

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Ziele des Versuchs | 2 |
| 2 | Aufbau und Durchführung | 2 |
| 3 | Auswertung und Fehleranalyse | 4 |
| 3.1 | Bestimmung des spezifischen Widerstands mit verschiedenen Schaltungen . | 4 |
| 3.2 | Abhängigkeit des Widerstands von der Drahtlänge l | 7 |
| 3.3 | Spezifischer Widerstand von Kupfer und Eisen | 10 |
| 4 | Diskussion der Ergebnisse | 12 |
| 4.1 | Angabe und Diskussion der Endergebnisse | 12 |
| 4.2 | Diskussion der verwendeten Messmethoden | 15 |
| 4.3 | Verbesserte Messmethoden | 17 |
| A | Anhang | 18 |
| | Abbildungsverzeichnis | 18 |
| | Tabellenverzeichnis | 18 |
| | Literaturverzeichnis | 18 |
| A.1 | Rohdaten und daraus berechnete Größen | 19 |
| A.2 | Messprotokoll | 20 |

1 Ziele des Versuchs

In diesem Versuch werden die elektrische Leitfähigkeit σ bzw. der spezifische Widerstand ρ von Metalldrähten bestimmt. Hierzu werden verschiedene Schaltkreise und sowohl analoge als auch digitale Multimeter zur Messung der Spannung U und Stromstärke I verwendet. Des Weiteren wird mit Hilfe einer Messreihe überprüft, ob die theoretischen Erwartungen eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Widerstand R und der relevanten Leiterlänge l des Drahtes zutreffen.

2 Aufbau und Durchführung

Die Messungen wurden mit einem Netzgerät, einem Digitalmultimeter (Modell: *Uni-T UT51*, siehe [1]), einem Analogmultimeter (Modell: *PeakTech 3260*, siehe [2]), jeweils einem Draht aus Silber, Kupfer und Eisen, mehreren Bananensteckern und Krokodilklemmen durchgeführt. Zur Messung der Abmessungen des Drahtes standen eine Bügelmessschraube und ein Maßband zu Verfügung.

Das Experiment gliedert sich in drei Versuchsteile. Im ersten Teil werden Strom und Spannung, die durch den Silberdraht fließen beziehungsweise an diesem abfallen, mit drei verschiedenen Schaltungen gemessen. Hierbei wird die Länge des Drahtes gleich gehalten. Für jede der drei Schaltungen (vgl. [Abbildung 1](#)) wird einmal die Spannung U mit dem Digital- und der Strom I mit dem Analogmultimeter gemessen und umgekehrt. Dadurch ergeben sich sechs Messungen.

Schaltung 1 sorgt für eine sogenannte stromrichtige Messung. Dabei wird das Multimeter, das den Strom misst, direkt vor den Draht geschaltet. Die Spannungsmessung erfolgt über Draht und Strommessgerät. Der kleine Innenwiderstand des Strommessgeräts kann hier die Spannungsmessung verfälschen. Die zweite Schaltung sorgt für eine spannungsrichtige Messung. Das Multimeter, das die Spannung misst, misst diese direkt über dem Draht, der Strom wird vor Spannungsmessung und Draht gemessen. Aus Sicht des Strommessgeräts handelt es sich hierbei also um eine Parallelschaltung von Draht und Spannungsmessung, sodass der hohe Widerstand des Spannungsmessgeräts die Strommessung verfälschen kann. Schaltung 3 misst ebenfalls spannungsrichtig. Sie unterscheidet sich in sofern von Schaltung 2, als dass das Spannungsmessgerät hier direkt am Metalldraht mittels zusätzlicher Krokodilklemmen parallelgeschaltet wird.

Da in der Versuchsanleitung [3] keine explizite Position der zusätzlichen Klemmen genannt wurde, wurden die Krokodilklemmen für die Spannungsmessung unmittelbar an der Innenseite der Krokodilklemmen der restlichen Schaltung platziert, sodass die relevante Länge des Silberdrahts für beide Messungen annähernd gleich blieb. Dennoch wurde diese neue Länge für die Berechnung des spezifischen Widerstandes verwendet.

Der Unterschied zu Schaltung 2 ist somit, dass mögliche Widerstände der Bananenstecker die Spannungsmessung weniger beeinflussen. Eine Spannungsmessung über eine kürzere Drahtstrecke hätte hingegen zur Folge, dass eine kleinere Spannung gemessen würde. Die Drahtstücke, die bei der Spannungsmessung unberücksichtigt bleiben, hätten aber dennoch einen Einfluss auf die Strommessung.

Die drei Schaltungen sind in [Abbildung 1](#) zu sehen.

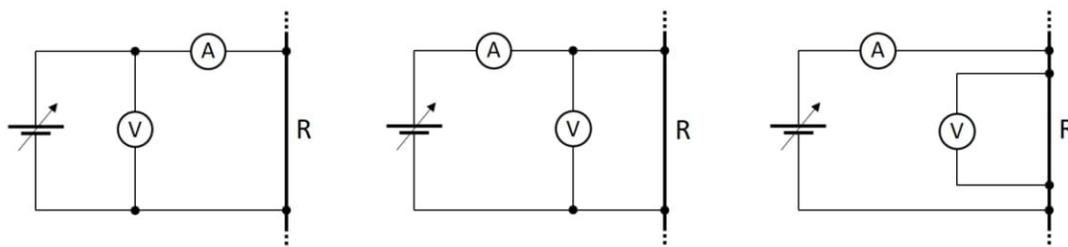


Abbildung 1: Schaltkreise 1 bis 3 (von links nach rechts), die in Versuchsteil 1 verwendet wurden. Schaltkreis 1 misst stromrichtig, Schaltkreis 2 spannungsrichtig. Schaltkreis 3 misst auch spannungsrichtig, die Spannung wird allerdings mit zusätzlichen Krokodilklemmen direkt über dem Draht abgenommen. Die Grafik wurde der Versuchsanleitung [3] entnommen.

Während allen sechs Messungen werden die Einstellungen für Strom und Spannung am Netzgerät konstant gehalten. Aus dem Verhältnis von gemessener Spannung U und Stromstärke I , kann nun der Widerstand R des Silberdrahtes

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

berechnet werden. Die Drähte werden hierbei als ohmsche Leiter angenommen, sodass dieser Widerstand konstant ist. Mithilfe der gemessenen Größen, relevante Drahtlänge l und Drahtdurchmesser d , lässt sich nun mit jedem ermittelten Widerstandswert R ein Wert für den spezifischen Widerstand von Silber mit

$$\varrho = \frac{RA}{l} = \frac{\pi R d^2}{4 l} \quad (2)$$

berechnen.

In Versuchsteil 2 wird die in [Gleichung \(2\)](#) erwartete Abhängigkeit des Widerstands von der Drahtlänge überprüft. Hierfür wird Schaltung zwei, also ein spannungsrichtiger Messaufbau, mit Analogmultimeter als Strommessgerät und Digitalmultimeter als Spannungsmessgerät verwendet. Mit einer Messreihe von 15 verschiedenen Messungen, bei denen jeweils Strom und Spannung für verschiedene Drahtlängen aufgenommen werden, wird die erwartete Abhängigkeit überprüft. Die Drahtlänge wird hierbei mit Krokodilklemmen variiert und mit dem Maßband gemessen. Abermals lässt sich mit [Gleichung \(1\)](#) der jeweilige Widerstand bestimmen. Durch lineare Regression kann dessen Zusammenhang zur Drahtlänge l ausgewertet werden.

Im Anschluss wurden wie in Versuchsteil 2 noch der spezifische Widerstand von Kupfer und Eisen bestimmt. Zusätzlich zum Vorgehen aus Versuchsteil 2 werden hierbei noch die Drahtdurchmesser der beiden Drähte mit der Bügelmessschraube bestimmt. Mit [Gleichung \(2\)](#) lassen sich so auch die spezifischen Widerstände für Kupfer und Eisen bestimmen. Diese werden in der Diskussion weiter verglichen und qualitativ ausgewertet.

