

4 Elektrizität

Inhalt

4.1 Einleitung	64
4.2 Was ist vorher zu tun?	64
4.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren	64
4.3.1 Messgrößen in der Elektrizitätslehre	64
4.3.2 Kirchhoffsche Knotenregel	66
4.3.3 Kirchhoffsche Maschenregel	66
4.3.4 Gesamtwiderstand	67
4.3.5 Kondensatoren	68
4.4 Rechenaufgaben	70
4.5 Kontrollfragen	70
4.6 Experimentelle Aufgaben	70
4.6.1 Ein Widerstand im Stromkreis	71
4.6.2 Kennlinie einer Glühlampe	71
4.6.3 Parallelschaltung / Knotenregel	72
4.6.4 Reihenschaltung / Maschenregel	73
4.6.5 Entladungskurve eines Kondensators (manuell)	73
4.6.6 Entladungskurve eines Kondensators (mit Oszil-	
loskop)	76
4.7 Wie geht es weiter?	77
4.8 Hinweise zur Auswertung	78
4.8.1 Ein Widerstand im Stromkreis	78
4.8.2 Kennlinie einer Glühlampe	78
4.8.3 Parallelschaltung / Knotenregel	78
4.8.4 Reihenschaltung / Maschenregel	78
4.8.5 Entladungskurve eines Kondensators (manuell)	78
4.8.6 Entladungskurve eines Kondensators (mit Oszil-	
loskop)	78

4.1 Einleitung

Einem physikalischen Konzept wie z.B. der Oberflächenspannung messen wir keine besonders große Bedeutung für unseren Alltag bei (wären wir Wasserflöhe, wäre das sicherlich anders). Aber wie ist es mit Elektrizität? Obwohl unser Leben maßgeblich von elektrischen Geräten bestimmt wird und ohne sie kaum noch denkbar wäre,¹ sind die meisten von uns reine Anwender, und viele verstehen nicht einmal die grundlegenden Konzepte der Elektrizität.

Das endet heute. Sie werden an diesem Versuchstag die wichtigsten Prinzipien der Elektrizitätslehre *hands-on* nachvollziehen und machen sogar Bekanntschaft mit einem der vielseitigsten Messgeräte für das 21. Jahrhundert: dem **Oszilloskop**.

¹ Spielen Sie diesen Gedanken einmal durch: Krankenhäuser ohne Strom, Logistikunternehmen ohne Möglichkeit zur Kommunikation (und Supermärkte mit fast keiner Lagerhaltung), die Anonymität einer Großstadt ohne Nachtbeleuchtung...

4.2 Was ist vorher zu tun?

- Lesen Sie das **Skript** zu diesem Versuchstag, also die folgenden Seiten.
- Sorgen Sie dafür, dass Sie den **Theorieteil** verstanden haben! Falls Ihnen Grundlagen fehlen, ist es in Ihrer Verantwortung, diese aufzuarbeiten. Gute Lehrmaterialien zu diesen Themen findet man problemlos im Internet.
- Fertigen Sie **Messwerttabellen** an (im Team), achten Sie dabei auf das korrekte Format und lassen Sie ggf. Details (Einheiten) zunächst frei.
- Lösen Sie die **Rechenaufgaben** (im Team). Sie werden am Versuchstag kontrolliert.
- Schauen Sie sich die **Kontrollfragen** an! In der Vorbesprechung müssen Sie in der Lage sein, sie zu beantworten, sonst dürfen Sie nicht am Praktikum teilnehmen und müssen den Versuchstag nachholen.

4.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren

4.3.1 Messgrößen in der Elektrizitätslehre

In der Elektrizität hat man es mit einer Reihe von physikalischen Größen zu tun, die man meistens nur dort antrifft. Wir führen hier als Erinnerung und systematische Einführung die wichtigsten auf.

Ohne Ladung q gäbe es keine Elektrizität. Sie ist eine Eigenschaft von Teilchen: Manche haben eine positive Ladung (z.B. Protonen), manche eine negative (z.B. Elektronen), manche gar keine (Neutronen, Photonen...). Praktischerweise hat die Ladung von Elektronen und Protonen den gleichen Betrag, nämlich $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (die sog. **Elementarladung**).

Die Einheit der Ladung heißt »Coulomb«. 1 C ist recht viel, denn es ist selten, dass so viel Ladung *getrennt* vorliegt. Die Materie, aus denen wir und unsere Welt bestehen, ist zwar größtenteils geladen, aber die Ladungen gleichen sich gegenseitig aus; Atome sind daher im Normalfall nach außen *elektrisch neutral*.

Üblicherweise schreibt man für die Ladung eines einzelnen Teilchens ein kleines q , für die Gesamtladung von irgendetwas einen Großbuchstaben Q .

Elektrischer Strom ist bewegte Ladung pro Zeit:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (4.1)$$

Meistens sind es die Elektronen, die sich bewegen – Sie könnten sich also an einem Draht aufstellen und die Elektronen zählen, die dort in einer bestimmten Zeit vorbeifliegen; anschließend teilen Sie die gesamte vorbeigeflogene Ladung durch die Zeit und erhalten den Strom. Echte Strommessgeräte, sog. *Ampere*meter, funktionieren natürlich anders – apropos, die Einheit der Stromstärke ist das *Ampere*: $[I] = A$. Zur Orientierung: Bei 16A fliegt eine normale Haushaltssicherung raus.

Die Spannung U wird in Volt gemessen. Vielleicht wissen Sie, dass die Netzspannung in Deutschland bei ca. 230V liegt und eine Gefahr für Leib und Leben darstellt, im Gegensatz beispielsweise zu USB-Kabeln (5V), Autobatterien (12V) oder Akkuschraubern (ca. 12–18V). Spannung ist das, was elektrischen Strom zum Fließen bringt: Es kann zwar eine Spannung anliegen, ohne dass ein Strom fließt (in einer freien Steckdose zum Beispiel); aber es fließt kein Strom, ohne dass eine Spannung anliegt.²

Spannung ist definiert als **Potentialdifferenz**. Sie besteht daher immer *zwischen zwei Punkten* (nie an einem Punkt). Auf ein geladenes Teilchen, das (nicht zu schnell) vom einen Punkt zum anderen fliegt, wirkt auf dem Weg die elektrostatische Kraft. Das Teilchen gewinnt dabei eine bestimmte Energie, die nur von Anfangs- und Endpunkt abhängt – nicht vom Weg dazwischen!³ Diese Energiedifferenz pro Ladung ist die Spannung:

$$U = \frac{\Delta E}{q} \quad (4.2)$$

Am besten stellen Sie sich ein Potential wie ein Gebirge vor: In einem Gebirge hat jeder Punkt auf der Karte eine bestimmte Höhe; in einem Potential hat jeder Punkt auf der Welt eine bestimmte Energie.

