

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	Versuchsaufbau	2
3	Durchführung	3
3.1	Versuchsteil 1	3
3.2	Versuchsteil 2	3
3.3	Versuchsteil 3	4
3.4	Versuchsteil 4	4
4	Auswertung	5
4.1	Versuchsteil 1	5
4.2	Versuchsteil 2	6
4.3	Versuchsteil 3	8
4.4	Versuchsteil 4	9
5	Diskussion	11
5.1	Versuchsteil 1	11
5.2	Versuchsteil 2	11
5.3	Versuchsteil 3	12
5.4	Versuchsteil 4	12
5.5	Weitere Fehlerquellen	13
5.6	Verbesserungsvorschläge	13
A	Anhang	15
A.1	Rohdaten	15

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch wurde spezifische elektrische Widerstand der vier Metalle Kupfer, Silber, Nickel und Tantal mithilfe von zwei Multimetern und einem jeweils zugehörigen Draht bestimmt. Außerdem wurde die Abhängigkeit des Widerstands von der Drahtlänge und vom Drahtquerschnitt untersucht.

2 Versuchsaufbau

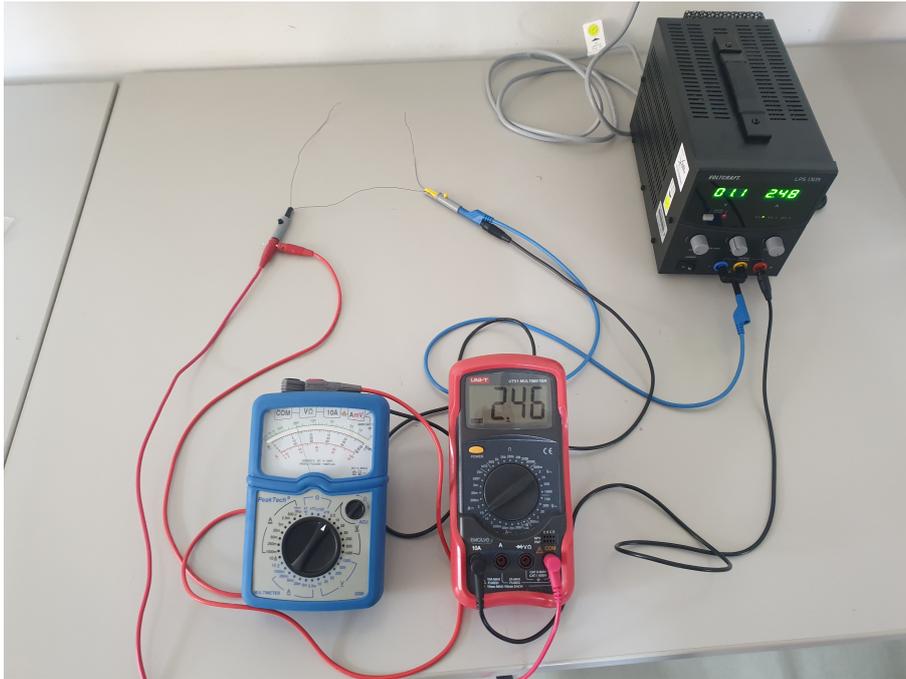


Abbildung 1: Skizze des Versuchsaufbaus

Ein Draht aus dem zu untersuchenden Material wird zwischen zwei Krokodilklemmen eingespannt. Anschließend wird der Draht durch Kabel mit einer Spannungsquelle verbunden. In diese Schaltung wird ein analoges Multimeter in Reihe und ein digitales Multimeter parallel geschaltet und anders herum. Das parallel geschaltete Multimeter misst die abfallende Spannung, das in Reihe geschaltete die Stromstärke.

3 Durchführung

3.1 Versuchsteil 1

In diesem Versuchsteil wurde der spezifische Widerstand ρ eines Tantaldrahtes bestimmt, indem Spannung und Stromstärke bei den drei unterschiedlichen Schaltungen, dargestellt in Abb. 2, gemessen wurden.

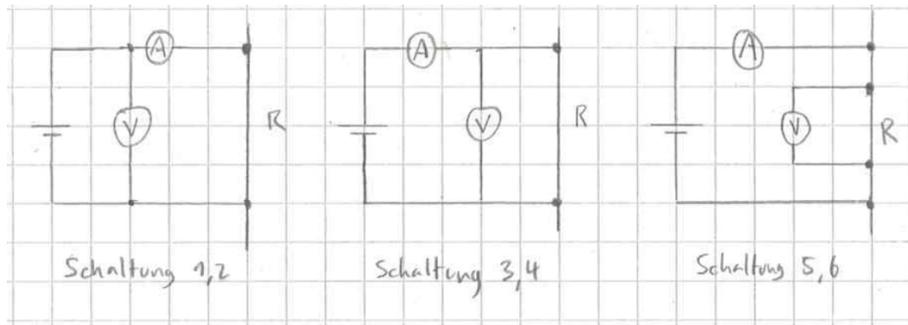


Abbildung 2: Skizze der in dem Versuch verwendeten Schaltungen. Die ungeraden Zahlen bezeichnen jeweils die Schaltung mit analogem Voltmeter und digitalem Amperemeter, bei den geraden Zahlen ist es umgekehrt.