Fantastisch.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung des spezifischen Widerstands mit verschiedenen Schaltungen

Der in diesem Versuchsteil verwendete Silberdraht hat einen Durchmesser von $d_s = (0,49 \pm 0,01)$ mm und eine relevante Länge von $l_s = (32,8 \pm 0,2)$ cm. Die Unsicherheiten ergeben sich aus den geschätzten Ableseunsicherheiten und der Skalenauflösung. Für Schaltung 1 ergeben die Spannungs- und Strommessung

$$\begin{aligned} U_{1dv} &= (0,389 \pm 0,003) \text{ V} \\ I_{1dv} &= (2,7 \pm 0,2) \text{ A} . \end{aligned}$$

Die Zahl im Subskript steht hierbei für die Schaltungsnummer (vgl. [Abbildung 1](#)), das Kürzel 'dv' für Spannungsmessung mit dem Digitalmultimeter (digital voltage), was einer Strommessung mit dem Analogmultimeter entspricht. Entsprechend steht 'av' für Spannungsmessung mit dem Analogmultimeter (analog voltage) und einer entsprechenden Strommessung mit Digitalmultimeter.

Die angegebenen Unsicherheiten wurden dabei anhand der in den Handbüchern der verschiedenen Multimeter gegebenen Messgenauigkeiten berechnet. Für das digitale Multimeter ist die Unsicherheit der gemessenen Größe im 2 V-Messbereich hierbei gegeben durch $\pm (0,5\% + 1 \text{ digit})$, und im 10 A-Bereich durch $\pm (2\% + 5 \text{ digits})$ (siehe [\[1\]](#)). Hierbei gibt es keine Ableseunsicherheiten und die statistischen Schwankungen sind bereits mit berücksichtigt. Beim analogen Multimeter ist die Unsicherheit der Messgröße im 2,5 V-Messbereich gegeben durch 1,5% des Skalenendwerts und im 10 A-Bereich 2% des Skalenendwerts (siehe [\[2\]](#)). Die Ableseunsicherheit wurde dabei auf 0,05 V, bzw. 0,1 A in den gegebenen Messbereichen geschätzt. Die kombinierte Gesamtunsicherheit wurde dabei durch quadratische Addition der beiden einzelnen Unsicherheiten berechnet.

Das Vertauschen der Messgeräte ergibt für Schaltung 1 folgende Werte:

$$\begin{aligned} U_{1av} &= (0,25 \pm 0,06) \text{ V} \\ I_{1av} &= (2,78 \pm 0,11) \text{ A} . \end{aligned}$$

Es ist erkennbar, dass die jeweils gemessenen Spannungen stark voneinander abweichen. Für die Stromstärken ist die Abweichung geringer. Grundsätzlich erwähnenswert ist auch, dass die Messung mit dem Digitalmultimeter präzisere Messungen ermöglicht. Zum einen lässt sich mit dem Digitalmultimeter ein Bestwert mit mehr signifikanten Stellen messen, zum anderen ist die Messunsicherheit hier deutlich geringer als beim Analogmultimeter. Mit [Gleichung \(1\)](#) und der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} \Delta I\right)^2} \quad (3)$$

berechnet sich der Widerstand des Silberdrahts für Schaltung 1 zu

$$\begin{aligned} R_{1dv} &= (0,144 \pm 0,011) \Omega \\ R_{1av} &= (0,09 \pm 0,02) \Omega . \end{aligned}$$

Der spezifische Widerstand

$$\begin{aligned}\varrho_{1dv} &= (0,083 \pm 0,007) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \\ \varrho_{1av} &= (0,052 \pm 0,013) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}\end{aligned}$$

folgt entsprechend mit den genannten Werten für Durchmesser und relevante Länge des Silberdrahts aus [Gleichung \(2\)](#) und der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta\varrho = \frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{d^2}{l} \Delta R\right)^2 + \left(2d \frac{R}{l} \Delta d\right)^2 + \left(-d^2 \frac{R}{l^2} \Delta l\right)^2}. \quad (4)$$

Man erkennt, dass diese Werte leicht voneinander abweichen, was hauptsächlich auf die unterschiedlichen Spannungswerte zurückzuführen ist. Die relative Unsicherheit des spezifischen Widerstands beträgt für die Messgerätekonfiguration mit Digitalmultimeter als Spannungsmessgerät $\frac{\Delta\varrho_{1dv}}{\varrho_{1dv}} = 8,5\%$ und für vertauschte Messgeräte $\frac{\Delta\varrho_{1av}}{\varrho_{1av}} = 24,7\%$. Um eine exaktere Messung des spezifischen Widerstands durchzuführen, bietet es sich laut den Ergebnissen aus Schaltung 1 also an, die Spannung mit dem Digitalmultimeter zu bestimmen.

Schaltung 2 ergab die Spannung und Stromstärke

$$\begin{aligned}U_{2dv} &= (0,1680 \pm 0,0018) \text{ V} \\ I_{2dv} &= (2,8 \pm 0,2) \text{ A}\end{aligned}$$

für die Spannungsmessung mit Digitalmultimeter und Strommessung mit Analogmultimeter. Entsprechend ergab eine Vertauschung der Messgeräte:

$$\begin{aligned}U_{2av} &= (0,15 \pm 0,06) \text{ V} \\ I_{2av} &= (2,78 \pm 0,11) \text{ A}.\end{aligned}$$

Abermals lässt sich sagen, dass sowohl Strom- als auch Spannungsmessung mit dem Digitalmultimeter exakter ausfallen. Die gemessenen Stromstärken unterscheiden sich, wie bereits in Schaltkreis 1 erkennbar war, kaum. Die gemessenen Spannungswerte der beiden Messgeräte sind bei der spannungsrichtigen zweiten Schaltung allerdings deutlich verträglicher miteinander. So liegt die mit dem Digitalmultimeter gemessene Spannung deutlich innerhalb der einfachen Standardabweichung der Spannung des Analogmessgeräts. Die Datenlage lässt also vermuten, dass die unterschiedlichen Messgeräte für eine spannungsrichtige Schaltung verträglichere Ergebnisse liefern, wenn ein Widerstand in der Größenordnung des verwendeten Silberdrahtes mit benutzten Netzgeräteinstellungen vermessen wird. Mit [Gleichung \(1\)](#) und [Gleichung \(3\)](#) folgt der Widerstand

$$\begin{aligned}R_{2dv} &= (0,060 \pm 0,004) \Omega \\ R_{2av} &= (0,05 \pm 0,02) \Omega.\end{aligned}$$

Mit [Gleichung \(2\)](#) und [Gleichung \(4\)](#) sowie den Maßen des Silberdrahts ergibt sich der spezifische Widerstand

$$\begin{aligned}\varrho_{2dv} &= (0,035 \pm 0,003) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \\ \varrho_{2av} &= (0,031 \pm 0,013) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}\end{aligned}$$

Solche Dinge gehören in die Diskussion.

