

Kapitel 1

Ladung, Spannung und Strom

1.1 Theoretischer Hintergrund

1.1.1 Elektrische Ladung

Es gibt zwei verschiedene Arten von **Ladungen**, positive und negative Ladungen. Geladene Teilchen mit verschiedenen Vorzeichen ziehen sich an, Ladungen mit gleichem Vorzeichen stoßen sich ab. **Elektrische Leiter** sind Materialien wie Metallen mit der Fähigkeit Ladungsträger zu transportieren.

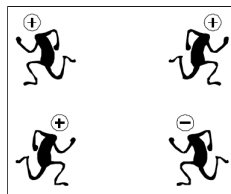


Abb. 1.1: Gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an.

1.1.2 Elektrischer Strom

Die Ladungsmenge die während einer bestimmten Zeit durch den Leiter fließt, ist ein Maß für die **Stromstärke**. Pro Sekunde fließen $6.25 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch einen Draht. Die Einheit des elektrischen Stromes ist der **Ampère** A. Die Stromstärke ist das Verhältnis der transportierten Ladung ΔQ durch die Zeit Δt .

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad [I] = \text{A} \quad (1.1)$$

Messgeräte, mit denen der elektrische Strom gemessen wird, bezeichnet man als **Ampéremeter**. Um den in einem Leiter fließenden elektrischen Strom zu messen, muss dieser Leiter aufgetrennt und ein Ampéremeter eingeführt werden.



Abb. 1.2: Der elektrische Strom wird durch Einschlaufen eines Ampèremeters in den Leiter gemessen.

Damit das Verhalten der Schaltung trotzdem möglichst nicht verändert wird, verhält sich ein gutes Ampèremeter wie ein Stück Leiter, das heisst wie ein **Kurzschluss**.

1.1.3 Elektrische Spannung

Um eine Ladung zu bewegen muss **Arbeit** geleistet werden. Diese Arbeit ist umso grösser, je grösser die elektrische Spannung zwischen zwei benachbarten Punkten ist. Die Einheit der elektrischen Spannung ist das **Volt** V. Spannungen werden durch ein **Voltmeter** gemessen. Die Spannung wird immer zwischen zwei Punkten einer Schaltung gemessen.

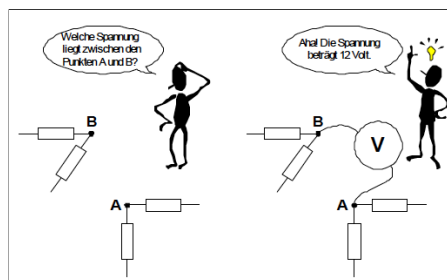


Abb. 1.3: Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten wird mit einem Voltmeter gemessen.

Spannungen können auch durch einen Bezugspunkt oder **Massenpunkt** gemessen werden. Man spricht von der Spannung eines einzelnen Punktes und meint damit die Spannung zwischen dem Punkt und der Masse.

1.1.4 Spannung-Strom-Kennlinie des Netzgeräts

Das Netzgerät liefert eine konstante Ausgangsspannung U_{konst} , solange der maximale Strom I_{max} nicht überschritten wird. Versucht die angeschlossene Schaltung mehr Strom zu ziehen, schaltet das Netzgerät auf Konstantstrombetrieb um. Der Ausgangsstrom wird auf I_{max} begrenzt.

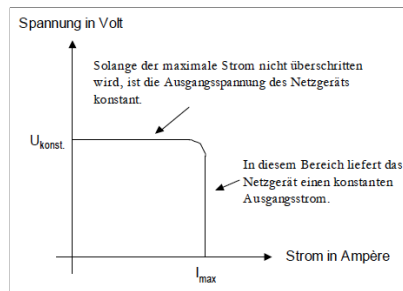


Abb. 1.4: Strom-Spannungs-Kennlinie des Netzgeräts

1.1.5 Spannung-Strom-Kennlinie von Widerständen

Die Spannung-Strom-Kennlinie eines Widerstands ist eine **Gerade**, die durch den Nullpunkt geht. Bei Verdoppelung der Spannung wird sich auch der Strom verdoppeln. Das Verhältnis von Spannung und Strom bleibt konstant und ist direkt proportional. Dadurch entsteht das **Ohmsche Gesetz**

$$R = \frac{U}{I}, \quad [R] = \Omega \quad (1.2)$$

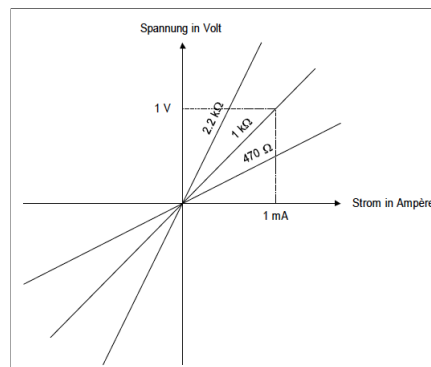


Abb. 1.5: Strom-Spannungs-Kennlinie der drei Widerstände

1.1.6 Spannung-Strom-Kennlinie der Glühlampe

Die Spannung-Strom-Kennlinie einer Glühlampe ist keine Gerade. Das Verhältnis von Spannung zu Strom ist nicht konstant, sondern nimmt mit wachsender Spannung zu. Ist die Spannung klein, so leuchtet die Glühlampe schwach. Der Glühdraht ist relativ kalt und leitet den Strom besser. Der Widerstand des Drahtes steigt mit zunehmender Temperatur an. Die Glühlampe ist kein linearer ohmscher Widerstand. Das **Ohmsche Gesetz** gilt bedingt.

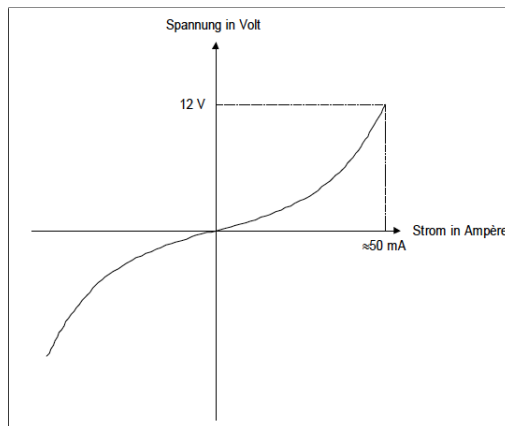


Abb. 1.6: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Glühlampe

1.1.7 Spannungsteiler

Die Schaltung in Aufgabe 7 wird als Spannungsteiler bezeichnet. Die Eingangsspannung U_q des Netzgeräts von 10 Volt wird in zwei Spannungen über den beiden Widerständen R_1 und R_2 aufgeteilt.

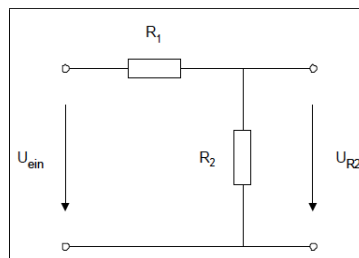


Abb. 1.7: Spannungsteiler mit ohmschen Widerständen

Durch beide Widerstände fließt den gleichen Strom. Pro Sekunde fließen eine gewissen Anzahl Elektronen durch R_1 und so fließen gleiche Anzahl Elektronen durch R_2 pro Sekunde. Es gilt das **Ohmsche Gesetz** für beide Widerstände

$$U_{R_1} = I \cdot R_1$$

$$U_{R_2} = I \cdot R_2$$

Die **Summe** beider Spannungen beider Widerstände muss gleich der Eingangsspannung U_Q sein.

$$U_q = U_{R_1} + U_{R_2} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I \cdot (R_1 + R_2)$$

Somit fließt ein Strom von

$$I = \frac{U_Q}{R_1 + R_2}$$

Die Spannungen an den jeweiligen Widerständen lauten

$$U_{R_1} = \frac{U_Q}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

$$U_{R_2} = \frac{U_Q}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

(1.3)

1.2 Versuchsanleitung

1.2.1 Messgeräte

Für diesen Versuch wurden ein **Labornetzgerät** und zwei Multimeter benötigt. Ein Labornetzgerät liefert eine **konstante, einstellbare Spannung**. Die elektrische Spannung zwischen den beiden Anschlüssen des Netzgeräts ist, unabhängig von der Belastung, immer gleich.