Es wurden drei unterschiedliche Schaltungen aufgebaut. Bei der ersten Schaltung (Schaltungen 1 und 2 in Abb. 2) wurde das Voltmeter parallel zum Amperemeter und dem Draht geschaltet, dies nennt man eine stromrichtige Schaltung. Diese Schaltung hat das Problem, dass ein Teil der gemessenen Spannung am Amperemeter abfällt weshalb sie für geringe Widerstände ungeeignet ist. Bei der nächsten Schaltung (Schaltungen 3 und 4 in Abb. 2) wird das Amperemeter vor das Voltmeter geschaltet. Diese Schaltung ist für große Widerstände ungeeignet, da in diesem Fall ein relevanter Teil des gemessenen Stromes durch das Voltmeter fließt. In diesem Kontext spricht man von einer spannungsrichtigen Schaltung. Im dritten Fall (Schaltungen 5 und 6 in Abb. 2) handelt es sich ebenfalls um eine spannungsrichtige Schaltung, bei der jedoch das Voltmeter direkt an die Krokodilklemmen angeschlossen wurde und der Strom durch zwei weitere Krokodilklemmen außerhalb der beiden zuvor verwendeten auf den Draht gegeben.

Zunächst wurden für die drei verschiedenen Schaltungen jeweils mit dem digitalen Voltmeter (kurz DVM) und dem analogen Amperemeter (kurz AAM) und dann umgekehrt eine Einzelmessung der Stromstärke I und der Spannung U durchgeführt. Für die Messfehler s_U und s_I wurden die Herstellerangaben der Multimeter verwendet und zusätzlich eine kleine Ungenauigkeit hinzugerechnet, da die angezeigten Werte beim Digitalen minimal schwankten und eine Ableseungenauigkeit beim Analogen existiert.

Um die Länge des Tantaldrahtes bestimmen zu können, wurden die Stellen, die mit den Klemmen befestigt wurden, etwas eingeknickt. Mit einem Maßband wurde dann die effektive Drahtlänge L (Abstand der Knicke) bestimmt. Da die Skala bei kleinen Werten abgenutzt war, wurde ein Knick an 100 cm angelegt und die Position des Anderen abgelesen. Der hierbei entstandene Ablesefehler wurde auf $s_{L,1} = 0,1$ cm geschätzt. Die Dicke des Drahts $d = (0,50 \pm 0,02)$ mm wurde mit einer Bügelmessschraube gemessen.

3.2 Versuchsteil 2

In diesem Versuchsteil wurde untersucht, wie der bestimmte spezifische Widerstand ρ von Tantal von der verwendeten Drahtlänge L abhängt. Da der Widerstand des Drahtes aus den Messungen des ersten Versuchsteils als eher klein geschätzt wurde, wurde für diese Messung Schaltung 3 aus Abb. 2 verwendet, da aufgrund des kleinen Widerstands des Drahtes der Strom, der durch das Voltmeter fließt und die Strommessung verfälscht, vergleichsweise gering ist. Um die teilweise stark schwankende Stromstärke möglichst genau messen zu können, wurde hier das digitale Multimeter

als Amperemeter verwendet. Es wurden zehn Einzelmessungen der Stromstärke und der Spannung für verschiedene Drahtlängen durchgeführt. Die Messung der Drahtlänge wurde wie in Versuchsteil 1 beschrieben durchgeführt.

3.3 Versuchsteil 3

In diesem Versuchsteil sollte die Abhängigkeit des bestimmten spezifischen Widerstands ρ von Tantal vom Drahtquerschnitt untersucht werden. Hierfür wurden wieder die Stromstärke und die Spannung gemessen. Da es nur einen Draht gab, wurden Messungen mit doppelt, dreifach und vierfach gelegtem Draht durchgeführt. Da der Draht jeweils nach den Messungen übereinander gelegt wurde, wurde die Längenmessung L nur einmal durchgeführt. Es wurde die gleiche Schaltung wie in Versuchsteil 2 verwendet.

3.4 Versuchsteil 4

Im letzten Teil des Versuchs wurden für verschiedene Materialien Einzelmessungen der Spannung und Stromstärke durchgeführt, um einen groben Wert für den spezifischen Widerstand zu erhalten. Hierfür wurde erneut Schaltung 3 aus Abb. 2 verwendet. Um einen möglichst geringen relativen Fehler für die Drahtlänge bei der Messung mit dem Maßband zu erhalten, wurde eine möglichst große effektive Länge gewählt. Dann wurden Einzelmessungen der Stromstärke I und der Spannung U für Kupfer, Silber und Nickel durchgeführt. Die Durchmesser der Drähte wurden erneut mit einer Bügelmessschraube gemessen.

4 Auswertung

4.1 Versuchsteil 1

Im ersten Schritt wurde für jede der sechs Einzelmessungen mithilfe von

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

der Widerstand des Drahtes bestimmt. Der Fehler ergibt sich dabei aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung durch

$$s_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial U} s_U\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I} s_I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{s_U}{I}\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} s_I\right)^2}.$$

Die so bestimmten Widerstände sind in Tabelle 2 eingetragen.

Aus den Widerständen R , dem Durchmesser d und der effektiven Drahtlänge L wurde dann mit

$$\rho = A \frac{R}{L} \quad (2)$$

der spezifische Widerstand des Drahtes bestimmt, wobei $A = \pi(d/2)^2$ die Querschnittsfläche des Drahts ist. Dabei gehen wir von einem Zylinderförmigen Draht mit konstantem Durchschnitt aus. Die Unsicherheit des spezifischen Widerstands s_ρ ergibt sich mit

$$s_\rho = \sqrt{\left(\frac{\pi d U}{2 I L} s_d\right)^2 + \left(\frac{\pi d^2}{4 I L} s_U\right)^2 + \left(-\frac{\pi d^2 U}{4 I^2 L} s_I\right)^2 + \left(-\frac{\pi d^2 U}{4 I L^2} s_L\right)^2} \quad (3)$$