von Silber in Schaltung 2. Wenig überraschend ist, dass sich die verträglicheren Spannungswerte auch in verträglicheren Ergebnissen für den spezifischen Widerstand niederschlagen. Wieder ist die relative Unsicherheit des Widerstands, die mit dem Analogmessgerät als Spannungsmessgerät ermittelt wurde ($\frac{\Delta \varrho_{2av}}{\varrho_{2av}} = 40,4\%$), deutlich höher als die der Messung mit vertauschten Messgeräten ($\frac{\Delta \varrho_{2dv}}{\varrho_{2dv}} = 8,3\%$). Es ist außerdem deutlich erkennbar, dass beide Werte für den Widerstand und damit auch für den spezifischen Widerstand mit Schaltkreis 2 deutlich geringer ausfallen als in Schaltkreis 1. Die gemessenen Stromstärken unterscheiden sich in Schaltkreis 1 und 2 kaum, obwohl in Schaltkreis 1 stromrichtig und in Schaltkreis 2 spannungsrichtig gemessen wurde. Das ist auf den ersten Blick verwunderlich, denn bei einer spannungsrichtigen Schaltung wird die Strommessung verfälscht, indem ein geringer Strom durch das Spannungsmessgerät fließen kann, dieser wird auch mitgemessen. Scheinbar ist dieser Strom allerdings im Vergleich zu dem über den Silberdraht fließenden Strom so gering, dass er kaum ins Gewicht fällt. Der Innenwiderstand eines Spannungsmessgeräts ist folglich offenbar sehr viel größer als der Widerstand der Drahtanordnung. Die gemessenen Spannungen sind in Schaltkreis 2 für beide Multimeteranordnungen allerdings deutlich geringer als in Schaltung 1. Da in Schaltung 2 spannungsrichtig gemessen wurde und in Schaltung 1 nicht, liegt die Vermutung nahe, dass der abweichende Spannungswert auf eine zusätzlich gemessene, über dem Strommessgerät abfallende Spannung in Schaltung 1 zurückzuführen ist. Diese zusätzlich gemessene Spannung sorgt, da die anderen Größen vergleichsweise konstant sind, für den deutlich höheren spezifischen Widerstandswert in Schaltung 1.

Die Messung von Spannung mit Digitalmultimeter und Stromstärke mit Analogmultimeter in Schaltung 3 ergab die Werte

$$U_{3dv} = (0,0810 \pm 0,0014) \text{ V}$$

$$I_{3dv} = (2,8 \pm 0,2) \text{ A} .$$

Entsprechend wurde

$$U_{3av} = (0,10 \pm 0,06) \text{ V}$$

$$I_{3av} = (2,77 \pm 0,11) \text{ A}$$

für vertauschte Messgeräte gemessen. Auch hier sind die gemessenen Ströme im Vergleich zu Schaltung 2 gleich geblieben. Die genaue Schaltposition des Spannungsmessgeräts hat also offenbar keinen merklichen Einfluss auf den gemessenen Strom einer spannungsrichtigen Schaltung. Die gemessenen Spannungen fallen allerdings etwas geringer aus als in Schaltung 2. Erklären ließe sich dies zum Beispiel durch Widerstände in Bananenstecker und Krokodilklemmen, die die Spannungsmessung in Stromkreis 2 verfälschen. Solche Einflussfaktoren werden an späterer Stelle diskutiert. Die Berechnung des Widerstands

$$R_{3dv} = (0,029 \pm 0,002) \Omega$$

$$R_{3av} = (0,04 \pm 0,02) \Omega .$$

und spezifischen Widerstands

$$\varrho_{3dv} = (0,0173 \pm 0,0014) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\varrho_{3av} = (0,022 \pm 0,013) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

von Silberdraht erfolgt analog zu den anderen Schaltungen. Aufgrund der im Vergleich zu Schaltung 2 und auch Schaltung 1 geringeren gemessenen Spannung wird mithilfe von Schaltung 3 auch ein geringerer Widerstand der Anordnung und damit ein geringerer spezifischer Widerstand von Silber ermittelt. Die relative Unsicherheit des mit digitaler Spannungsmessung ermittelten spezifischen Widerstands ($\frac{\Delta \rho_{3dv}}{\rho_{3dv}} = 8,0\%$) ist abermals geringer als der mit vertauschten Messgeräten ($\frac{\Delta \rho_{3av}}{\rho_{3av}} = 57,9\%$).

Über alle Schaltungen hinweg scheint es also zur Ermittlung des spezifischen Widerstands von Silberdraht sinnvoller, die Spannung digital zu messen, den Strom analog. Eine spannungsrichtige Schaltung beeinflusst die Spannungsmessung stark, eine stromrichtige den gemessenen Strom jedoch kaum. Eine spannungsrichtige Messung trägt also in höherem Maße zu einem unverfälschten Ergebnis bei. Die Spannung direkt über dem Draht zu messen könnte zwar weitere fehlerhafte Einflüsse minimieren, produziert aber dafür neue Unsicherheiten, die in der Diskussion näher beleuchtet werden.

Für die weiteren Messungen wurde daher entschieden, Schaltung 2 mit digitaler Spannungs- und analoger Strommessung zu verwenden.

3.2 Abhängigkeit des Widerstands von der Drahtlänge l

Um im zweiten Versuchsteil die Abhängigkeit des Widerstands R_s des Silberdrahtes von der relevanten Leiterlänge l_s zu bestimmen, wurde die Drahtlänge mit Hilfe der Krokodilklemmen in 2 cm-Schritten variiert. Die dabei mit dem Maßband gemessenen Längen l_s sind [Tabelle 1](#) zu entnehmen. Aufgrund der leichten Krümmung des Drahtes und aufgrund von Ableseunsicherheiten wird die Unsicherheit der Längenmessungen hierbei auf $\Delta l_s = 0,2\text{ cm}$ geschätzt.

Da hierbei weiterhin der Silberdraht aus Versuchsteil 1 verwendet wird, wird für den Durchmesser des Drahtes wie zuvor $d_s = (0,49 \pm 0,01)\text{ mm}$ angenommen.

Zur Spannungs- und Stromstärkemessung wurde der spannungsrichtige Stromkreis 2 verwendet. Die Stromstärke wurde dahingegen an dem analogen Multimeter abgelesen. Während der Messungen wurde die Stromstärke am Netzgerät konstant gehalten. Die Messwerte für die Spannung U_s und Stromstärke I_s sowie deren Unsicherheiten sind ebenfalls [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

Für die einzelnen Messergebnisse kann wie bereits zuvor der Widerstand R_s mit [Gleichung \(1\)](#) ermittelt und die entsprechenden Ergebnisse in [Tabelle 1](#) gefunden werden. Die Unsicherheiten ΔR_s ergeben sich dabei mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung über

$$\Delta R_s = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} \Delta I\right)^2} . \quad (5)$$

Aufgrund der Annahme, dass es sich beim Silberdraht um einen Ohmschen Leiter handelt, ist in der Theorie der lineare Zusammenhang

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho l}{d^2} \quad (6)$$

zwischen den berechneten Widerständen R_s des Drahtes und den variierten relevanten Leiterlängen l_s zu erwarten.

| l_s [$\pm 0,2$ cm] | U [mV] | I [A] | R_s [Ω] |
|-----------------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 32,8 | $120,0 \pm 1,6$ | $2,8 \pm 0,2$ | $0,043 \pm 0,003$ |
| 30 | $105,0 \pm 1,5$ | | $0,038 \pm 0,003$ |
| 28 | $98,0 \pm 1,5$ | | $0,035 \pm 0,003$ |
| 26 | $93,0 \pm 1,5$ | | $0,033 \pm 0,002$ |
| 24 | $88,0 \pm 1,4$ | | $0,031 \pm 0,002$ |
| 22 | $87,0 \pm 1,4$ | | $0,031 \pm 0,002$ |
| 20 | $83,0 \pm 1,4$ | | $0,030 \pm 0,002$ |
| 18 | $77,0 \pm 1,4$ | | $0,0275 \pm 0,0020$ |
| 16 | $69,0 \pm 1,4$ | | $0,0246 \pm 0,0018$ |
| 14 | $66,0 \pm 1,3$ | | $0,0236 \pm 0,0017$ |
| 12 | $56,0 \pm 1,3$ | | $0,0200 \pm 0,0014$ |
| 10 | $54,0 \pm 1,3$ | | $0,0193 \pm 0,0014$ |
| 8 | $49,0 \pm 1,3$ | | $0,0175 \pm 0,0013$ |
| 6 | $40,0 \pm 1,2$ | | $0,0143 \pm 0,0011$ |
| 4 | $35,0 \pm 1,2$ | | $0,0125 \pm 0,0010$ |

Tabelle 1: Dargestellt sind die am digitalen Multimeter gemessene Spannung U sowie die am analogen Multimeter gemessene Stromstärke I , welche konstant gehalten wurde, für verschiedene Leiterlängen l_s des Silberdrahtes mitsamt deren Unsicherheiten. Außerdem wurden die entsprechenden Widerstände R_s und deren Unsicherheiten aus [Gleichung \(1\)](#) und [Gleichung \(5\)](#) berechnet, um in [Abbildung 2](#) den theoretisch erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Widerstand und Leiterlänge zu überprüfen.

