

Graphische Auswertung von elektrischen Widerständen

Messung der elektrischen Kennlinie mit dem Oszilloskop

1 Vorbemerkungen

In der Schule werden oftmals Messreihen zum Ohmschen Gesetz durchgeführt, woraufhin aus einzelnen wenigen Messwerten mithilfe einer graphischen Auswertung „*I über U*“ auf die Proportionalität $U \propto I$ mit $U = R \cdot I$ geschlossen wird. Der ohmsche Widerstand wird oftmals als abstrakte Konstante eingeführt: $R := \frac{U}{I}$.

Um den Sachverhalt für die Schüler *greifbarer* zu machen und der fachlichen Korrektheit Genüge zu tragen – denn nicht jeder Widerstand verhält sich gemäß des Ohmschen Gesetzes – soll diese Auswertung mithilfe eines Oszilloskops stattfinden; es soll die elektrische Kennlinie des Widerstands gemessen werden.

1.1 Bezug zum Bildungsplan 2016 (Baden-Württemberg)

Der Bildungsplan 2016 des Landes Baden-Württemberg im Fach Physik der Sekundarstufe I sieht vor, dass die Schülerinnen und Schüler auf den Niveaustufen G/M/E der Klasse 10

„(2) den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung untersuchen und erläutern (Widerstand, $R = \frac{U}{I}$)

(3) die Abhängigkeit des Widerstands von Länge, Querschnitt und Material experimentell untersuchen“

können (MINISTERIUM FÜR KULTUS JUGEND UND SPORT BADEN-WÜRTTEMBERG, 2016, S. 25). Weiterhin sieht der Bildungsplan für das E-Niveau der Klasse 10 vor, dass die Schülerinnen und Schüler

Graphische Auswertung von elektrischen Widerständen

Messung der elektrischen Kennlinie mit dem Oszilloskop

*„(3) Kennlinien experimentell aufzeichnen und interpretieren (z.B. Eisen-
draht, Graphit, technischer Widerstand) sowie die Abhängigkeit des Wi-
derstands von Länge, Querschnitt und Material beschreiben“*

können (Ebenda, 2016). In niedrigeren Klassenstufen sieht der Bildungsplan keine Erwähnung des elektrischen Widerstands vor. Es geht folglich direkt aus dem Bildungsplan eine Experimentierfähigkeit und -tätigkeit der Schülerinnen und Schüler hervor. Es werden, bezogen auf den genannten Themenkomplex, folgende prozesshaften Kompetenzen zur Erkenntnisgewinnung gefordert:

„Die Schülerinnen und Schüler können [...]

2. Hypothesen zu physikalischen Fragestellungen aufstellen

*3. Experimente zur Überprüfung von Hypothesen planen (unter ande-
rem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)*

*4. Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls
Messwerte erfassen [...]*

*10. mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formu-
lieren“*

(Ebenda, 2016, S. 8). Demnach wird das Ohmsche Gesetz mindestens durch Schülerversuche bestätigt werden. Der Umgang mit dem Oszilloskop wird für die Mehrheit der Schulklassen zu anspruchsvoll sein, sodass im Regelfall das zu beschreibende Verfahren der Durchführung durch die Lehrkraft obliegt. Ein Aufbau inklusive einer Einrichtung/Einstellung des Oszilloskops durch die Lehrkraft und eine Durchführung im Rahmen eines Schülerversuchs ist ebenfalls in leistungsstarken Schulklassen der Sekundarstufe I denkbar.

1.2 Physikalische Vorüberlegungen

Für die gewünschte Darstellung muss sowohl eine Messung der Spannung als auch des Stromes erfolgen. Oszilloskope messen Potentiale (gegenüber einer Masse/GND) und somit Spannungen. Mehrkanal-Oszilloskope besitzen i.d.R. jedoch nur die Möglichkeit verschiedene Potentiale gegenüber einer gemeinsamen Masse zu messen.

