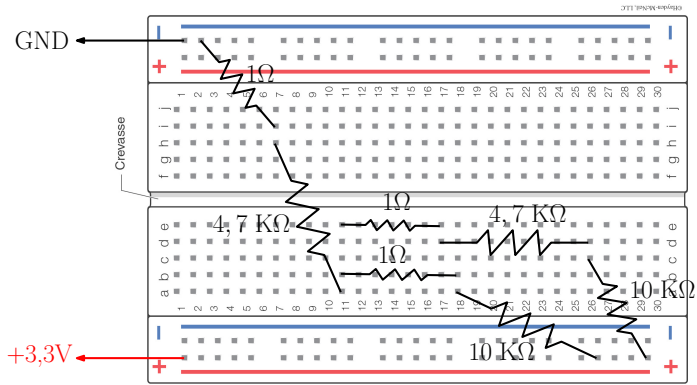
Abbildung 2: Aufgabe 3: Aufbau zur Überprüfung des Ohmschen Gesetz. Zur Messung des Stroms durch den Widerstand  $R_i$  verwenden wir einen sog. Shunt-Widerstand.

(bei einer Messung ist der Potentialunterschied minimal größer als 1 V). Zusätzlich beobachte die gemessene Spannung und wackle ein wenig an den Kabeln und Widerständen. Falls die Schwankungen nicht minimiert werden können, müssen sie berücksichtigt werden. Wie in der vorherigen Aufgabe müssen wir die Kontaktspannungen berücksichtigen und deren Einfluss durch Messungen mit umgekehrter Polarität minimieren.

Zur vollständigen Analyse der Schaltung wollen wir neben den Strömen auch die Spannung, die an den Widerständen abfällt, bestimmen. Dazu verwenden wir wieder den Sensor A7. Dieser ist allerdings zur Masse (GND) des iOLabs referenziert, weshalb wir die Spannung nicht an allen Widerständen direkt messen können. Überlege dir, wie man trotzdem alle Spannungen bestimmen kann.

**Verwende die Kirchhoffschen Regeln und das Ohmsche Gesetz, um die Ströme an den Punkten  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  sowie die Spannungen, die an den vier Widerständen abfallen, zu berechnen und vergleiche sie mit den gemessenen Werten.** Die Berechnung der erwarteten Werte soll **vor** der Versuchsdurchführung durchgeführt werden. Achte darauf, dass sowohl die gemessenen sowie die berechneten Werte sinnvolle Angabe über deren Unsicherheit enthalten. Bestätigt deine Analyse die Kirchhoffschen Regeln?





(b) Skizze des Aufbaus.

## 8 Aufgabe 5: Widerstandsnetzwerk mit zwei Spannungsquellen

Bei der Messung der Stromstärke wollen wir diesmal etwas präziser sein. Die gemessenen Spannungen sind so klein, dass sich winzige Fehler, z.B. thermo-elektrische Effekte, einschleichen und die Messung stören können. Um solche Fehlerquellen möglichst gering zu halten, werden wir dieses mal an den drei Messpunkten je sechs Messungen machen, wobei wir zwischen jeder Messung die  $G_+$  und  $G_-$  Anschlüsse vertauschen. Das Endergebnis erhalten wir aus dem Mittelwert und den Schwankungen der sechs Messungen. **Vergleiche wieder deine Messergebnisse mit den berechneten Erwartungswerten.** Mit dieser Methode erwarten wir, dass die Unsicherheit, als auch

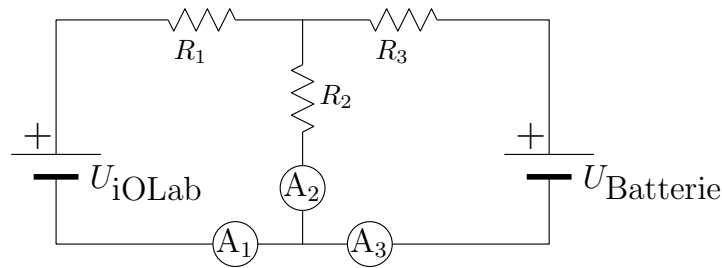


Abbildung 4: Aufgabe 5: Widerstandsnetzwerk mit zwei Spannungsquellen. Die Widerstände betragen  $R_1 = 4,7\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4,7\text{ k}\Omega$  und  $R_3 = 10\text{ k}\Omega$ . Zur Messung des Stroms verwenden wir sog. Shunt-Widerstände.

die Abweichungen zwischen den vorhergesagten und gemessenen Werten, kleiner als 10% sind. Sollten eure Abweichungen bzw. Unsicherheiten größer sein, überprüft zunächst, ob alle Kabel und Widerstände einen guten Kontakt haben. Falls das Problem weiter besteht, diskutiert die Abweichungen mit den Betreuern.

## 9 Punktevergabe

Für diesen Versuch gibt es insgesamt zehn mögliche Punkte, basierend auf die Datenauswertung, der am Ende des Experiments eingereicht wird. Es gibt zwei Punkte für Aufgabe 2, eineinhalb Punkte für Aufgabe 3, dreieinhalb Punkte für Aufgabe 4 und drei Punkte für Aufgabe 5.