Abb. 1.8: Frontplatte des Labornetzgeräts

Um das Netzgerät und/oder die angeschlossene Schaltung zu schützen kann jedoch der **maximale Ausgangsstrom** begrenzt werden. Zieht die angeschlossene Schaltung einen höheren Strom, so wird die Ausgangsspannung solange verkleinert, bis der Strom wieder im erlaubten Bereich liegt.

Wird das Netzgerät als Konstantspannungsquelle gebraucht, so muss man darauf achten, dass die Strombegrenzung nicht anspricht.

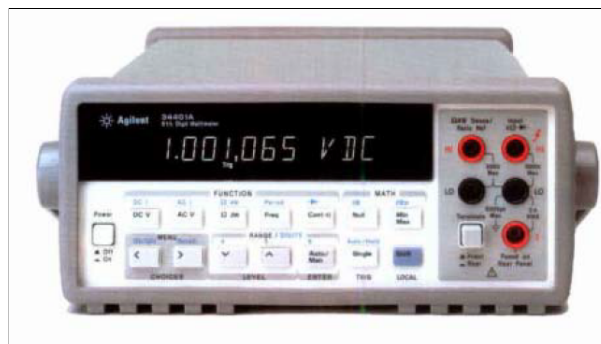


Abb. 1.9: Frontplatte des Multimeters

Anstelle der Volt- und Ampéremeter werden **Multimeter** benutzt. Die Umschaltung erfolgt über einen Wahlschalter oder über Funktionstasten. Da sich ein Ampéremeter wie ein Kurzschluss verhält, ist es nicht ratsam, damit Spannung messen zu wollen. Moderne Multimeter können neben Spannung und

Strom auch andere Grössen wie beispielsweise Widerstand, Kapazität, Frequenz und Stromverstärkung messen.

1.2.2 Widerstände

Ein **Widerstand** wird durch sein Widerstandswert beschrieben. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω). Häufig werden Widerstände deshalb mit Farbringen gekennzeichnet. Die ersten zwei (manchmal drei) Ringe geben die ersten zwei (resp. drei) Ziffern des Widerstandswerts an. Der nachfolgende Ring gibt einen Multiplikator an, mit dem die Ziffern multipliziert werden. Der letzte Ring bezeichnet die Toleranz des Widerstands.

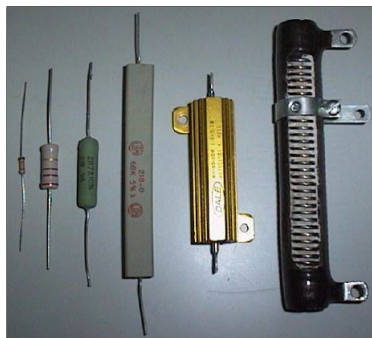


Abb. 1.10: Verschiedene Bauformen von Widerständen

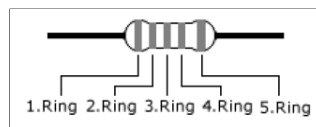


Abb. 1.11: Kennzeichnung des Widerstandswerts.

Farbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring	5. Ring
Silber	•	•	•	x0,01	±10%
Gold	•	•	•	x0,1	±5%
Schwarz	•	0	0	x1	•
Braun	1	1	1	x10	±1%
Rot	2	2	2	x100	±2%
Orange	3	3	3	x1000	•
Gelb	4	4	4	x10000	•
Grün	5	5	5	x100000	± 0.5%
Blau	6	6	6	x1000000	±0.25%
Lila	7	7	7	x10000000	±0.1%
Grau	8	8	8	•	±0.05%
Weiss	9	9	9	•	•

Tab. 1.1: Widerstandswerte mittels Farbringen.

1.2.3 Aufgaben

Aufgabe 1

Stellen Sie die Spannung am Netzgerät auf das **Minimum** und drehen Sie die Strombegrenzung auf **“max”**. Wählen Sie beim Multimeter die Funktion **“DC V”** (Messen von Gleichspannung) und schliessen Sie das Multimeter an die Ausgangsklemmen des Netzgeräts an.

- In welchem Bereich können Sie die Ausgangsspannung des Netzgeräts einstellen?
- Wie genau ist die Anzeige der Ausgangsspannung des Netzgeräts in % beim **Maximum** bez. Multimeter?

Aufgabe 2

Stellen Sie die Spannung am Netzgerät auf ca. 10V und drehen Sie nun die Strombegrenzung auf **“min”** (nur soweit, dass noch die Ausgangsspannung anliegt). Schliessen Sie das Multimeter an die Ausgangsklemmen des Netzgeräts an. Wählen Sie wiederum die Funktion **“DC I”** (Messen von Gleichstrom).

- In welchem Bereich können Sie den Ausgangsstrom des Netzgeräts einstellen? Welchen maximalen Strom kann das Netzgerät liefern?
- Welchen Wert zeigt das Voltmeter am Netzgerät an?

Aufgabe 3

Bauen Sie die unten stehende Messschaltung auf. Achten Sie darauf, beim als Ampèremeter benutzten Multimeter den Eingang für hohe Ströme zu verwenden. Drehen Sie den Knopf für die Strombegrenzung auf **“max”** und wählen Sie eine **mittlere Ausgangsspannung**.

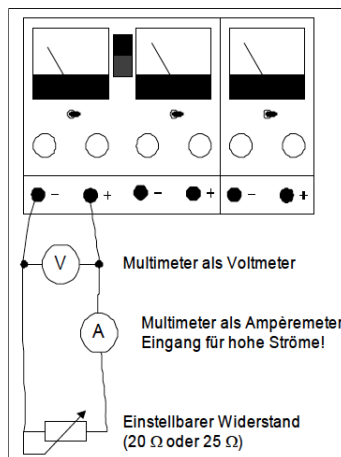


Abb. 1.12: Aufbau Aufgabe 3

- a) Verändern Sie nun den Wert des einstellbaren Widerstands und tragen Sie die jeweils gemessenen Spannungs- und Stromwerte in eine Tabelle ein.

U/V	I/A	R/Ω
-------	-------	------------

Tab. 1.2: Spannungs- und Stromwerte von 20Ω

- b) Stellen Sie die Werte der Tabelle graphisch dar (separates Blatt), indem Sie diese in ein Koordinatensystem eintragen. Diese Kurve nennt man die Spannungs-Strom-Kennlinie des Netzgeräts, da sie den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wiedergibt.

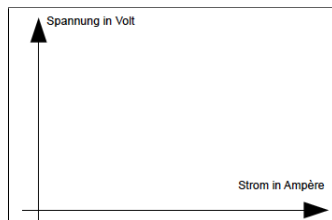


Abb. 1.13: Spannungs-Strom-Kennlinie von 20Ω

- c) Kommentieren Sie die erhaltene Kennlinie.

Aufgabe 4

Wechseln Sie nun den einstellbaren Widerstand in der obigen Schaltung durch einen fixen Widerstand von 1000Ω ($1k\Omega$) aus. Drehen Sie die Strombegrenzung auf “**max**”.

- a) Ändern Sie die Ausgangsspannung des Netzgeräts und tragen Sie die jeweils gemessenen Spannungs- und Stromwerte in eine Tabelle ein.

U/V	I/A	R/Ω
-------	-------	------------

Tab. 1.3: Spannungs- und Stromwerte von $1k\Omega$

- b) Um auch negative Spannungs- und Stromwerte zu erhalten, müssen Sie die Anschlüsse am Netzgerät vertauschen.

