

Hochschule Bremen
Fakultät 4, Elektrotechnik und Informatik
Labor: Grundlagen der Elektrischen Messtechnik (ELMESS-L)
Labor-Bericht

Versuchskennziffer: **R7/C1**
Versuchsbezeichnung: Bestimmung von Widerständen /
Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kondensatoren
Versuchsdatum: 30.11.2009
Abgabetermin: 14.12.2009
Semester: WS2009/2010 TI 3.2
Gruppe: A3
Hochschullehrer: Prof. Dr. M. Mevenkamp
Protokollführer: Tobias Groch

Mitarbeiter: Tobias Groch (Matrikel-Nr.: 242048)
Steffen Schütte (Matrikel-Nr.: 250651)
Florian Wolters (Matrikel-Nr.: 241433)

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse:

Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Bestimmung von rein ohmschen Widerständen und der Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kondensatoren. Es wurden verschiedene Messmethoden zur Bestimmung von unbekanntem Widerständen untersucht:

spannungsrichtige Messung	ungeeignet für große, geeignet für kleine Widerstände
stromrichtige Messung	ungeeignet für kleine, geeignet für große Widerstände
Messung mit Konstantstromquelle	ungeeignet für große, geeignet für kleine Widerstände

Der Vergleich von 2-Leiter- mit 4-Leiter-Methode führte zum Ergebnis, dass die Leitungswiderstände bei zunehmender Länge der Leitungen an Bedeutung gewinnen. Durch die Verwendung der 4-Leiter-Methode kann diese Messungenauigkeit verringert werden.

Des Weiteren wurden anhand der Entladung eines Kondensators ($C = 7,2\mu F$) Informationen zu seinem Isolationswiderstand gewonnen. Dazu wurde der Entladevorgang grafisch aufgezeichnet und daraus der Widerstand berechnet. Zudem wurde die Spannungsverteilung an zwei Kondensatoren ($C = 2\mu F$) untersucht:

Gleichspannung (2V)	Anfangs stark unterschiedliche Werte. Änderung der Spannungsverteilung über die Zeit (wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Isolationswiderstände)
Wechselspannung (2V / 50Hz)	gleichmäßige Aufteilung der Spannung

(Unterschrift Protokollführer)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	3
2.	Teilversuch R7	4
2.1	Theoretischer Hintergrund	4
2.1.1	Spannungsrichtige Messung	4
2.1.2	Stromrichtige Messung	5
2.1.3	2-Leiter-Messung	6
2.1.4	4-Leiter-Messung	6
2.1.5	Messung mit Konstantstromquelle.....	7
2.1.6	Schalter und Relais.....	7
2.2	Versuchsaufbau	8
2.3	Versuchsdurchführung	8
2.4	Auswertung	9
2.4.1	Spannungsrichtige Messung	9
2.4.2	Stromrichtige Messung	10
2.4.3	Messung mit einer Konstantstromquelle.....	11
2.4.4	2-Leiter- und 4-Leiter-Methode.....	11
2.4.5	Kontaktwiderstände von Schaltern und Relais	12
2.5	Zusammenfassende Ergebnisdiskussion	13
2.5.1	Vergleich der Messmethoden.....	13
2.5.2	Bestimmung der Kontaktwiderstände.....	13
3.	Teilversuch C1	14
3.1	Theoretischer Hintergrund	14
3.2	Versuchsaufbau	15
3.3	Versuchsdurchführung	16
3.4	Auswertung	17
3.4.1	Bestimmung des Isolationswiderstandes eines Kondensators	17
3.4.2	Spannungsverteilung an zwei Kondensatoren	19
3.5	Zusammenfassende Ergebnisdiskussion	20
4.	Literaturverzeichnis	21
5.	Anhang.....	22
A.	Zeitlicher Ablauf	22
B.	Geräteliste.....	23
C.	Plot des y,t-Schreibers.....	25
D.	gnuplot-Daten.....	26

1. Einführung

Der Versuch R7/C1 besteht aus zwei Teilversuchen. Der Teilversuch R7 („Bestimmung von Widerständen“) untersucht verschiedene Messmethoden zur Bestimmung von unbekanntem Widerständen. Besonderes Augenmerk liegt darauf, welche Methode sich für welche Widerstandsgröße eignet, sprich, ob das jeweilige Verfahren besser für kleine bzw. besser für große Widerstände ist. Die Messmethoden, die in diesem Teilversuch untersucht werden, lauten:

- Spannungsrichtige Messung
- Stromrichtige Messung
- 2-Leiter-Messung
- 4-Leiter-Messung
- Messung mit Konstantstromquelle
- Messung von Kontaktwiderständen (sowohl bei geschlossenen, als auch offenen Kontakten)

Der Teilversuch C7 („Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kondensatoren“) untersucht das Verhalten von Kondensatoren in Bezug auf die Entladung und die Spannungsverteilung. Dadurch lassen sich Rückschlüsse über die Widerstände der Bauelemente gewinnen.

2. Teilversuch R7

Der Teilversuch R7 beschäftigt sich mit der Bestimmung von ohmschen Widerständen mit Hilfe verschiedener Messmethoden.

2.1 Theoretischer Hintergrund

2.1.1 Spannungsrichtige Messung

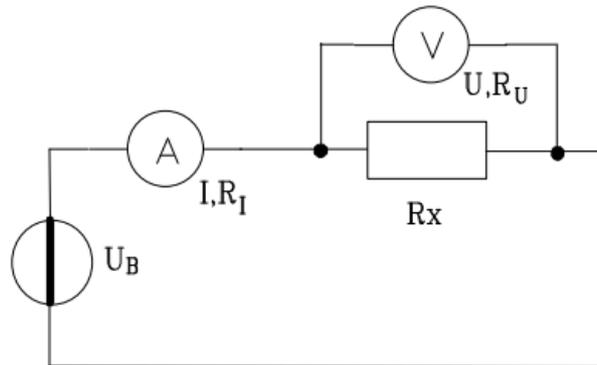


Abbildung 1: Spannungsrichtige Messung [1]

Bei der spannungsrichtigen Messung wird der Gesamtstrom I in Reihe vor dem Verbraucher (in diesem Fall der Widerstand R_x) und der Spannungsabfall U parallel zum Verbraucher gemessen.