wieder aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Die einzelnen Beiträge von d, L, U, I zur Unsicherheit des spezifischen Widerstands s_ρ sind in Tabelle 1 aufgelistet. Es fällt auf, dass der Beitrag von keiner der Eingangsgrößen deutlich größer als der der anderen ist, alle bewegen sich in einem Bereich von $10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Schaltung	$\left(\frac{\pi d U}{2 I L} s_d\right)$ in $\Omega \text{ m}$	$\left(\frac{\pi d^2}{4 I L} s_U\right)$ in $\Omega \text{ m}$	$\left(-\frac{\pi d^2 U}{4 I^2 L} s_I\right)$ in $\Omega \text{ m}$	$\left(-\frac{\pi d^2 U}{4 I L^2} s_L\right)$ in $\Omega \text{ m}$
1	$1,23 \times 10^{-8}$	$1,74 \times 10^{-8}$	$3,53 \times 10^{-8}$	$1,23 \times 10^{-8}$
2	$1,58 \times 10^{-8}$	$1,31 \times 10^{-8}$	$2,58 \times 10^{-8}$	$1,58 \times 10^{-8}$
3	$1,01 \times 10^{-8}$	$1,96 \times 10^{-8}$	$1,94 \times 10^{-8}$	$1,01 \times 10^{-8}$
4	$1,08 \times 10^{-8}$	$1,19 \times 10^{-8}$	$1,73 \times 10^{-8}$	$1,08 \times 10^{-8}$
5	$4,30 \times 10^{-9}$	$1,73 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-9}$
6	$4,47 \times 10^{-9}$	$3,17 \times 10^{-8}$	$7,43 \times 10^{-9}$	$4,47 \times 10^{-9}$

Tabelle 1: Durch die Stromstärke I und die Spannung U berechneten Widerstände und spezifischen Widerstände des Drahts mit Fehlern bei den unterschiedlichen Schaltungen.

Auch die Werte für den spezifischen Widerstand sind in Tabelle 2 eingetragen.

Schaltung	R in Ω	ρ in $10^{-7} \Omega \text{ m}$
1	$0,51 \pm 0,04$	$5,0 \pm 0,6$
2	$0,65 \pm 0,03$	$6,4 \pm 0,6$
3	$0,42 \pm 0,03$	$4,1 \pm 0,4$
4	$0,45 \pm 0,02$	$4,3 \pm 0,4$
5	$0,18 \pm 0,02$	$1,7 \pm 0,2$
6	$0,18 \pm 0,03$	$1,8 \pm 0,4$

Tabelle 2: Durch die Stromstärke I und die Spannung U berechneten Widerstände und spezifischen Widerstände des Drahts mit Fehlern bei den unterschiedlichen Schaltungen.

Mittelung der berechneten spezifischen Widerstände liefert

$$\rho = (3,9 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \text{m},$$

wobei für die Unsicherheit die Standardabweichung des Mittelwerts verwendet wurde.

Die berechneten spezifischen Widerstände für die verschiedenen Schaltungen sowie der Mittelwert und die Standardabweichung sind in Abb. 3 eingezeichnet.

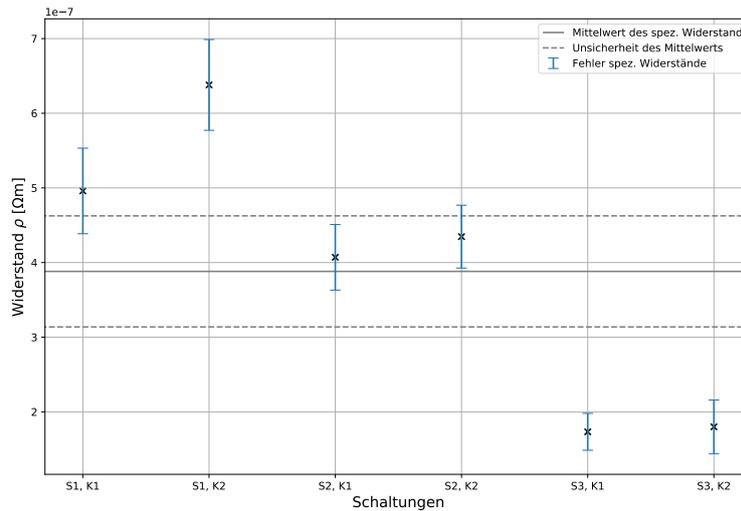


Abbildung 3: Die berechneten spezifischen Widerstände ρ von Tantal für die verschiedene Schaltungen mit Unsicherheiten sowie der Mittelwert mit der Standardabweichung des Mittelwerts. S_i bezeichnen dabei die Schaltpläne in Abb. 2, K_1 bezeichnet die Kombination mit analogem Voltmeter und digitalem Amperemeter, K_2 die umgekehrte Kombination.

4.2 Versuchsteil 2

Für die verschiedenen Drahtlängen wurde wie im ersten Versuchsteil der Widerstand R aus der Stromstärke I und der Spannung U berechnet. Die Drahtlängen L konnten zwar mit einem geschätzten Fehler von $s_{L,1} = 0,1 \text{ cm}$ relativ genau am Maßband abgelesen werden, allerdings war der Draht so verbogen, dass er nicht gerade an das Maßband angelegt werden konnte. Der so entstandene Fehler auf die Drahtlänge wurde auf $s_{L,2} = 1 \text{ cm}$ geschätzt. Da dieser Fehler wesentlich größer als $s_{L,1}$ ist, wurde für die weiteren Berechnungen $s_{L,2}$ verwendet.