Ob dieser Zusammenhang auch experimentell bestätigt werden kann, wird mit Hilfe einer linearen Regression, wie in [\[4\]](#), überprüft. Hierfür sind zunächst die verschiedenen berechneten Widerstände gegen die Drahtlängen l_s aufgetragen in [Abbildung 2](#) zu finden. Durch die lineare Regression ergibt sich folgender Zusammenhang für die Ausgleichsgerade:

$$R_s = m_s l_s + c_s \quad (7)$$

mit

$$m_s = (0,097 \pm 0,003) \Omega \text{ m}^{-1} \quad (7a)$$

$$c_s = (0,0091 \pm 0,0006) \Omega \quad (7b)$$

Die Ausgleichsgerade sowie die zugehörigen Fehlergeraden sind ebenfalls [Abbildung 2](#) zu entnehmen. Die Unsicherheiten ergeben sich dabei nur aus den Schwankungen der Messwerte um die Ausgleichsgerade. Es ist aber zu erkennen, dass die Messergebnisse im Rahmen ihrer Unsicherheiten gut auf der Ausgleichsgeraden liegen. Dies weist darauf hin, dass der vermutete lineare Zusammenhang zwischen Widerstand und Drahtlänge zutrifft. Diskussioooooon

Der spezifische Widerstand des Silberdrahtes kann nun mit Hilfe der Steigung m_s der Ausgleichsgeraden über

$$m_s = \frac{4}{\pi} \frac{\varrho_s}{d^2} \implies \varrho_s = \frac{\pi}{4} m_s d^2 \quad (8)$$

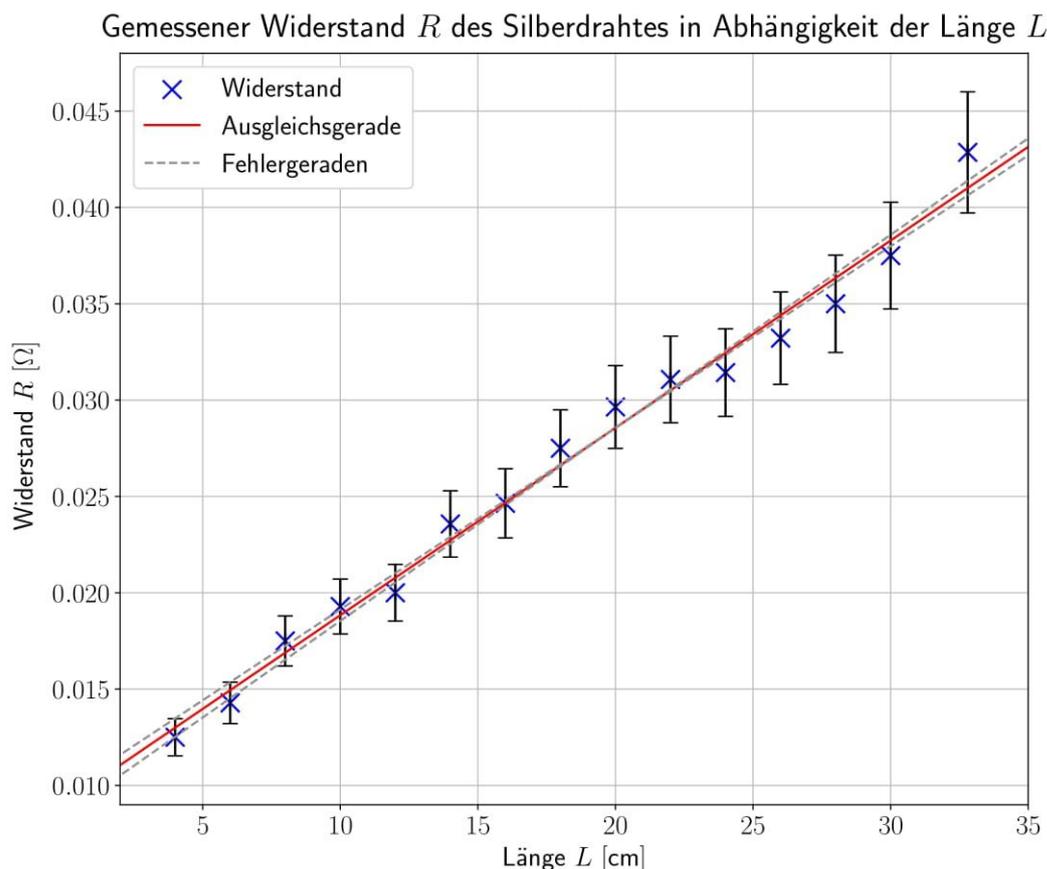


Abbildung 2: Darstellung der nach [Gleichungen \(1\) und \(5\)](#) berechneten Widerstände R_s des Silberdrahtes mit ihren entsprechenden Unsicherheiten in Abhängigkeit der im spannungsrichtigen Schaltkreis verwendeten Drahtlänge l_s . Die Formel für die gezeigte lineare Regression mit Ausgleichs- und Fehlergeraden ist in [Gleichung \(7\)](#) zu finden.

bestimmt werden. Mit der Unsicherheit Δm_s der Steigung der Ausgleichsgeraden und der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta \varrho_s = \sqrt{\left(\pi \frac{d^2}{4} \Delta m_s\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2} dm_s \Delta d\right)^2} \quad (9)$$

ergibt sich dann mit [Gleichung \(8\)](#) als Wert für den spezifischen Widerstand des Silberdrahtes

$$\varrho_s = (0,0183 \pm 0,0009) \cdot 10^{-6} \Omega \text{m} .$$

Die relative Unsicherheit des über die lineare Regression bestimmten spezifischen Widerstands ist

$$\frac{\Delta \varrho_s}{\varrho_s} = 5 \% .$$

3.3 Spezifischer Widerstand von Kupfer und Eisen

Wie bereits zuvor für den Silberdraht, sollen nun die spezifischen Widerstände von Kupfer und Eisen bestimmt werden. Dazu wurde aus oben genannten Gründen der selbe Schaltkreis verwendet, wie bei der Vermessung des Silberdrahts.

Die Durchmesser der beiden Drähte wurden mit einer Messschraube gemessen und ergaben sich mit der geschätzten Ableseunsicherheit zu

$$d_k = (0,25 \pm 0,01) \text{ mm}$$

$$d_e = (0,15 \pm 0,01) \text{ mm} .$$

Für die Messung von Spannung und Strom bei verschiedenen Längen, wurde durch das Netzgerät die Stromstärke gleich gehalten und dabei für jede Messung die Länge des stromdurchflossenen Drahtes um 5 cm variiert.

Die gemessenen Spannungen und Ströme, sowie die dazugehörigen Längen sind [Abbildung 6](#) zu entnehmen.

Mit [Gleichung \(1\)](#) und der dazugehörigen Fehlerfortpflanzung nach [Gleichung \(3\)](#), lassen sich Widerstände berechnen. Die Werte sind [Tabellen 2](#) und [3](#) zu entnehmen und in [Abbildung 3](#) dargestellt.