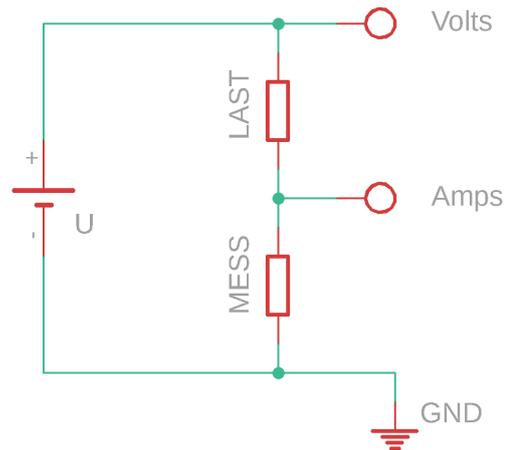


Abbildung 1: Schaltplan.

Die Messung der Stromstärke erfolgt durch eine Messung der abfallenden Spannung $U_{MESS} = \varphi_{AMPS} - \varphi_{GND}$ an einem bekannten ohmschen Messwiderstand $R_{MESS} \ll R_{LAST}$. Es gilt: $I = \frac{U_{MESS}}{R_{MESS}}$. Aufgrund der linearen, direkten Proportionalität $I \propto U_{MESS}$ und der Tatsache, dass halbquantitativ gemessen wird (d.h. keine quantifizierten Messwerte; lediglich eine graphische Auswertung), kann folgende Aussage getroffen werden:

$U_{MESS} = \varphi_{MESS} - \varphi_{GND}$ ist ein Maß des im System herrschenden Stromes I , unter der Voraussetzung, dass der Innenwiderstand des Oszilloskops sehr groß gegenüber R_{LAST} sowie R_{MESS} ist.

Für die am Lastwiderstand R_{LAST} abfallende Spannung $U_{LAST} = \varphi_{Volts} - \varphi_{Amps}$ gilt: $U_{LAST} = U_0 - U_{MESS}$ (Kirchhoffsche Maschenregel; KUCHLING, 2014, S. 423). Aus der notwendigen Approximation zur Messung der am Lastwiderstand R_{LAST} abfallenden Spannung $U_{Last} = \varphi_{Volts} - \varphi_{Amps} \cong \varphi_{Volts} - \varphi_{GND}$ folgt: $U_{LAST} \gg U_{MESS} \Leftrightarrow R_{LAST} \gg R_{MESS}$.

Um eine graphische Auswertung „ I über U “ zu erhalten, muss ein Oszilloskop verwendet werden, welches einen Auftrag zweier Messwerte über X/Y unterstützt. Die Messung des Potentials φ_{Amps} , welches gegenüber der Masse GND ein Maß des im System herrschenden Stromes I entspricht, erfolgt durch einen Auftrag über Y . Die Messung des Potentials φ_{Volts} , welches ein Maß der abfallenden Spannung U_{LAST} darstellt, erfolgt durch Auftrag über X .

2 Versuchsaufbau

Es ist darauf zu achten, dass der Versuchsaufbau möglichst kognitiv effizient gestaltet ist.¹ Die Tatsache, dass in der Schaltung ein ohmscher Widerstand zur Messung der Stromstärke verwendet wird, widerspricht diesem jedoch, da unter anderem die Schaltung dazu verwendet werden soll, den (ohmschen) Widerstand erstmalig zu thematisieren. Diesbezüglich ergeben sich a priori folgende Möglichkeiten des Umgangs:

- i. Denkbar wäre der Einsatz einer *Black-Box* mit eingebautem Messwiderstand und BNC-Buchsen zum direkten Anschluss an das Oszilloskop.
- ii. Eine Verwendung der für die Schülerinnen und Schüler sichtbaren Schaltung und nachträglicher Thematisierung des Einsatzes eines ohmschen Widerstands zur Strommessung. Dies könnte beispielsweise im Rahmen einer Anwendung- bzw. Transferleistung erfolgen.