Der Widerstand ist definiert als Spannung pro Stromstärke:

$$R = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

Diese Formel heißt auch »**Ohmsches Gesetz**«, aber sie ist eigentlich kein Naturgesetz, sondern nur eine Definition. Bauteile, deren Widerstand R in einem bestimmten Bereich konstant ist, heißen »ohmsche Widerstände«, für sie gilt $R = \frac{U}{I} = \text{const.}$, für alle anderen Bauteile gilt $R(U) = \frac{U}{I(U)}$. Formel 4.3 stellt eine Frage: »Wieviel Spannung muss ich anlegen, um eine bestimmte Stromstärke zum Fließen zu bringen?« Je mehr Spannung man braucht, desto größer ist der Widerstand. Die Einheit des Widerstandes ist das *Ohm*: $[R] = \frac{V}{A} = \Omega$.

Kein Bauteil ist für alle Spannungen ein ohmscher Widerstand. Technische Widerstände (also die kleinen Bauteile in Schaltungen) sollen für alle vorgesehenen Betriebsspannungen konstant sein, bei Glühlampen steigt der Widerstand mit der Spannung (bzw. mit der Temperatur) und wieviel Strom durch LEDs fließt, hängt so stark von der Spannung ab, dass diese mit einem Regelkreis eingestellt werden muss.

Preisfrage: Warum können Sie die Elektronen nicht sehen?

- (A) Sie sind zu klein.
- (B) Sie sind zu schnell.
- (C) Licht funktioniert nicht so.
- (D) (alle drei obigen Antworten)

² Eine Ausnahme gibt es schon: Bei extrem niedrigen Temperaturen verschwindet der Widerstand (s.u.) mancher Materialien vollständig. Wenn man dann einen Strom zum Fließen bringt (mit einer Spannung, natürlich), fließt er quasi unbegrenzt weiter – jahrelang!

³ Kraftfelder, in denen die Energie nur vom Ort abhängt, nennt man *konservativ*. Elektrische Felder sind konservativ, Magnetfelder nicht. Eigentlich sind beide ohnehin zwei Aspekte einer Kraft – die Relativitätstheorie vereint sie wieder.

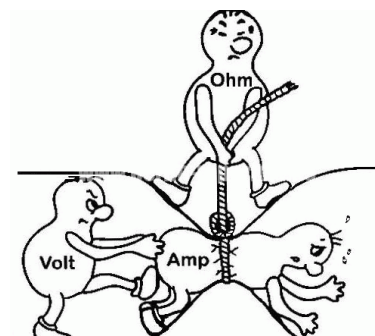


Abbildung 4.1: Eine populäre Darstellung des Ohmschen Gesetzes.

Kapazität C ist ein Maß für die Fähigkeit eines **Kondensators**, Ladung zu trennen. Ein Kondensator besteht im einfachsten Fall aus zwei Metallplatten, die mit etwas Abstand parallel voneinander stehen. Legen Sie an diese Platten eine Spannung an, wird die eine Platte positiv, die andere negativ geladen. Je größer der so erzeugte Ladungsüberschuss (pro Spannung), desto größer ist die Kapazität dieses Kondensators:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4.4)$$

Die Einheit der Kapazität ist nach MICHAEL FARADAY benannt und wird im Deutschen auf der zweiten Silbe betont: Das *Farad*, Formelzeichen F.

4.3.2 Kirchhoffsche Knotenregel

Elektrischer Strom besteht fast immer aus Elektronen, die sich bewegen. Elektronen sind stabil; sie können nicht einfach entstehen oder verschwinden.⁴ Ein Elektron, das in eine Kreuzung zwischen mehreren Drähten hineinfliegt – einen *Knoten* –, sollte also auf einem der anderen Drähte wieder aus dem Knoten herauskommen. So weit einverstanden?

Erweitern wir diese Erkenntnis noch etwas: Alle Ströme, die in den Knoten hineinfließen, müssen an anderer Stelle auch wieder herausfließen. Für die Situation in Abbildung 4.2 könnte man das so aufschreiben:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

Man kann auch festlegen, dass das Vorzeichen der Stromstärke eine Bedeutung erhält: Positive Ströme fließen in den Knoten hinein, negative hinaus. Damit bekommt die Kirchhoffsche Knotenregel ihre allgemeine Form:

$$\sum_i I_i = I_1 + I_2 + \dots = 0 \quad (4.5)$$

In einem Knotenpunkt eines elektrischen Netzwerkes ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme.

4.3.3 Kirchhoffsche Maschenregel

Stellen Sie sich vor, Sie sind Mountainbiker und haben sich für Ihren Aktivurlaub eine kleine Berghütte gemietet. Dort starten Sie morgens, fahren zunächst 800 m hinab ins Tal, dann 450 m bergauf bis zu einer kleinen Kapelle, weiter am Hang entlang, ... Am Abend finden Sie sich wieder bei der Berghütte ein. Sie werfen einen Blick in Ihre Fitness-App: Wenn alles mit rechten Dingen zugegangen ist, sollten die bergab gefahrenen Höhenmeter genau den bergauf gefahrenen entsprechen – denn was man runterfährt, muss man auch wieder hochkurbeln, oder?

Ein Potential ist wie ein Gebirge: Auf welcher Höhe bzw. auf welchem Energieniveau man sich befindet, hängt nur vom Ort ab; nicht davon, wie man dorthin gelangt ist. Stellen Sie sich nun vor, Sie haben eine *Testladung*, d.h. ein Elektron an einer kurzen Leine. Sie führen das Elektron durch eine elektrische Schaltung und spüren dabei, in welche Richtung das Elektron gezogen wird. Manchmal zieht das Elektron Sie nach vorne (z.B. bei einer Batterie), manchmal müssen Sie es hinter sich herziehen (z.B. bei einem

⁴ Genauer gesagt: Die durchschnittliche Lebensdauer eines Elektrons ist 4,7 Trillionen mal länger als die bisherige Lebensdauer unseres Universums.