Hierbei ist zu beachten, dass der Innenwiderstand R_U des Spannungsmessgerätes möglichst groß gegenüber dem zu messenden Widerstand R_x sein sollte. Nur in diesem Fall ist der Strom I_U durch das Spannungsmessgerät vernachlässigbar und das Strommessgerät zeigt ungefähr denselben Strom I_M an, der auch durch den Verbraucher R_x fließt:

$$R_U \gg R_x \Leftrightarrow I_M \approx I_x \quad [1]$$

Die Bestimmung des Verbraucherwiderstands R_x über das ohmsche Gesetz

$$R_x = \frac{U_M}{I_M} \quad (1)$$

ist hier falsch, da diese Formel nicht den Innenwiderstand R_U des Spannungsmessgerätes berücksichtigt. Um dies zu korrigieren, muss der Strom I_U durch das Spannungsmessgerät vom gemessenen Laststrom I_M abgezogen werden. Damit ergibt die die Korrekturformel für die spannungsrichtige Messung:

$$R_x = \frac{U_M}{I_M - I_U} = \frac{U_M}{I_M - \frac{U_M}{R_U}} \quad (2)$$

2.1.2 Stromrichtige Messung

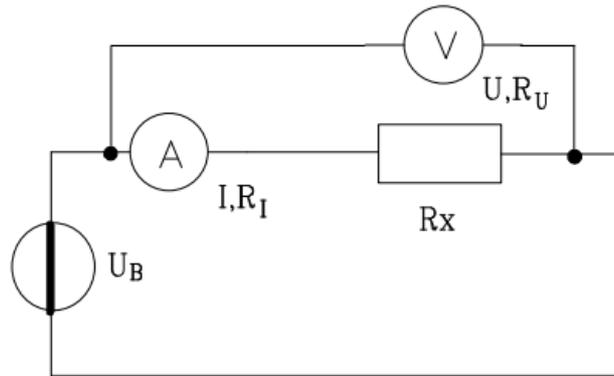


Abbildung 2: Stromrichtige Messung [1]

Bei der stromrichtigen Messung wird der Gesamtstrom I in Reihe vor dem Verbraucher (in diesem Fall der Widerstand R_x) und der Spannungsabfall U parallel zum Strommessgerät und dem Verbraucher gemessen.

Hierbei ist zu beachten, dass der Innenwiderstand R_I des Strommessgerätes möglichst klein gegenüber dem zu messenden Widerstand R_x sein sollte. Nur in diesem Fall ist der Spannungsabfall U_I am Strommessgerät vernachlässigbar und das Spannungsmessgerät zeigt ungefähr dieselbe Spannung U_M an, die auch an dem Verbraucher R_x abfällt:

$$R_I \ll R_x \Leftrightarrow U_M \approx U_x \quad [1]$$

Die Bestimmung des Verbraucherwiderstands R_x über das ohmsche Gesetz mittels Formel (1) ist falsch, da diese Formel nicht den Innenwiderstand R_I des Strommessgerätes berücksichtigt. Um dies zu korrigieren, muss der Spannungsabfall am Strommessgerät und damit dessen Innenwiderstand R_I berücksichtigt werden. Es ergibt sich die Korrekturformel für die stromrichtige Messung:

$$R_x = \frac{U_M}{I_M} - R_I \quad (3)$$

2.1.3 2-Leiter-Messung

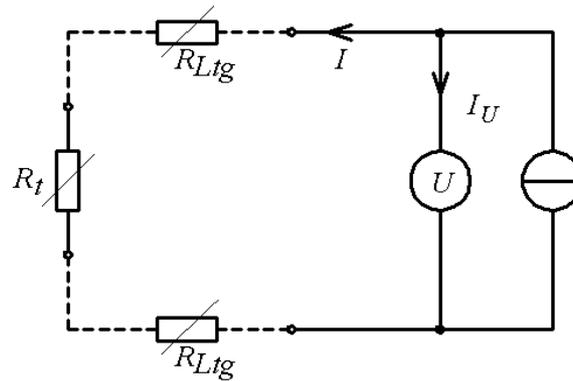


Abbildung 3: 2-Leiter-Methode [3]

Bei der 2-Leiter-Messung wird der Verbraucher (in diesem Fall der Widerstand R_t) über Leitungen gemessen, wobei es passieren kann, dass diese Leitungen einen, verglichen zum Widerstandswert von R_t , ebenfalls hohen Widerstandswert besitzen. Es wird somit nicht der Leitungswiderstand R_{Ltg} berücksichtigt, wodurch eine hohe Messabweichung entstehen kann.

2.1.4 4-Leiter-Messung

Kleine Widerstände lassen sich bevorzugt mit einer Konstantstromquelle und einem hochohmigen Voltmeter messen (spannungsrichtige Schaltung), weil dann die Kontaktübergangswiderstände in die Messung nicht eingehen. Wichtig ist dabei der korrekte Anschluss des Messobjektes, damit Widerstände von Zuleitungen und Anschlusskontakten, die oft in der Größenordnung $0,01 \Omega$ bis ca. 1Ω liegen, das Messergebnis nicht verfälschen. Geeignet ist ein Vierleiteranschluss nach Abbildung 4. [4]

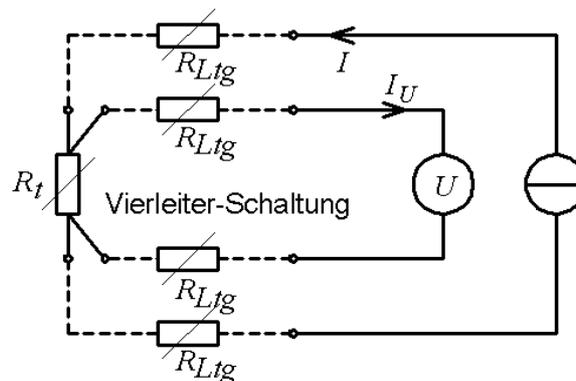


Abbildung 4: 4-Leiter-Methode [3]

Bei der Vierleitermessung wird der Konstantstrom über Stromleitungen und Stromkontakte an den zu messenden Widerstand R_x herangeführt. Die Kontaktübergangswiderstände im Strompfad haben keinen Einfluss, weil der Strom konstant und damit eingepreist ist.

Der Spannungsabfall wird über getrennte Spannungsleitungen und Kontakte (engl. sense) gemessen. Gegenüber dem Innenwiderstand des Voltmeters sind die Kontaktübergangswiderstände im Spannungspfad sehr klein und verursachen praktisch keinen Messfehler. [4]

Wenn man, wie in der Aufgabenstellung verlangt, einen maximalen Messfehler von 1% vorgibt, so muss folgendes gelten:

$$1 - \frac{R_U}{R_U + R_x} \leq 1\%$$

$$\Rightarrow R_x \leq R_U \cdot \frac{1\%}{1 - 1\%}$$

2.1.5 Messung mit Konstantstromquelle

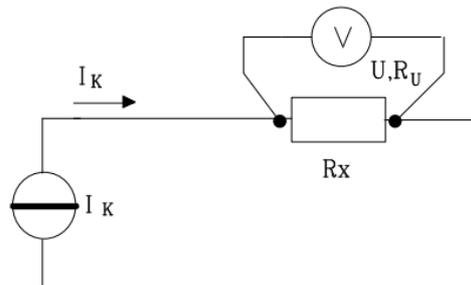


Abbildung 5: Messung mit Konstantstromquelle [1]

Durch die sehr hohen und konstanten Eingangswiderstände von $10M\Omega$ - $20M\Omega$ moderner Messgeräte, ist es möglich Widerstände direkt zu messen (Abbildung 5). Dazu wird ein konstanter Strom I_K aus einer Präzisionsstromquelle durch den Verbraucher geleitet und der Spannungsabfall U am Verbraucher (in diesem Fall der Widerstand R_x) gemessen.