- c) Stellen Sie diese Werte in einer Spannung-Strom-Kennlinie graphisch dar.

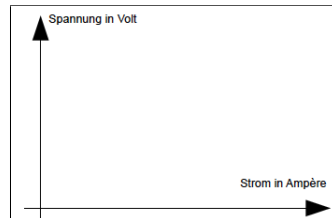


Abb. 1.14: Spannungs-Strom-Kennlinie von $1k\Omega$

- d) Welche Kurvenform erhalten Sie?
e) Tragen Sie in die Tabelle auch den Wert “Spannung dividiert durch Strom” ein.

Aufgabe 5

Wiederholen Sie die [Aufgabe 4](#) mit Widerständen von 470Ω und $2.2k\Omega$.

U/V	I/A	R/Ω
-------	-------	------------

Tab. 1.4: Spannungs- und Stromwerte von 470Ω

U/V	I/A	R/Ω
-------	-------	------------

Tab. 1.5: Spannungs- und Stromwerte von $2.2k\Omega$

- a) Zeichnen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie für alle drei Widerstände in einem gemeinsamen Koordinatensystem ein.

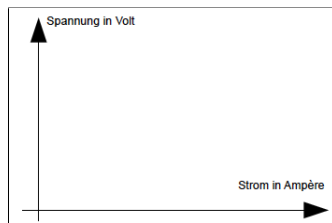


Abb. 1.15: Spannungs-Strom-Kennlinie von 470Ω und $1k\Omega$

- b) Was können Sie über die Steigungen der Geraden aussagen?

Aufgabe 6

Wiederholen Sie die **Aufgabe 4**, indem Sie den Widerstand durch eine **Glühlampe** ersetzen. Achten Sie darauf, dass die Spannung nun 12V nicht mehr überschreiten darf!

- a) Zeichnen Sie wiederum die Spannungs-Strom-Kennlinie der Glühlampe auf.

U/V	I/A	R/Ω
-------	-------	------------

Tab. 1.6: Spannungs- und Stromwerte der Glühlampe

- b) Vergleichen Sie diese mit den Kennlinien der vorhergehenden Versuche.

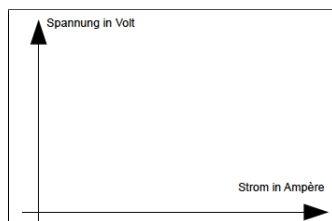


Abb. 1.16: Spannungs-Strom-Kennlinie der Glühlampe

Aufgabe 7

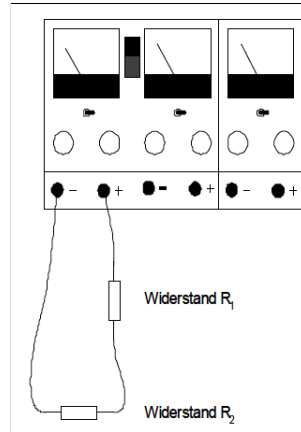


Abb. 1.17: Spannungsteiler

Bauen Sie die nebenstehende Versuchsanordnung auf. Wählen Sie eine Ausgangsspannung des Netzgeräts von genau 10V. Füllen Sie nun die unten stehende Tabelle aus.

R_1/Ω	R_2/Ω	U_{R_1}/V	U_{R_2}/V
1000	1000		
1000	470		
2200	1000		
1000	0		
0	1000		

Tab. 1.7: Spannungen über die Widerstände

- Was können Sie über die Summe der beiden Spannungen aussagen?
- Versuchen Sie eine Beziehung herzuleiten, mit der sie die Spannung über R_2 als Funktion der beiden Widerstandswerte R_1 und R_2 berechnen können.

$$U_{R_1} = I \cdot R_1 \quad U_{R_2} = I \cdot R_2$$

Die **Summe** beider Spannungen beider Widerstände muss gleich der Eingangsspannung U_Q sein.

$$U_q = U_{R_1} + U_{R_2} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I \cdot (R_1 + R_2)$$

Somit fließt ein Strom von

$$I = \frac{U_Q}{R_1 + R_2}$$

Die Spannungen an den jeweiligen Widerständen lauten

$$U_{R_1} = \frac{U_Q}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \quad U_{R_2} = \frac{U_Q}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (1.4)$$

1.3 Diskussion

Kapitel 2

Vierleitermessung

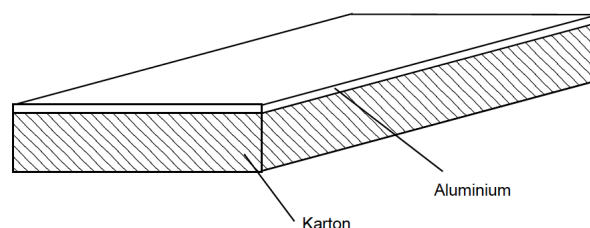
2.1 Theoretischer Hintergrund

2.1.1 Einleitung

Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes lässt sich der ohmsche Widerstand von homogenen geometrischen Formen sehr einfach berechnen. Das Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung der Dicke einer Aluminiumfolie. Dieser Versuch hat folgende Zielsetzungen: Rechnen mit SI - Einheiten, Bedienen von Messgeräten in der Gleichstromlehre, Anwenden von Strom- und Spannungsfehlerschaltung, Anwenden der 4-Leiter Messung, Abschätzen der Grenzen von Modellen und Vereinfachungen.

2.1.2 Vorbereitung

Kreieren Sie Ihren eigenen persönlichen Widerstand, indem Sie Aluminiumfolie auf einen Karton kleben und ein längliches Rechteck herausschneiden. Fertigen Sie mindestens zwei davon an.



2.1.3 Das Ohmsche Gesetz

Das Ohmsche Gesetz beschreibt den Zusammenhang von Strom und Spannung bei einem ohmschen Widerstand. Bei einem Widerstand von 1Ω fließt bei einer Spannung von 1V ein Strom von 1A.

$$R = \frac{U}{I}, \quad \begin{array}{l} R : \text{ohmscher Widerstand } [\Omega] \\ U : \text{Spannung [V]} \\ I : \text{Strom [A]} \end{array} \quad (2.1)$$

2.1.4 Die Leistung im Gleichstromkreis

Bei Gleichspannung gilt

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \\ P &= I^2 \cdot R \\ P &= \frac{U^2}{R} \end{aligned} \quad , \quad [P] = \text{Watt} = \text{V} \cdot \text{A} \quad (2.2)$$

Allgemein für nicht konstante Werte ist die Leistung

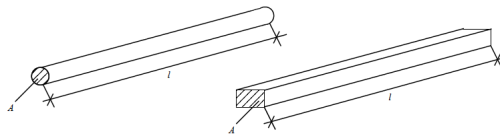
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.3)$$

2.1.5 Der spezifische Widerstand

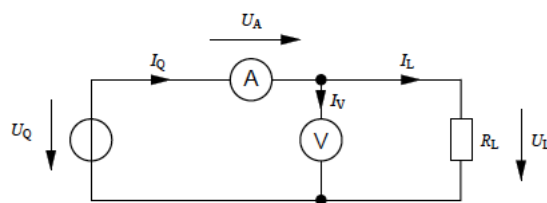
Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes lässt sich der ohmsche Widerstand eines homogenen Körpers berechnen.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\sigma \cdot A} \quad (2.4)$$

wobei R der ohmsche Widerstand in Ω , ρ der spezifische Widerstand in Ωm , l die Länge des Körpers in m, A die Querschnittsfläche in m^2 und σ die Leitfähigkeit in $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.



2.1.6 Die Spannungsfehlerschaltung



Bei der Spannungsfehlerschaltung entsteht ein **Spannungsteiler** aus dem Innenwiderstand des Strommessgerätes und dem zu messenden Widerstand. Der **Spannungsabfall** U_A am Strommessgerät verfälscht die Spannungsmessung. Die gemessene Spannung U_Q ist um die Spannung U_A zu gross.