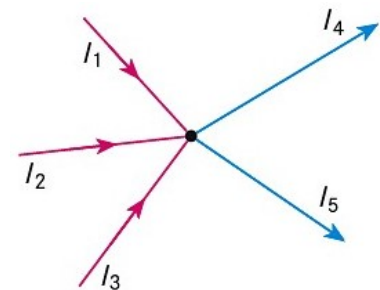


Abbildung 4.2: Ein Knoten und fünf Ströme I_i , die hinein- bzw. herausfließen.

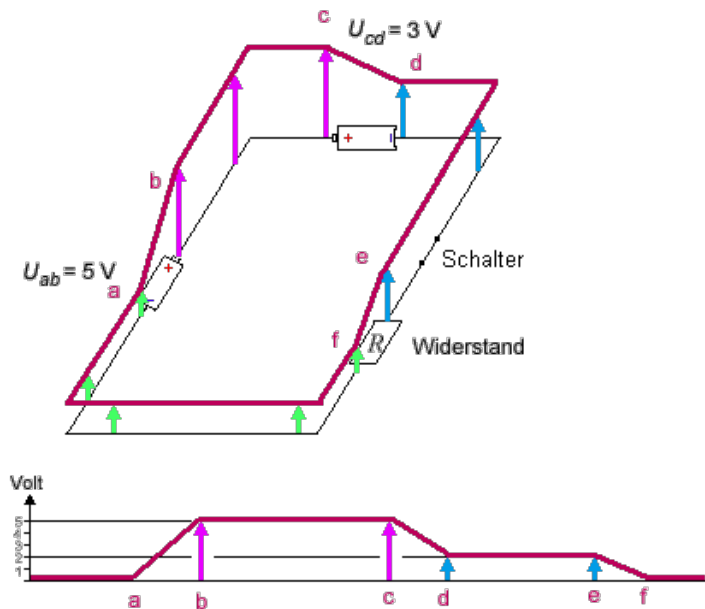


Abbildung 4.3: Potentialverlauf für einen Stromkreis (eine Masche) aus drei Bauelementen.

Widerstand oder einer falsch gepolten Batterie). Wenn Sie nach dem Spaziergang wieder an den gleichen Punkt zurückkehren, sollte das Elektron wieder auf dem gleichen elektrischen Energieniveau sein wie vor der Reise, d.h. die Potentialdifferenzen sollten sich zu Null addieren:

$$\sum_i U_i = U_1 + U_2 + \dots = 0 \quad (4.6)$$

Alle Teilspannungen einer Masche in einem elektrischen Netzwerk addieren sich zu null. Diese Formel gilt für beliebige Maschen (beliebige Rundgänge) in einem elektrischen Netzwerk – Sie können Ihren Spaziergang machen, wo Sie wollen, solange Sie am Ende wieder nach Hause zurückkehren.

4.3.4 Gesamtwiderstand

Oft möchten wir das Ohmsche Gesetz nicht auf einzelne Widerstände, sondern auf ganze Schaltungen anwenden. Uns interessiert daher der *Ersatz-* oder *Gesamtwiderstand* dieser Schaltung, welchen wir mithilfe der Kirchhoffschen Regeln bestimmen können. Die Schaltung verhält sich so, als würde sie nur aus diesem Widerstand bestehen.

Reihenschaltung: Eine Reihenschaltung bildet (zusammen mit der Spannungsversorgung) eine **Masche**. Die Spannungen addieren sich nach Gleichung 4.6 also zu Null. Gleichzeitig muss der Strom nacheinander durch alle Widerstände fließen (wo soll er sonst hin?), die Stromstärke ist also die gleiche:

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 \\ I &= I_1 = I_2 \\ R &= \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

In einer Reihenschaltung addieren sich die Widerstände. Das gilt auch, wenn mehr als zwei Widerstände in Reihe geschaltet sind.

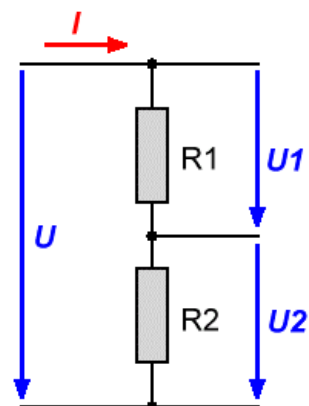


Abbildung 4.4: Eine einfache Reihenschaltung.

Parallelschaltung: Eine Parallelschaltung hat mehrere Maschen, aber es gibt einen **Knoten** (in Abbildung 4.5 grün eingekreist), auf den man die Knotenregel (Gleichung 4.5) anwenden kann. Der Strom I teilt sich an diesem Knoten auf zwei Teilströme I_1 und I_2 auf, deren Summe wieder I ergeben muss. Da die Anschlüsse beider Widerstände verbunden sind, liegen sie auf dem gleichen Potential, über beiden fällt also die gleiche Spannung ab. Insgesamt haben wir:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 \\ U &= U_1 = U_2 \\ \frac{1}{R} &= \frac{I}{U} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{aligned} \quad (4.8)$$

In einer Parallelschaltung addieren sich die Kehrwerte der Widerstände. Dies gilt für eine beliebige Zahl von parallel geschalteten Widerständen.

4.3.5 Kondensatoren

Ein Kondensator besteht im einfachsten Fall aus zwei leitenden Platten, die sich in einem kleinen Abstand parallel voreinander befinden.⁵ Legt man eine Gleichspannung an die Platten an, so entsteht auf ihnen ein **Ladungsüberschuss** und zwischen ihnen ein **elektrisches Feld**. Kondensatoren können also Ladung speichern. Ihre Fähigkeit dazu wird durch ihre Kapazität C charakterisiert, vgl. 4.3.1 auf Seite 64.

Die Kondensatorplatten sind durch einen Isolator getrennt; es kann also kein Strom zwischen ihnen fließen. Allerdings fließt ein Strom *auf die Platten*, während der Kondensator geladen wird.⁶ Dieser Strom fließt so lange, bis das elektrische Feld im Kondensator die äußere Spannung ausgleichen kann. Der Kondensator ist nun **voll geladen**. Dieser Zustand bleibt auch erhalten, wenn die Spannungsquelle entfernt wird: Der Kondensator ist seine eigene Spannungsquelle.

