

Laborbericht: Messtechnik und Fehlerrechnung

Helen Klos
Matrikelnummer: 2222449

Sandro Fahrion
Matrikelnummer: 6684592

29.-30.10.2024



Contents

Einführung und Überblick	3
1 Versuch 1: Kapazitätsmessung eines unbekannten Kondensators (Black Box)	4
1.1 Zielsetzung	4
1.2 Bauteile und Messgeräte	4
1.3 Messkonzept	5
1.4 Messergebnisse	7
2 Versuch 2: Passiver Zweipol (Black Box)	9
2.1 Zielsetzung	9
2.2 Bauteile und Messgeräte	9
2.3 Messkonzept	10
2.4 Messergebnisse	11
3 Versuch 3: Leistungsaufnahme eines elektrischen Widerstands	12
3.1 Zielsetzung	12
3.2 Bauteile und Messgeräte	12
3.3 Messkonzept	13
3.4 Messergebnisse	13
4 Versuch 4: Widerstandsmessung mittels Vierdrahtmethode	14
4.1 Zielsetzung	14
4.2 Bauteile und Messgeräte	14
4.3 Messkonzept	14
4.4 Messergebnisse	16
5 Versuch 5: Statistik	17
5.1 Zielsetzung	17
5.2 Bauteile und Messgeräte	17
5.3 Messkonzept	17
5.4 Messergebnisse	18
6 Versuch 6: Aktiver Tiefpass erster Ordnung	21
6.1 Zielsetzung	21
6.2 Bauteile und Messgeräte	21
6.3 Messkonzept	22
6.4 Messergebnisse	22
7 Diskussion	22

Einführung und Überblick

Die moderne Messtechnik bildet die Grundlage zahlreicher technischer sowie naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Messergebnisse niemals vollständig fehlerfrei sind. Die Ursachen für Messfehler und -ungenauigkeiten sind vielfältig. Als Ursachen für Messfehler und -ungenauigkeiten können beispielsweise eine fehlende Kalibrierung, Linearität und Stabilität der verwendeten Messinstrumente oder eine mangelnde Qualität des Messobjekts genannt werden. Des Weiteren kann auch der*die Messende selbst als Ursache in Betracht gezogen werden, welcher, zum Beispiel durch eine mögliche Sehschwäche oder einen ungünstigen Winkel, die Messwerte ungenau abliest. Nicht angepasste oder unvollkommene Messmethoden können ebenfalls zu einer Verfälschung der Messung führen.

Genannte Ursachen können zu drei verschiedenen Fehlerarten führen: grobe, statistische und systematische Fehler.

In diesem Laborbericht werden Versuche beschrieben, welche die Genauigkeit verschiedener Bauteile ermitteln. Des Weiteren beschäftigen sich diese mit Fehlerrechnung

1 Versuch 1: Kapazitätsmessung eines unbekannten Kondensators (Black Box)

1.1 Zielsetzung

Das Ziel des ersten Versuchs bestand darin, die Kapazität eines unbekannten Kondensators in einer Black-Box zu bestimmen.

1.2 Bauteile und Messgeräte

Messgeräte

- Teledyne Technologies Funktionsgenerator T3AFG80 80 MHz
- Keysight Oszilloskop (DSOX1102A)
- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Oszilloskop BNC Tastkopf mit Messklemme
- Steckkabel (mehrere)
- Tru Components Steckbrett
- Bananenkabel (schwarz und rot)
- Sicherheits-Klemmprüf spitze (2 Stück)

Bauteile

- Black-Box (Nr. 18-30)
- Widerstand Nominalwert 4,7 k Ω

1.3 Messkonzept

Zu Beginn wurde die Formel der Ladekurve $u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ und der Entladekurve $u_c = U e^{-\frac{t}{RC}}$) grafisch am Computer dargestellt (siehe Figure 1).

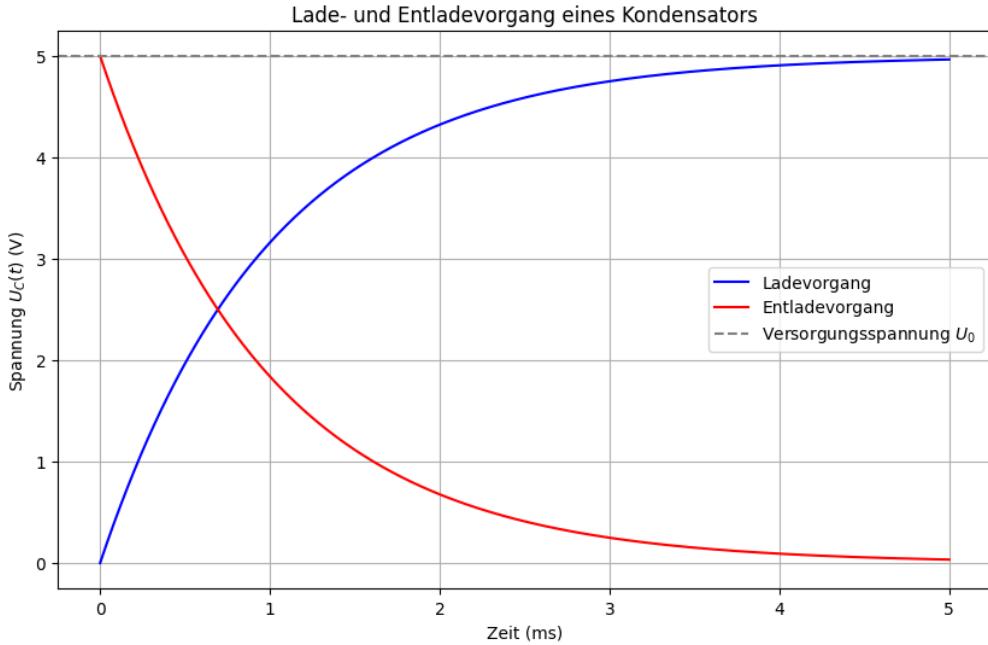


Figure 1: Ladekurve (blau) und Entladekurve (rot) eines Kondensators

Diese sollte in den folgenden Schritten mit dem Oszilloskop sichtbar gemacht werden. Hierzu wurde sich zunächst überlegt, wie der Funktionsgenerator einzustellen ist. Diese Einstellungen sind Table 1 zu entnehmen. Für die verwendete Frequenz muss dabei gelten, dass...!!!, warum einstellungen so?