Der Zusammenhang des Widerstands R und der Drahtlänge L ergibt sich durch

$$R = \frac{\rho}{A} L. \quad (4)$$

Bei einer Auftragung von R gegen L erwartet man also einen linearen Zusammenhang mit einer Steigung von ρ/A . Die Auftragung ist in Abb. 4 zu sehen und die Werte für die Auftragung sind in Tabelle 3.

Die aus der linearen Regression $R = b \cdot L + a$ erhaltenen Parameter betragen

$$b = (1,01 \pm 0,17) \Omega \text{m}^{-1}$$

$$a = (0,13 \pm 0,05) \Omega.$$

L in m	R in Ω
$0,502 \pm 0,010$	$0,646 \pm 0,016$
$0,461 \pm 0,010$	$0,580 \pm 0,016$
$0,420 \pm 0,010$	$0,70 \pm 0,03$
$0,376 \pm 0,010$	$0,454 \pm 0,012$
$0,352 \pm 0,010$	$0,368 \pm 0,010$
$0,312 \pm 0,010$	$0,473 \pm 0,013$
$0,252 \pm 0,010$	$0,370 \pm 0,016$
$0,208 \pm 0,010$	$0,324 \pm 0,010$
$0,182 \pm 0,010$	$0,333 \pm 0,011$
$0,152 \pm 0,010$	$0,316 \pm 0,010$
$0,121 \pm 0,010$	$0,265 \pm 0,009$

Tabelle 3: Werte für die Auftragung des Widerstands R gegen die Drahtlänge L

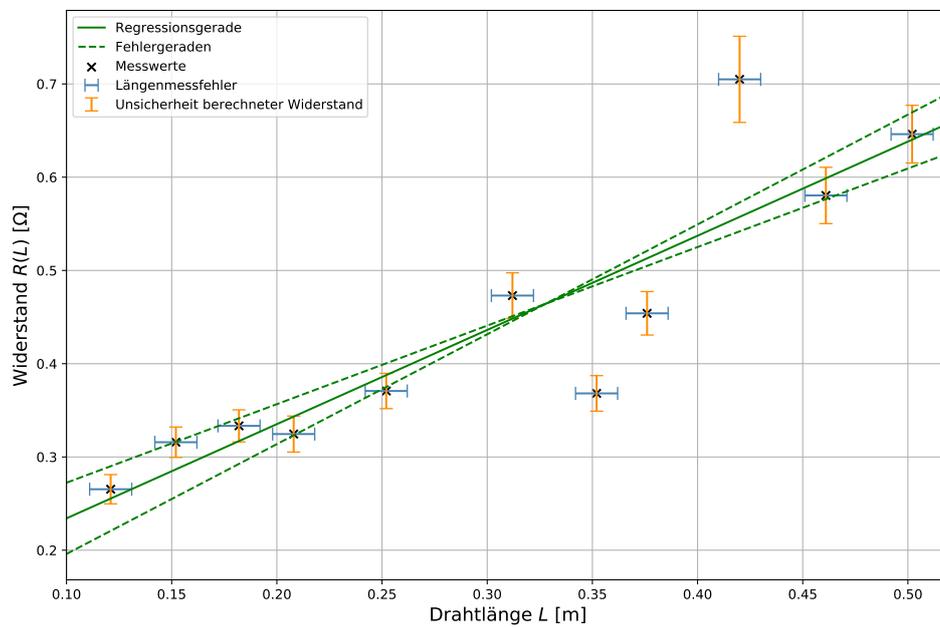


Abbildung 4: Auftragung des Widerstands R gegen die Drahtlänge L

Aus dem mit $d = (0,50 \pm 0,02)$ mm bestimmten Durchmesser des Drahtes und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wurde mit

$$A = \pi \left(\frac{d^2}{2} \right) \quad (5)$$

die Querschnittsfläche

$$A = (0,20 \pm 0,06) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (6)$$

berechnet. Aus dieser und der Steigung der Regressionsgerade konnte dann mithilfe von Gleichung (4) der spezifische Widerstand von Tantal

$$\rho = (2,0 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$$

bestimmt werden.

4.3 Versuchsteil 3

Aus den Einzelmessungen der Stromstärke I und der Spannung U wurde analog zum ersten Versuchsteil der Widerstand R berechnet. Da es diesmal möglich war, den Draht relativ gerade an das Maßband anzulegen, wurde für die Fehlerrechnung der geschätzte Ablesefehler von $s_{L,3} = 0,5$ cm verwendet. Da der Draht an beiden Enden am Maßband angelegt wurde, ergibt sich die Länge aus der Differenz der abgelesenen Werte und die Unsicherheit aus Fehlerfortpflanzung der Ablesefehler an beiden Drahtenden zu

$$L = (0,118 \pm 0,007) \text{ m}. \quad (7)$$

Da der Draht nur übereinandergelegt wurde, ergibt sich die Gesamtquerschnittsfläche A durch Multiplikation der Querschnittsfläche des Drahtes mit der Anzahl der Lagen n . Man erhält für die Gesamtquerschnittsfläche

$$A_n = n\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2.$$

Mit Gleichung (4) erhält man

$$R(n) = \frac{\rho L}{A_n} = \frac{4\rho L}{\pi d^2} \frac{1}{n} = \frac{\rho L}{A_1} \frac{1}{n}$$

und erwartet somit bei Auftragung von R gegen $1/n$ einen linearen Zusammenhang mit einer Steigung von $\rho L/A_1$. Hierbei ist mit A_1 die einfache Querschnittsfläche des Drahtes gemeint. Die Auftragung ist in Abb. 5 zu sehen.