Wegen der **Definition der Kapazität** (Gleichung 4.4) ist die Spannung des geladenen Kondensators proportional zu der Ladung, die auf seinen Platten getrennt ist, und zu seiner Kapazität. Wenn der Kondensator über einen Widerstand R entladen wird, ist außerdem wegen des **Ohmschen Gesetzes** (Gleichung 4.3) die Spannung proportional zur Stromstärke, also zu der Geschwindigkeit, mit der die Kondensatorladung verringert wird. Ladung und Strom sind über die Kondensatorspannung aneinander **gekoppelt**! Es gilt zu allen Zeitpunkten t :

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{1}{C} \cdot Q(t) \\ U(t) &= R \cdot I(t) = R \cdot \frac{\partial Q(t)}{\partial t} \\ \Rightarrow Q(t) &= RC \cdot \frac{\partial Q(t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Dabei haben wir die Stromstärke $I = \dot{Q} = \partial Q(t) / \partial t$ in ihrer *differentiellen Form* geschrieben.⁷

Gleichung 4.9 ist eine sog. *Differentialgleichung* – sie enthält eine Größe (nämlich Q) und ihre Ableitung. Die Lösung einer Differentialgleichung ist

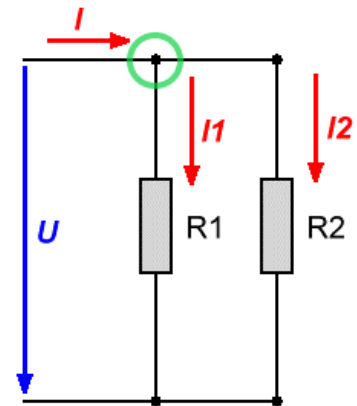


Abbildung 4.5: Eine einfache Parallelschaltung.

⁵ In der Praxis sind die »Platten« meistens aus dünnen Metallfolien realisiert, die mit einer ebenfalls dünnen Isolationsschicht in einem Elektrolytbad eingeschlossen sind.

⁶ Die **Knotenregel** ist daher etwas eingeschränkt, wenn sich in dem Knoten ein Kondensator befindet. *Langfristig* gilt sie aber trotzdem.

⁷ Der Übergang ist klar, wenn Sie sich vorstellen, dass das Zeitintervall der Messung unendlich klein wird.

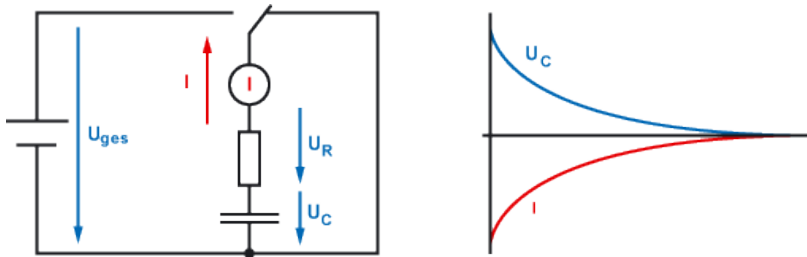


Abbildung 4.6: Entladevorgang eines Kondensators über einen Widerstand.

eine Funktion. Oft ist die Lösung *nicht eindeutig bestimmt*; es gibt unendlich viele Funktionen, die die Differentialgleichung lösen – so auch hier: Die Anfangsladung des Kondensators ist frei wählbar, denn sie taucht auf beiden Seiten von Gleichung 4.9 auf und kürzt sich somit heraus. Erst mit zusätzlichen *Randbedingungen* wird die Lösung eindeutig.

Die **allgemeine Lösung** von Gl. 4.9 lautet:

$$Q(t) = Q(0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.10)$$

Da die Spannung am Kondensator, wie gesagt, proportional zur Ladung ist, können wir sofort weiter folgern:

$$U(t) = U(0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} =: U(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (4.11)$$

Das letzte Gleichheitszeichen definiert eine alternative *inline*-Schreibweise für die Exponentialfunktion e^x . Das Produkt aus Widerstand und Kapazität hat die Dimension einer Zeit; wir nennen es *Zeitkonstante* τ :

$$\tau = RC \quad (4.12)$$

$$U(\tau) = U(0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau}\right) = U(0) \cdot \exp(-1) = U(0) \cdot \frac{1}{e} \quad (4.13)$$

Die zweite Zeile demonstriert die Bedeutung von τ : Nach Verstreichen dieser Zeit ist die Spannung auf $1/e$ des ursprünglichen Wertes abgefallen. τ ist einer Halbwertszeit also nicht ganz unähnlich.

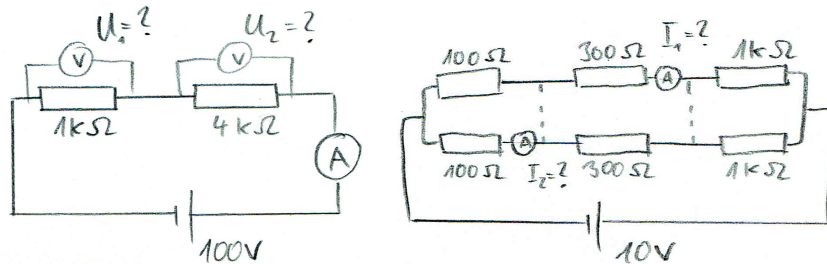


Abbildung 4.7: Abbildungen zu den Rechenaufgaben.

4.4 Rechenaufgaben

1. Berechnen Sie den Gesamtwiderstand und alle weiteren fehlenden Größen in Abbildung 4.7 (a) und (b). Was ändert sich, wenn in (b) an den gestrichelten Linien Leiterverbindungen eingefügt werden?
2. Ein Kondensator mit $C = 50\mu\text{F}$ wird über einen Widerstand $R = 20\text{k}\Omega$ entladen. Berechnen Sie die Zeitkonstante τ und die Halbwertszeit $t_{1/2}$, bei der $U(t_{1/2}) = \frac{1}{2}U(0)$ ist.
3. Zwei Widerstände R_1, R_2 sind parallel geschaltet. Zeigen Sie, dass für den Gesamtwiderstand gilt:

$$R_{Ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.14)$$

4.5 Kontrollfragen

Sie sollten alle Definitionen und Regeln aus Abschnitt 4.3 parat haben.

4.6 Experimentelle Aufgaben

An diesem Versuchstag können (und sollten) Sie die Aufgaben in der hier gegebenen Reihenfolge durchführen. Die Versorgungsspannung ist mit etwa 10 V völlig ungefährlich; Sie dürfen also auch unbesorgt von der Anleitung abweichen und herumspielen. **Schließen Sie aber bitte nicht das Amperemeter (rotes Multimeter) direkt an die Spannungsversorgung an**, denn die Sicherungen kosten Geld. Das passiert besonders leicht, wenn Sie statt des Unterbrecherbausteins fälschlicherweise die Messfahnen verwenden, die zur Spannungsmessung dienen sollen.