Frequenz	Signalform	Amplitude	Offset
500 Hz	Rechtecksignal	5 V _{pp}	2.5 V _{dc}

Table 1: Einstellungen des Funktionsgenerators

Nachdem der Funktionsgenerator korrekt eingestellt war, wurde die Schaltung für die Messungen aufgebaut. Dabei wurde sich an der in Figure 2 dargestellten Skizze orientiert. Der, in der Skizze dargestellte, 50Ω Widerstand ist der Innenwiderstand des Funktionsgenerators. Dieser muss bei späteren Rechnungen berücksichtigt werden.

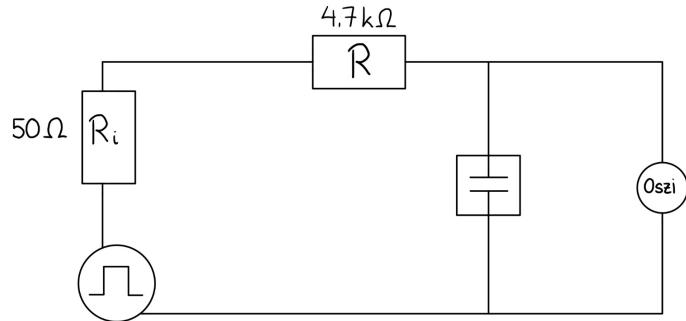


Figure 2: Schaltungsskizze

Für den Schaltungsaufbau wurde zunächst der Funktionsgenerator mit einem ""kabel, mit Masse an die Black-Box mit der Nummer 24, und mit der Versorgungsspannung an das Steckbrett angeschlossen. An den Anschluss, an dem die Versorgungsspannung anliegt, wurde ein Steckkabel angeschlossen, welches dann den 4.7Ω in Reihe schaltet. Die Black-Box wurde nun ebenfalls mit dem Steckbrett, hinter den Widerstand, verschaltet. Das Oszilloskop wurde nun parallel zur Black-Box angeschlossen. Hierfür wurde ein Oszilloskop BNC Tastkopf mit Messklemme verwendet. Die Masseklemme wurde an die Black-Box-Masse verbunden. Die Messklemme wurde mit einem weiteren Steckkabel am Steckbrett eingehakt, welches parallel zum Kondensator verläuft. Der Schaltungsaufbau ist in Figure 3 drgestellt.

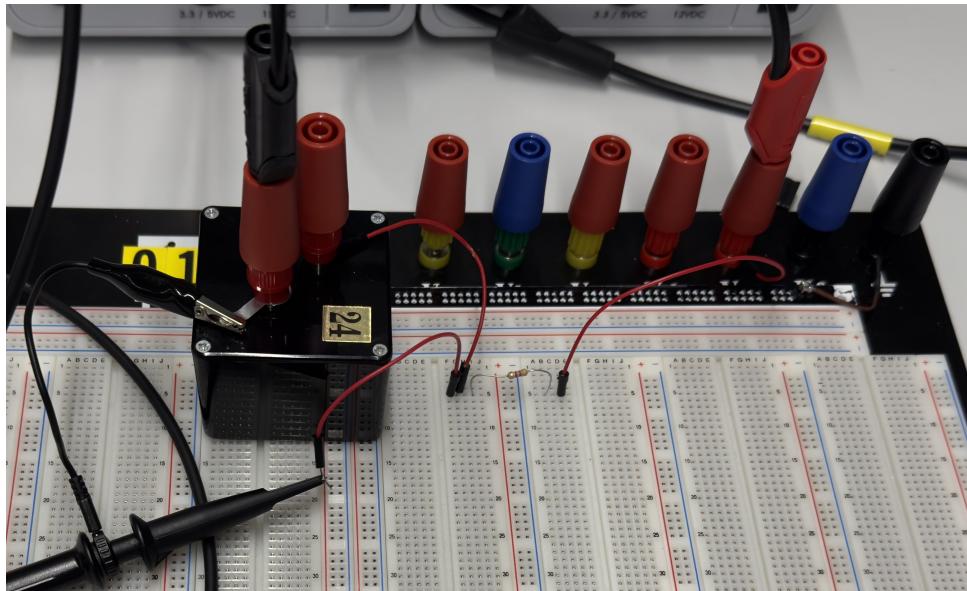


Figure 3: Schaltungsaufbau

Der Verlauf der Lade- und der Entladekurve konnte nun am Oszilloskop abgelesen werden (siehe Figure 4). Diese wurde reingezoomt (siehe Figure 5), um die Zeitkonstante Tau (τ) zu ermitteln. !!!

Anschließend an die Tau-Ermittlung sollte die Kapazität C_x des Kondensators bestimmt werden. Hierzu wurde zuerst der ohm'sche Widerstand ($4.7 \text{ k}\Omega$) mit dem Digital-Multimeter (DMM) nachgemessen. Der Widerstand wurde mit den Sicherheits-Klemmprüf spitzen, wie in Figure 6 gezeigt, gemessen. Mit diesem Widerstand, dem

Innenwiderstand des Funktionsgenerators und der ermittelten Zeitkonstante konnte nun die Kapazität des Kondensators mit der Formel $\tau = R \cdot C$ ausgerechnet werden.

$$C_x = \frac{\tau}{R} = \frac{34.2 \cdot 10^{-6} \text{s}}{4611 \Omega + 50 \Omega} = 7337 \text{ pF}$$

In Table 2 sind alle in der Schaltung und der Messanordnung vorkommenden absoluten bzw. relativen Einzelfehler aufgelistet!!!