Der Strom muss bei dieser Messung nicht per Messgerät aufgenommen werden, da der an der Präzisionsstromquelle eingestellte Strom I_K direkt zur Berechnung des Widerstands R_x verwendet werden kann.

Hierbei ist, analog zur spannungsrichtigen Messung (siehe Abschnitt 2.1.1) zu beachten, dass der Innenwiderstand R_U des Spannungsmessgerätes möglichst groß gegenüber dem zu messenden Widerstand R_x sein sollte.

2.1.6 Schalter und Relais

Die folgenden drei Begriffserklärungen von Bauelementen sind für Abschnitt 2.4.5 nötig, da dort deren Kontaktwiderstände mit Hilfe der 4-Leiter-Methode bestimmt werden sollen:

- **Reedrelais:** Verbindung einer Magnetspule mit einer Versorgungsspannung. Der Schaltkontakt wird durch das dadurch aufgebaute Magnetfeld geschlossen. Ist Die Versorgungsspannung zu gering, oder fehlt sie, so ist der Schaltkontakt offen.
- **Kippschalter:** Das Umlegen des Schalters öffnet bzw. schließt den Schaltkontakt.
- **Drehschalter:** Das Drehen des Schalters öffnet bzw. schließt den Schaltkontakt.

2.2 Versuchsaufbau

In dem Widerstands Teilversuch R7 werden drei Prüflinge (aufgedruckte Werte von $0,5\Omega$, 500Ω und $5M\Omega$, vgl. Anhang B, Geräteliste) auf ihre Widerstandswerte hin untersucht. Hierfür wird zunächst die spannungsrichtige Messung (vgl. Abbildung 1), danach die stromrichtige Messung (vgl. Abbildung 2) und anschließend eine Messung mit einer Konstantstromquelle (vgl. Abbildung 5) durchgeführt.

Anschließend werden der $0,5\Omega$ sowie der 500Ω Widerstand zuerst mit der 2-Leiter-Methode (vgl. Abbildung 3) und anschließend mit der 4-Leiter-Methode (vgl. Abbildung 4) gemessen. Dabei werden jeweils zwei Messungen durchgeführt – mit kurzen Anschlussleitungen von ca. 30cm Länge und ca. 160cm langen Leitungen.

Danach werden die Kontaktwiderstände eines Reedrelais, eines Kippschalters sowie eines Drehschalters (siehe Anhang B, Geräteliste) mit Hilfe der 4-Leiter-Methode bestimmt. Neben der Messung im geschlossenen Zustand wird untersucht, ob die Widerstandswerte ermittelt werden können, wenn die Schalterkontakte geöffnet sind.

2.3 Versuchsdurchführung

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung wurden die drei Widerstände mit einem Multimeter MetraHit (siehe Anhang B, Geräteliste) gemessen. Die aufgedruckten Werte von $0,5\Omega$, 500Ω , sowie $5M\Omega$ konnten mit den folgenden Messwerten bestätigt werden:

Aufgedruckter Wert [Ω]	Gemessener Wert [Ω]
$0,5$	$\approx 0,51$
500	$\approx 506,5$
$5M$	$\approx 5,14M$

Tabelle 1: Übersicht der aufgedruckten / gemessenen Widerstandswerte

Mit den drei Widerständen aus Tabelle 1 wurden die spannungsrichtige Messung, die stromrichtige Messung sowie die Messung mit einer Konstantstromquelle durchgeführt.

Welche Spannung die Gleichspannungsquelle (vgl. Anhang B, Geräteliste) liefern sollte, wurde durch die Versuchsbeschreibung vorgegeben und betrug bei dem $5M\Omega$ Prüfling 10V , sowie bei dem $0,5\Omega$ und dem 500Ω Prüfling 1V . Da die gelieferte Spannung nie exakt der angelegten Spannung entspricht, wurden zur Berechnung der Widerstände die gemessenen Spannungswerte verwendet.

Bei der Messung mit der Konstantstromquelle wurden die Stromstärken vorgegeben und an der Präzisionsstromquelle (siehe Anhang B, Geräteliste) eingestellt. Die Werte betragen $1\mu\text{A}$ bei dem $5M\Omega$, 10mA für den 500Ω sowie 100mA für den $0,5\Omega$ Prüfling.

Anschließend wurden der $0,5\Omega$ und der 500Ω Prüfling mit Hilfe der 2-Leiter- bzw. 4-Leiter-Methode mit zwei unterschiedlich langen Anschlussleitungen gemessen. Die kurzen Leitungen hatten eine Länge von ca. 30cm und die Langen von ca. 160cm . Als Messgerät kam das HP Systemmultimeter 34401A (vgl. Anhang B, Geräteliste) zum Einsatz.

Dieses wurde auch für den letzten Teilversuch verwendet, bei dem mit Hilfe der 4-Leiter-Methode die Kontaktwiderstände eines Reedrelais, eines Kippschalters und eines Drehschalters (vgl. Anhang B, Geräteliste) untersucht wurden. Bei der Durchführung wurden alle Prüflinge an die Präzisionsstromquelle angeschlossen und mit dem maximalen Strom, den die Quelle korrekt liefern konnte, belastet. Der an den Prüflingen entstehende Spannungsabfall wurde am HP-Systemmultimeter abgelesen.

2.4 Auswertung

2.4.1 Spannungsrichtige Messung

Die Messergebnisse der spannungsrichtigen Messung befinden sich in Tabelle 2. Mit Hilfe dieser Werte wurden die Werte der Tabelle 3 berechnet, wobei erstens der Widerstand ohne die Berücksichtigung der Innenwiderstände der Messgeräte und zweitens mit Berücksichtigung dieser berechnet wurde.

Zur Korrektur wurde Formel (2) verwendet:

$$R_x = \frac{U_M}{I_M - \frac{U_M}{R_U}}$$

Der Innenwiderstand des Messgerätes wurde, laut Herstellerangaben, mit $10M\Omega$ angenommen. Die relative Abweichung ergibt sich anhand der folgenden Formel:

$$\text{Relative Abweichung} = \left| \frac{R - R_{\text{korrektur}}}{R_{\text{korrektur}}} \right| \quad (4)$$

Aus den Messergebnissen lässt sich folgern, dass die spannungsrichtige Messung besonders für kleine Widerstände geeignet ist, da die relative Abweichung hier gegen 0% geht. In Tabelle 3 ist außerdem abzulesen, dass die relative Abweichung am $5M\Omega$ Widerstand hingegen sehr groß ist, was die These unterstreicht, dass die spannungsrichtige Messung für große Widerstände ungeeignet ist.