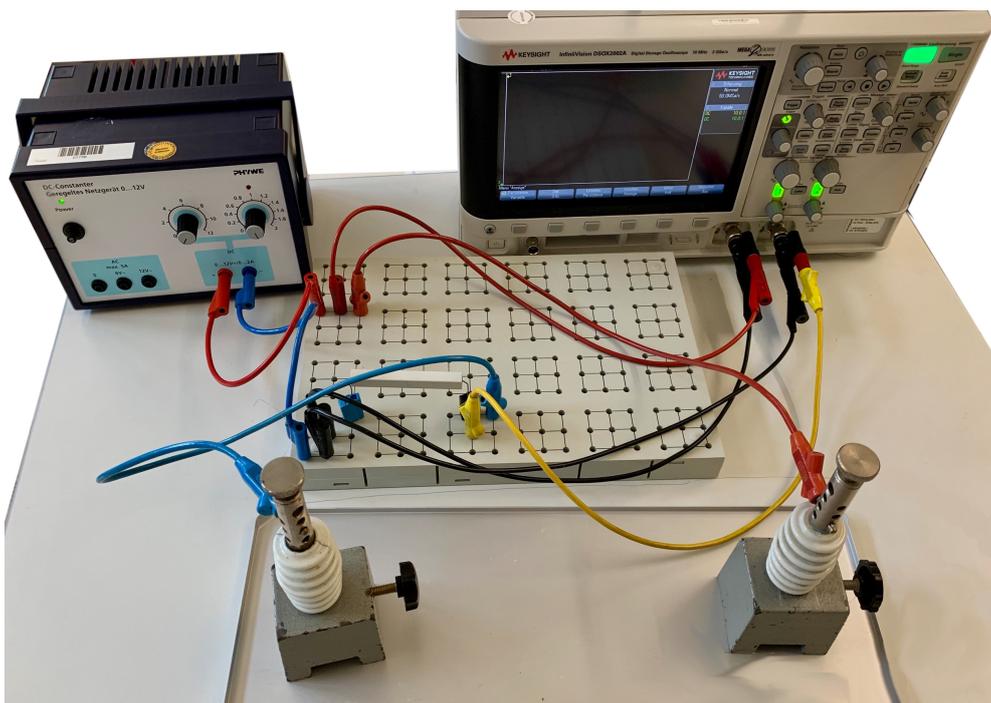


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der elektrischen Kennlinie eines Konstantandrahtes.

Der in *Abbildung 1* dargestellte Schaltplan ist beispielhaft für die Bestimmung der Kennlinie eines Konstantandrahtes in *Abbildung 2* aufgebaut.

¹ Vgl.: Wahrnehmungsgesetze bezüglich Versuchsaufbauten. Z.B.: (KIRCHER, GIRWIDZ & HÄUBLER, 2015, Kapitel 6.5.4)

2.1 Hinweise

2.1.1 Einrichtung und Einstellung des Oszilloskops

Hinweis: Die Beschreibung bezieht sich auf das verwendete Oszilloskop aus der *Keysight InfiniiVision 2000 X* Serie. Die Bedienung anderer Geräte ist abweichend und kann der Bedienungsanleitung entnommen werden.

Zunächst muss der Modus zur Darstellung des X/Y -Graphen eingestellt werden: Im Feld **Horizontal** mit der Taste **Horiz** wird der Modus **Zeitmodus XY** eingestellt. Die Einstellung der Nachleuchtdauer des Pfades (*Persistence*) kann im Feld **Messen** unter **Signal** mit der Taste **Display** vorgenommen werden: Der Pfad kann wahlweise nach kurzer ausgeblendet werden oder dauerhaft dargestellt werden – hiermit sind Vergleiche zwischen verschiedenen Lasten möglich. Der angezeigte Pfad kann manuell gelöscht werden: **Löschen Persistence**. Der Ursprung wird unten links platziert, da bei der Messung nur Gleichströme auftreten und dementsprechend nur der erste Quadrant benötigt wird. Es empfiehlt sich zunächst, eine große Abtastbreite der zu messenden Potentiale/Spannungen zu wählen und diese dann unter Versuchsbedingungen zu optimieren. Der Auftrag auf der Y -Achse sollte nicht größer sein als die maximale Spannung $U_{MESS,MAX}$ am Messwiderstand von $U_{MESS,MAX} = \sqrt{R_{MESS} \cdot P}$.