1.4 Messergebnisse

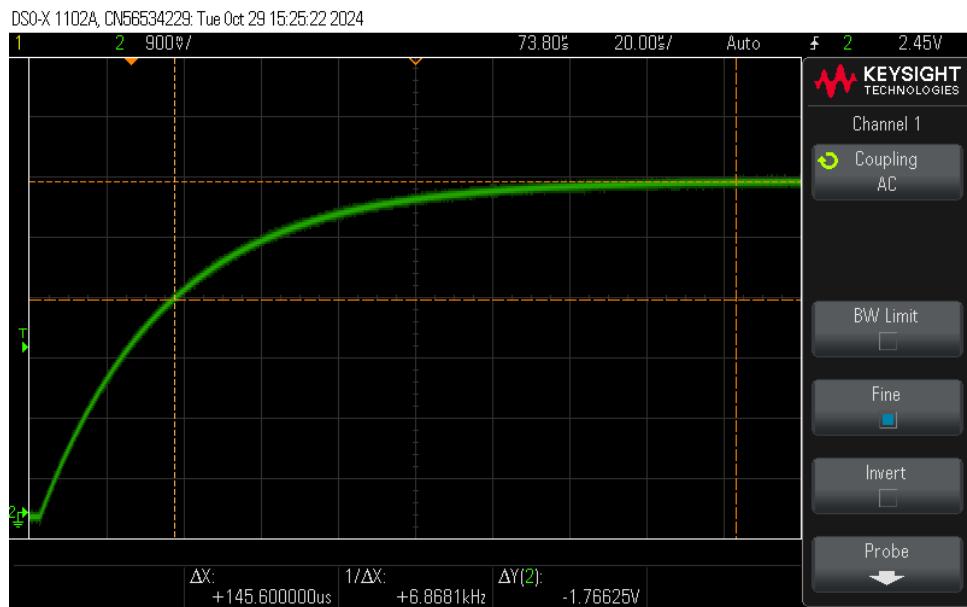


Figure 4: Ladekurve des Kondensators



Figure 5: reingezoomte Ladekurve des Kondensators für Tau-Bestimmung

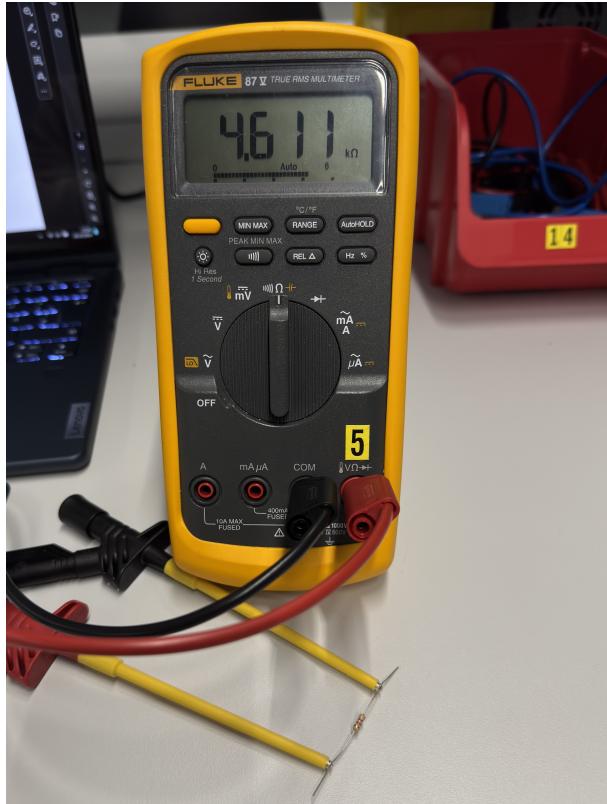


Figure 6: Messung ohm'scher Widerstand mit dem DMM

Fehlerquelle	Einfluss	typische Größe	stat. oder sys.	Berücksichtigung?	relevant?
$R = 4.7 \text{ k}\Omega$	DMM-Messung	% siehe Datenblatt	statistisch	Fehlerrechnung	Ja
Oszilloskop	R_i, C_i Tastkopf (10x) x, y - Messung Curser	$10 \mu\Omega, \sim pF$ $\approx 3 \%$ Datenblatt! Steigung beachten	systematisch statistisch statistisch	Nein < 0.5% Fehlerrechnung Fehlerrechnung	Nein Ja Ja
Funktionsgenerator	Anstiegszeit R_i Amplitude, Offset	einige ns 50Ω $\Delta R_i (\approx 1\%)$ -	systematisch systematisch statistisch systematisch	$\approx 1 \%$ Korrektur $1\% \Rightarrow \pm 0.5 \Omega$ relativ	Nein Ja Nein Nein
Kabel +5 V	Widerstand	$\approx 20 m\Omega$	systematisch	zu klein	Nein

Table 2

2 Versuch 2: Passiver Zweipol (Black Box)

2.1 Zielsetzung

Bestimmung der Bauteil-Typen (Möglichkeiten: R, L oder C) und deren Anordnung innerhalb einer Black Box.