Geräte: Elektronik-Experimentierkasten (Bestandteile siehe dort), Gleichspannungsquelle, Funktionsgenerator, zwei Multimeter, Oszilloskop.

Im Handbuch der beiden Multimeter finden Sie Angaben zu den (relativen) Fehlern der Spannungs- und Stromstärkenmessung auf verschiedenen Messbereichen. Notieren Sie alle für die Versuche relevanten Werte. Notieren Sie außerdem den Eingangswiderstand des gelben Multimeters für die Spannungsmessung.

4.6.1 Ein Widerstand im Stromkreis

Eine Glühlampe wird mit verschiedenen Widerständen in Reihe geschaltet. Was ändert sich dadurch? Dieses Experiment ist eine kleine Meditation über U und I ; außerdem testen Sie dabei, ob und, wenn ja, wie Ihr Material funktioniert.

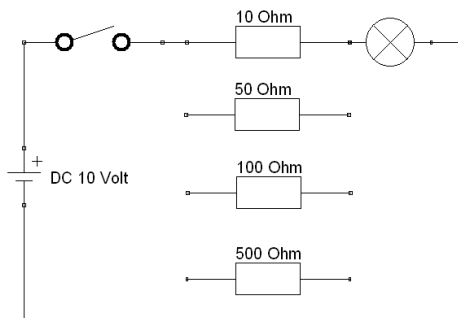


Abbildung 4.8: Ein Widerstand im Stromkreis.

Durchführung:

- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.8 mit Hilfe der einzelnen Bausteine auf. Nutzen Sie hier und für alle folgenden Schaltungen Laborkabel für den Anschluss der Spannungsquelle an die Anschlussbausteine. Zur besseren Übersicht werden rote Kabel für den + Eingang und schwarze oder blaue Kabel für den - Eingang gewählt.
- Betätigen Sie den **Schalter**, um die Lampe zum Leuchten zu bringen.
- Tauschen Sie den **Widerstand** gegen einen anderen – was ändert das? Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

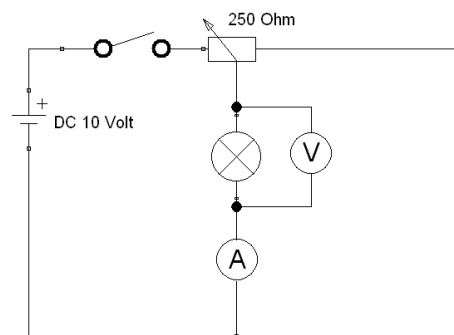
Falls der Schalter Sie nervt, können Sie ihn in dieser und den meisten folgenden Schaltungen weglassen.

4.6.2 Kennlinie einer Glühlampe

Glühlampen sind keine ohmschen Widerstände, d.h. der Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke (die sog. *Kennlinie*) ist nicht linear. In diesem Versuch messen Sie diese Kennlinie.

Varierte Größen: Potentiometerstellung.

Gemessene Größen: Spannung über der Glühbirne U , Stromstärke durch die Glühbirne I .



Dass sich der Widerstand einer Glühlampe ändert, liegt übrigens vor allem daran, dass sie sich erwärmt. Der Glühwendel besteht aus Wolfram, einem Kaltleiter (vgl. 3.3.2).

Abbildung 4.9: Aufbau zur Messung der Kennlinie einer Glühlampe.

Durchführung:

- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.9 auf. Verwenden Sie hier und für alle folgenden Versuche das rote Multimeter in der mA-Stellung für die Strommessung.
- Das **Potentiometer** fungiert als *Spannungsteiler*. Drehen Sie daran, sollte sich die Leuchtstärke der Glühbirne gleichmäßig ändern.
- Messen Sie für verschiedene Potentiometerstellungen jeweils Spannung und Stromstärke. Nehmen Sie auf diese Weise **mindestens 10** möglichst gleichmäßig verteilte Messpunkte auf.

Achtung! Drehen Sie den Wahlschalter am roten Multimeter immer nur dann, wenn es gerade nicht angeschlossen ist. Ansonsten brennt die (teure) Sicherung für die μA -Stellung durch.

4.6.3 Parallelschaltung / Knotenregel

In diesem Versuch überprüfen Sie die Kirchhoffsche Knotenregel an einer Parallelschaltung von Widerständen.

Varierte Größen: Auswahl der angeschlossenen Widerstände.

Gemessene Größen: Spannung U und Stromstärke I bei verschiedenen Bauteilen.

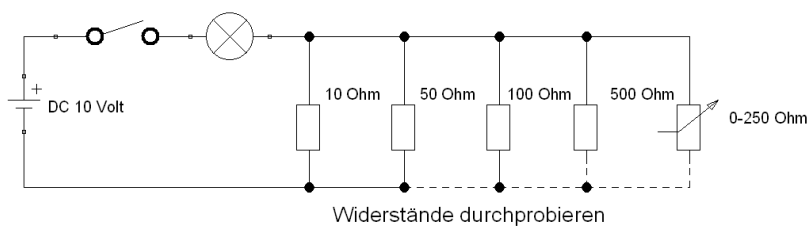


Abbildung 4.10: Aufbau zur Kirchhoffschen Knotenregel.

Durchführung:

- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.10 auf.
- Setzen Sie zunächst nur den 10- Ω -Widerstand ein. Die Lampe sollte leuchten, wenn Sie den Schalter betätigen.
- Probieren Sie auch die **anderen Widerstände** auf diese Weise aus.⁸
- Setzen Sie nun den den Widerstand mit 500 Ω ein und zusätzlich parallel dazu den Widerstand mit 100 Ω . Nutzen Sie dazu Verzweigungsbausteine. Notieren Sie Ihr Ergebnis.
- Überprüfen Sie nun die **Knotenregel** experimentell. Dazu messen Sie die Spannung und die Stromstärke bei den beiden Widerständen, bei der Glühlampe sowie die genaue Versorgungsspannung (ca. 10 V). Die Schaltung wird dabei nicht verändert – Widerstände 500 Ω und 100 Ω parallel geschaltet!
- Versuchen Sie nun, allein mit dem Potentiometer die gleiche Lampenelligkeit zu erzeugen wie mit den zwei parallel geschalteten Widerständen. Da der direkte Vergleich von Intensitäten zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit dem menschlichen Auge nahezu unmöglich ist, gehen Sie folgendermaßen vor:

⁸ Sehen Sie, dass diese Situation identisch ist zu 4.6.1?