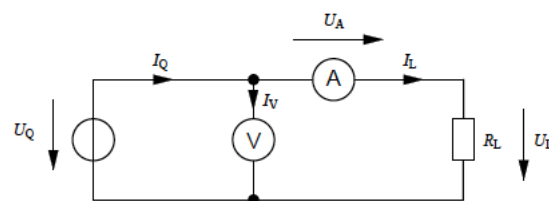
Folgende Messung wurde mit $R = 10\Omega$ gemacht

U/V	I/A	R/Ω (Spannungsfehler)	R/Ω (Stromfehler)
20	2,4	10000	8333
0,2	0,024	10000	8333

Typischerweise ist der Innenwiderstand von Strommessern **sehr klein**. Die Spannungsfehlerschaltung eignet sich deshalb nur für Messungen an **grossen Widerständen**, wo der Spannungsabfall am Innenwiderstand des Strommessers die Messung sehr wenig beeinflusst. Sobald man mit dieser Schaltung einen kleinen Widerstand messen will, verfälscht die Reihenschaltung aus Innenwiderstand des Strommessers und dem zu messenden Widerstand das Ergebnis.

Die Spannungsfehlerschaltung wird bei hochohmigen Lastwiderständen $R_L > 1\text{M}\Omega$ gebraucht.

2.1.7 Die Stromfehlerschaltung



Bei der Stromfehlerschaltung besteht eine **Parallelschaltung** aus dem Innenwiderstand des Spannungsmessers und dem zu messenden Widerstand. Durch den Spannungsmesser fliesst ein Strom I_V . Dieser verfälscht den zu messenden Strom $I_L = U_L/R_L$, der durch den zu messenden Widerstand fliesst. Der Strom I_Q ist um den Strom I_L , der durch den Spannungsmesser fliesst, zu gross.

Folgende Messung wurde mit $R = 220\Omega$ gemacht.

U/V	I/A	R/Ω (Spannungsfehler)	R/Ω (Stromfehler)
20	90	222	222
0,2	0,91	333	220

Typischerweise ist der Innenwiderstand von Spannungsmessern **sehr gross**. Die Stromfehlerschaltung eignet sich deshalb nur zur Widerstandsmessung an **kleinen Widerständen**, wo der Strom durch den Innenwiderstand des Spannungsmessers, die Messung sehr wenig beeinflusst. Sobald man mit dieser Schaltung an einem grossen Widerstand messen will, verfälscht die Parallelschaltung aus Innenwiderstand des Spannungsmessers und dem zu messenden Widerstand das Ergebnis.

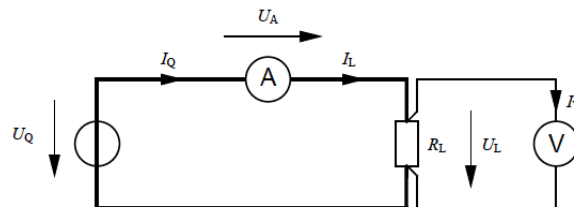
Die Stromfehlerschaltung wird bei niederohmigen Lastwiderständen $1\Omega < R_L < 1\text{M}\Omega$ gebraucht.

2.1.8 Multimeter

Elektronische Multimeter sind bei der Spannungsmessung **sehr hochohmig** ($1..10\text{M}\Omega$). Daher hat die Stromfehlerschaltung nur dann eine Bedeutung wenn sehr kleine Ströme (μA -Bereich) gemessen werden. Die Spannungsfehlerschaltung kommt aber ebenso zur Anwendung, weil der Shunt-Widerstand im Messgerät einen relevanten Spannungsabfall bewirkt.

2.1.9 Die 4-Leiter Messung

Bei sehr **niederohmigen Widerstandsmessungen** bevorzugt man die 4-Leiter Messung. Die 4-Leiter Messung ist eine Erweiterung der Stromfehlerschaltung. Die Spannung wird aber direkt über der Last gemessen. So wird der Spannungsabfall über den Zuleitungen nicht mitgemessen.



2.2 Versuchsanleitung

2.2.1 Theoretische Aufgaben

- a) Berechnen Sie den **ohmschen Widerstand** einer Stromschiene aus Kupfer mit einer rechteckigen Querschnittsfläche von 3cm auf 10 cm. Die Länge beträgt 52 Meter.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{l}{\sigma_{Cu} \cdot A} \\
 &= \frac{52\text{m}}{(5.7 \cdot 10^7 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}) \cdot (3 \cdot 10^{-2}\text{m}) \cdot (10 \cdot 10^{-2}\text{m})} \\
 &= 3.04 \cdot 10^{-4} \Omega
 \end{aligned}$$

- b) Leiten Sie die Leistungsformel her

$$\begin{aligned}
 P &= U \cdot I = (R \cdot I) \cdot I = R \cdot I^2 \\
 &= U \cdot I = U \cdot \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{U^2}{R}
 \end{aligned}$$

- c) Die vielfach verwendeten bedrahteten Widerstände (Metallfilmwiderstände) haben eine maximale Belastbarkeit von 0.6 Watt. Berechnen sie die **maximalen Ströme** für einen 1Ω, 1kΩ und einen 10kΩ Widerstand. Berechnen Sie für die gleichen Widerstände, die **maximal zulässige Spannung**. Kann es für einen Widerstand andere Einschränkungen für die maximale Spannung geben, als die maximal zulässige Leistung?

P/Watt	R/Ω	I_{max}/A	U_{max}/V
$6 \cdot 10^{-1}$	1	$7.7 \cdot 10^{-1}$	$7.7 \cdot 10^{-1}$
$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	24.5
$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^4$	$7.7 \cdot 10^{-3}$	77.5

$$\boxed{I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P}{R}}} \quad \boxed{U_{\text{max}} = \sqrt{P \cdot R}} \quad (2.5)$$

- d) Berechnen sie allgemein die Dicke der Aluminiumfolie, wenn Sie den ohmschen Widerstand und die Geometrie kennen.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l}{b \cdot d} \Rightarrow d = \frac{\rho \cdot l}{b \cdot R} = \frac{l}{\sigma \cdot b \cdot R}$$

- e) In der Literatur wird häufig der spezifische Widerstand in $[\Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}]$ angegeben. Bestimmen Sie den Umrechnungsfaktor um den spezifischen Widerstand in $[\Omega \text{m}]$ angeben zu können.

$$\Omega \text{m} = \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1} \cdot \frac{1 \text{m}^2}{(1000 \text{mm})^2} \Rightarrow \text{Faktor} = \frac{1}{10^6}$$

- f) Welche Schaltungsart (Ohmmeter, Spannungsfehlerschaltung, Stromfehlerschaltung, 4-Leiter Messung) ist wohl die genaueste für die Widerstandsbestimmung der Aluminiumfolie?

\Rightarrow Die 4-Leiter-Messung.

- g) Sie bestimmen einen elektrischen Widerstand durch Strom- und Spannungsmessung mit der **Stromfehlerschaltung**. Der Lastwiderstand beträgt ungefähr $1 \text{M}\Omega$, der Innenwiderstand des Voltmeters ca. $20 \text{M}\Omega$. Schätzen sie den Fehler ab, wenn Sie davon ausgehen, dass die Messgeräte selber keinen Fehler aufweisen. Berechnen Sie den Fehler genau.

$$R_L = 1 \cdot 10^6 \Omega, \quad R_V = 20 \cdot 10^6 \Omega \Rightarrow \frac{1}{20} = 0.2 = 20\%$$

- h) Überlegen Sie sich, wo die Grenzen der Formel des **spezifischen Widerstandes** liegen resp. welche Annahmen bei dieser Formel getroffen werden.

\Rightarrow Materialtoleranzen.

2.2.2 Dicke der Aluminiumfolie in Längsrichtung

Benutzen Sie Ihre selbstgebauten Widerstände nur in **Längsrichtung**.