2.2 Bauteile und Messgeräte

Messgeräte

- Teledyne Technologies Funktionsgenerator T3AFG80 80 MHz
- Keysight Oszilloskop (DSOX1102A)
- Netzgerät (NEP-8323)?
- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Oszilloskop BNC Tastkopf mit Messklemme
- Steckkabel (mehrere)
- Tru Components Steckbrett
- Bananenkabel (schwarz und rot)
- Sicherheits-Klemmprüf spitze (2 Stück)

Bauteile

- Black-Box (Nr. 1-17)
- Widerstand Nominalwert $4,7\text{ k}\Omega$

2.3 Messkonzept

Der Schaltungsaufbau des ersten Versuchs konnte so beibehalten werden. Es musste lediglich die Black-Box des ersten Versuchs durch eine Black-Box mit einer Nummer zwischen 1 und 17 ersetzt werden. In diesem Versuchsbericht wurde Nummer 6 verwendet. Diese konnte identisch zur vorherigen angeschlossen werden. Bevor die Schaltung aufgebaut wurde, wurde zunächst der Widerstand der verwendeten Black-Box mit dem DMM gemessen (siehe Figure 8). Nun wurde die Black-Box in der Schaltung integriert. Um herauszufinden, welche Bauteile sich in der Black-Box befinden und wie diese miteinander verschaltet sind, sollten die Frequenzen des Rechtecksignals verändert werden und dabei der Verlauf der Funktion auf dem Oszilloskop beobachtet werden. An dem Verlauf, welcher in Figure 9 zu sehen ist konnte mithilfe der Cursor abgelenkt werden, dass die Eingangsamplitude 5 V und die Ausgangsamplitude 2,96 V entspricht. Dazu kommt, dass es sich um ein periodisches Verhalten handelt und ein Lade- und ein Entladevorgang erkennbar sind. Daraus lässt sich schließen, dass es sich in jedem Fall um einen Kondensator handeln muss. Da bei der Widerstands-Messung der Black-Box!!!

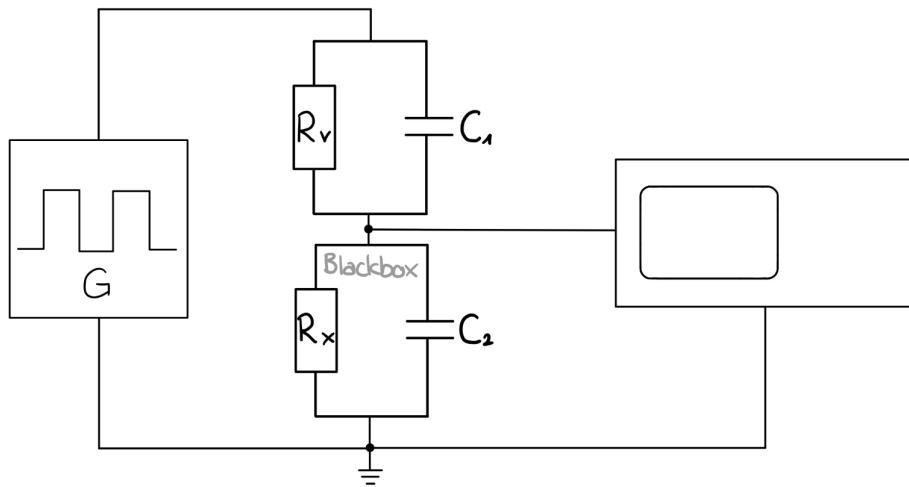


Figure 7: Schaltskizze

2.4 Messergebnisse

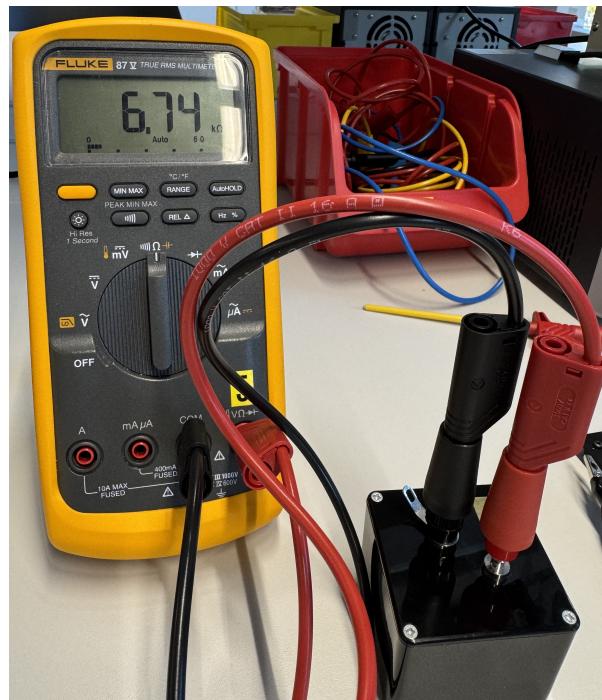


Figure 8: ...

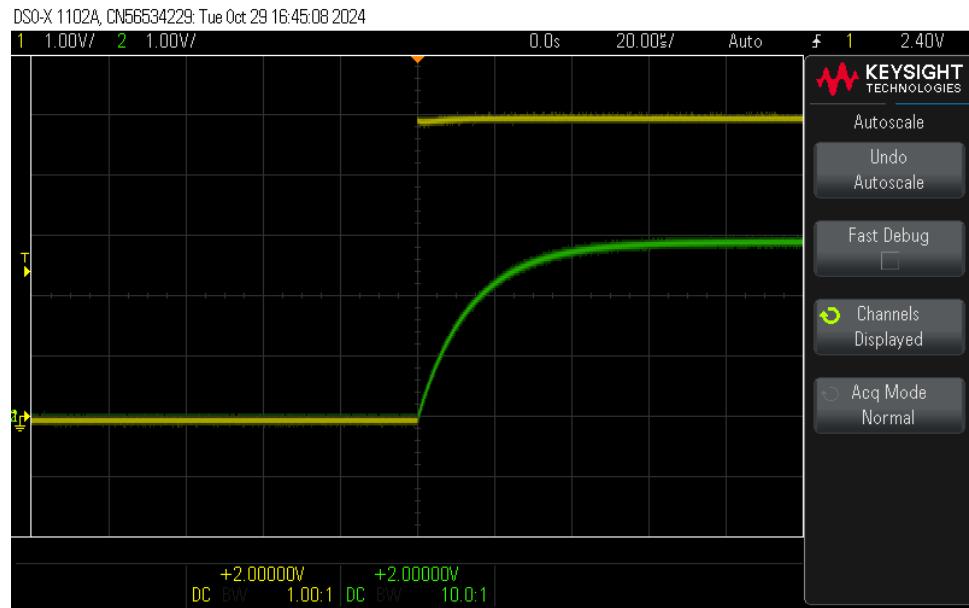


Figure 9: ...