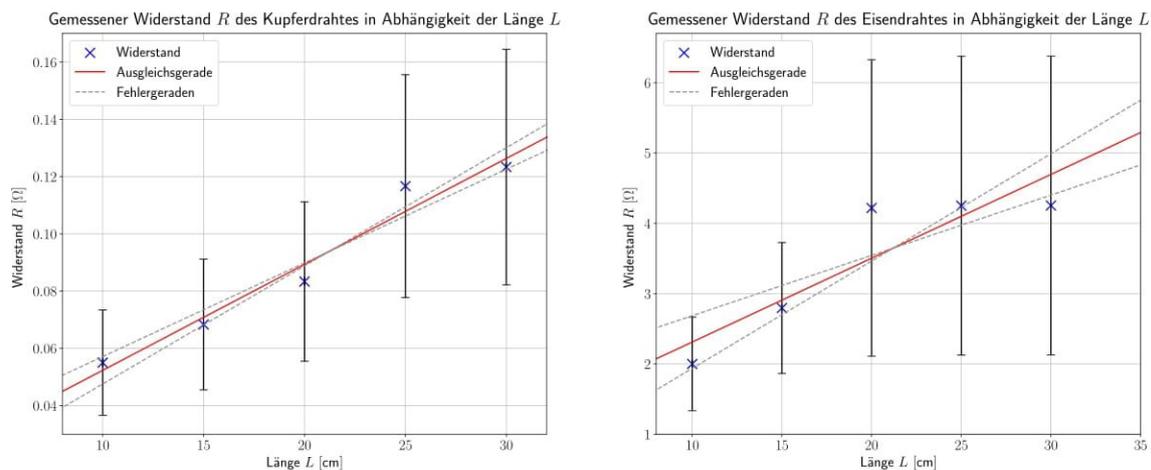


Abbildung 3: Dargestellt sind die aus den primären Messwerten Spannung und Strom, mit [Gleichung \(1\)](#), berechneten Werte für den Widerstand R des Drahtes bei einer veränderlichen Länge L . Links ist der Widerstand des Kupferdrahtes dargestellt, rechts der des Eisendrahtes. Die Fehlerbalken ergeben sich nach [Gleichung \(3\)](#) aus einer Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Die gezeigten Ausgleichsgeraden und Fehlergeraden wurden mit Hilfe einer linearen Regression bestimmt (siehe [Gleichungen \(10\)](#) und [\(11\)](#)).

Für den Fall des Kupferdrahtes kann man erahnen, dass der Zusammenhang zwischen der Länge des Drahtes und dem gemessenen Widerstand annähernd linear ist. Dies stimmt gut mit den vorherigen Überlegungen beim Silberdraht überein. Die vergleichsweise großen Unsicherheiten in der Bestimmung des Widerstands lassen sich auf die Messung mit dem digitalen Spannungsmessgerät zurückführen. Hierauf wird in der Diskussion näher eingegangen. Die dargestellte Ausgleichsgerade, sowie die Fehlergeraden ergeben sich nach

einer linearen Regression zu

$$R = ml + c , \quad (10)$$

mit

$$m = (0,37 \pm 0,04) \Omega \text{ m}^{-1} \quad (10a)$$

$$c = (0,02 \pm 0,01) \Omega \quad (10b)$$

Die Unsicherheiten resultieren dabei nur aus der Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade und beinhalten nicht die berechneten Unsicherheiten der Werte. Man sieht aber, dass die Ausgleichsgerade sehr gut im $1\text{-}\sigma$ -Bereich, also im Bereich einer Standardabweichung der Messwerte liegt.

Beim Eisendraht weisen der mittlere und letzte berechnete Widerstand eine deutliche Abweichung von der Ausgleichsgerade auf (vgl. [Abbildung 3](#)). Diese ist darauf zurückzuführen, dass das Netzteil in diesem Bereich von c.c. (constant current) auf c.v. (constant voltage) umgeschaltet hat. Damit hatte sich auch die Stromstärke stark verändert. Da diese mit dem analogen Multimeter gemessen wurde, konnte die Abweichung nicht so genau bestimmt werden, wie mit dem digitalen Multimeter, das für die Spannung verwendet wurde.

Die Ausgleichsgerade und die Fehlergeraden ergeben sich mit einer Linearen Regression zu

$$R = ml + c , \quad (11)$$

mit

$$m = (11,9 \pm 3,3) \Omega \text{ m}^{-1} \quad (11a)$$

$$c = (1,1 \pm 0,7) \Omega \quad (11b)$$

Man sieht aber, dass dennoch alle Werte gut im $1\text{-}\sigma$ -Bereich der Standardabweichung von der Ausgleichsgerade entfernt liegen.

Dies ist wieder auf die hohen absoluten Unsicherheiten zurückzuführen, die sich durch die hohen Spannungen und die dadurch ergebenen hohen Unsicherheiten in der Spannung direkt aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach [Gleichung \(3\)](#) ergeben.

Durch einen quantitativen Vergleich der berechneten Widerstände bei gleicher Drahtlänge sieht man, dass der Widerstand des Eisendrahtes immer deutlich höher ist als der des Kupferdrahtes. Dies ist einerseits auf den leicht unterschiedlichen Durchmesser der Drähte zurückzuführen, andererseits zeigt sich der Effekt auch deutlich in der Bestimmung des spezifischen Widerstandes.

Mit Hilfe von [Gleichungen \(8\)](#) und [\(9\)](#), können die spezifischen Widerstände von Kupfer und Eisen nun aus der linearen Regression bestimmt werden. Diese ergeben sich zu

$$\varrho_k = (0,018 \pm 0,003) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

$$\varrho_e = (0,21 \pm 0,07) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} .$$

Die relative Unsicherheit beträgt dabei

$$\left| \frac{\Delta \varrho_k}{\varrho_k} \right| = 14 \%$$

$$\left| \frac{\Delta \varrho_e}{\varrho_e} \right| = 31 \% .$$

Wie erwartet sieht man, dass der berechnete spezifische Widerstand von Eisen deutlich höher ist als der von Kupfer. Im Folgenden werden nun diese Werte und Unsicherheiten diskutiert und mit ihren Literaturwerten verglichen.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

In Versuchsteil 1 konnte der spezifische Widerstand des Silberdrahtes anhand verschiedener Schaltungen bestimmt werden. Hierbei zeigt sich, dass die Verwendung des digitalen Multimeters zur Spannungsmessung von Vorteil ist, da dieses eine höhere Auflösung und geringere Messunsicherheiten besitzt als das analoge Multimeter. Auch zeigte sich, dass aufgrund der deutlich höheren Beeinflussung der Spannungsmessung im stromrichtigen Schaltkreis ein spannungsrichtiger Schaltkreis präzisere Messergebnisse liefert, sodass sich die Schaltkreise 2 und 3, wie oben beschrieben, besser eignen. Zur Bestimmung des Endergebnisses und zur Durchführung der Versuchsteile 2 und 3 wurde hierbei Schaltkreis 2, also ein spannungsrichtiger Stromkreis bei dem direkt an den am Draht befestigten Krokodilklemmen die Spannung gemessen wurde, gewählt. Dieser Schaltkreis ermöglicht die genauere Messung und Variation der relevanten Leiterlänge. In Schaltkreis 3 hätte man dahingegen berücksichtigen müssen, dass die relevante Leiterlänge zur Spannungsmessung aufgrund einer direkt am Draht angreifenden Parallelschaltung des Voltmeters leicht verringert wäre, was ebenfalls zu einer geringeren gemessenen Spannung geführt hätte. Daher wird als Endergebnis von Versuchsteil 1 der mit Schaltung 2 ermittelte Wert ϱ_{2dv} für den spezifischen Widerstand des Silberdrahtes angegeben:

$$\varrho_{2dv} = (0,035 \pm 0,003) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \qquad \frac{\Delta \varrho_{2dv}}{\varrho_{2dv}} = 8,3 \%$$

Im Vergleich zu den anderen in Versuchsteil 1 ermittelten Werten des spezifischen Widerstand ist hier auch die relative Unsicherheit, neben der aus Schaltung 3 mit digitaler Spannungsmessung, am geringsten.