R_x [Ω]	U_B [V]	U_{mess} [V]	I_{erw} [A]	I_{mess} [A]
0,5	1	$0,9004 \pm 100\mu$ (0,01%)	≈ 2	$1,8418 \pm 100\mu$ (0,542%)
500	1	$0,9124 \pm 100\mu$ (0,01%)	$\approx 2m$	$1,8012m \pm 100n$ (0,005%)
5M	10	$9,988 \pm 1m$ (0,01%)	$\approx 2\mu$	$2,91\mu \pm 10n$ (0,34%)

Tabelle 2: Ergebnisse der spannungsrichtigen Messung

R_x [Ω]	R [Ω] ohne Korrektur	$R_{\text{korrektur}}$ [Ω]	Relative Abweichung
0,5	0,489	0,489	0%
500	506,551	506,577	0,005%
5M	3,432M	5,226M	34,328%

Tabelle 3: Errechnete sowie korrigierte Widerstandswerte der spannungsrichtigen Messung

2.4.2 Stromrichtige Messung

Die stromrichtige Messung ergab die folgenden Messergebnisse, welche sich in Tabelle 4 befinden. Mit Hilfe dieser Werte wurden die Werte der Tabelle 6 berechnet, wobei neben der Widerstandsbe-
rechnung ohne Berücksichtigung der Innenwiderstände der Messgeräte auch die Berechnung mit
Berücksichtigung dieser durchgeführt wurde. Die Innenwiderstandswerte für das Amperemeter
wurden dem Datenblatt entnommen und befinden sich in Tabelle 5.

Zur Korrektur wurde Formel (3) verwendet:

$$R_x = \frac{U_M}{I_M} - R_I$$

Die relative Abweichung ergibt sich anhand von Formel (4):

$$\text{Relative Abweichung} = \left| \frac{R - R_{\text{korrektur}}}{R_{\text{korrektur}}} \right|$$

Die Messergebnisse zeigen, dass die stromrichtige Messung besonders für große Widerstände ge-
eignet ist. Die relative Abweichung bei dem $5M\Omega$ Widerstand ist nahezu vernachlässigbar, wo hin-
gegen die relative Abweichung bei den kleinen Widerständen ($0,5\Omega$ und 500Ω) ansteigt.

R_x [Ω]	U_B [V]	U_{mess} [V]	I_{erw} [A]	I_{mess} [A]
0,5	1	$0,9731 \pm 100\mu$ (0,01%)	≈ 2	$1,8432A \pm 100\mu$ (0,0054%)
500	1	$1,0056 \pm 100\mu$ (0,01%)	$\approx 2m$	$1,8012mA \pm 100n$ (0,005%)
5M	10	$9,992 \pm 1m$ (0,01%)	$\approx 2\mu$	$1,93\mu A \pm 10n$ (0,52%)

Tabelle 4: Ergebnisse der stromrichtigen Messung

Messbereich [A]	Innenwiderstand [Ω]
Messwert x	
$0 \leq x \leq 300\mu$	533
$300\mu < x \leq 3m$	53
$3m < x \leq 30m$	7
$30m < x \leq 300m$	1
$300m < x \leq 3$	36m

Tabelle 5: Innenwiderstandswerte des Messgerätes

R_x [Ω]	R [Ω] ohne Korrektur	$R_{\text{korrektur}}$ [Ω]	Relative Abweichung
0,5	0,527	0,492	7,1%
500	558,294	505,294	10,5%
5M	5,177202M	5,176669M	0,01%

Tabelle 6: Errechnete sowie korrigierte Widerstandswerte der stromrichtigen Messung

2.4.3 Messung mit einer Konstantstromquelle

Die Messergebnisse der Messung mit einer Konstantstromquelle befinden sich in Tabelle 7. Analog zur spannungsrichtigen Messung (vgl. 2.4.1) werden die Widerstandswerte einmal ohne Berücksichtigung der Innenwiderstände der Messgeräte und einmal mit Berücksichtigung dieser berechnet (vgl. Tabelle 8). Zur Korrektur der Widerstände wurde wie bei der spannungsrichtigen Messung die Korrekturformel (1) verwendet. Ebenfalls in Tabelle 8 sind die relativen Abweichungen aufgeführt, welche mit Hilfe von Formel (4) berechnet wurden.

Die Messergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Messung mit einer Konstantstromquelle vor allem kleine Widerstände genau gemessen werden können, da die relative Abweichung bei diesen gegen 0% strebt. Außerdem ist, analog zur spannungsrichtigen Messung, die relative Abweichung bei dem 5M Ω Prüfling sehr groß, was bestätigt, dass diese Messmethode für große Widerstände ungeeignet ist.

R_x [Ω]	I_K [A]	U_{erw} [V]	U_{mess} [V]
0,5	$100m \pm 1m$ (1%)	≈ 50	$48,58m \pm 10\mu$ (0,021%)
500	$10m \pm 100\mu$ (1%)	≈ 5	$5,06 \pm 1m$ (0,020%)
5M	$1\mu \pm 10n$ (1%)	≈ 5	$3,418 \pm 1m$ (0,029%)

Tabelle 7: Ergebnisse der Messung mit einer Konstantstromquelle

R_x [Ω]	R [Ω] ohne Korrektur	$R_{\text{korrektur}}$ [Ω]	Relative Abweichung
0,5	0,4858 Ω	0,4857 Ω	$\approx 0\%$
500	506 Ω	506,0256 Ω	0,005%
5M	3,418M Ω	5,1930M Ω	34,18%

Tabelle 8: Errechnete sowie korrigierte Widerstandswerte der Messung mit einer Konstantstromquelle

2.4.4 2-Leiter- und 4-Leiter-Methode

Die Messergebnisse der 2-Leiter-Methode sind in Tabelle 9, sowie die der 4-Leiter-Methode in Tabelle 10 aufgeführt. Aus dem Datenblatt des HP-Systemmultimeters wurden die Abweichungen abgelesen. Diese betragen im Bereich bis 100 Ω 0,006% und im Bereich bis 1k Ω 0,0025%. Dies hat zur Folge, dass die Abweichung beim 0,5 Ω Widerstand vernachlässigt werden kann.

Die relativen Abweichungen werden analog zu Formel (4) berechnet.

R_x [Ω]	R_x [Ω] mit 2 * \approx 30cm Anschlusskabel	R_x [Ω] mit 2 * \approx 160cm Anschlusskabel	Relative Abweichung
0,5	$0,499 \pm 0,0$ (0,006%)	$0,544 \pm 0,0$ (0,006%)	8,27%
500	$506,73 \pm 0,013$ (0,0025%)	$506,77 \pm 0,013$ (0,0025%)	0,008%

Tabelle 9: Messergebnisse der 2-Leiter-Methode

R_x [Ω]	R_x [Ω] mit 2 * \approx 30cm Anschlusskabel	R_x [Ω] mit 2 * \approx 160cm Anschlusskabel	Relative Abweichung
0,5	$0,494 \pm 0,0$ (0,006%)	$0,493 \pm 0,0$ (0,006%)	0,2%
500	$506,73 \pm 0,013$ (0,0025%)	$506,72 \pm 0,013$ (0,0025%)	0,001%

Tabelle 10: Messergebnisse der 4-Leiter-Methode

Aus den Messergebnissen ist zu entnehmen, dass die 4-Leiter-Methode exaktere Ergebnisse liefert. Dies bestätigt unsere Erwartungen in Bezug darauf, dass sie nicht durch die Länge der Messleitung beeinflusst wird, wie die 2-Leiter-Methode.