Ohmmeter

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

Spannungsfehlerschaltung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

Stromfehlerschaltung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

4-Leiter Messung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

2.2.3 Dicke der Aluminiumfolie in Querrichtung

Benutzen Sie Ihre selbstgebauten Widerstände nur in **Querrichtung**.

Ohmmeter

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

Spannungsfehlerschaltung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

Stromfehlerschaltung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

4-Leiter Messung

Messerwartung:

Messaufbau:

Messresultate:

Diskussion:

2.3 Leitfähigkeiten

Material	Typ	$\sigma / \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
Quarz	Isolator	$\approx 10^{-17}$
Silikonöl	Isolator	$\approx 10^{-15}$
Mica	Isolator	$\approx 10^{-15}$
Paraffin	Isolator	$\approx 10^{-15}$
Hartgummi	Isolator	$\approx 10^{-15}$
Porzellan	Isolator	$\approx 10^{-14}$
Glas	Isolator	$\approx 10^{-12}$
Bakelit	Isolator	$\approx 10^{-9}$
Destilliertes Wasser	Isolator	$\approx 10^{-4}$
Sandige Erde, trocken	schlechter Isolator	$\approx 10^{-3}$
Feuchte Erde	schlechter Isolator	$\approx 10^{-2}$
Frischwasser	schlechter Isolator	$\approx 10^{-2}$
Tierisches Fett	schlechter Isolator	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$
Tierischer Muskel	schlechter Leiter	0.4
Tierisches Blut	schlechter Leiter	0.7
Germanium (rein)	Halbleiter	≈ 2
Meerwasser	Leiter	≈ 4
Tellur	Leiter	$\approx 5 \cdot 10^2$
Kohle	Leiter	$\approx 3 \cdot 10^4$
Graphit	Leiter	$\approx 10^5$
Gusseisen	Leiter	$\approx 10^6$
Quecksilber	Leiter	$\approx 10^6$
Chromnickel	Leiter	$\approx 10^6$
Konstantan	Leiter	$\approx 2 \cdot 10^6$
Blei	Leiter	$\approx 5 \cdot 10^6$
Zinn	Leiter	$\approx 9 \cdot 10^6$
Bronze	Leiter	$\approx 10^7$
Messing	Leiter	$\approx 1.1 \cdot 10^7$
Zink	Leiter	$\approx 1.7 \cdot 10^7$
Wolfram	Leiter	$\approx 1.8 \cdot 10^7$
Aluminium	Leiter	$\approx 3.0 \cdot 10^7$
Aluminium hartgezogen	Leiter	$\approx 3.5 \cdot 10^7$
Gold	Leiter	$\approx 4.5 \cdot 10^7$
Kupfer	Leiter	$\approx 5.7 \cdot 10^7$
Silber	Leiter	$\approx 6.1 \cdot 10^7$
Nb3(Al-Ge)	Supraleiter	∞

Kapitel 3

Reale Quellen

3.1 Theoretischer Hintergrund

Jedes beliebige **lineare Netzwerk**, welches aus Widerständen, Spannungs- und Stromquellen, Kapazitäten und Induktivitäten besteht, kann durch eine **Ersatzschaltung** mit einer Strom- oder Spannungsquelle und einem Widerstand (Impedanz) dargestellt werden. Dabei verhält sich das Netzwerk von aussen genau gleich wie die entsprechende Ersatzschaltung.

Reale Quellen können in gewissen Betriebspunkten durch lineare Netzwerke angenähert (linearisiert) werden. Dieses linearisierte Netzwerk kann sich mit dem Betriebspunkt massiv ändern.

Dieser Versuch hat folgende Zielsetzungen:

- a) Anwenden der **Norton** und **Thevenin Ersatzschaltung**
- b) Anwenden von **Strom-** und **Spannungsfehlerschaltung**
- c) Messen und Auswerten von **Kennlinien**
- d) Netzgeräte kennen lernen
- e) **Unterschied** zwischen Strom- und Spannungsquelle lernen

3.2 Diskussion

3.3 Theoretische Aufgaben

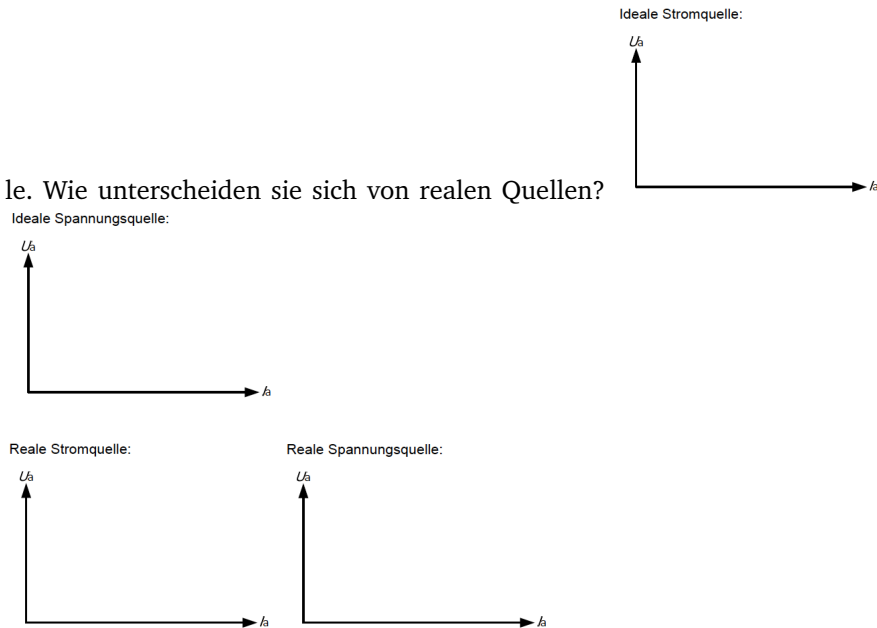
3.3.1 Batterie

Nehmen Sie mindestens eine Batterie von sich zu Hause mit, welche Sie im Labor ausmessen möchten. Diese Batterie werden wir entladen. Sie wird nicht mehr brauchbar sein.

3.3.2 Aufgaben

- Von einer Autobatterie werden folgende zwei Punkte gemessen: ($U_1 = 13.80\text{V}$, $I_1 = 10.0\text{A}$) und ($U_2 = 10.20\text{V}$, $I_2 = 150.0\text{A}$). Berechnen Sie nun numerisch den Innenwiderstand, die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom.
- Ist die Autobatterie eher eine Strom- oder Spannungsquelle?
- Skizzieren Sie die Kennlinien von einer idealen Strom- und Spannungsquelle-

le. Wie unterscheiden sie sich von realen Quellen?



3.4 Versuchsanleitung

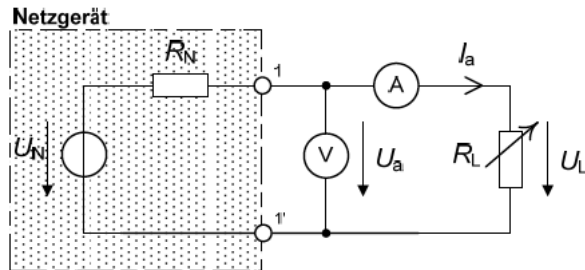
3.4.1 Kennlinie eines Labornetzgerätes

Messaufgabe

Messen Sie die U/I -Kennlinie des Labornetzgerätes. Stellen Sie die Leerlaufspannung auf $U_N = 10.0\text{V}$ ein.