Die expliziten Beiträge zur Unsicherheit sind hierbei

$$\left| 2 \frac{d_s U_{2dv}}{l_s I_{2dv}} \Delta d_s \right| = 0,36 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\left| - \frac{d_s^2 U_{2dv}}{l_s^2 I_{2dv}} \Delta l_s \right| = 0,11 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\left| \frac{d_s^2}{l_s I_{2dv}} \Delta U_{2dv} \right| = 0,21 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$\left| - \frac{d_s^2 U_{2dv}}{l_s I_{2dv}^2} \Delta I_{2dv} \right| = 1,3 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} .$$

Auffällig ist hierbei, dass der Beitrag der Unsicherheit der Stromstärkemessung mit dem analogen Multimeter erheblich größer ist, als die anderen Beiträge. Dies ist auf die Verwendung des analogen Messgeräts und die Messmethoden zurückzuführen, welche weiter unten genauer diskutiert werden. Aufgrund der sehr kleinen Durchmesser, trägt außerdem die Unsicherheit der Bestimmung dieser ebenfalls stärker bei als die Unsicherheit der Spannungsmessung, welche aufgrund des digitalen Multimeters eher gering ist. Auch die Längenmessung hat einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Unsicherheit, was auf die große Länge des Drahtes im Vergleich zur Ableseunsicherheit am Maßband zurückzuführen ist.

In der Versuchsanleitung [3] ist der spezifische Widerstand für Silber gegeben durch $\varrho_{\text{sLit}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Ein t-Test mit diesem aus den Messungen berechneten Wert und dem Literaturwert ergibt

$$t_s = \frac{|\varrho_{2\text{dv}} - \varrho_{\text{sLit}}|}{\Delta\varrho_{2\text{dv}}} = 11,8 .$$

Für die Berechnung dieses spezifischen Widerstandes, wurde nur eine einzelne Messung von Strom und Spannung verwendet. Daher ist dieser Wert trotz seiner kleinen Unsicherheiten sehr anfällig für statistische Schwankungen. Damit ist es auch nicht verwunderlich, dass der Wert mit dem Literaturwert nicht gut verträglich ist, da auch die Unsicherheiten sehr klein sind und somit eine kleine Abweichung einen großen t-Wert hervorruft. Das Ergebnis ist also nicht wirklich repräsentativ. Guter Einwand, allerdings ist das Messen sehr kleiner Widerstände auch aus physikalischen Gründen extrem ungenau.

In Versuchsteil 2 wurde die theoretisch erwartete lineare Abhängigkeit des Widerstand R_s von der relevanten Drahtlänge l_s durch Messungen bei verschiedenen Längen überprüft. Wie in **Abbildung 2** sichtbar, wird dieser lineare Zusammenhang bestätigt, da die einzelnen berechneten Werte für R_s im $1\text{-}\sigma$ -Bereich ihrer Standardunsicherheiten allesamt auf der Ausgleichsgeraden liegen.

Da **Gleichung (6)** einen Zusammenhang für R und l im Falle eines idealen ohmschen Leiters liefert, sind hier leichte Abweichungen von der Theorie unter anderem dadurch zu erklären, dass im Experiment der Silberdraht nicht als vollständig ideal angesehen werden kann. Es ist außerdem zu beachten, dass ein Offset vorliegt, da die Ausgleichsgerade einen von 0 verschiedenen y-Achsenabschnitt aufweist. Dieses Offset ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass in der verwendeten Schaltung bei der Spannungsmessung ebenfalls immer die Widerstände der Krokodilklemmen berücksichtigt werden müssen, welche bei der Berechnung der Widerstände R_s des verwendeten Silberdrahts aus den gemessenen Größen mit **Gleichung (1)** jedoch vernachlässigt wurden. Des Weiteren konnte aus der Steigung der Ausgleichsgeraden ein genauerer Wert für den spezifischen Widerstand des Silbers berechnet werden, dessen relative Unsicherheit aufgrund der Durchführung einer Messreihe geringer ist als die, der Ergebnisse in Versuchsteil 1. Der hieraus ermittelte Wert für den spezifischen Widerstand lässt sich angeben zu

$$\varrho_s = (0,0183 \pm 0,0009) \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} \qquad \frac{\Delta\varrho_s}{\varrho_s} = 5 \% .$$

Ein t-Test mit dem Literaturwert ergibt

$$t_s = \frac{|\varrho_s - \varrho_{sLit}|}{\Delta\varrho_s} = 2,5 .$$

Der anhand der Messreihe mit Hilfe der linearen Regression berechnete Wert ist daher nahezu verträglich mit dem Literaturwert. Die kleine Abweichung lässt sich auf eventuelle systematische Fehler zurückführen. Eine weitere Fehlerquelle ist auch, dass der Innenwiderstand der Krokodilklemmen und der teilweise nicht so gute Sitz der Klemmen am Draht berücksichtigt werden müssten, da diese systematische Fehler hervorrufen können.

Um die Abweichungen vom Literaturwert genauer zu betrachten, wird in [Abbildung 4](#) der aus [Gleichung \(2\)](#) berechnete Wert für den spezifischen Widerstand gegen die jeweilige Drahtlänge l_s aufgetragen.

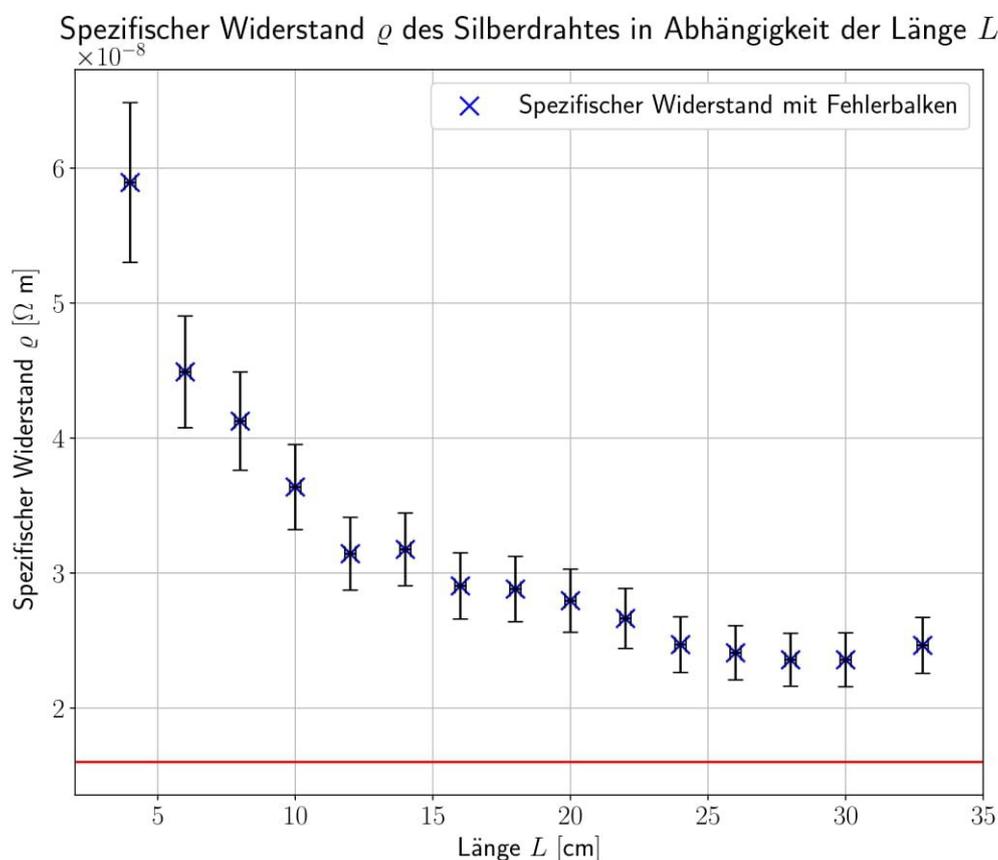


Abbildung 4: Darstellung der durch [Gleichung \(2\)](#) berechneten spezifischen Widerstände ϱ_s für die verschiedenen verwendeten Drahtlängen l_s . Außerdem ist der theoretisch erwartete Literaturwert sichtbar. Die einzeln berechneten Ergebnisse weichen sichtbar vom Literaturwert ab.