2.1.2 Dimensionierung des Messwiderstandes

Der in Kap. 1.2 – *Physikalische Vorüberlegungen* beschriebenen Bedingung $R_{MESS} \ll R_{LAST}$ steht eine zuverlässige Messung des Potentials φ_{Amps} gegenüber. Um Verlustleistungen am Messwiderstand zu vermeiden, empfiehlt sich die Verwendung ohmscher Widerstände in einem kleinen einstelligen Bereich. Für den Maximalstrom I muss ein Leistungswiderstand mit $P = R \cdot I^2$ verwendet werden.

Im beschriebenen Aufbau (*Abbildung 2*) wurde ein Leistungswiderstand mit $R = 3,9 \Omega * 10\%$ und $P = 5 W$ verwendet. Es ergibt sich ein Maximalstrom von $I_{MAX} \approx 1,1 A$.

2.1.3 Auswahl des Netzteils

Um eine lückenlose Abtastung zu erzielen und dadurch eine lückenlose Darstellung zu erhalten, bedarf es eines stufenlos regelbaren Netzteils. Sofern das verwendete Netzteil eine Stromstärkenbegrenzung hat, ist diese auf den

Graphische Auswertung von elektrischen Widerständen

Messung der elektrischen Kennlinie mit dem Oszilloskop

Maximalstrom $I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R_{MESS}}}$ einzustellen. Da das Oszilloskop gleichzeitig die Potentiale φ_{Volts} und φ_{Amps} in der Darstellung aufträgt, kann auf eine Spannungsstabilisierung verzichtet werden, wenn

1. keine parallele Messung der Stromstärke und Spannung mittels Multimeter stattfindet und
2. der zu messende Widerstand keine Temperaturabhängigkeit aufweist, sodass sich durch eine kleine Variation des Stromes/der Spannung der Widerstand erheblich verändert.

Anderenfalls ist ein Netzteil mit Spannungsstabilisierung zu verwenden.

3 Auswertungsmöglichkeiten

Neben dem eigentlichen Ziel, der Thematisierung des Ohmschen Gesetzes $U = R \cdot I$ und der Analyse ohmscher Widerstände (vgl. *Abbildung 3, Kurve D*), bietet der Aufbau weitere Möglichkeiten:²