Die aus der linearen Regression $R = m \cdot \frac{1}{n} + c$ erhaltenen Parameter sind:

$$\begin{aligned} m &= (0,15 \pm 0,05) \Omega \\ c &= (0,08 \pm 0,03) \Omega \end{aligned}$$

Mit $\rho = mA_1/L$ lässt sich dann mit der Steigung der Regressionsgeraden m und der in Gleichung (7) berechneten Länge wieder der spezifische Widerstand

$$\rho = (2,4 \pm 0,9) \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$$

bestimmen. Dafür wurde für A_1 der in Gleichung (6) berechnete Wert verwendet, in den der Durchmesser des Drahtes mit seinem Fehler einfließt.

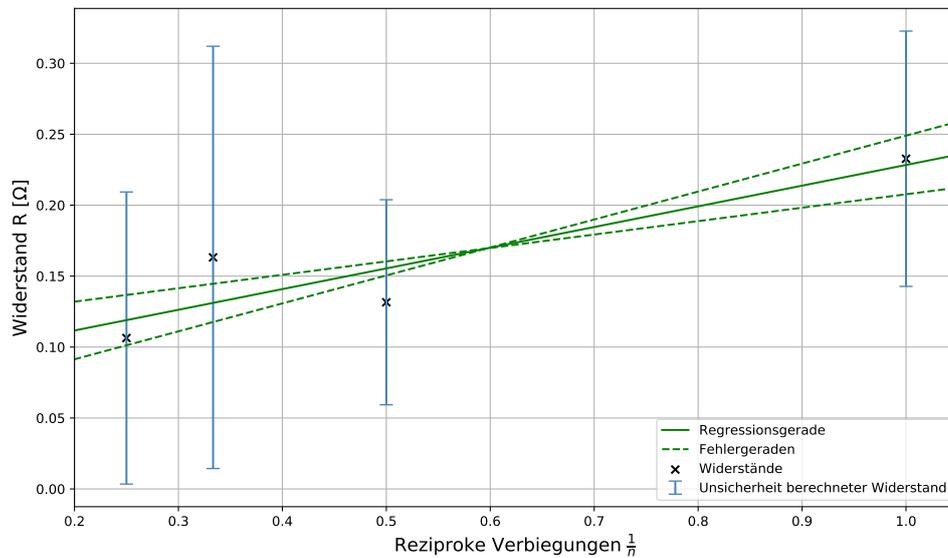


Abbildung 5: Auftragung des Widerstands R mit Unsicherheiten gegen den Kehrwert der Anzahl der Faltungen des Drahts $1/n$. Mit den Daten wurde eine lineare Regression durchgeführt, die zugehörige Regressionsgerade sowie die Fehlergeraden sind auch eingezeichnet.

4.4 Versuchsteil 4

Auch in diesem Versuchsteil gab es das Problem, dass der Draht nicht gerade an das Maßband angelegt werden konnte. Obwohl der geschätzte Ablesefehler der Drahtlänge wie zuvor $s_L = 0,1$ cm betrug, wurde die effektive Ungenauigkeit der Drahtlänge für Kupfer (Cu), Silber (Ag), und Nickel (Ni) auf

$$s_{L,Cu} = 0,5 \text{ cm}$$

$$s_{L,Ag} = 0,3 \text{ cm}$$

$$s_{L,Ni} = 0,3 \text{ cm}$$

geschätzt.

Analog zum ersten Versuchsteil wurde aus Gleichungen (1) und (2) der Widerstand R und der spezifische Widerstand ρ bestimmt. Auch hier ergab sich der Fehler auf den spezifischen Widerstand durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4 eingetragen. Zum Vergleich sind auch die Werte für Tantal aus Versuchsteil 2 eingetragen. Der Wert des zweiten Versuchsteils wurde verwendet, da in die Berechnung dieses Werts im Vergleich zum ersten und dritten Versuchsteil viele Messwerte eingeflossen sind und deshalb eine höhere Genauigkeit erwartet werden kann. In Abb. 6 sind die gemessenen Werte für die spezifischen Widerstände zusammen mit ihren Literaturwerten [1, 2, 3, 4] eingetragen.

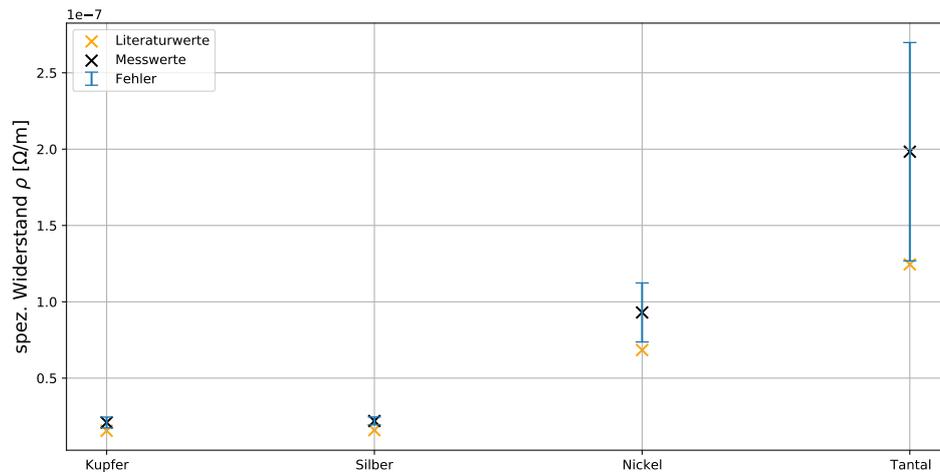


Abbildung 6: spezifische Widerstände ρ von Kupfer, Silber, Nickel und Tantal sowie ihre Fehler und die zugehörigen Literaturwerte [1, 2, 4, 3]. Für Kupfer, Silber und Nickel wurden die spezifischen Widerstände aus Einzelmessungen der Spannung U und der Stromstärke I bestimmt, für Tantal wurden Messungen von U und I für verschiedene Drahtlängen durchgeführt und der spezifische Widerstand aus einer linearen Regression bestimmt.