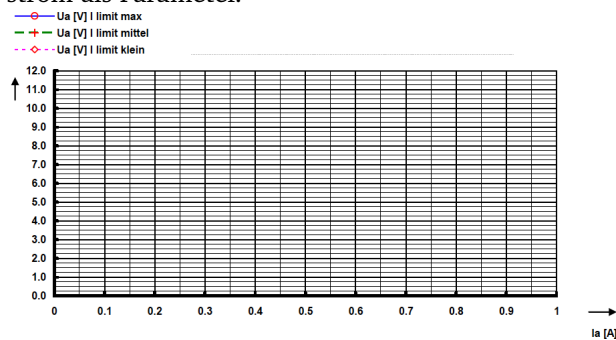
Messerwartung

Messaufbau und Kommentare



Messresultate und Berechnungen

Stellen Sie die Strombegrenzung zuerst auf das Maximum. Zeichnen Sie die Kennlinie in ein Diagramm $U_a=f(I_a)$. Stellen Sie die Strombegrenzung dann auf verschiedene Werte und wiederholen Sie die Messungen. Zeichnen Sie die verschiedenen Kurven in das untenstehende Diagramm, mit dem Begrenzungsstrom als Parameter.



Messwert: $I_{\text{limit}} = \max$

I_a/A							
U_a/V							

Messwert: $I_{\text{limit}} = \text{mittel}$

I_a/A								
U_a/V								

Messwert: $I_{\text{limit}} = \text{klein}$

I_a/A								
U_a/V								

- Wie gross ist der Innenwiderstand des Labornetzgerätes R_N im “normalen” Betrieb?
- Wie gross ist der Innenwiderstand R_N , wenn das Laborgerät in Strombegrenzung ist?

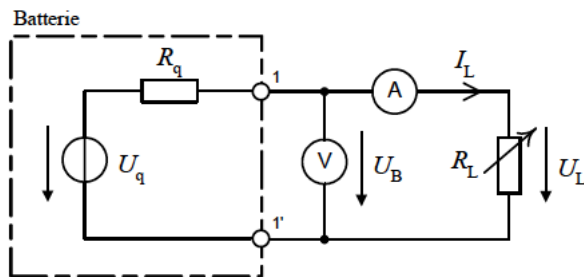
Interpretation der Messresultate

3.4.2 Ausmessen der Batterie

Nehmen Sie Ihre Batterie als Messobjekt (nur ein Exemplar). Messen Sie die U/I Kennlinie der Batterie, indem Sie verschiedene Widerstände anschliessen (oder verwenden Sie alternativ einen einstellbaren Widerstand).

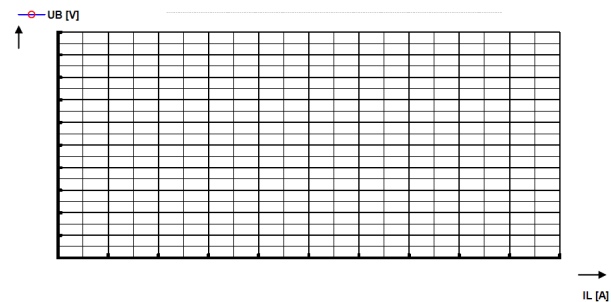
Messerwartung

Messaufbau und Kommentare



Messresultate

Tabellieren Sie die Messwerte und zeichnen Sie die Kennlinie in ein Diagramm



$U_B = f(I_L)$. Tabellieren Sie auch die Widerstandswerte.

Messwert:

I_L/A									
U_B/V									
R_L/Ω									

Zeichnen Sie zwei Widerstandsgeraden in das Diagramm. Stimmen die Arbeitspunkte überein?

- Berechnen Sie den Quellenwiderstand der Batterie. Von welchen Parametern wird dieser abhängig sein?
- Wie gross ist die Leerlaufspannung, wie gross der Kurzschlussstrom (Berechnung)?
- Messen Sie den Kurzschlussstrom.

Kapitel 4

Impulsverhalten von RC-Schaltungen

4.1 Theoretischer Hintergrund

4.1.1 Oszilloskop

Bei einem Oszilloskop handelt es sich um ein Messgerät das Spannungen in Funktion der Zeit erfassen und grafisch darstellen kann. Man unterscheidet zwischen **Analoges** und **Digitales Oszilloskop**. Meistens sind zwei Messkanäle (Channel, Ch) vorhanden. Achtung: beide Kanäle messen auf einen gemeinsamen Bezugspunkt!.

Analoges Oszilloskop

Auch **Kathodenstrahl Oszilloskop** oder abgekürzt **KO** genannt. Die zu messende Spannung wird verstärkt und steuert direkt den Elektronenstrahl der Kathodenstrahlröhre (cathode ray tube, CRT) an. Systembedingt kann das Gerät i.d.R. nur periodische und repetierende Signale erfassen. Eine Speichermöglichkeit der erfassten Messspannung besteht - ausser bei speziellen (teuren) Ko's - nicht.

Digitales Oszilloskop

Auch **Digitales Speicher Oszilloskop** oder abgekürzt **DSO** genannt. Das Messsignal wird hier zuerst mit einem Analog-Digital-Converter (ADC) digitalisiert und in einem Speicher abgelegt. Anschliessend werden die Daten vom messgerätinternen Rechner verarbeitet und auf der Anzeigeeinheit, meist einem Liquid Crystal Display (LCD), dargestellt. Da die Messwerte digitalisiert und gespeichert werden, eignet sich das DSO auch für nicht repetierende Signale (single shot Messungen). Wenn bei der Digitalisierung die Abtastfrequenz (sampling rate) nicht mindestens der doppelten Messfrequenz entspricht, kommt es zu Aliasingeffekten. Typische Abtastfrequenzen liegen beim 10- bis 20-fachen der Messfrequenz.

Im Labor arbeiten wir mit dem Tektronix Digital Scope TDS3014B. Tektronix ist einer der führenden Hersteller von Oszilloskopen.

In einer Schaltung ist es meist am besten, die Signale mit einem Tastkopf (Sonde) an den DSO-Input anzuschliessen. Tastköpfe haben in der Regel einen 10-fach (selten 100-fach) Spannungsteiler eingebaut. Dafür steigt die Eingangsimpedanz um den Faktor 10 (bzw. 100) an. Ziehen Sie den vorderen Teil einer Sonde nie ab, da ihre Spitze (Steckkontakt) so ungeschützt ist und beschädigt werden kann.

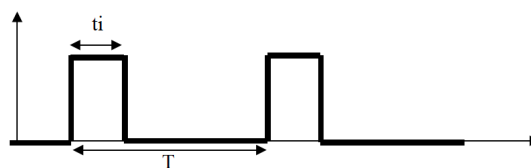
4.1.2 Funktionsgenerator

Mit dem Funktionsgenerator (FG) lassen sich spezielle elektrische Spannungsverläufe erzeugen. In der Regel sind dies:

- a) Sinus
- b) Rechteck
- c) Dreieck
- d) Sägezahn
- e) Puls

Die Parameter: Amplitude, Frequenz, Offset und Tastverhältnis lassen sich gezielt einstellen. Unter **Offset** versteht man die Addition einer Gleichspannung zum obigen Signalverlauf. Das Tastverhältnis oder **Duty Cycle** g kommt nur beim Rechtecksignal vor. Es entspricht dem Verhältnis der Impulsdauer t_i zu Periodendauer T und wird meistens in % angegeben

$$g = \frac{t_i}{T} \quad (4.1)$$



Zudem kann der FG vom Labor auch modulierte Signale und beliebige Signalformen ausgeben. Im Labor wird mit dem FG vom Typ Tektronix AFG1062 gearbeitet.

4.1.3 RC-Glied

Der Kondensator C

Ein Kondensator besteht aus zwei elektrisch leitenden Platten, die durch eine Isolation (Dielektrikum) getrennt sind. Beim Anschlus an eine Gleichspannung U_0 entzieht diese der einen Platte Elektronen und drückt sie auf die andere Platte. Der Kondensator wird dadurch geladen. Während der Ladezeit fließt

in den Zuleitungen ein Strom $i_C(t)$, obwohl zwischen den Platten kein Strom fließt. Wenn $u_C(t) = U_0$ geworden ist, ist die Ladung beendet, und somit wird $i_C(t) = 0$. Die Energie bleibt im Kondensator erhalten (gespeichert), auch wenn dieser von der Speisequelle abgetrennt wird. Das Fassungsvermögen des Kondensators heisst **Kapazität** und hat die Einheit Farad $[F] = [AsV^{-1}]$.