3 Versuch 3: Leistungsaufnahme eines elektrischen Widerstands

3.1 Zielsetzung

Es soll die elektrische Leistung bestimmt werden, die bei Stromdurchfluss in einem Widerstand R anfällt.

3.2 Bauteile und Messgeräte

Messgeräte

- Netzgerät (NEP-8323)
- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Steckkabel (mehrere)
- Tru Components Steckbrett
- Bananenkabel (schwarz und rot)
- Sicherheits-Klemmprüf spitze (2 Stück)

Bauteile

- Widerstand Nominalwert $1 \text{ k}\Omega$ (2 Stück)

3.3 Messkonzept

Zu Beginn dieses Versuchs, wurden die beiden Widerstände mit dem DMM nachgemessen (siehe Table 3), um die Genauigkeit der darauf folgenden Messungen zu steigern.

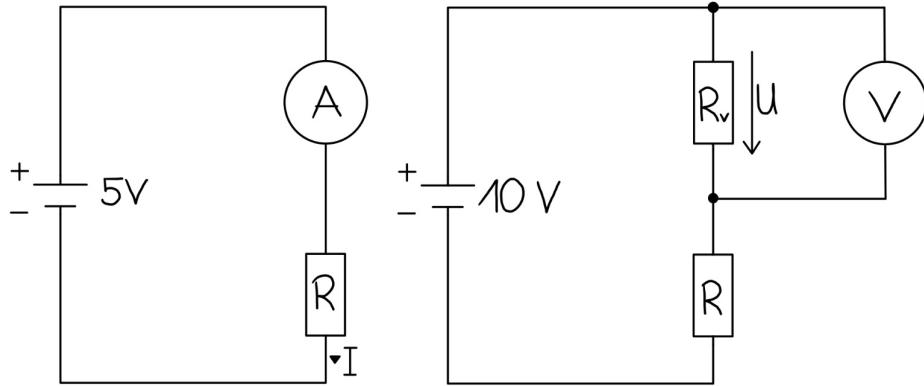


Figure 10: ...

Figure 11: ...

3.4 Messergebnisse

	gemessener Widerstand
R	988 Ω
R _v	996 Ω

Table 3: Nachmessung der Widerstände

4 Versuch 4: Widerstandsmessung mittels Vierdrahtmethode

4.1 Zielsetzung

Es soll der (sehr niederohmige) Übergangswiderstand eines Kabels inklusive seiner Steckverbinder mittels der Vierdrahtmethode gemessen werden. Der Fokus liegt darauf, möglichst Präzise den Widerstand des gesamten Kabels zu ermitteln, ohne die Werte mit der Messmethode zu verfälschen.

4.2 Bauteile und Messgeräte

- Labornetzgerät (NEP-8323)
- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Bananenkabel 2 Stück (Messobjekt und Messkabel)

4.3 Messkonzept

Das Messkonzept basiert auf der Nutzung der Vierdrahtmethode. Sie kann hohe Genauigkeit erzielen, was bei derart kleinen Widerständen, wie der eines Kabels, sehr von Vorteil ist. Im Detail wird der Messaufbau so realisiert, dass zwei separate Strom- und Spannungspfade verwendet werden. Dadurch, dass über die Messleitung kein Strom fließt, fällt dadurch dort nur sehr wenig Spannung ab und sie verfälscht so nicht den Widerstand.

Ein Multimeter hingegen würde den Messtrom über die Messleitung leiten und die dabei entstehenden Leitungswiderstände mitmessen. Diese parasitären Widerstände führen zu einer Verfälschung des Messergebnisses.

Netzteil Einstellungen:

Am Netzteil leuchtet die Anzeige für C.C (= Constant Current), was bedeutet, dass sich das Gerät im Konstantstrom Modus befindet und über Spannungsanpassungen den Strom konstant hält. Die Strombegrenzung in diesem Modus hat verschiedene Einflüsse:

- Zu niedrig: Spannungsabfall zu klein, um vom Messgerät präzise gemessen zu werden. Höhere Ströme erzeugen einen größeren Spannungsabfall, der leichter und genauer zu messen ist, insbesondere bei niederohmigen Widerständen.
- Zu hoch: Messtrom erwärmt das Objekt, wodurch der Widerstand steigt und das Ergebnis verfälscht wird.
- Zu hoch: Überlastung des Netzerätes, Abschaltung

Die Grenzen der Strombegrenzung:

- Seitens des Netzgeräts: Das Netzteil verfügt über eine maximale Stromausgabe von 3,5 A.
- Seitens der Anwendung: Die genauen Spezifikationen des Kabels sind unbekannt. Typischerweise können Bananenkabel diesen Durchmessers mit etwa 30 A belastet werden.
- Bei anderen Anwendungen:
 - Bauteilschutz: In Anwendungen, die Halbleiterbauteile oder andere empfindliche Bauteile beinhalten, darf der Strom bestimmte Bauteilgrenzen nicht überschreiten, um Zerstörung oder Funktionsbeeinträchtigungen zu verhindern.
 - Effizienz: Ein zu hoher Strom führt generell zu Energieverlusten.