Material	ρ in $10^{-8} \Omega \text{ m}$
Kupfer	$2,1 \pm 0,4$
Silber	$2,2 \pm 0,3$
Nickel	$9,3 \pm 1,9$
Tantal	$20,0 \pm 0,7$

Tabelle 4: Berechnete Werte für den spezifischen Widerstand ρ für Kupfer, Silber und Nickel mit dem Wert für Tantal aus Versuchsteil 2

5 Diskussion

5.1 Versuchsteil 1

In diesem Versuchsteil wurde für die verschiedenen in Abb. 2 dargestellten Schaltungen Messungen der Stromstärke und der Spannung durchgeführt. Aus den Messungen wurde für jede Schaltung der Widerstand R und der spezifische Widerstand ρ berechnet. Die Werte sind in Tabelle 2 eingetragen. Durch Mittelung erhält man ein Endergebnis für den spezifischen Widerstand von

$$\rho_1 = (3,9 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \text{ m},$$

wobei sich der Fehler aus der Standardabweichung des Mittelwerts ergibt. Die Messwerte mit den Unsicherheiten sind in Abb. 3 dargestellt.

Als Endergebnis wurde der gemittelte Wert verwendet, da manche Schaltungen stromrichtig und andere spannungsrichtig sind. Um ein möglichst repräsentatives Ergebnis zu erhalten wurde also der Wert verwendet, in den die Messwerte aller Schaltungen mit einfließen.

Bei Vergleich mit dem Literaturwert [1] erhält man einen t-Wert von

$$t_1 = 3.54.$$

Damit ist der von uns berechnete Wert nicht mit dem Literaturwert verträglich. Dies kann viele Ursachen haben: Bei der Berechnung des spezifischen Widerstands wurde die Annahme getroffen, dass der Draht perfekt rund war. Da diese Größe quadratisch in die Berechnung von R und ρ einfließt, könnte das durchaus das Ergebnis verfälschen. Die Längenmessung war auch alles andere als ideal, und mögliche Fehler der effektiven Drahtlänge, die durch Fehler beim Befestigen der Krokodilklemmen entstanden sein können, wurden nicht berücksichtigt. Die wichtigste Annahme, die getroffen wurde, war allerdings eine andere: Bei der Bestimmung von R und ρ wurden Formeln verwendet, die für ohmsche Materialien gelten. Es ist durchaus möglich, dass die verwendeten Drahte keine perfekten ohmschen Widerstände waren und allein dadurch die Messung verfälscht wurde.

5.2 Versuchsteil 2

Im zweiten Versuchsteil wurde die Abhängigkeit des Widerstands R des Drahtes von der verwendeten Drahtlänge L untersucht. Aus der linearen Regression wurde wieder der spezifische Widerstand für Tantal

$$\rho_2 = (2,0 \pm 0,7) \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$$

berechnet. Bei Vergleich mit dem Literaturwert [1] erhält man einen t-Wert von

$$t_2 = 1.03 \tag{8}$$

Da der t-Wert deutlich unter 2 liegt, ist dieser Wert mit dem Literaturwert verträglich. Dies ist die beste Übereinstimmung aller ermittelten Werte mit dem Literaturwert, was eindeutig an der verwendeten Methode liegt. Im Vergleich zum ersten Versuchsteil haben wir uns auf die stromrichtige Schaltung 3 beschränkt, die aufgrund des geringen Widerstandes des Drahtes am Besten zum Versuch passt. Außerdem haben wir mit Abstand die meisten Messwerte aller Versuchsteile aufgenommen. Dadurch konnten wir eine lineare Regression machen, wodurch wir im Gegensatz zu Versuchsteil vier ein besseres Ergebnis ermitteln konnten. Im Vergleich zu Versuchsteil drei ist das Ergebnis außerdem besser, da die lineare Regression auf mehr Messungen beruht und die durch das Umbiegen des Drahtes in Versuchsteil drei entstandenen Probleme nicht existieren. Gegenüber Versuchsteil eins existiert außerdem noch der Vorteil, dass die lineare Regression die Eliminierung des y-Achsenabschnittes, der ein systematischen Fehler ist, erlaubt.

5.3 Versuchsteil 3

Im dritten Versuchsteil wurde die Abhängigkeit des Widerstands R vom Drahtquerschnitt A untersucht. Da auch hier aufgrund der Theorie ein linearer Zusammenhang erwartet wurde, wurden R und A aufgetragen und eine lineare Regression durchgeführt. Auch in diesem Versuchsteil konnte der spezifische Widerstand von Tantal

$$\rho = (2,4 \pm 0,9) \times 10^{-7} \Omega \text{ m} \quad (9)$$

durch die Regression bestimmt werden. Bei Vergleich mit dem Literaturwert [1] ergibt sich hier ein t-Wert von