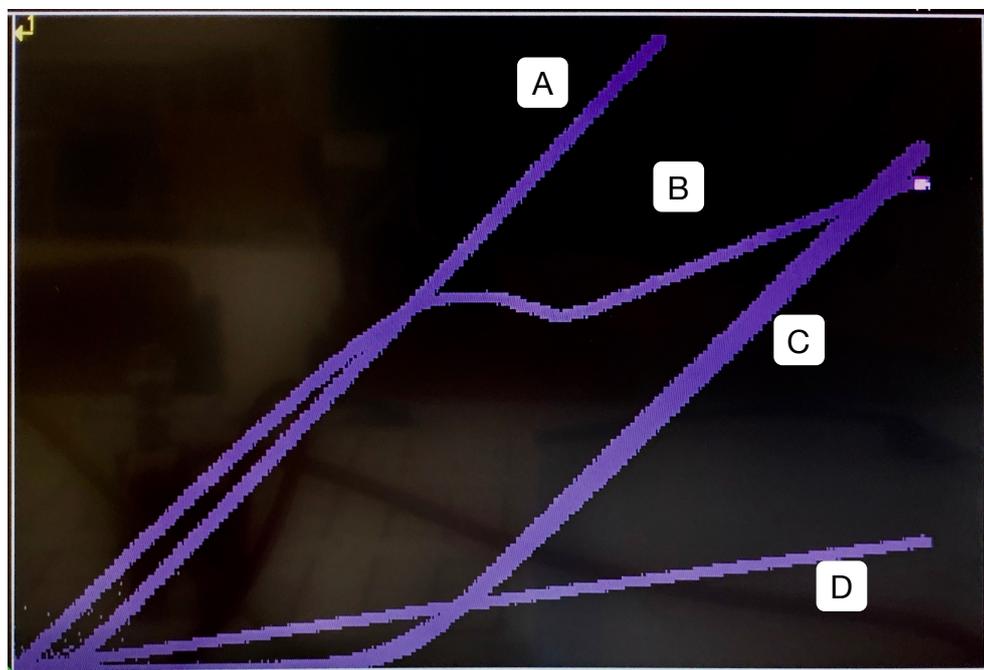


Abbildung 3: Elektrische Kennlinien verschiedener Widerstände: Diode in Durchlassrichtung (A), Glühbirne (B), Z-Diode mit $U_B = 4,7\text{ V}$ in Sperrrichtung (C) und ohmscher Widerstand mit $R = 100\ \Omega$ (D).

² Diese Aufzählung stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll vielmehr die Möglichkeiten des Aufbaus aufzeigen.

- Es können *nicht ohmsche Widerstände* wie z.B. Glühlampen (vgl. *Abbildung 3, Kurve B*) analysiert werden. Ggfs. kann durch die Bestimmung der Kennlinie ein Bereich direkter Proportionalität, in welchem das Ohmsche Gesetz gilt, erkannt werden.
- Es können Kennlinien von *Halbleitern* aufgenommen werden und dadurch das elektrische Leitverhalten, beispielsweise von Dioden oder Z-Dioden (vgl. *Abbildung 3, Kurven A, C*), in Sperr- und Durchlassrichtung abgeleitet werden.
- Quantitative Unterschiede zwischen Leiterquerschnitten bzw. Leiterlängen $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ können ebenfalls untersucht werden (vgl. *Abbildung 2*): Durch Variation eines Leiters in seiner Länge (durch Verschieben der Isolierstützen und gleichzeitiger Anpassung der Drahtlänge) bzw. in seinem Querschnitt (durch Verwendung unterschiedlicher Querschnitte gleichen Materials) kann auf den o.g. Zusammenhang geschlossen oder dieser bestätigt werden.
- Die *Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit* $\sigma = \frac{I \cdot l}{U \cdot A} = \frac{1}{\rho}$ von Leitern und Halbleitern kann ebenfalls analysiert werden: Durch Aufzeichnen der elektrischen Kennlinie nach Erwärmen bzw. Abkühlen eines Leiters aus Metall bzw. Halbmetall, zusätzlich zu einer Aufzeichnung einer Referenzkennlinie bei Raumtemperatur. Auf diese Art können PTC (*Positive Temperature Coefficient*; Kaltleiter) und NTC (*Negative Temperature Coefficient*; Heißleiter) thematisiert werden.

4 Ausblick

Eine Möglichkeit, das Experiment auszubauen, könnte eine computergestützte Auswertung mithilfe eines Mikrocontrollers (z.B. Arduino®) sein.

4.1 Schaltung

Die grundlegende Schaltung entspricht der aus *Abbildung 1*. Es wurde jedoch die Möglichkeit hinzugefügt, einen Kondensator mit einer Pulsweitenmodulation (PWM) zu laden: Der in Abhängigkeit der Pulsweite geladene Kondensator wird konstant durch den Lastwiderstand sowie den Messwiderstand entladen. Somit ist

Graphische Auswertung von elektrischen Widerständen

Messung der elektrischen Kennlinie mit dem Oszilloskop

der Versuch in der Lage, sich selbstständig auszuführen, jedoch mit $U_{\max} \ll U_{in}$, da weitere Verlustleistungen am Ladewiderstand wirken. Es wird mit einem Umschalter zwischen den beiden Modi gewechselt, wobei der Umschalter einen zweiten Kanal auf 5 V bzw. *high* legt, welcher der Mikrocontroller als *MODE* erkennen kann.