Neben den unten angegebenen Anforderung, achte ebenso darauf, dass:

- der volle Bericht eine Beschreibung des Versuchsaufbaus, inklusive Skizze und Ersatzschaltbild enthält. Im Falle der Datenauswertung muss die Information, die bereits im Skript enthalten ist, nicht wiederholt werden.
- immer klar erkenntlich ist, wo bestimmte Werte gemessen wurden. Hierfür eignen sich zum Beispiel zusätzliche Beschriftungen in den Skizzen bzw. Ersatzschaltbildern.
- Symbole eingeführt werden und konsistent verwendet werden.
- Endergebnisse deutlich gekennzeichnet sind.
- für gemessene- und theoretische Werte immer Unsicherheiten angegeben sind. (Meistens sind die theoretischen Werte mithilfe anderer fehlerbehafteter Messwerte berechnet.) Werte und Unsicherheiten müssen sinnvoll gerundet sein!
- Abbildungen aussagekräftige Bildunterschriften haben. Die Beschriftungen von fließenden Tabellen, also Tabellen, die nicht wie unten direkt in den Fließtext integriert sind, stehen über der Tabelle. Beide sollten nummeriert sein und müssen im Text referenziert sein.

- Beschriftungen in Abbildungen (und Grafen) leserlich sind. Sie sollten etwa die gleiche Schriftgröße wie der Fließtext haben.

## 9.1 Aufgabe 2 (2 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- eine Angabe der Ausgangsspannungen der beiden Spannungsquellen mit richtiger Einheit
- eine begründete Angabe der Unsicherheit der Spannungen inklusive vereinfachter Formel
- eine Diskussion des Einflusses der Messungenauigkeit des Sensors

Punkte	Beschreibung
Fehlt (0 Punkte)	Die Aufgabe wurde nicht durchgeführt.
Ausreichend (1 Punkt)	Die Ausgangsspannung der beiden Spannungsquellen sind mit begründeten und richtig gerundeten Unsicherheiten angegeben. Die Diskussion des Einflusses der Messungenauigkeit des Sensors wurde versucht.
Sehr gut (2 Punkte)	Die Fehlerrechnung und Analyse des Einflusses der Messungenauigkeit des Sensors sind nachvollziehbar, sauber dargestellt und korrekt. Die Diskussion der Messungenauigkeit des Sensors enthält sinnvolle Argumente und Ergebnisse.

## 9.2 Aufgabe 3 (1,5 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- eine Angabe der gemessenen Spannung und der daraus berechneten Werte mit richtiger Einheit
- eine Angabe der erwarteten Werte
- alle Größen haben eine begründete Angabe derer Unsicherheiten
- eine Diskussion des Einflusses des Shunt-Widerstands auf das Messergebnis
- ein nachvollziehbarer Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte und Argumentation, ob das Ohmsche Gesetz zutrifft

Punkte	Beschreibung
Fehlt (0 Punkte)	Die Aufgabe wurde nicht durchgeführt.
Gut (1 Punkt)	Die Datenauswertung enthält gemessene und berechnete Ströme durch beide Widerstände mit Unsicherheiten, ein nachvollziehbarer Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte und Argumentation, ob das Ohmsche Gesetz zutrifft. Der Versuchsaufbau und die Berechnungen werden ersichtlich.
Sehr gut (1,5 Punkte)	Die (Fehler-)Rechnungen und Analyse des Einflusses des Shunt-Widerstands sind nachvollziehbar und sauber dargestellt und korrekt.

### 9.3 Aufgabe 4 (3,5 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung aller abfallenden Spannungen
- eine Berechnung der erwarteten Spannungen und Ströme
- eine Angabe der gemessenen Spannung und der daraus berechneten Werte mit richtiger Einheit
- alle Größen haben eine begründete Angabe derer Unsicherheiten
- ein nachvollziehbarer Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte und Argumentation, ob sich die Kirchhoffschen Regeln bestätigen

Punkte	Beschreibung
Fehlt (0 Punkte)	Die Aufgabe wurde nicht durchgeführt.
Ausreichend (1,5 Punkte)	Die Datenauswertung enthält berechnete und gemessene Werte aller Spannungen und Ströme mit Unsicherheiten. Allerdings ist die Versuchsbeschreibung, die Fehlerrechnung und der Vergleich bzw. die Argumentation mangelhaft.
Gut (2,5 Punkte)	Die Berechnung der erwarteten Werte sowie die Fehlerrechnung ist dargestellt. Es gibt einen nachvollziehbaren Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte und eine Argumentation, ob die Kirchhoffschen Regeln zutreffen.
Sehr gut (3,5 Punkte)	Die Herleitungen der Formeln aus der Theorie sind nachvollziehbar erläutert. Der Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte erfolgt in einer übersichtlichen Tabelle.

### 9.4 Aufgabe 5 (3 Punkte)

Diese Aufgabe erfordert:

- die Berechnung der erwarteten Stromstärken sowie Richtung

- eine Angabe der gemessenen Spannung und der daraus berechneten Werte mit richtiger Einheit
- alle Größen haben eine begründete Angabe derer Unsicherheiten
- ein nachvollziehbarer Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte

Punkte	Beschreibung
Fehlt (0 Punkte)	Die Aufgabe wurde nicht durchgeführt.
Ausreichend (1,5 Punkte)	Die Datenauswertung enthält erwartete und gemessene Stromstärke und Richtung. Die Stromstärke besitzt sinnvolle Unsicherheiten.
Sehr gut (3 Punkte)	Die Herleitungen der Formeln aus der Theorie sowie die Berechnung der Stromrichtung sind nachvollziehbar erläutert. Der Vergleich der theoretischen und gemessenen Werte ist sauber und nachvollziehbar und enthält eine übersichtliche Tabelle. Die Unsicherheiten und Abweichungen sind sauber diskutiert.

## Literatur

- [1] W. Demtröder. *Experimentalphysik 1*. Springer, Berlin, Heidelberg, 5. Auflage, 2008.