$$t_3 = 1.3, \quad (10)$$

mit dem die beiden Werte verträglich sind. Trotzdem ist diese Methode zur Bestimmung etwas fraglich, da wir lediglich vier Messwerte aufnehmen konnten. Dies lag daran, dass wir keine dickeren Drähte verwenden konnten, da diese nicht verfügbar waren. Deshalb mussten wir den Draht mehrfach biegen um die Fläche verändern zu können. Dadurch mussten wir die Länge des Drahtes relativ kurz wählen, weshalb der Fehler bei der Längenmessung relativ stark ins Gewicht fällt. Dies verstärkt sich zusätzlich dadurch, dass jedes umgebogene Stück durch die Verformung des Drahtes wohl eine leicht andere Länge als die anderen hatte. Darüber hinaus ist es fraglich, ob durch die Berührung der einzelnen Leiterstücke die tatsächliche effektive Fläche der von uns angenommenen Fläche entspricht und nicht eine Andere ist oder innerhalb der Länge der Strecke zwischen den Krokodilklemmen schwankend ist. Außerdem könnte es sein, dass durch die Befestigung mehrerer Drahtstücke in den Krokodilklemmen nicht alle Drahtstücke einen guten Kontakt zur Klemme hatten. Dieser ist jedoch notwendig, damit das Drahtstück den Strom tatsächlich so wie von uns angenommen leitet.

Bei Vergleich der in den ersten drei Versuchsteilen erhaltenen Werte für den spezifischen Widerstand ρ_1 , ρ_2 und ρ_3 erhält man t-Werte von

$$t_{1,2} = 1.84 \quad t_{2,3} = 0.39 \quad t_{1,3} = 1.26. \quad (11)$$

Da alle dieser Werte unter 2 liegen, sind sie alle miteinander verträglich. Besonders auffällig ist, dass die Werte für ρ von Versuchsteil zwei und drei sehr gut miteinander verträglich sind. Dies könnte auf einen systematischen Fehler hinweisen, der durch die Regression in den beiden Versuchsteilen berücksichtigt wurde, aber den Wert im ersten Versuchsteil verfälscht haben könnte.

5.4 Versuchsteil 4

Im vierten Versuchsteil wurden zum Abschluss Einzelmessungen für verschiedene Materialien durchgeführt, um grobe Richtwerte für den spezifischen Widerstand zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 eingetragen. Auch die t-Werte der spezifischen Widerstände von Kupfer ρ_{Cu} Silber ρ_{Ag} und Nickel ρ_{Ni} mit den zugehörigen Literaturwerten [1, 2, 3, 4] stehen in Tabelle 5.

Material	ρ in $10^{-8} \Omega \text{ m}$	t-Wert mit dem Literaturwert
Kupfer	2,1 ± 0,4	1,54
Silber	2,2 ± 0,3	2,33
Nickel	9,3 ± 1,9	1,27

Tabelle 5: Berechnete Werte für den spezifischen Widerstand ρ für Kupfer, Silber und Nickel sowie ihre t-Werte bei Vergleich mit den Literaturwerten [1, 2, 3, 4]

Die T-Werte sind für Kupfer und Nickel verträglich, lediglich für Silber liegt er über zwei. Dass die t-Werte alle deutlich höher sind als die in Versuchsteil zwei und drei erhaltenen Werte deutet daraufhin, dass wir mehr Messungen hätten durchführen sollen. Dafür dass wir lediglich eine Messung mit vielen Ungenauigkeiten durchgeführt haben, sind die Werte, die wir erhalten haben, jedoch relativ nah an den Literaturwerten.

5.5 Weitere Fehlerquellen

Eine wichtige Fehlerquelle waren die Multimeter, mit denen Stromstärke und Spannung gemessen wurden. Neben dem digitalen Multimeter wurde ein Analoges genutzt, dessen Zeiger einige Millimeter von der Skala entfernt war. Hier mussten die Messwerte exakt senkrecht abgelesen werden. Sobald man minimal von der Seite schaute ergaben sich leicht andere Werte. Dadurch kam es zu Messungenauigkeiten. Zudem schwankte der Zeiger, wenn man das Gerät leicht bewegte.

Ein weiteres Problem war, dass die Multimeter interne Ungenauigkeiten haben. Ab Teil zwei verwendeten wir die Multimeter als analoges Voltmeter (AVM) und als digitales Amperemeter (DAM), was im Nachhinein nicht so gut war, weil das digitale Multimeter bei der Messung der Stromstärke eine deutlich höhere Messungenauigkeit aufweist als bei der Spannungsmessung, wohingegen die Fehler beim analogen Multimeter für Strom- und Spannungsmessung gleich groß sind.

Die Verwendung von Krokodilklemmen hatte auch einige Nachteile. So wurde zum Beispiel der gemessene Widerstand der Drähte verfälscht, weil teilweise Wackelkontakte beim Übergang der Krokodilklemmen zum Draht entstanden und es sich bei den Kabeln nicht um ideale Leiter mit Eigenwiderstand Null handelte.

Auch sind die untersuchten Drähte keine perfekten Ohmschen Widerstände mit homogener Struktur. Es gibt vermutlich Stellen mit höherem spezifischen Widerstand als andere, was durch das ständige Verbiegen und die dadurch entstehenden Mikrorisse sicher verschlimmert wurde. Auf der Drahtoberfläche könnte sich eine Oxidschicht mit einem anderen (wahrscheinlich höheren) spezifischen Widerstand befinden als der des Materiales. Es ist also möglich, dass die lose aufgesteckten Krokodilklemmen das eigentliche Material nicht erreicht haben.

Je nach Schaltung fällt ein Teil der gemessenen Spannung am Amperemeter ab oder ein Teil des gemessenen Stroms fließt durch das Voltmeter. Diese Verluste sind mit dem Multimeter nicht messbar und daher eine Fehlerquelle.