Warum leuchtet die Lampe heller, wenn mehr Widerstände hinzugeschaltet werden? Welchen Weg nimmt der Strom?

auf die Glühlampe wird zur besseren Sichtbarkeit ein kleines Röhrchen gesteckt. Reduzieren Sie die Spannung so weit, bis die Glühlampe gerade anfängt zu leuchten. Entfernen Sie jetzt die Festwiderstände und setzen Sie das Potentiometer ein. Verändern Sie den Widerstandswert bei Beibehaltung der zuvor eingestellten Spannung so weit, bis die Glühlampe gerade wieder anfängt zu leuchten. Messen Sie den am Potentiometer eingestellten Widerstand. Notieren Sie Ihr Ergebnis.

Entsprechen die Messwerte Ihren Erwartungen? Machen Sie eine Überschlagsrechnung im Kopf.

4.6.4 Reihenschaltung / Maschenregel

In diesem Versuch überprüfen Sie die Kirchhoffsche Maschenregel an einer Reihenschaltung von Widerständen.

Varierte Größen: Auswahl der eingebauten Widerstände.

Gemessene Größen: Spannung U und Stromstärke I bei verschiedenen Bauteilen.

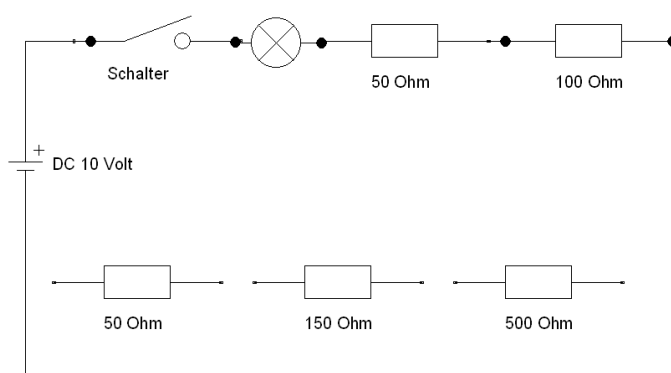


Abbildung 4.11: Aufbau zur Kirchhoffschen Maschenregel.

Durchführung:

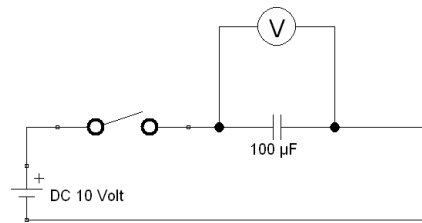
- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.11 auf. Die Widerstände mit $50\ \Omega$ und $100\ \Omega$ sind damit **in Reihe geschaltet**.
- Schließen Sie den Schalter – die Lampe sollte leuchten.
- Versuchen Sie, mit einem **einzelnen Widerstand** die gleiche Lampenhelligkeit zu erzeugen wie mit den zwei in Reihe geschalteten Widerständen. Notieren Sie Ihr Ergebnis.
- Bauen Sie zuletzt die Widerstände $10\ \Omega$, $50\ \Omega$ und $100\ \Omega$ **alle in Reihe** in die Schaltung ein.
- Überprüfen Sie nun die **Maschenregel** experimentell. Dazu messen Sie die Spannung und insbesondere die Stromstärke bei allen Widerständen, bei der Glühlampe sowie die genaue Versorgungsspannung (ca. 10 V).

Welchen Weg nimmt der Strom? Spielt die Reihenfolge der Bauteile eine Rolle?

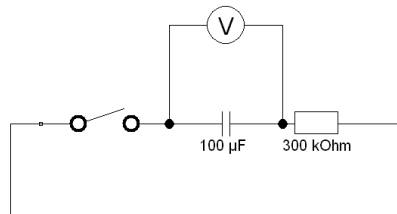
Entsprechen die Messwerte Ihren Erwartungen? Machen Sie eine Überschlagsrechnung im Kopf.

4.6.5 Entladungskurve eines Kondensators (manuell)

Kondensatoren haben eine charakteristische Lade- und Entladekurve. In diesem Versuch messen Sie die Spannung während der (verlangsamten) Entladung manuell, d.h. mit Voltmeter und Stoppuhr.