Aufbau der Messschaltung:

Um den gesamten Widerstand des Kabels inklusiver seiner Steckverbindungen, wie er bei reellen Nutzungssituationen vorkommt, zu ermitteln, muss die Reihenfolge der Steckverbindungen beachtet werden.

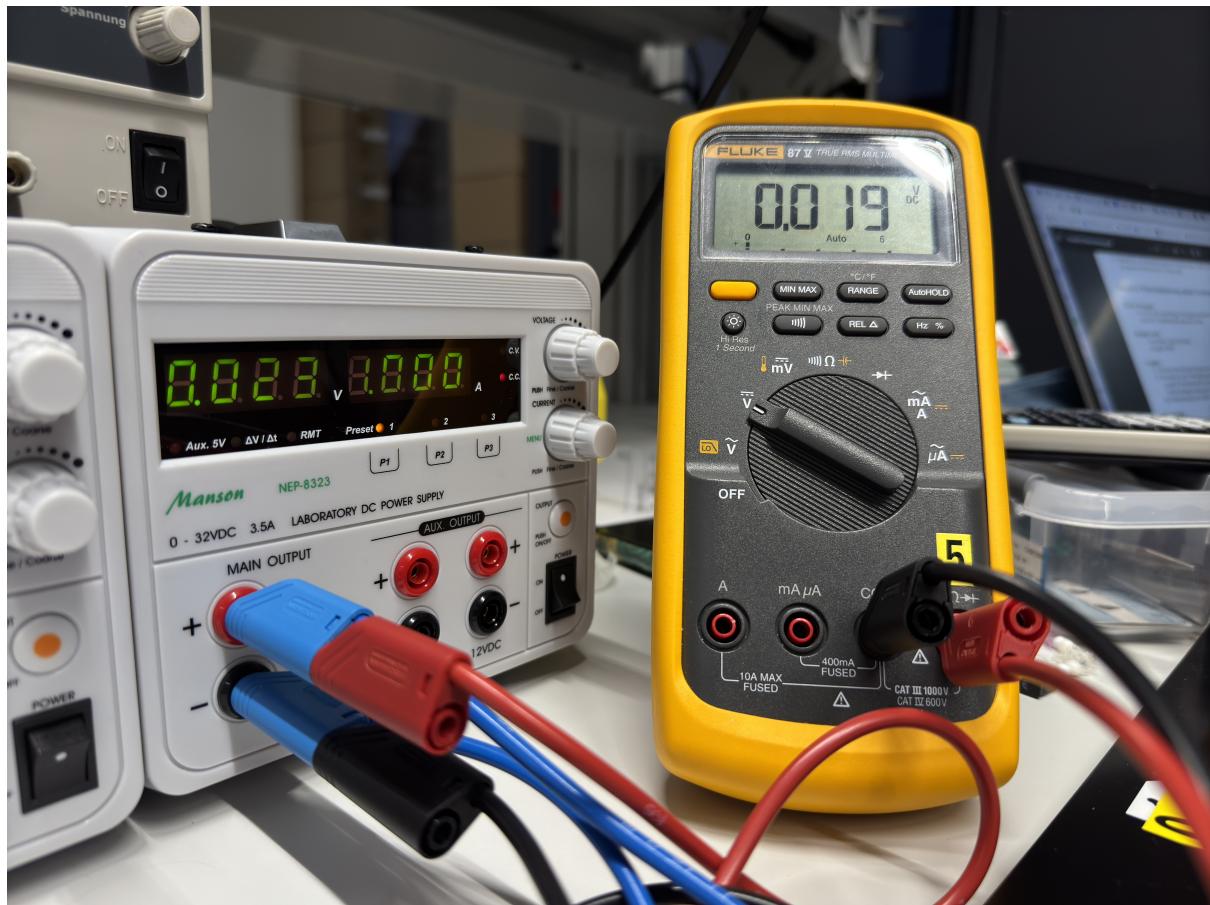


Figure 12: Teil der Steckverbindung nicht berücksichtigt



Figure 13: Messung über gesamtes Objekt inkl. der ganzen Steckverbindungen

4.4 Messergebnisse

Um den Widerstand des blauen Kabels zu berechnen, verwenden wir die Differenz der Spannungswerte zwischen dem Netzteil und dem Digitalmultimeter.

- Spannung am Netzteil: $U_{\text{Netzteil}} = 0,035 \text{ V}$
- Spannung am DMM: $U_{\text{DMM}} = 0,030 \text{ V}$
- Strom durch das Kabel: $I = 1,000 \text{ A}$

Spannungsabfall über das Kabel:

$$\Delta U = U_{\text{Netzteil}} - U_{\text{DMM}} = 0,035 \text{ V} - 0,030 \text{ V} = 0,005 \text{ V}$$

Berechnung des Widerstands:

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{0,005 \text{ V}}{1,000 \text{ A}} = 0,005 \Omega$$

5 Versuch 5: Statistik

5.1 Zielsetzung

Aufgabenstellung: Bestimmung einer gemessenen Zufallsverteilung und ihrer Eigenschaften (Momente). Hierbei stellt das vorgegebene Los von Widerständen eine willkürlich entnommene Stichprobe einer vom Hersteller erzeugten Grundgesamtheit dar. Die Eigenschaften der gemessenen Zufallsverteilung zu bestimmen, insbesondere den Mittelwert und die empirische Standardabweichung. Diese Messung ermöglicht es, die Verteilung der Werte und die Toleranzen der Bauteile zu bewerten sowie zu untersuchen, inwieweit die gemessenen Ergebnisse mit den Herstellerangaben übereinstimmen.