Bei der 2-Leiter-Methode ist dementsprechend anzumerken, dass diese bei kleinen Widerständen stark von der Länge der Leitung beeinflusst wird und die relative Abweichung dadurch steigt.

2.4.5 Kontaktwiderstände von Schaltern und Relais

Mit Hilfe der 4-Leiter-Messung wurden die Kontaktwiderstände der drei Bauteile Reedrelais, Kippschalter sowie Drehschalter gemessen. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 11.

Der Innenwiderstand des Messgerätes ist in diesem Zusammenhang sehr viel größer als die Kontaktwiderstände, so dass er in diesem Fall vernachlässigt wird. Die Kontaktwiderstände werden nach dem ohmschen Gesetz aus Formel (1) berechnet.

Bauteil	Gemessene Spannung U [V]	Max. einstellbarer Strom I [A]	Errechneter Widerstand R [Ω]
Reedrelais	$7,082m \pm 10\mu$ (0,14%)	$100m \pm 1m$ (1%)	$70,82m \pm 0,715m$ (1,01%)
Kippschalter	$0,925m \pm 10\mu$ (1,08%)	$100m \pm 1m$ (1%)	$9,25m \pm 0,014m$ (1,47%)
Drehschalter	$1,965m \pm 10\mu$ (0,51%)	$100m \pm 1m$ (1%)	$19,65m \pm 0,022m$ (1,12%)

Tabelle 11: Messergebnisse sowie die berechneten Werte der Kontaktwiderstände

Die Messgenauigkeit der Widerstände wird anhand der folgenden Formel berechnet:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (5)$$

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kontaktwiderstände sehr gut leiten, was sich an den Widerstandswerten im $m\Omega$ -Bereich erkennen lässt.

Ebenfalls mit Hilfe der 4-Leiter-Methode wurden die Kontaktwiderstände im geöffneten Zustand gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgeführt. Dabei handelt es sich bei den berechneten Widerstandswerten um den Innenwiderstand des Messgerätes, da der Strom bei geöffneten Kontaktwiderständen nur über das Messgerät fließt. Daraus folgt, dass diese Messung keine konkrete Aussage über die geöffneten Kontaktwiderstände liefert.

Bauteil	Gemessene Spannung U [V]	Max. einstellbarer Strom I [A]	Errechneter Widerstand R [Ω]
Reedrelais	9,981	1 μ	9,981M
Kippschalter	9,981	1 μ	9,981M
Drehschalter	9,981	1 μ	9,981M

Tabelle 12: Messwerte der Kontaktwiderstände bei geöffnetem Schalter

2.5 Zusammenfassende Ergebnisdiskussion

2.5.1 Vergleich der Messmethoden

Tabelle 13 enthält zur Verdeutlichung die durch Fehlerrechnung korrigierten Widerstandswerte.

Messmethode	0,5 Ω Widerstand	500 Ω Widerstand	5M Ω Widerstand
Spannungsrichtig	0,489 Ω	506,577 Ω	5,226M Ω
Stromrichtig	0,492 Ω	505,294 Ω	5,177M Ω
Konstantstromquelle	0,486 Ω	506,026 Ω	5,193M Ω
4-Leiter-Methode (kurze Anschlusskabel)	0,494 Ω	506,73 Ω	-

Tabelle 13: Gegenüberstellung der korrigierten Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden

Vergleicht man die verschiedenen Messmethoden, so lässt sich aus den Ergebnissen folgern, dass die 4-Leiter-Methode mit dem HP Systemmultimeter die genaueste ist, da sie nur geringe relative Abweichungen liefert. Die 2-Leiter-Methode hingegen hat bei kleineren Widerständen (hier mit $R = 0,5\Omega$ und $R = 500\Omega$) einen größeren Messfehler, sofern die Leitungswiderstände zum Messobjekt relativ groß sind.

Die spannungsrichtige Messung und die Messung mit Konstantstromquelle hingegen liefern bei kleinen Widerständen ein genaueres Ergebnis mit nur geringer Abweichung. Bei größeren Prüflingen (hier $R = 5M\Omega$) sind diese Methoden jedoch nicht zu empfehlen.

Entgegengesetzt verhält es sich mit der stromrichtigen Messung, die für große Widerstände ein genaueres Ergebnis liefert, als für Kleine.

2.5.2 Bestimmung der Kontaktwiderstände

Für diese Messungen wurde eine Konstantstromquelle verwendet, da sich diese Methode für kleine Widerstände als geeignet herausgestellt hat. Der Kippschalter hatte mit 9,25m Ω den geringsten Widerstand. Der Drehschalter mit 19,65m Ω lag etwas darüber. Den höchsten Kontaktwiderstand hatte das Reedrelais mit 70,82m Ω , welcher durch die erhöhte Komplexität des Bauteils verursacht wird.

3. Teilversuch C1

Der Teilversuch C1 beschäftigt sich mit der Bestimmung des Isolationswiderstandes eines Kondensators ($C = 6 \mu F$) und der Spannungsverteilung an zwei Kondensatoren ($C = 2 \mu F$).

3.1 Theoretischer Hintergrund

Die Spannung eines einmalig aufgeladenen Kondensators nimmt nach einer e-Funktion mit der Zeitkonstanten $\tau = R \cdot C$ ab (vgl. Abbildung 6). Diese Abnahme ist dadurch zu begründen, dass die beiden Beläge des Kondensators nicht vollständig voneinander isoliert sind.

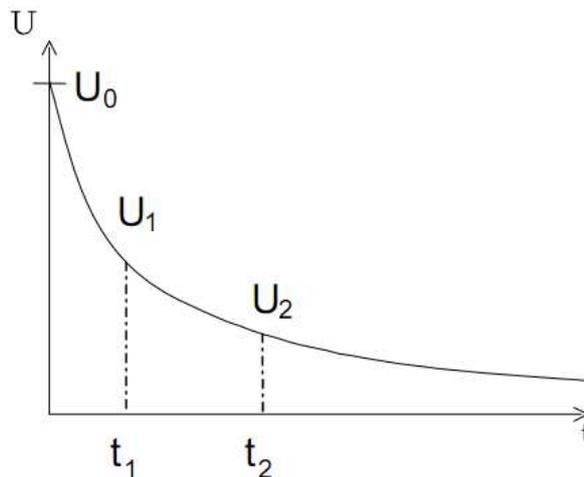


Abbildung 6: Theoretischer Entladevorgang eines Kondensators [1]

Isolationswiderstände haben Werte, welche in der Größenordnung $10^6 - 10^{12}$ Ohm liegen. Dieser kann auch als ohmscher Widerstand gesehen werden, der parallel zum Kondensator liegt (vgl. Abbildung 7).