(a) Ladung



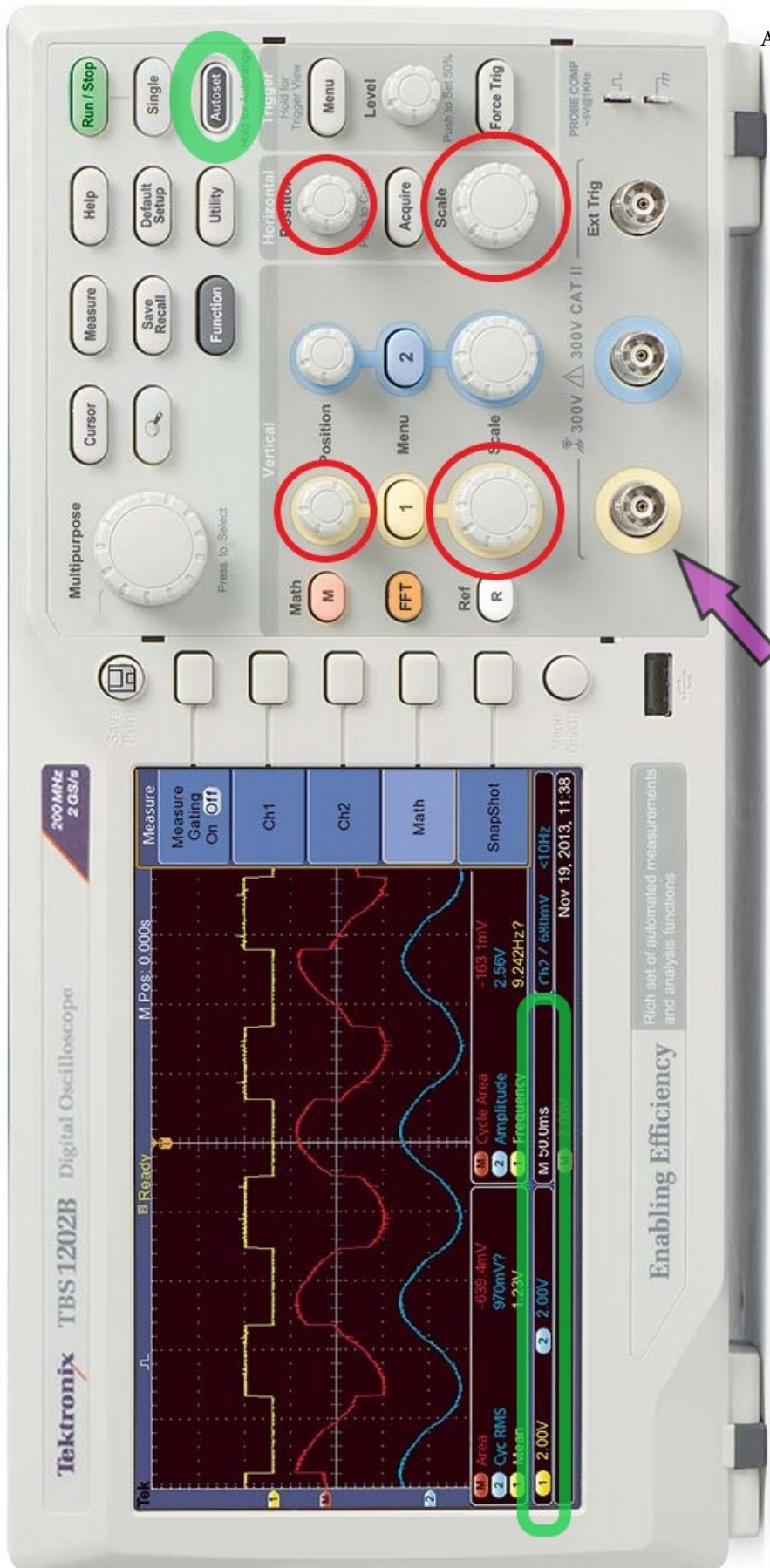
(b) Entladung

Abbildung 4.12: Aufbau zur Ladung und Entladung eines Kondensators.

Gemessene Größen: Spannung $U_C(t)$ über dem Kondensator, Zeit t , Kapazität C , Widerstand R .

Durchführung:

- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.12 (a) auf. Diesmal den Schalter nicht vergessen. Nach kurzer Zeit sollte der Kondensator geladen sein; überprüfen Sie das mit dem Voltmeter.
- Bauen Sie nun den zweiten Teil der Schaltung auf, indem Sie die Laborkabel kurzschließen, **nachdem** Sie den Schalter zunächst geöffnet haben. Schließen Sie außerdem das Voltmeter am Kondensator an.
- Wenn Sie nun den Schalter schließen, wird die Spannung abnehmen – erst schnell, dann langsamer. Sie sollen den zeitlichen Verlauf dieser Spannung aufnehmen. Dafür müssen Sie zusammenarbeiten. Eine Person kann z.B. alle fünf Sekunden einen Spannungswert ablesen und diesen ansagen, die andere Person notiert den Wert. Alternativ können Sie ein Video der Anzeige des Multimeters machen und die Spannung zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beendigung der Aufnahme bestimmen. Starten Sie die Aktion in jedem Fall mit
 - einem Plan und
 - einem frisch geladenen Kondensator.
- Die auf den Bauteilen aufgedruckten Werte sind nicht sehr präzise. Messen Sie daher auch die Kapazität C des Kondensators und den Wert des Widerstandes R noch einmal mit dem Multimeter nach. Der Fehler für diese Messungen steht im Handbuch der Geräte; notieren Sie diesen ebenfalls.



4.6.6 Entladungskurve eines Kondensators (mit Oszilloskop)

Wir machen nun die gleiche Messung wie im letzten Versuch (4.6.5), allerdings schneller – ca. 100-mal pro Sekunde. Bei manueller Messung wäre das schlichtweg unmöglich, aber mit den richtigen technischen Mitteln ist es kein Problem:

- Der Funktionsgenerator übernimmt den Umbau der Schaltung und ersetzt den Ein- und Ausschalter. Er erzeugt ein *Rechtecksignal*: Ein Signal, welches schnell zwischen zwei Werten wechselt. Wählen Sie ein rein positives Signal (über Einstellung eines Offset) mit der Amplitude 10 V und der Frequenz 100 Hz.
- Das Oszilloskop ist ein Voltmeter, das den zeitlichen Verlauf der Spannung auf den Bildschirm zeichnet und bei einer bestimmten Spannung – der Triggerspannung – wieder an den linken Bildschirmrand zurückspringt. Wenn das gemessene Signal periodisch ist (sich also immer wiederholt), entsteht so im Oszilloskop der Eindruck eines ruhenden Bildes.
- Der Kondensator und der Widerstand haben in diesem Aufbau übrigens andere, an die Art der Messung angepasste Werte ($R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 47 \text{ nF}$). Die Zeitkonstante ist $RC = 470 \mu\text{s}$ – bei manueller Messung hätte man also keine Chance.

Gemessene Größen: Halbwertszeit $t_{1/2}$, Kapazität C , Widerstand R .

Durchführung:

- Bauen Sie die Schaltung in Abbildung 4.14 auf.
- Schließen Sie das **Oszilloskop** mithilfe der Adapter als Voltmeter über dem Kondensator an. Benutzen Sie den ersten Kanal. Die Buchse ist in Abbildung 4.13 mit einem violetten Pfeil gekennzeichnet.
- **Nehmen Sie sich nun etwas Zeit, das Oszilloskop kennen zu lernen.** In Abbildung 4.13 sind einige wichtige Bedienelemente gekennzeichnet:
 - Wenn Sie zwei Kurven sehen – eine gelbe und eine blaue –, schalten Sie die blaue zunächst aus, indem Sie auf die blaue Taste »2« drücken (ggf. mehrfach). Am **zweiten Kanal** ist nichts angeschlossen; Sie sehen also nur Rauschen.
 - Sie können **Skalierung** (*Scale*) und **Position** der Zeitachse und der Spannungsachse für beide Kanäle einzeln verändern (Knöpfe rot umkreist). Verändern Sie die Skalierung des ersten Kanals und der Zeitachse, bis Sie das Signal auf dem Bildschirm erkennen können. Die Höhe und Breite der **Gitterkästchen** wird am unteren Bildschirmrand angezeigt (in der Abbildung grün markiert).
 - Die Geheimwaffe aller Nebenfach-Physiker ist, seit es Digital-Oszilloskope gibt, die Taste »Autoset« (grün umkreist). Sie startet einen Algorithmus, der alle Skalierungen automatisch einstellt. Das funktioniert teilweise ganz gut, liefert aber auch oft unerwartete Ergebnisse.