5.2 Bauteile und Messgeräte

- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Widerstandsgurt mit 25 Widerständen

5.3 Messkonzept

Am Fluke Multimeter wird die Widerstandsmessung aktiviert. Es ermöglicht die Messung einzelner Widerstände mithilfe von Klemmen, die ans Multimeter angeschlossen werden. Mit dem Widerstand wird ein geschlossener Stromkreis gebildet, in dem das Multimeter den Widerstand mithilfe eines kleinen Messtroms bestimmt.

Bei dieser Messung können die parasitären Widerstände der Kabel vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zu den zu messenden Widerstandsbauteilen verschwindend gering sind.

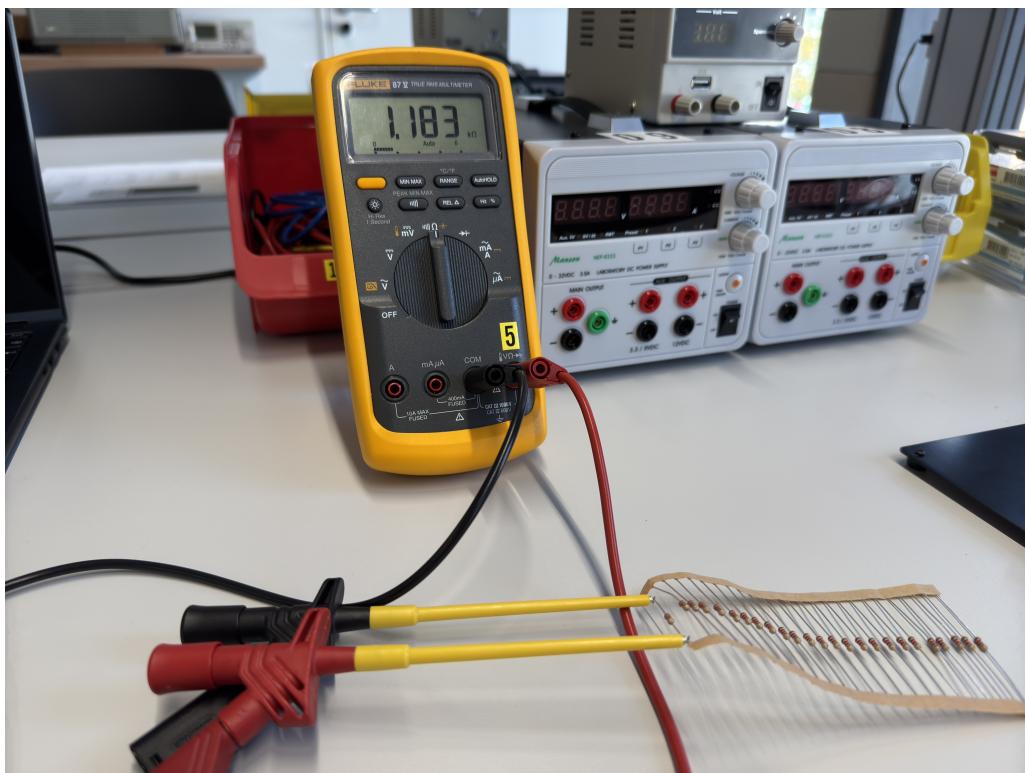


Figure 14: Messschaltung

5.4 Messergebnisse

Widerstand Nr.	Wert in kOhm	Widerstand Nr.	Wert in kOhm
1	1.183	14	1.183
2	1.181	15	1.180
3	1.186	16	1.183
4	1.181	17	1.180
5	1.186	18	1.182
6	1.183	19	1.184
7	1.182	20	1.183
8	1.181	21	1.184
9	1.187	22	1.187
10	1.181	23	1.182
11	1.188	24	1.179
12	1.186	25	1.187
13	1.179	-	-

Table 4: Einzelne Messungen

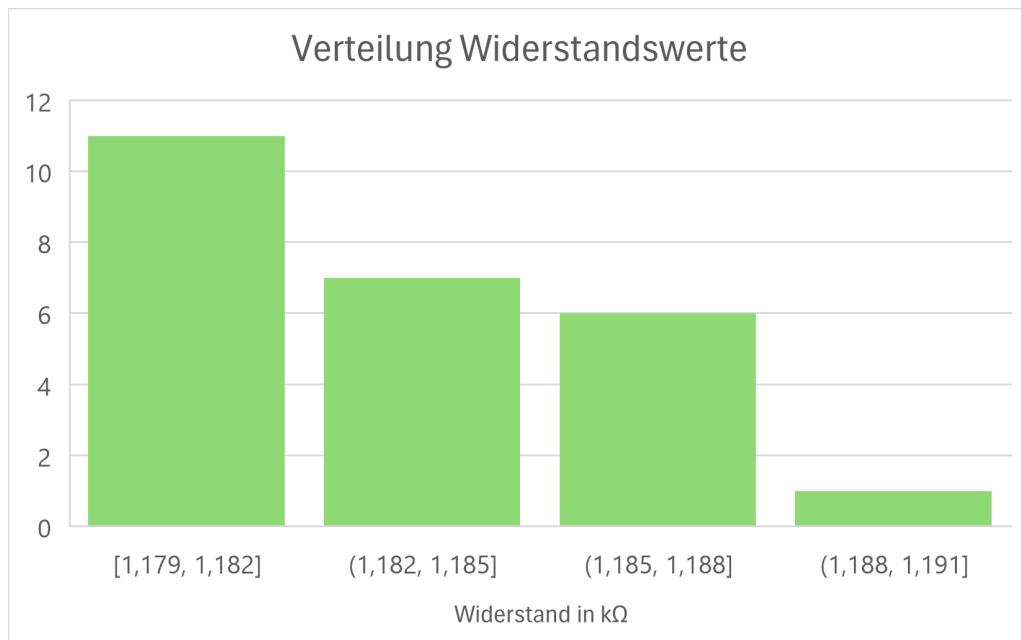


Figure 15: Histogramm

Der Mittelwert \bar{x} wird berechnet als:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{29.582}{25} = 1.1833 \text{ kΩ}$$