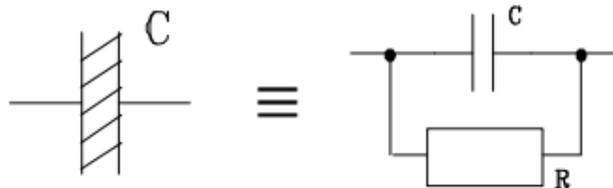


Abbildung 7: Ersatzschaltbild eines Kondensators [1]

Derart große Widerstände können nicht mehr durch einfache Strom- und Spannungsmessung bestimmt werden. Stattdessen kann man an einem mit Gleichspannung aufgeladenen Kondensator an zwei beliebigen Zeitpunkten t_1 und t_2 seine Spannungen U_1 und U_2 messen, um mit diesen Werten seinen Isolationswiderstandwert zu ermitteln.

Aus dem allgemeinen Ansatz

$$U_t = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit} \quad \tau = R \cdot C \quad (6)$$

$$U_0 = \text{Anfangswert der Kondensatorspannung} \quad [1]$$

lässt sich ableiten:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)} \quad (7)$$

[1]

$$R = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)} \cdot \frac{1}{C} \quad (8)$$

[1]

Nach Formel (8) lässt sich der Widerstand der Parallelschaltung berechnen. Falls der Isolationswiderstand des Kondensators hochohmig gegenüber R ist, entspricht der berechnete Wert nahezu dem Widerstandswert des zum Kondensator parallel geschalteten Widerstandes.

3.2 Versuchsaufbau

Zunächst wird in diesem Teilversuch ein Kondensator mit der Angabe von $C = 6\mu F \pm 10\%$ in einem Zeitraum von ca. 3 Minuten mit einer Gleichspannung von 5V geladen. Danach soll der Kondensator vom Stromkreis getrennt werden und es soll nachgewiesen werden, dass der geladene Kondensator nach 5 Minuten nahezu keine Ladung verloren hat. Anschließend wird mittels Elektrometer, welches an einen y,t-Schreiber (vgl. Anhang B, Geräteliste) angeschlossen ist, die Entladung des Kondensators über einen Zeitraum von 15 Minuten aufgezeichnet.

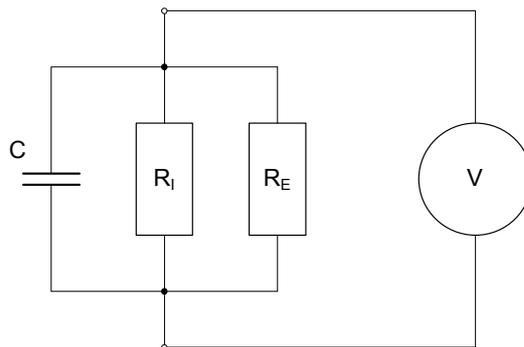


Abbildung 8: Schaltbild der Kondensatorentladung

Das Elektrometer besitzt einen hochohmigen Widerstand $R_i = 10^{14} \dots 10^{16} \Omega$. Um den Entladevorgang des Kondensators beobachten zu können, wird das Elektrometer als Ableitwiderstand parallel zum Kondensator geschaltet. Durch den hohen Innenwiderstand findet die Entladung in einer für diesen Versuch angemessenen Zeit statt.

Im zweiten Teil dieses Versuches wird die Spannungsverteilung zweier Kondensatoren mit jeweils $C = 2\mu F$ in Serienschaltung untersucht. Hierbei wird die Schaltung einmal mit Gleichspannung und einmal mit Wechselspannung betrieben.

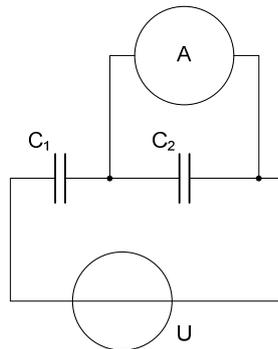


Abbildung 9: Schaltbild für die Spannungsverteilung an zwei Kondensatoren

3.3 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde die Gruppe vor der Durchführung durch Herrn Hävecker darauf hingewiesen, dass der Kondensator mit $C = 6\mu F$ einen tatsächlichen Wert von $C = 7,2\mu F$ besitzt. Das Messobjekt wurde mit Hilfe einer Gleichspannungsquelle (vgl. Anhang B, Geräteliste) 3 Minuten lang mit einer Spannung von $5V$ geladen und anschließend an das HP Systemmultimeter zur Spannungsmessung angeschlossen. Nachdem der Kondensator danach vom Stromkreis getrennt wurde, wurde 5 Minuten lang die Spannung mittels Elektrometer und y,t-Schreiber aufgezeichnet. Der Plot des Schreibers in diesem Zeitraum bestätigt, dass der Kondensator nahezu keine Spannung verloren hat (vgl. Anhang C, Plot des y,t-Schreibers). Anschließend wurde für 15 Minuten ein Entladewiderstand von $100M\Omega$ parallel zum Kondensator geschaltet, welches ebenfalls mit dem y,t-Schreiber aufgenommen wurde. Letztlich wurde der Kondensator nach der Durchführung zum vollständigen Entladen kurzgeschlossen.

Im letzten Versuchsteil wurden zwei Kondensatoren mit der gleichen Kapazität, $C = 2\mu F$, in Reihe geschaltet. Zunächst wurden sie an eine Gleichspannung von $2V$ angeschlossen. Dabei wurde die Spannung an jedem Kondensator durch wechselseitiges Parallelschalten mit dem HP Systemmultimeter gemessen, welches zuvor auf einen Innenwiderstand von $1G\Omega$ eingestellt wurde, um den Messfehler zu minimieren. Die gleichen Messungen mit den Kondensatoren wurden anschließend bei einer Wechselspannung von $2V$ mit einer Frequenz $f = 50Hz$ durchgeführt. Als Spannungsquelle diente der Low Distortion Generator (vgl. Anhang B, Geräteliste).

3.4 Auswertung

3.4.1 Bestimmung des Isolationswiderstandes eines Kondensators

Entnimmt man dem Plot des y,t-Schreibers die Spannungswerte in Schritten von 0,5 Minuten (vgl. Anhang C, Plot des y,t-Schreibers), so erhält man Tabelle 14. Nicht übernommen wurden hierbei die 5 Minuten, in denen der Kondensator nicht merklich entladen wurde, da kein Entladewiderstand, parallel geschaltet war.

Zeit t [min]	Spannung U [V]	Zeit t [min]	Spannung U [V]
0	5,00	8	2,60
0,5	4,83	8,5	2,50
1	4,62	9	2,39
1,5	4,44	9,5	2,30
2	4,26	10	2,20
2,5	4,08	10,5	2,11
3	3,91	11	2,03
3,5	3,77	11,5	1,95
4	3,61	12	1,87
4,5	3,47	12,5	1,80
5	3,32	13	1,72
5,5	3,18	13,5	1,66
6	3,06	14	1,59
6,5	2,94	14,5	1,52
7	2,81	15	1,47
7,5	2,71		

Tabelle 14: Abgelesene Spannungswerte am Kondensator beim Entladevorgang

In Abbildung 10 wurde die Kondensatorentladung mittels gnuplot dargestellt. Die Werte wurden aus dem Plot bzw. Tabelle 14 übernommen. Über die fit-Funktion ermittelte gnuplot für die Zeitkonstante τ_{minuten} einen Wert von 12.2241 ± 0.01353 (0.1107%) (vgl. Anhang D, gnuplot-Daten).