Ein Kondensator C besitzt per Definition die Kapazität 1F, wenn er bei einer gespeicherten Ladung Q von einem Coulomb ($1C = 6.24 \cdot 10^{18}$ Elektronen) auf 1V geladen wird. Elektrolytkondensatoren sind gepolt und dürfen nicht verkehrt angeschlossen werden. Allgemein gilt

$$\boxed{i_C(t) = C \cdot \frac{d}{dt} u_C(t)} \quad \boxed{u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt} \quad (4.2)$$

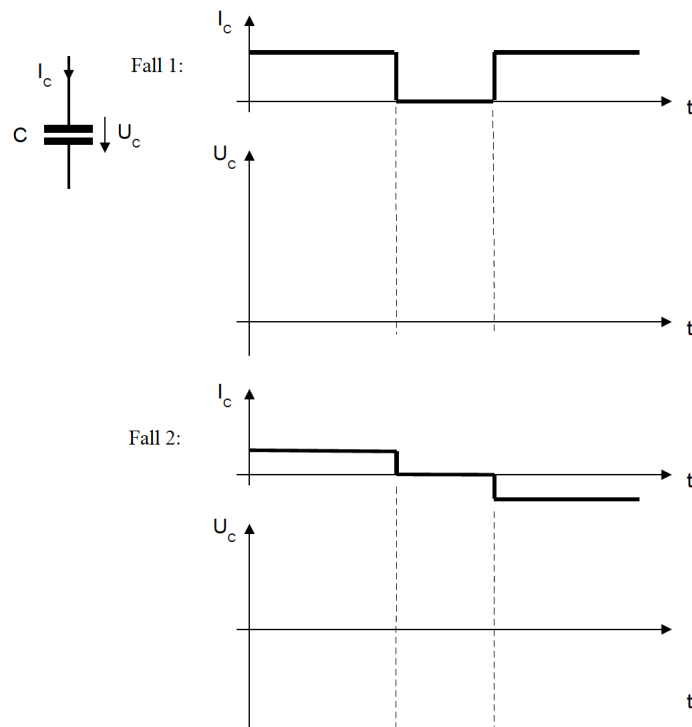
Vereinfachung

Wenn im Zeitintervall Δt der Strom $i_C(t)$ als konstant zu I_C angenommen wird (Gleichstrombetrachtung), darf man schreiben

$$\boxed{C = \frac{\Delta Q}{\Delta U_C}} \quad \boxed{I_C = C \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta t}} \quad (4.3)$$

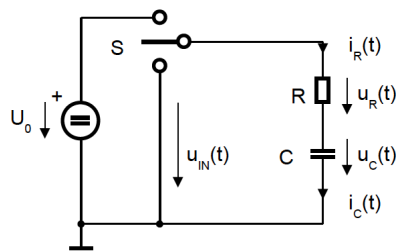
Überlegung

Wie verläuft die Spannung U_C über einem Kondensator C , wenn er mit einem konstanten Strom I_C geladen wird? Annahme: zum Zeitpunkt $t = 0$ sei der Kondensator entladen: $U_C = 0V$.



Impulsverhalten von RC-Gliedern

Wie sieht der Spannungsverlauf über dem Kondensator $u_C(t)$ aus, wenn er über einen Schalter und einen Widerstand R an eine Gleichspannung U_0 angeschlossen wird?



Bsp: Gegeben $U_0 = 10\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$, $U_C(t) = 0\text{V}$. Gesucht: $u_C(t)$ und $i_C(t)$

Mit der Beziehung

$$C \cdot \Delta u_C(t) = i_C(t) \cdot \Delta t = \Delta Q(t) \quad (4.4)$$

kann man nun in Intervallen Δt zu diskreten Zeitpunkten t_n die jeweiligen Werte numerische berechnen. Annahme: der Strom $i_C(t)$ bleibt in einem Zeit-

intervall Δt konstant.

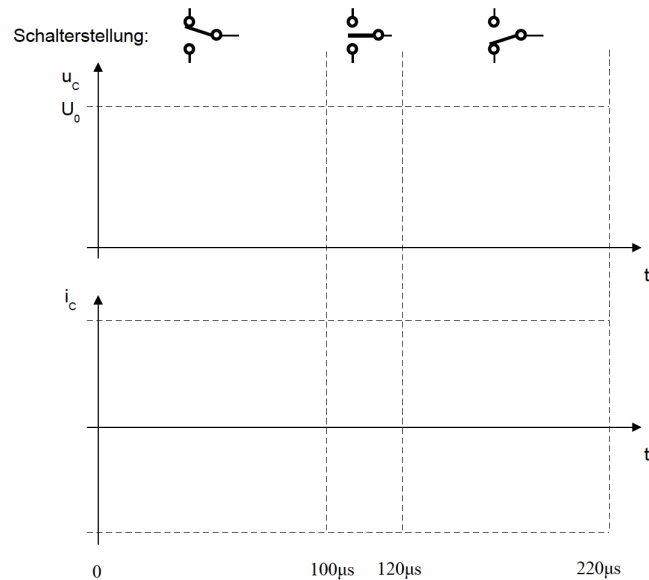
$$\begin{aligned} u_R(t_n) &= U_0 - u_C(t_n) \\ i_C(t_n) &= i_R(t_n) = \frac{u_R(t)}{R} \\ \Delta u_C(t_n \rightarrow t_{n+1}) &= i_C(t_n) \cdot \frac{\Delta t}{C} \\ u_C(t_{n+1}) &= u_C(t_n) + \Delta u_C(t_n \rightarrow t_{n+1}) \end{aligned}$$

Folgende Werte sind für den **Ladevorgang** für eine Zeitdauer von $100\mu s$

$t_n/\mu s$	$\Delta u_C(t_n \rightarrow t_{n+1})$	$u_C(t)$	$u_R(t_n)$	$i_C(t_n)$
0				
20				
40				
60				
80				
100				

Folgende Werte sind für den **Entladevorgang** für eine Zeitdauer von $100\mu s$

$t_n/\mu s$	$\Delta u_C(t_n \rightarrow t_{n+1})$	$u_C(t)$	$u_R(t_n)$	$i_C(t_n)$
0				
20				
40				
60				
80				
100				



Der genaue Verlauf der Spannung resp. des Stromes in Kondensator lässt sich beim **Aufladen** folgendermassen berechnen.

$$u_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.5)$$

τ ist die **Zeitkonstante** und berechnet sich zu

$$\tau = R \cdot C \quad (4.6)$$

Nach einer Zeitkonstanten $t = 1\tau$ hat sich der Kondensator auf 63% von U_0 aufgeladen.

$$i_C(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.7)$$

Der **Anfangsstrom** I_0 berechnet sich zu

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \quad (4.8)$$

Nach $t = 1\tau$ ist der Strom auf 37% abgesunken. Nach $t = 5\tau$ ist der Ladevorgang praktisch abgeschlossen ($u_C \approx 100\%$, $i_C \approx 0$)

Bei der **Entladung** gelten die folgenden Formel

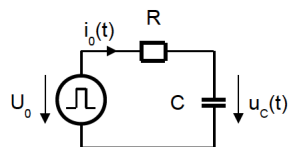
$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad i_C(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.9)$$

Die Spannung $u_R(t)$ über dem Widerstand R verläuft in beiden Fällen proportional zum Strom $i_C(t)$

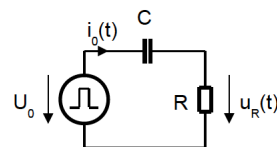
$$u_R(t) = i_C(t) \cdot R \quad (4.10)$$