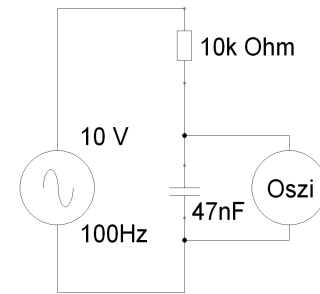


Abbildung 4.14: Aufbau zur Messung der Kondensatorentladung mit dem Oszilloskop.

Es kann z.B. sein, dass Sie anschließend ein sehr interessantes Signal sehen (Rauschen) oder dass kommentarlos alle Spannungen mit einem Faktor 10 multipliziert werden. **Sie wurden gewarnt.**

- Wenn Sie das Signal gut sehen können und einigermaßen mit der Bedienung des »Oszis« (so dürfen Sie ihn jetzt nennen) vertraut sind, können Sie die **Halbwertszeit** des Signals messen. Das ist die Zeit, nach der die Spannung auf die Hälfte abgefallen ist. Sie können dies auf zwei Arten tun:
 1. Anhand des **Gitters** und der **Skalenunterteilungen**. Vergrößern oder verkleinern Sie das Signal, um den Bildschirm optimal auszunutzen, und verschieben Sie es dann mit den *Position*-Knöpfen so, dass Sie die Halbwertszeit ablesen können. Dazu machen Sie am besten den relevanten Punkt der Messkurve zu einem Achsenschnittpunkt. Die Ablesegenauigkeit entspricht der Unterteilung des Gitters: Die Höhe und Breite jedes Kästchens wird durch die Achsenunterteilung gefünftelt, d.h. ein Strich entspricht einem Fünftel dessen, was am unteren Bildschirmrand als »DIV« angegeben ist.
 2. Mit der **Cursor-Funktion**. Betätigen Sie die entsprechende Taste, so gelangen Sie in ein Menü, in dem Sie am besten eine kombinierte Spannungs- und Zeitmessung einstellen. Mit dem Cursor suchen Sie dann den Punkt, an dem die Spannung genau auf die Hälfte abgefallen ist. Wie groß der Fehler dieser Messung ist, müssen Sie anhand der minimalen Schritte zwischen zwei Werten abschätzen. Evtl. kann eine größere Skalierung die Präzision verbessern.
- Schließen Sie den **zweiten Kanal** des Oszilloskops an den Ausgang des Funktionsgenerators an. Sie sollten dann das **Rechtecksignal** in blau sehen können. Skalieren Sie beide Kanäle gleich, dann können Sie den zyklischen Lade- und Entladevorgang nachvollziehen.
- Machen Sie ein **Foto**, auf dem man möglichst nachvollziehen kann, wie Sie $t_{1/2}$ ablesen.

4.7 Wie geht es weiter?

- Es gibt **kein Musterprotokoll**, aber Hinweise zur Auswertung, siehe nächster Abschnitt.
- Es gibt wieder eine **Checkliste** zur Selbstkontrolle. Gehen Sie diese Liste am Ende zusammen durch und unterschreiben Sie anschließend beide, dass das Protokoll den genannten Ansprüchen genügt. **Nehmen Sie diesen Schritt ernst!** Falls Ihr Ergebnis nicht vollständig und plausibel im Sinne der dort aufgeführten Punkte ist, müssen Sie zumindest die Tutorin im Vorfeld per E-Mail kontaktiert haben – andernfalls wird ein solches Protokoll *nicht* testiert.

4.8 Hinweise zur Auswertung

4.8.1 Ein Widerstand im Stromkreis

Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen und erklären Sie sie in ein paar Sätzen.

4.8.2 Kennlinie einer Glühlampe

Stellen Sie U , I und den daraus berechneten Widerstand R mit Fehlern in einer kompakten Tabelle dar. Visualisieren Sie außerdem Ihre Messreihe in einem I - U -Diagramm ohne Fehlerbalken.⁹ Tragen Sie zum Vergleich auch die Kennlinie eines ohmschen Widerstandes mit $R = 75 \Omega$ ein.

⁹ Die Fehlerbalken wären vermutlich so klein, dass man sie kaum erkennen könnte.

Bei der Messung der Stromstärke ist ein (nicht vermeidbarer) systematischer Fehler eingegangen, da der Strom durch den Eingangswiderstand (oder Innenwiderstand) des Amperemeters beeinflusst wird. Wie groß ist dieser Fehler? Müssen Sie die Messwerte entsprechend korrigieren? Der Eingangswiderstand des Amperemeters ist im Handbuch dokumentiert; üblich sind bei kleinen Strömen Werte um $R_e = (1 \dots 10) \text{ k}\Omega$.

4.8.3 Parallelschaltung / Knotenregel

Stellen Sie kurz – ohne Fehlerrechnung – Ihre Messwerte für die Stromstärken und den Ersatzwiderstand dar und vergleichen Sie diese mit Ihren Erwartungen entsprechend Gleichung 4.5.

4.8.4 Reihenschaltung / Maschenregel

Stellen Sie kurz – ohne Fehlerrechnung – Ihre Messwerte für die Spannungen und den Ersatzwiderstand dar und vergleichen Sie diese mit Ihren Erwartungen entsprechend Gleichung 4.6.

4.8.5 Entladungskurve eines Kondensators (manuell)

Tragen Sie die Entladungskurve $U(t)$ auf. Auf diese Weise sehen Sie den exponentiellen zeitlichen Verlauf der Spannung.

Erstellen Sie nun manuell ein halblogarithmisches Diagramm: Tragen Sie $\ln \frac{U(t)}{U(t=0)}$ über der Zeit auf. Machen Sie in diesem Diagramm eine lineare Regression. Bestimmen Sie damit die Zeitkonstante τ_m (mit Fehler) und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem rechnerisch zu erwartenden Wert $\tau_r = RC$ (ebenfalls mit Fehler).

4.8.6 Entladungskurve eines Kondensators (mit Oszilloskop)

Dokumentieren Sie den genauen Ablauf des Versuches. Vergleichen Sie Ihr Messergebnis $\tau_m = t_{1/2} / \ln 2$ mit dem rechnerischen Wert $\tau_r = RC$. Überlappen sich die Fehlergrenzen?