Während in der Theorie ein konstanter Wert zu erwarten gewesen wäre, sind hier deutliche Abweichungen je nach relevanter Leiterlänge zu erkennen. Insbesondere steigt der spezifische Widerstand mit abnehmender Drahtlänge erheblich und liegt in allen Fällen über dem Literaturwert. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass mit sinkender Leiterlänge und damit mit sinkendem Widerstand des Leiters der relative Einfluss der

Widerstände der Krokodilklemmen zunimmt, welcher wie oben beschrieben jedoch nicht bei der Berechnung der spezifischen Widerstände berücksichtigt wurde und zu einem Offset führt.

Einen weiteren leichten Einfluss kann außerdem die Zunahme der Temperatur des Silberdrahtes bei längerer Messung haben, wobei ebenfalls der spezifische Widerstand dieses Metalls steigt. Da die Messungen mit abnehmender Leiterlänge durchgeführt wurden, könnte eine Zunahme des spezifischen Widerstands bei kürzeren Längen unter anderem auch darauf zurückgeführt werden. Diese Faktoren, sowie die weiter unten diskutierten, verwendeten Messmethoden, sind mögliche Erklärungen für die Abweichung der berechneten Endergebnisse vom Literaturwert des spezifischen Widerstands.

In Versuchsteil 3 wurden analog zum vorigen Versuchsteil die spezifischen Widerstände eines Kupfer- und eines Eisendrahts ermittelt. Hierbei wurden wieder mit Schaltkreis 2 und digitaler Spannungsmessung Messungen bei verschiedenen Leiterlängen durchgeführt, wobei die Messreihen hier jedoch kürzer waren. Die über die linearen Regressionen ermittelten Werte für die spezifischen Widerstände lassen sich angeben zu

$$\begin{aligned} \varrho_k &= (0,018 \pm 0,003) \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} & \left| \frac{\Delta\varrho_k}{\varrho_k} \right| &= 14 \% \\ \varrho_e &= (0,21 \pm 0,07) \cdot 10^{-6} \Omega\text{m} & \left| \frac{\Delta\varrho_e}{\varrho_e} \right| &= 31 \% . \end{aligned}$$

Hier ist auffällig, dass die relativen Unsicherheiten erheblich größer sind als zuvor beim Silberdraht. Die höheren Unsicherheiten sind dabei überwiegend auf die Spannungsmessung zurückzuführen. Bei Kupfer und vor allem bei Eisen wurden deutlich höhere Spannungen gemessen als bei Silber. Da die durch das digitale Multimeter gegebene Messunsicherheit der Spannung relativ von den gemessenen Größen abhängt, steigt daher hier ebenfalls die Unsicherheit der aus den Messwerten berechneten spezifischen Widerstände. Ein t-Test zwischen den Literaturwerten und den jeweiligen berechneten Werten der spezifischen Widerstände von Eisen und Kupfer ergibt dahingegen

$$\begin{aligned} t_k &= \frac{|\varrho_k - \varrho_{k\text{Lit}}|}{\Delta\varrho_k} = 0,5 \\ t_e &= \frac{|\varrho_e - \varrho_{e\text{Lit}}|}{\Delta\varrho_e} = 1,7 \end{aligned}$$

wobei $\varrho_{k\text{Lit}} = 0,017 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ und $\varrho_{e\text{Lit}} = 0,098 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, wie in [3] verwendet wurden. In beiden Fällen sind die Ergebnisse also gut verträglich mit den Literaturwerten. Eine größere Messreihe hätte hier dennoch zu geringeren Unsicherheiten geführt.

4.2 Diskussion der verwendeten Messmethoden

Im folgenden werden nun die verwendeten Messmethoden und Messinstrumente im Hinblick auf mögliche Fehlerquellen diskutiert.

Zunächst können auch die kleinen Widerstände der verwendeten Bananenstecker die Messungen insbesondere dadurch beeinflussen, weil der Widerstand der zu vermessenden

Drähte sehr klein ist. Leitungswiderstände fallen dadurch stärker ins Gewicht. Die Kontaktstellen der Stecker können daher Flugrost aufweisen und leichte Wackelkontakte erzeugen. Auffällig sind Einflüsse bei der Widerstandsmessung durch die Krokodilklemmen. Diese müssen guten Kontakt zum Draht haben, um keinen Wackelkontakt zu erzeugen. Da diese im Experiment eher locker saßen, sind diese daher anfällig für leichte Stöße oder Verschiebungen der Kabel. Beispielsweise kam es während einer Messung zu einem Wackelkontakt an einer Krokodilklemme, welcher die gemessene Spannung sehr deutlich verfälschte, worauf die Messung wiederholt werden musste. In Versuchsteil 1 ist der Einfluss der Kabel und Klemmen deutlich zu erkennen, da Schaltung 3 eine kleinere Spannung misst als Schaltung 2.

Die Messung der Drahtdurchmesser mit der Bügelmessschraube erfolgte mit ausreichender Genauigkeit. Durch die hohe Skalenauflösung der Messschraube von 0,01 mm ist ein genaues Ablesen des Messergebnisses möglich. Die Rutschkupplung begrenzt die beim Zudrehen der Schraube aufgewendete Messkraft, sodass diese die Messung, anders als etwa bei einem Noniusmessschieber, nicht beeinflussen kann. Erwähnenswert ist, dass die Durchmesser der Drähte jeweils nur einmal an einer Stelle des Drahtes gemessen wurden. Eventuelle Durchmesserschwankungen sind so nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Draht eine perfekt kreisförmige Querschnittsfläche besitzt.

Die Längenmessung der Drähte erfolgte mit dem Maßband. Hierzu waren zwei Experimentatoren nötig, da der Draht gespannt gehalten werden musste während abgelesen wurde. Gleichzeitig durften die Krokodilklemmen, die wie schon erwähnt nur schwach schlossen, nicht in ihrer Position verrutschen. Das Ablesen der Länge erfolgte dann derart, dass jeweils die Zähne der Krokodilklemme, die am nächsten zur gegenüberliegenden Krokodilklemme zeigten, als Messpunkt genommen wurden. Hier ergab sich eine zusätzliche Unsicherheit. Die Isolierung der Krokodilklemmen und der wie beschrieben wackelige Messvorgang sorgten für eventuelle systematische Fehler.

Wichtig ist auch, dass am Drahtwiderstand Stromfluss Joule'sche Wärme abfällt. Dadurch erhitzt sich der Draht. Metalle wie Silber sind keine perfekten Ohm'schen Leiter, vielmehr ist der spezifische Widerstand der Metalle temperaturabhängig. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich diese spezifischen Widerstände im Laufe der Messungen leicht änderten. Das würde auch teilweise erklären, warum der spezifische Widerstand von Silber stieg, nachdem die Länge l schrittweise verringert worden war. Da Silber ein sogenannter Kaltleiter ist, kann eine zunehmende Erwärmung des Drahtes für einen zunehmenden spezifischen Widerstand sorgen. Ähnlich verhält es sich auch mit den anderen verwendeten Metallen.

Da der Eisendraht die kleinste Querschnittsfläche aufwies, wurde vorsorglich die Stromstärke für diesen Draht deutlich verringert. Der Draht sollte sich aus den gerade beschriebenen Gründen nicht zu sehr erhitzen. Dadurch schaltete das Netzteil allerdings bei zwei Messwerten in einen anderen Modus, es wechselte von c.c. (constant current) zu c.v. (constant voltage). Dadurch änderten sich die Strom- und Spannungswerte innerhalb der Messreihe. Möglicherweise änderte sich dadurch auch der Innenwiderstand des Netzgeräts. Die Messreihe wurde dadurch deutlich sichtbar beeinflusst.