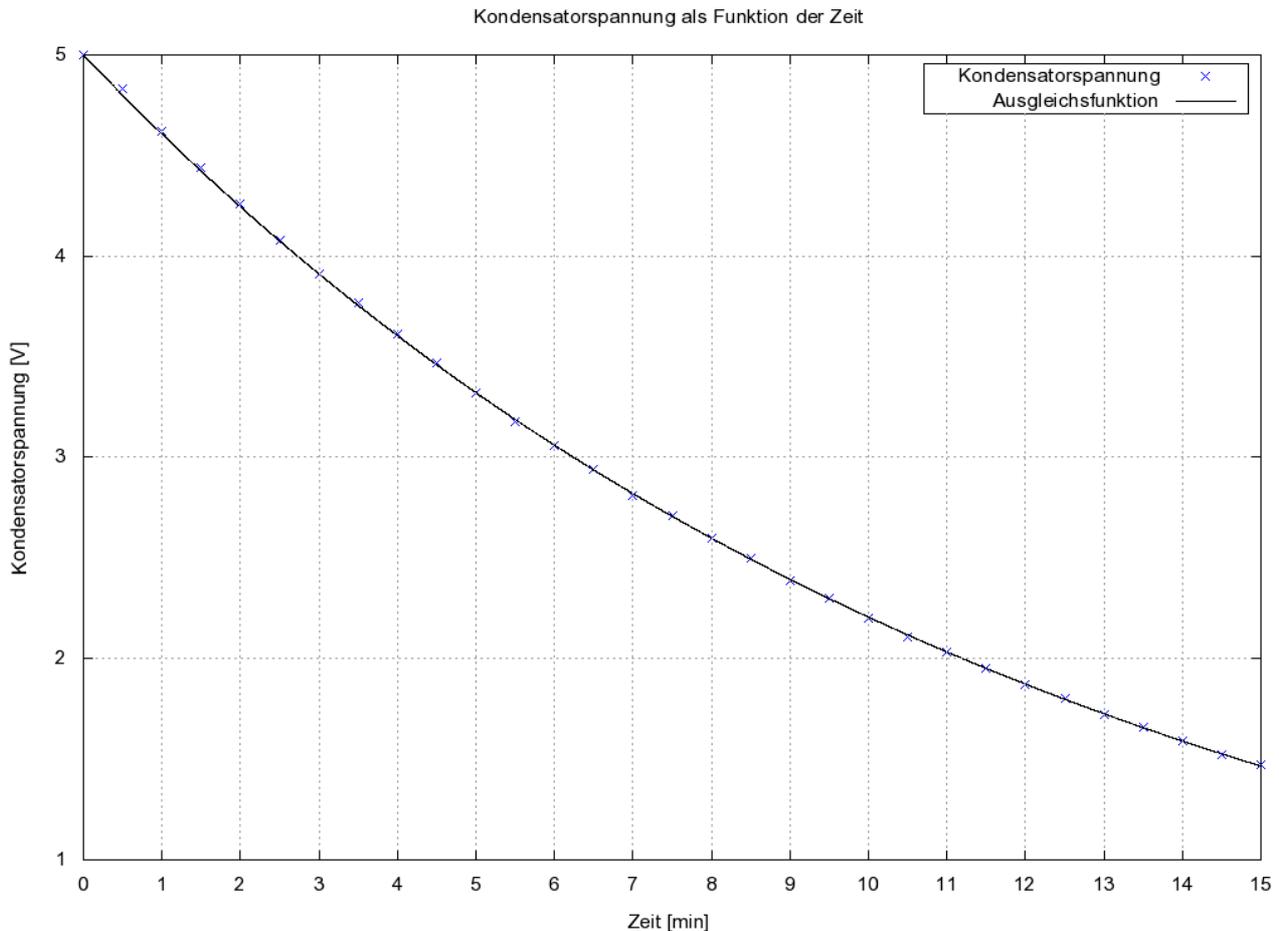


Abbildung 10: Kondensatorspannung als Funktion über die Zeit

Für die weiteren Berechnungen wird τ_{sekunden} benötigt:

$$\tau_{\text{sekunden}} = \tau_{\text{minuten}} \cdot 60 = 12,2241 \cdot 60 = \underline{\underline{733,446}}$$

Durch Formel (6) erhält man für den Isolationswiderstand des Kondensators folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{sekunden}} &= R \cdot C \\ \Leftrightarrow R &= \frac{\tau_{\text{sekunden}}}{C} = \frac{733,446}{7,2\mu\text{F}} = \underline{\underline{101,86\text{M}\Omega}} \end{aligned}$$

Der errechnete Wert für $R = 101,86\text{M}\Omega$ entspricht nahezu den Erwartungen. Die geringe Abweichung ist auf Messfehler bzw. Toleranzen zurückzuführen. Theoretisch hätte der errechnete Widerstand geringfügig kleiner sein müssen, als die $100\text{M}\Omega$ des Entladewiderstandes. Dies ist zurückzuführen auf die allg. Formel zur Berechnung des Gesamtwiderstandes einer Parallelschaltung:

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (9)$$

3.4.2 Spannungsverteilung an zwei Kondensatoren

Zur Unterscheidung der Kondensatoren wird zwischen Kondensator C_1 und C_2 unterschieden. Beide Kondensatoren hatten eine Kapazität von $C = 2\mu F$, waren jedoch nicht baugleich.

Die erste Messung mit 2V Wechselspannung bei einer Frequenz von 50Hz ergab eine sich auf beide Kondensatoren gleichmäßig verteilte Spannung, die sich über die Zeit nahezu unverändert blieb. Folgende Werte wurden dabei aufgenommen:

Kondensator	Spannung U [V]
C_1	1,00072
C_2	1,00163

Tabelle 15: Spannungsverteilung an C_1 und C_2 bei 2V Wechselspannung mit 50Hz

Tabelle 15 zeigt die erwartete Verteilung der Spannung auf die beiden Messobjekte bei einer Wechselspannung. Denn der komplexe Widerstand eines Kondensators ist von der Frequenz und seiner Kapazität abhängig, die in diesem Fall identisch sind.

Bei der Messung mit 2V Gleichspannung wurde eine unterschiedliche Verteilung der Spannungen festgestellt, die sich mit fortschreitender Zeit veränderte. Die Anfangswerte werden in Tabelle 16 genannt.

Kondensator	Spannung U [V]
C_1	0,755
C_2	1,241

Tabelle 16: Spannungsverteilung an C_1 und C_2 bei 2V Gleichstrom

Beobachtete man die Spannungswerte über die Zeit, so war zu erkennen, dass die Spannung an C_1 stetig fiel, während die Spannung an C_2 anstieg. Beide Werte ergaben addiert durchgehend annähernd 2V.