Die empirische Standardabweichung s wird berechnet als:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Berechnung der Abweichungen:

$$x_i - \bar{x} \quad \text{für jeden Messwert :}$$

Beispiele:

$$1.183 - 1.1833 = -0.0003, \quad 1.181 - 1.1833 = -0.0023, \quad \dots$$

Quadratische Abweichungen:

$$(x_i - \bar{x})^2 \quad \text{für jeden Messwert :}$$

Beispiele:

$$(-0.0003)^2 = 9 \times 10^{-8}, \quad (-0.0023)^2 = 5.29 \times 10^{-6}, \quad \dots$$

Summe der quadratischen Abweichungen:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0.000192$$

Einsetzen in die Formel:

$$s = \sqrt{\frac{0.000192}{25-1}} = \sqrt{\frac{0.000192}{24}} = \sqrt{0.000008} = 0.0028 \text{ k}\Omega$$

Vergleich der invertierenden und nicht-invertierenden Grundschaltung eines Operationsverstärkers

1. Allgemeine Spannungsverstärkung

Invertierende Schaltung:

$$A_V = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

wobei:

- R_f der Gegenkopplungswiderstand ist
- R_{in} der Eingangswiderstand ist

Nicht-invertierende Schaltung:

$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

wobei:

- R_f der Gegenkopplungswiderstand ist
- R_{in} der Widerstand zwischen Masse und dem invertierenden Eingang des Operationsverstärkers

2. Relative Verstärkungsänderung

Angenommen, der Gegenkopplungswiderstand R_f wird durch einen Wert $R_f + \Delta R_f$ ersetzt, wobei ΔR_f die Abweichung aufgrund der Toleranz ist.

Invertierende Schaltung:

$$A'_V = -\frac{R_f + \Delta R_f}{R_{in}}$$

Die relative Verstärkungsänderung $\frac{\Delta A_V}{A_V}$ ist:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{A'_V - A_V}{A_V} = \frac{\left(-\frac{R_f + \Delta R_f}{R_{in}}\right) - \left(-\frac{R_f}{R_{in}}\right)}{-\frac{R_f}{R_{in}}}$$

Vereinfachung:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{\Delta R_f}{R_f}$$

Nicht-invertierende Schaltung:

$$A'_V = 1 + \frac{R_f + \Delta R_f}{R_{in}}$$

Die relative Verstärkungsänderung $\frac{\Delta A_V}{A_V}$ ist:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{A'_V - A_V}{A_V} = \frac{\left(1 + \frac{R_f + \Delta R_f}{R_{in}}\right) - \left(1 + \frac{R_f}{R_{in}}\right)}{1 + \frac{R_f}{R_{in}}}$$

Vereinfachung:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{\frac{\Delta R_f}{R_{in}}}{1 + \frac{R_f}{R_{in}}}$$

3. Empfindlichkeit der Schaltungen

Die **invertierende Schaltung** ist proportional zur relativen Änderung $\frac{\Delta R_f}{R_f}$, was bedeutet, dass die Verstärkungsänderung direkt von der Änderung des Gegenkopplungswiderstands abhängt.

Die **nicht-invertierende Schaltung** ist weniger empfindlich, da die Verstärkungsänderung durch den Faktor $1 + \frac{R_f}{R_{in}}$ abgeschwächt wird.

Fazit: Die invertierende Schaltung reagiert empfindlicher auf Änderungen des Gegenkopplungswiderstands.

4. Zahlenbeispiel

Gegeben:

- $R_f = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_{in} = 1 \text{ k}\Omega$

- Toleranz $\Delta R_f = 5\%$, also $\Delta R_f = 0,05 \times 10 \text{ k}\Omega = 0,5 \text{ k}\Omega$

Invertierende Schaltung:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{\Delta R_f}{R_f} = \frac{0,5}{10} = 0,05 \quad (5\% \text{ relative Änderung})$$

Nicht-invertierende Schaltung:

$$\frac{\Delta A_V}{A_V} = \frac{\frac{\Delta R_f}{R_{in}}}{1 + \frac{R_f}{R_{in}}} = \frac{\frac{0,5}{1}}{1 + \frac{10}{1}} = \frac{0,5}{11} \approx 0,0455 \quad (4,55\% \text{ relative Änderung})$$

Hier zeigt sich, dass die nicht-invertierende Schaltung eine geringere relative Verstärkungsänderung aufweist.

6 Versuch 6: Aktiver Tiefpass erster Ordnung

6.1 Zielsetzung

Bestimmung der frequenzabhängigen Verstärkung eines aktiven Tiefpasses

6.2 Bauteile und Messgeräte

- Netzgerät (NEP-8323)
- Fluke 87 V True RMS Multimeter
- Keysight Oszilloskop (DSOX1102A)
- Bananenkabel (mehrere: rot, blau, schwarz)
- Sicherheits-Klemmprüfspitze (2 Stück)
- Oszilloskop BNC Tastkopf mit Messeklemme
- Steckkabel (mehrere: im Idealfall verschiedene Farben)
- Steckbrett

- A/D Converter - ADC080x
- 10 Segment LED-Bar - OSX10201-B

- Kondensatoren:
 - 10 μF "Tantalum"
 - 0,1 μF (2 Stück)
 - 150 pF
- Widerstände:
 - 1k Ω
 - 10k Ω
 - 8 x 1 k Ω Widerstandsnetzwerk

6.3 Messkonzept

...

Figure 16: ...

6.4 Messergebnisse

...

7 Diskussion

Was würden Sie nächstes Mal anders machen? Was hat besondere Schwierigkeiten bereitet?