In der Auswertung wurde darauf hingewiesen, dass ein Digitalmultimeter präziser misst als ein Analogmultimeter. Bei letzterem kam zusätzlich zur Unsicherheit des Messgeräts ein Parallaxenfehler beim Ablesen des Zeigerausschlags an der analogen Skala hinzu. Dieser wurde dadurch minimiert, dass eine Spiegelskala vorhanden war. Indem man Zeiger und Spiegelbild des Zeigers in Deckung brachte, konnte der angezeigte Messwert möglichst exakt abgelesen werden.

4.3 Verbesserte Messmethoden

Um den Widerstand der Bananenstecker zu reduzieren wäre es sinnvoll, kürzere Kabel zu verwenden. Denn auch bei den Bananensteckern hängt der Widerstand von der Leiterlänge ab. Bananenstecker mit größerem Durchmesser hätten einen ähnlichen Effekt. In Hinblick auf Sicherheitsvorkehrungen wäre es auch sinnvoll, Bananenstecker mit Berührschutz zu verwenden, vor allem, wenn mit höheren Spannungen und Stromstärken gearbeitet wird.

Krokodilklemmen mit gut sichtbaren Mäulern, die stärker schließen, hätten die Längenmessung deutlich vereinfacht und gleichzeitig Wackelkontakte reduziert.

Um die Längenmessung zusätzlich zu verbessern und Stabilität des Versuchsaufbaus insgesamt zu verbessern, könnte der zu vermessende Metalldraht in eine Vorrichtung gespannt werden. Ließe sich der Metalldraht in einer solchen Vorrichtung einer Gitarrensaite gleich einspannen, könnten auch die Krokodilklemmen besser angebracht und verschoben und auch der Abstand besser gemessen werden, da keine Krümmung des Drahtes das Messergebnis verfälschen würde.

Um eine Erhitzung des Drahtes zu vermeiden, könnte dickerer Draht verwendet werden. Dadurch würde der Widerstand des Drahtes wiederum sinken. Störwiderstände, zum Beispiel in Form der Bananenstecker oder auch der Innenwiderstände der Messgeräte, würden dadurch allerdings stärker ins Gewicht fallen. Eine Änderung des Drahtdurchmessers hätte also Vor- und Nachteile und müsste sorgfältig abgewägt werden.

Nachdem Versuchsteil 1 ergab, dass Digitalmultimeter präzisere Messergebnisse liefern als Analogmultimeter, hätten die nachfolgenden Messreihen gleich mit zwei Digitalmultimetern durchgeführt werden können. Da das Analogmultimeter allerdings die fehlerunabhängige Strommessung übernahm, wurde dieser Nachteil möglichst gering gehalten.

Mit Hilfe der genannten verbesserten Methoden, könnte man die Ungenauigkeiten deutlich reduzieren. Um auch die statistischen Unsicherheiten zu minimieren, könnte man für jeden untersuchten Zusammenhang längere Messreihen durchführen. Diese würden einerseits die Genauigkeit der Endergebnisse verbessern, andererseits auch statistische Fehler durch Mittelung verringern.

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Drei Schaltkreise für Versuchsteil 1 | 3 |
| 2 | Abhängigkeit des Widerstand von der Länge - Silber | 9 |
| 3 | Berechnete Widerstände von Kupfer und Eisen | 10 |
| 4 | Spezifischer Widerstand von Silber bei variierter Drahtlänge | 14 |
| 5 | Messprotokoll Seite 1 | 20 |
| 6 | Messprotokoll Seite 2 | 21 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Messwerte und deren Unsicherheiten bei variabler Länge des Silberdrahtes | 8 |
| 2 | Längen und Widerstände des Kupferdrahtes | 19 |
| 3 | Längen und Widerstände des Eisendrahtes | 19 |

Literaturverzeichnis

- [1] *Uni-T UT51 Bedienungsanleitung* (UNI-TREND TECHNOLOGY (DONG GUAN) LIMITED, 2022, Dong Guan City, 1. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/Uni-T%20UT51%20operating%20Manual.pdf>.
- [2] *PeakTech 3260 Bedienungsanleitung* (PeakTech Prüf- und Messtechnik GmbH, 2022, Ahrensburg, 1. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/PeakTech%203260%20Bedienungsanleitung.pdf>.
- [3] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Anleitung Versuch 44, Elektrische Leitfähigkeit* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 1. März 2022).
- [4] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 1. März 2022).
- [5] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Aufbau Versuch 44* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 1. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/>.
- [6] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 1. März 2022).

A.1 Rohdaten und daraus berechnete Größen

Widerstände Kupfer

| l_k ($\pm 0,2$ cm) | R_k [Ω] |
|-----------------------|--------------------|
| 10,0 | $0,06 \pm 0,02$ |
| 15,0 | $0,07 \pm 0,02$ |
| 20,0 | $0,08 \pm 0,03$ |
| 25,0 | $0,12 \pm 0,04$ |
| 30,0 | $0,12 \pm 0,04$ |

Tabelle 2: Dargestellt sind die Längen l_k des Kupferdrahtes und die zugehörigen berechneten Widerstände R_k .

Widerstände Eisen

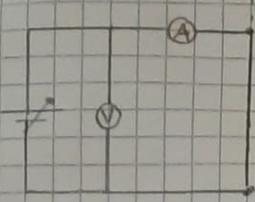
| l_e ($\pm 0,2$ cm) | R_e [Ω] |
|-----------------------|--------------------|
| 10,0 | $2,0 \pm 0,6$ |
| 15,0 | $2,8 \pm 0,9$ |
| 20,0 | 4 ± 2 |
| 25,0 | 4 ± 2 |
| 30,0 | 4 ± 2 |

Tabelle 3: Dargestellt sind die Längen l_e des Kupferdrahtes und die zugehörigen berechneten Widerstände R_e .

A.2 Messprotokoll

Versuch 44 - elektrische Leitfähigkeit

1. relevante Drahtlänge $L = 32,8 \pm 0,2 \text{ cm}$



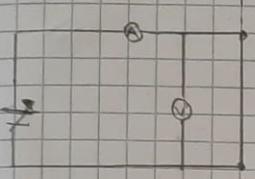
← Draht aus Silber

Durchmesser des Drahtes:
 $d = 0,49 \pm 0,01 \text{ mm}$

Schaltung 1, 2: Netzgerät - Spannung: $U_0 = 0,5 \text{ V}$ Stromstärke: $I_0 = 2,82 \text{ A}$

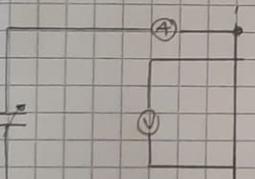
Schaltung 1: Digitales Multimeter - Spannung, analoges Multimeter - Stromstärke
Spannung $U = 0,389 \pm$ Stromstärke $I = 2,7 \pm 0,1 \text{ A}$

Schaltung 2: Digitales Multimeter - Stromstärke, analoges Multimeter - Spannung
Spannung $U = 0,25 \pm 0,05 \text{ V}$ Stromstärke $I = 2,78 \text{ A}$



Schaltung 3: Digitales Multimeter - Strom
Analoges Multimeter - Spannung
Spannung $U = 0,15 \pm 0,05 \text{ V}$
Stromstärke $I = 2,78 \text{ A}$

Schaltung 4: Digitales Multimeter - Spannung: $U = 0,168 \text{ V}$
Analoges Multimeter - Stromstärke: $I = 2,8 \pm 0,1 \text{ A}$



Schaltung 5: Digitales Multimeter - Spannung: $U = 0,081 \text{ V}$
Analoges Multimeter - Stromstärke: $I = 2,8 \pm 0,1 \text{ A}$
relevante Länge $L = 31,5 \pm 0,2 \text{ cm}$

Schaltung 6: Digitales Multimeter - Stromstärke: $I = 2,77 \text{ A}$
Analoges Multimeter - Spannung: $U = 0,1 \pm 0,05 \text{ V}$

Messbereiche auf den Multimetern:

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| digital: Stromstärke: 10 A | analog: Stromstärke: 10 A |
| Spannung: 2 V | Spannung: $2,5 \text{ V}$ |

Abbildung 5: Messprotokoll Seite 1