Über die unterschiedliche Verteilung der Spannung und ihrer Veränderung über die Zeit konnte nur spekuliert werden. Da die Kondensatoren zwar die gleiche Kapazität besaßen, aber nicht baugleich waren, kann die These aufgestellt werden, dass dieses Verhalten auf unterschiedliche Isolationswiderstände bzw. die unterschiedliche Bauform zurückzuführen ist. Dieses Verhalten müsste allerdings in einem separaten Versuch nachgewiesen werden.

Es ist jedoch anzumerken, dass diese unterschiedliche Spannungsverteilung an Kondensatoren bei Gleichspannung beachtet werden sollte, da durch dieses Verhalten ggf. Belastungsgrenzen von Bauteilen überschritten werden können.

3.5 Zusammenfassende Ergebnisdiskussion

Als erstes konnte festgestellt werden, dass ein mit Gleichstrom geladener Kondensator, hier mit $C = 6\mu F$, seine Spannung durch den Isolationswiderstand kaum verliert. Er besitzt also einen großen ohmschen Widerstand. Schaltet man einen hochohmigen Entladewiderstand, hier $R = 100M\Omega$, parallel zum Kondensator, so kann man seine Entladung messen und als Funktion über die Zeit darstellen. Die Parallelschaltung hatte einen Gesamtwiderstand von $R = 101,86M\Omega$, was im Wesentlichen dem Entladewiderstand entspricht. Hieraus, in Kombination mit Formel (9), ist zu erkennen, dass der Isolationswiderstand des Kondensators sehr viel größer ist, als der Entladewiderstand.

Bei einer Wechselspannung verhielten sich die Spannungen der Serienschaltung zweier Kondensatoren den Erwartungen entsprechend. Sie waren nahezu übereinstimmend, da sowohl die Kapazität als auch die Frequenz identisch waren. Bei einer Gleichspannung hingegen kann spekuliert werden, dass die Spannungsverteilung anhängig von der Bauform bzw. den Isolationswiderständen ist, welches in Schaltungen ggf. berücksichtigt werden muss.

Geladene Kondensatoren sollten aus Sicherheitsgründen nach ihrer Benutzung kurzgeschlossen werden, wodurch sie ihre ggf. vorhandene Ladung sofort verlieren.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Otto, Prof. H.-J., Hävecker, Dipl.-Ing. W.: Versuch: R7/C1 – Bestimmung von Widerständen / Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kondensatoren, kein Verlag, Bremen, 2009.
- [2] Mevenkamp, Prof. Dr.-Ing. M.: Grundlagen der Elektrischen Messtechnik - Unterlagen zum Modul ELMESS im Studiengang Technische Informatik, kein Verlag, Bremen, o.J.
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Vierleitemessung> (gesehen am: 01.12.2009)
- [4] http://www.ohm-hochschule.de/fileadmin/Fachbereiche/efi/Weigand/Strom_Spannung.pdf (gesehen am: 10.12.2009)

5. Anhang**A. Zeitlicher Ablauf**

<u>Uhrzeit [hh:mm]</u>	<u>Aktion</u>	<u>Vorkommnisse</u>	<u>erhaltene Hinweise</u>
09:00	Anfertigung der Geräteliste		
09:40	Einweisung in den Versuch		durch Herrn Mevenkamp
9:55	Versuchsdurchführung R7 a)		
10:00	Versuchsdurchführung R7 b)		
10:05	Versuchsdurchführung R7 c)		
10:20	Versuchsdurchführung 2-Leiter. / 4-Leiter-Methode mit HP Systemmultimeter		durch Herrn Hävecker
10:30	Messung versch. Kontaktwiderstände durch 4-Leiter-Methode		
10:45	Versuchsdurchführung C1 mit $C = 6\text{nF}$ a)		
10:55	Versuchsdurchführung C1 mit $C = 6\text{nF}$ b)		
11:20	Spannungsverteilung an 2 Kondensatoren a) 2V / 50Hz		durch Herrn Hävecker
11:30	Spannungsverteilung an 2 Kondensatoren b) 2V Gleichspannung		

B. Geräteliste

<u>Anzahl</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Inventarnummer</u>	<u>Verwendungszweck</u>	<u>Messbereiche & Fehlertoleranzen</u>
2	Multimeter MetraHit 26S	02001a 02001n	Spannungs- und Strommessung	300mV: $\pm 10\mu\text{V}$ 3V: $\pm 100\mu\pm$ 30V: $\pm 1\text{mV}$ 300 μA : $\pm 10\text{nA}$ 3mA: $\pm 100\text{nA}$ 30mA: $\pm 1\mu\text{A}$ 300mA: $\pm 100\mu\text{A}$
1	HP Systemmultimeter 34401A	ELGM 404868 ELGM 2007A	Spannungs-, Strom- und Widerstandsmessung	100 Ω => 0,006% 1k Ω => 0,0025% 10M Ω => 0,016%
1	EPS Regulated DC Power Supply EP-1803	ELGE 990086 ELGE 4049396	Gleichspannungsquelle	Ripple $\pm 1\text{mV}$
1	Keithley 6514 System Electrometer	ELGE 404940	Spannungsmessung	
1	Präzisionsstromquelle PCS100	ELGE-MES-04	Stromquelle	1% Fehlertoleranz
1	Low Distortion Generator HM8037	ELGE 89031	Wechselspannungsquelle	
1	Servogor 122 Dc	ELGE 01005	y,t-Schreiber	
1	0,5 Ω Widerstand	75055		

<u>Anzahl</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Inventarnummer</u>	<u>Verwendungszweck</u>	<u>Messbereiche & Fehlertoleranzen</u>
1	500Ω Widerstand	-		
1	5MΩ Widerstand	49081		
1	Widerstandsbox 5 * 100MΩ	IV / 61004A		
1	Transparente Anschlussbox	-	Reedrelais Kippschalter Drehschalter	
1	6μF Kondensator	91012		±10%
2	2μF Kondensatoren	87003 -		

C. Plot des y,t-Schreibers

D. gnuplot-Daten**Skript**

```

reset;
set term png enhanced size 1024, 768;
set samples 10000;
set key box;
set xlabel 'Zeit [min]';
set xrange [0:15];
set xtics 1
set ylabel 'Kondensatorspannung [V]';
set ytics 1
set grid front xtics ytics mxtics;
set title 'Kondensatorspannung als Funktion der Zeit';
set output 'yt.png';

f(x) = 5*exp(-x/tau)
fit [0.5:15] f(x) 'yt.dat' via tau #fit von 0.5 bis 15 auf der Abszisse
plot 'yt.dat' w p pt 2 ps 1 lc rgb 'blue' title 'Kondensatorentladung', \
      f(x) w l lc rgb 'black' title 'Ausgleichsfunktion';

```

Ausgabe von fit

Final set of parameters	Asymptotic Standard Error
=====	=====
tau = 12.2241	+/- 0.01353 (0.1107%)