Bei der Längenmessung war eine schwerwiegende Fehlerquelle der ungerade Draht. Durch die vielen Verbiegungen war es trotz starkem Spannen nicht möglich, den Draht vollkommen gerade an das Metermaß zu legen und wir mussten einen recht großen Längenmessfehler wählen. Es wurde für die Längenmessung immer die Differenz zweier Punkte des Metermaßes berechnet für die es jeweils einen Ablesefehler gab, dh. wir hatten zwei Ablesefehler pro Längenmessung zusätzlich zum (im Vergleich deutlich größeren) Längenmessfehler wegen des verbogenen Drahtes.

Ein weiterer Fehler kam bei der Messung des Durchmesser zustande. So wurden sehr dünne Drahtdurchmesser (unter 1mm) verwendet, weshalb das Verhältnis von geschätztem Fehler zu Messwert relativ groß war. Zudem war die Messung ungenau, weil die Drähte nicht perfekt rund waren. Der Messschieber funktionierte mit einem Gewinde, weshalb es schwer war einzuschätzen wie fest er auf den Draht drückte. Es könnte gut möglich sein, dass wir dabei die Drähte etwas eingedrückt haben.

5.6 Verbesserungsvorschläge

Eine offensichtliche Verbesserung wäre die Verwendung von zwei digitalen Multimetern. Zusätzlich könnte man hochwertigere Multimeter mit größeren internen Genauigkeiten verwenden.

Anstatt Krokodilklemmen zu verwenden, könnte man die zu untersuchenden Drähte mit den Verbindungskabeln verlöten oder verschweißen. Die Verbindungskabel selbst sollten aus einem besser leitenden Material, oder wenn möglich einem Supraleiter bestehen. Um die möglicherweise störende Oxidschicht zu vermeiden, könnte man die zu untersuchenden Drähte bis kurz vor der Durchführung vakuumiert aufbewahren. Die Verwendung von kürzeren Verbindungskabeln würde den störenden Eigenwiderstand dieser verringern.

Man könnte für jede Durchführung einen neuen, geraden Draht verwenden um den Längenmessfehler zu vermindern. Die Verwendung eines besseren Metermaßes, bei dem die gesamte Skala lesbar ist, würde die Ablesegenauigkeit verbessern. Generell könnte man natürlich auch eine andere Längenmessmethode (optisch oder akustisch) verwenden.

Die Verwendung von Drähten mit größeren Durchmessern würde den Messfehler verkleinern. Zudem könnte man hochwertig hergestellte Drähte verwenden, die runder sind als die verwendeten Drähte. Anstatt die Durchmesser mithilfe einer Bügelmessschraube zu messen könnte man genormte Drähte verwenden deren Durchmesser und Ungenauigkeiten vom Hersteller angegeben wurden.

A Anhang

A.1 Rohdaten

V 44 1.3.22 Material: Taubtal

1) Schaltung 1: Analoges Voltmeter, digitales Amperemeter

	U	I
Schaltung 2: Digitales VM, Analoges AM:	$1,23 \pm 0,01 \text{ V}$	$1,06 \pm 0,05 \text{ A}$
Schaltung 3: analoges VM, digitales AM	$0,90 \pm 0,02 \text{ V}$	$2,16 \pm 0,01 \text{ A}$
Schaltung 4: digitales VM, analoges AM	$0,89 \pm 0,01 \text{ V}$	$2,00 \pm 0,05 \text{ A}$
Schaltung 5: analoges VM, digitales AM	$0,47 \pm 0,01 \text{ V}$	$2,65 \pm 0,05 \text{ A}$
Schaltung 6: Digitales VM, analoges AM	$0,35 \pm 0,05 \text{ V}$	$1,90 \pm 0,05 \text{ A}$

Einrichtung: analog: VM: 2,5, AM: 10 A
 ±(4,5% + Ablesfehler) ±(1,5% + Ablesfehler)
 digital: VM: 2, AM: 10 A
 ±(0,5% + 1 dig) ±(2,1% + 5 dig)

Linienbreite: 100,0 ± 0,5 cm
 Pulsbreite: 120,1 ± 0,3 cm
 bekannte Drahtlänge: ~~100,0 ± 0,5 cm~~
 Durchmesser des Drahtes: $d = 0,5 \pm 0,02 \text{ mm}$

Drahtlängenungenauigkeit: ± 1 cm

3) U in V I in A

U in V	I in A
0,84 ± 0,02	2,75 ± 0,05
0,50 ± 0,02	3,88 ± 0,1
0,55 ± 0,02	3,37 ± 0,02
0,95 ± 0,02	4,23 ± 0,05

Länge: linke Ende: 100,0 ± 0,5 cm rechte Ende: 111,8 ± 0,5 cm

4) Material U in V I in A

Material	U in V	I in A	linke Ende	rechte Ende
Kupfer	0,62 ± 0,02	2,95 ± 0,01	100,0 ± 0,5	119,0 ± 0,5
Silber	0,29 ± 0,02	5,04 ± 0,01		115,1 ± 0,1
Nickel	0,34 ± 0,02	0,66 ± 0,01		114,1 ± 0,1

Durchmesser Drahtlängenun-
genauigkeit

Kupfer	0,25 mm ± 0,05 mm	0,5 cm
Silber	0,50 ± 0,05 mm	0,3 cm
Nickel	0,20 ± 0,05 mm	0,3 cm

*- Silber
VI 01.02.2022*

Literatur

- [1] *Spektrum: Lexikon der Physik*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/tantal/14319>. (accessed: 02.03.2022).
- [2] *Spektrum: Lexikon der Physik*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/silber/13298>. (accessed: 02.03.2022).
- [3] *Spektrum: Lexikon der Physik*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kupfer/8640>. (accessed: 02.03.2022).
- [4] *Spektrum: Lexikon der Physik*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/nickel/10335>. (accessed: 02.03.2022).