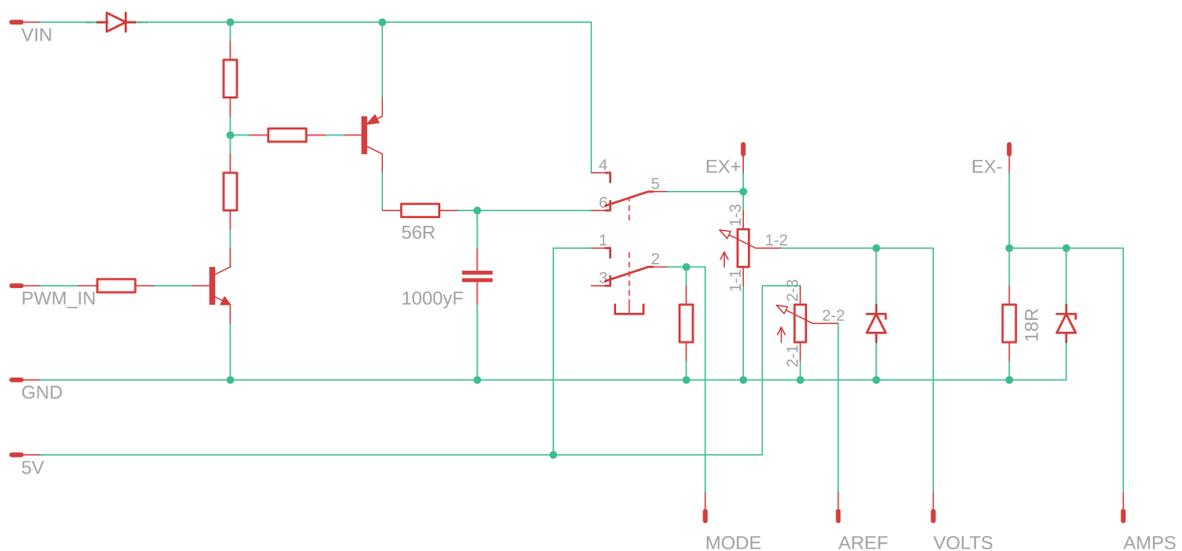


Abbildung 4: Schaltplan der computergestützten Messung mittels Arduino®. Es erfolgt ein Anschluss der externen Spannungsquelle an *VIN* sowie *GND*. Die Anschlüsse "EX +"/"EX -" dienen dem Anschluss an den zu messenden Widerstand. Der Arduino® wird folgendermaßen angeschlossen: "MODE" an einen beliebigen digitalen Pin, "AREF", "VOLTS", "AMPS" an analoge Eingänge, "PWM_IN" an einen PWM-fähigen Pin. Es erfolgt ein Anschluss der Masse an "GND" sowie eine Stromversorgung (von 5 V) an "5V".

Es erfolgt eine Messung der Spannung U_{LAST} mithilfe eines Zwei-Kanal-Spannungsteilers (Stereo-Potentiometer), wodurch aus der bekannten Stellung (zweiter Kanal: $U_{AREF} \in [0; 5 V]$) des Potentiometers unmittelbar auf die gemessene Spannung geschlossen werden kann: $U_{LAST} = U_{VOLTS} \cdot \frac{U_{AREF}}{5 V} - U_{AMPS}$. Die Messung der Stromstärke erfolgt analog zu dem in 1.2 – *Physikalische Vorüberlegungen* beschriebenen Aufbau.

4.1.1 Bauteilschutz

Um mit Spannungen $> 5 V$ arbeiten zu können, bedarf es einer Anpassung des Messbereichs. Hierzu dient der Potentiometer. Jedoch können durch Fehleinstellungen des Potentiometers Spannungen $> 5 V$ auftreten. Der Einsatz von Z-Dioden schützt hierbei den Mikrocontroller, verfälscht jedoch bei Spannungen oberhalb der Durchbruchspannung von $U_B = 4,7 V$ das Messergebnis. Zum Schutz vor einer Umpolung wurde eine Leistungsdiode eingebaut.