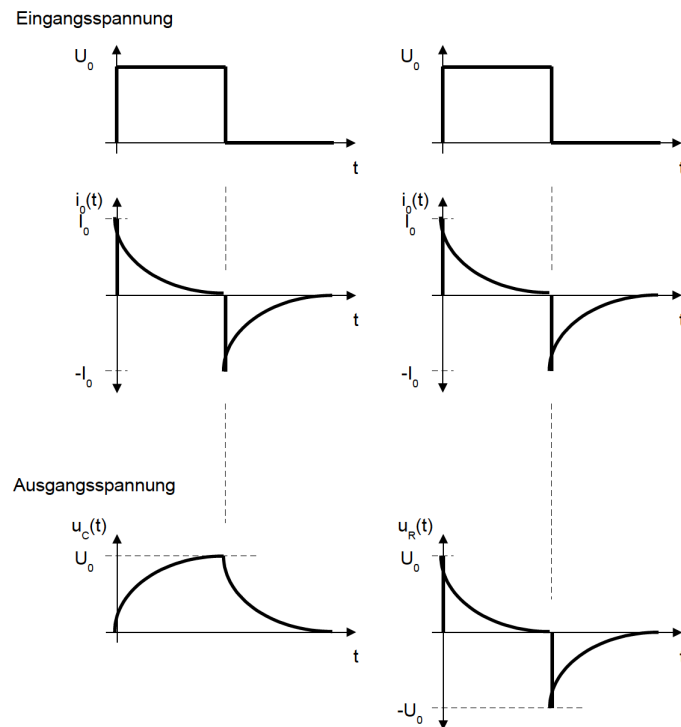
4.1.4 Zusammenfassung: Impulsverhalten von RC-Gliedern

Integrierglied



Differenzierglied





4.1.5 Begriffe des KO

Division: Teilung oder Abschnitt des Bildschirmgitters; früher oft als Zentimeter („10mV/cm“) bezeichnet.

DC: engl. Direct Current = Gleichspannung/Gleichstrom.

AC: engl. Alternating Current = Wechselspannung / Wechselstrom.

GND: engl. Ground = Massepotential, Nullpotential.

HF: engl. High Frequency = Hochfrequenz.

Line: engl. Begriff für Stromnetz-Bezug, aktuelle Netzfrequenz (50 Hz).

Video, TV: Aktivieren eines Filters im Triggerverstärker, das aus einem Videosignal das Zeilenwechsignale als Trigger herausfiltert.

Frame: Aktivieren eines Filters im Triggerverstärker, das aus einem Videosignal das Bildwechsignale als Trigger herausfiltert.

Slope: eng. für Flanke, der steigende oder fallende Abschnitt einer periodischen Funktion, der das Triggersignal auslöst.

Delay: engl. für Verzögerung, die zeitliche Verzögerung zwischen Triggerzeit-

punkt und Beginn der Bilddarstellung, die ermöglicht, das Ereignis zu zeigen, das den Trigger ausgelöst hat.

Trigger: Auslösesignal, das das Zeichnen des Schirmbildes veranlasst.

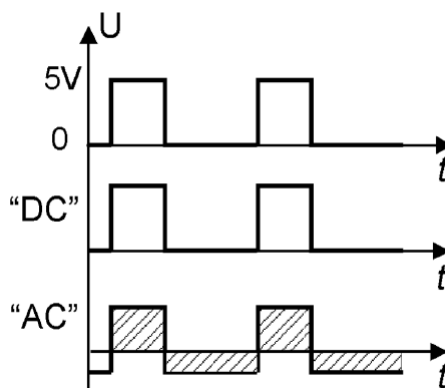
4.1.6 Kopplungsarten

Stellt man den Eingangswahlschalter auf **DC**, so besteht eine **Gleichspannungskopplung** zum Verstärker des Oszilloskops. Damit wird sowohl der Gleichspannungsanteil wie auch der Wechselspannungsanteil des Signals auf dem Schirm korrekt angezeigt.

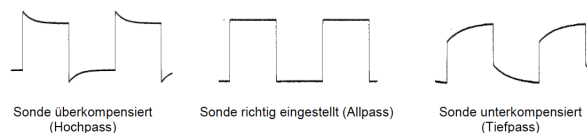
Will man hingegen nur den **veränderlichen Anteil**, z.B. die Rippelspannung einer Gleichspannung, darstellen und den Gleichanteil unterdrücken, kann mit der Schalterstellung **AC** eine Wechselspannungskopplung des Eingangs bewirkt werden.

Die neue **Null-Linie** des Schirmbildes entsteht beim (linearen) Mittelwert der Kurvenform der Signalspannung, ein eventuell vorhandener Gleichspannungsanteil wird unterdrückt.

Bei sehr langsamen Vorgängen können in der Stellung AC Verzerrungen der Kurvenform auftreten.



4.1.7 Tastköpfe und Messsonden





4.2 Versuchsanleitung

4.2.1 Theoretische Aufgaben

- Sie möchten von einer **DC Spannung** von 15V die **Rippelspannung** messen.
 - In welchem Bereich ist so eine Rippelspannung zu erwarten?
 - Mit welcher Kopplungsart messen Sie die Rippelspannung?
- Was können Sie mit AC-Kopplung nicht messen?
- Was kann der Nachteil einer AC-Kopplung sein?
- Wieso verwendet man Messsonden?
- Was ist der Nachteil einer Messsonde?

4.2.2 Versuchsinhalt

Die meisten elektrischen Vorgänge verlaufen in Funktion der Zeit variabel und können damit nicht mit einem digitalen Multimeter (DMM) erfasst werden.

Im ersten Teil des Versuchs lernt man den Umgang mit dem **Oszilloskop** und dem **Funktionsgenerator** kennen. Als Anwendung will man im zweiten Teil das **Impulsverhalten eines RC-Gliedes** mit diesen beiden Geräten ausmessen.

4.2.3 Ziel des Versuchs

Ziele des Versuchs sind

- Funktionsweise und Bedienung des Oszilloskops verstehen.
- Richtige Anwendung des Oszilloskops für alle späteren Versuche kennen lernen.
- Generierung elementarer Signale mit dem Funktionsgenerator.
- Ausmessen eines RC-Gliedes im Zeitbereich als Integrierer und Differenzierer.

4.2.4 Inbetriebnahme von FG und DSO

Vorbereitungen

- a) Verbinden Sie den Ausgang des Funktionsgenerators (FG) HP 33120A mit dem Vertikaleingang CH1 des Oszilloskops (DSO) TDS3014B mit einer 1:10-Sonde.
- b) Stellen Sie am FG die Signalform auf Sinus, die Amplitude auf 5.0Vpp, die Frequenz auf 1kHz und drücken Sie auf dem DSO die Taste "AUTOSET". Jetzt sollten Sie ein stehendes Bild auf der DSO-Anzeige haben.
- c) Verstellen Sie auf dem FG die Kurvenform (Sinus, Dreieck, Rechteck) und kontrollieren Sie sie auf dem DSO.

Aufgabe 1

- Stellen Sie am FG eine Sinusspannung von 1.0Vpp (Spitzen-Spitzen Wert) und einer Frequenz von 10kHz ein.
- Der Offset am FG muss 0 sein, es darf kein Offsetim Display des FG erscheinen.
- Messen Sie die Werte mit dem DSO. Machen Sie die Einstellungen mit den beiden „SCALE“-Drehknöpfen, nicht mit der ÄUTOSETTaste.
- Verwenden Sie auch die CURSORMöglichkeiten des DSO.
- Frage: Wie gross sind die Abweichungen der gemessenen Werte von den Einstellungen am FG? (Angaben in %)
- Stellen Sie sicher, dass die Anschlüsse des FG und des DSO auf High-Z resp. $1M\Omega$ eingestellt sind.

4.2.5 RC-Glieder

4.3 Diskussion