Graphische Auswertung von elektrischen Widerständen

Messung der elektrischen Kennlinie mit dem Oszilloskop

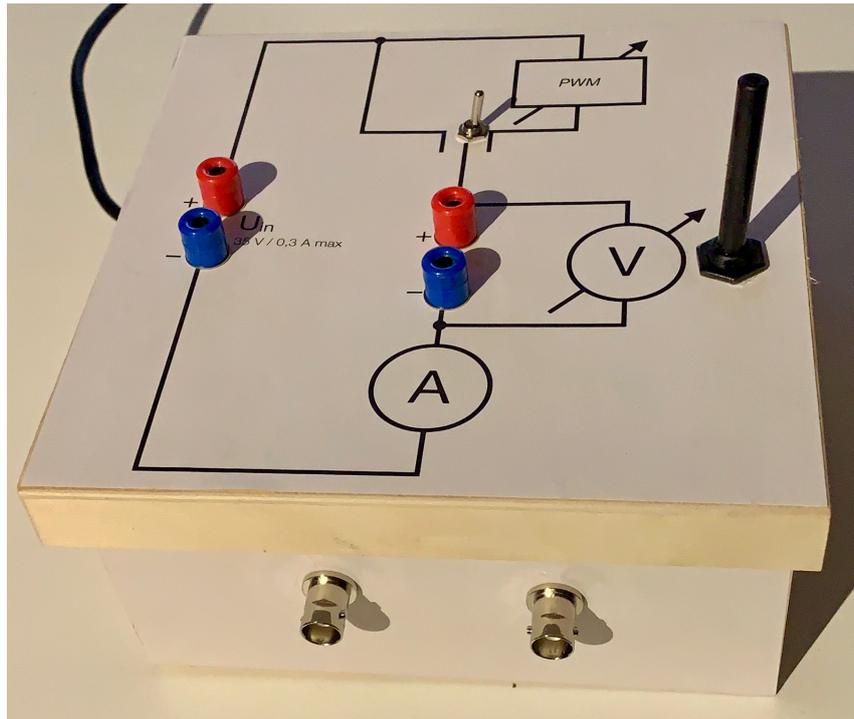


Abbildung 5: Selbsterstellte Schaltung für eine computergestützte Auswertung. Es wurden zusätzlich zwei BNC-Buchsen für DC-Messungen eingebaut. Es kann wahlweise die Eingangsspannung direkt auf den Lastwiderstand geschaltet werden oder mithilfe dieser Eingangsspannung ein Kondensator mit einer Pulsweitenmodulation (PWM) geladen werden.

4.2 Software

Die Implementation der Software ist derzeit ausstehend. In Planung ist eine Programmierung in Java, sodass verschiedene Betriebssysteme den Versuch ausführen können. Es ist notwendig, dass die Versuchsaufzeichnung gesteuert werden kann; der Mikrocontroller den Modus (manuell vs. PWM) erkennt und dementsprechend die graphische Oberfläche (GUI) verändert. Im PWM-Modus muss ein Abbruch des Versuchs möglich sein. Eine Berechnung des erfassbaren Messbereichs in Abhängigkeit der Stellung des Potentiometers ist ebenfalls zu programmieren. Die geplante graphische Auswertung „*I über U*“ soll zusätzlich die Möglichkeit bieten, den gemessenen Widerstand in Abhängigkeit der gewählten Position im Schaubild darzustellen. Des Weiteren sind eine Aufzeichnung und Überlagerung unterschiedlicher Messreihen geplant. Da der Versuch (Abbildung 5) mit zwei BNC-Buchsen versehen wurde, ist ebenfalls ein Zweikanal-DC-Oszilloskop in Planung. Weitere Funktionen wie beispielsweise das Exportieren der Messwerte in eine Tabelle oder das Abspeichern und Laden einzelner Versuche bleibt vorerst höheren Versionen vorbehalten.

Literatur

KIRCHER, Ernst, GIRWIDZ, Raimund, HÄUßLER, Peter (2015): *Physikdidaktik*. (Bd. 3).
Heidelberg: Springer-Verlag

KUCHLING, Horst (2014): *Taschenbuch der Physik*. (Bd. 21). München: Carl Hanser
Verlag

MINISTERIUM FÜR KULTUS JUGEND UND SPORT BADEN-WÜRTTEMBERG (2016):
Bildungsplan 2016 - Physik. In: *Gemeinsamer Bildungsplan der
Sekundarstufe I* (S. 42)