

Physik-Praktikum

für Studierende des Studiengangs
Staatsexamen Medizin

Versuch 3: Elektrizität

Wintersemester 2014/15

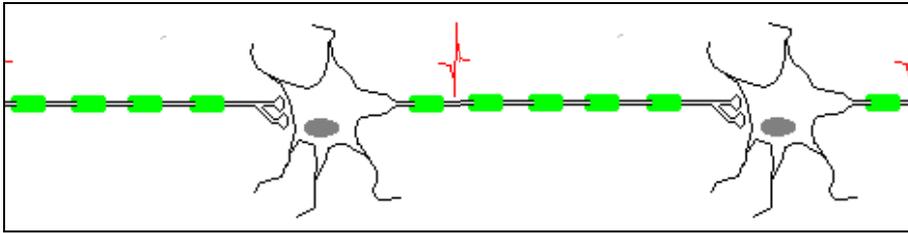
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Institut für Physik
D-26111 Oldenburg

25. September 2014

Namen:

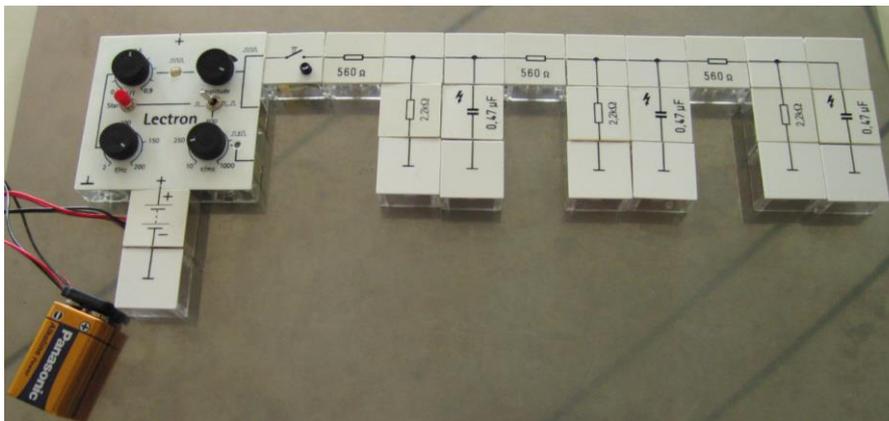
Tutor:

3 Elektrizität: Signale in Nervenleitungen



Elektrische Reizleitung in Nervenzellen

Die Signalübermittlung durch Nervenzellen stellt ein wichtiges Gebiet der Neurophysiologie dar. Die Fähigkeit einer einzelnen Nervenzelle, Signale aufzunehmen und weiterzuleiten, beruht zu großen Teilen auf ihren elektrischen Eigenschaften. Die entsprechenden physikalischen Grundlagen sind Inhalt dieses Versuchs. Anhand elektronischer Bauteile soll dann im zweiten Teil des Versuchstages das Modell einer Nervenzelle aufgebaut und einige Prozesse der Weiterleitung elektronischer Reize simuliert werden.



Simulation des Signaltransportes in Nervenzellen

Für die Durchführung der Versuche sollten Sie mit der Verwendung elektrischer und elektronischer Geräte vertraut sein. Die wichtigsten Geräte werden in einem einleitenden Abschnitt und in der vorbereitenden Vorlesung vorgestellt. Ebenfalls wichtig sind Grundkenntnisse der physikalischen Größen Spannung, Strom, Widerstand, Kapazität, elektrische Arbeit, Leistung etc. und gesetzmäßigen Zusammenhänge wie etwa das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Gesetze, die daher im Folgenden ebenfalls erläutert werden.

3.1 Elektrische Instrumente¹

Studierende, die noch nie oder nur wenige Male selbständig experimentiert haben, haben oftmals Schwierigkeiten bei der Umsetzung einer Schaltungsskizze oder eines Blockschaltbildes in eine reale elektrische Schaltung. Auch der Umgang mit Netzgeräten, Vielfach-Messgeräten, Funktionsgeneratoren und Oszilloskopen

¹ Bilder und Text sind mit Modifikationen den Anleitungen für das Grundpraktikum Physik, <http://www.uni-oldenburg.de/physik/studium-lehre/physik-praktika/grundpraktikum/> entnommen.

bereitet anfänglich Probleme. Andererseits gehört der Umgang mit elektronischen Instrumenten zum beruflichen Alltag jedes Mediziners. Deshalb wird hier eine kurze Einführung gegeben. Zunächst werden die wichtigsten Funktionen der genannten Geräte erläutert. Einfache Schaltungsskizzen werden beschrieben und Fotos der zugehörigen realen Aufbauten gezeigt.

Netzgeräte

Für viele Versuchsaufbauten im Praktikum werden Gleichspannungen² mit unterschiedlichen Höhen und Vorzeichen benötigt, wie z. B. + 10 V, - 12 V, + 5 V usw. Solche Spannungen können einem Netzgerät entnommen werden. Netzgeräte werden auch als *Stromversorgung* oder *Spannungsversorgung* bezeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt ein Netzgerät der Fa. PHYWE, das im Grundpraktikum zum Einsatz kommt. Es handelt sich um ein Doppel-Netzgerät, da es über zwei separat einstellbare Ausgänge verfügt. Am linken Ausgang können Spannungen zwischen 0 V und 15 V eingestellt werden, der Strom kann dort maximal 5 A betragen. Am rechten Ausgang stehen Spannungen zwischen 0 V und 30 V zur Verfügung bei einem maximalen Strom von 2,5 A.



Netzgerät vom Typ PHYWE. An beiden Ausgängen (jeweils blaue und rote Buchse) ist eine Spannung von ca. 10 V eingestellt.

Mit den Drehknöpfen können die Spannung U und der Strom I eingestellt bzw. begrenzt werden.

Jeder Ausgang verfügt über zwei Anschlussbuchsen für Laborkabel. Das Potential³ an der blauen Buchse ist *immer* niedriger als das Potential an der roten Buchse. Vergleicht man den Ausgang des Netzgeräts mit einer Batterie, so entspricht die blaue Buchse dem Kontakt mit der Bezeichnung „-“ und die rote Buchse dem Kontakt mit der Bezeichnung „+“.

Das Vorzeichen der Spannung zwischen den beiden Anschlussbuchsen hängt ausschließlich vom gewählten Bezugspunkt ab. Nehmen wir an, am Ausgang des Netzgerätes sei eine Spannung (Potentialdifferenz) von 10 V eingestellt. Wählen wir die rote Buchse als Bezugspunkt, so ist das Potential an der blauen Buchse um 10 V niedriger. Von diesem Bezugspunkt aus betrachtet ist die Spannung also $U = -10$ V. Wählen wir dagegen die blaue Buchse als Bezugspunkt, so ist das Potential an der roten Buchse um 10 V höher. Von diesem Bezugspunkt aus betrachtet ist die Spannung also $U = +10$ V.

² Englisch DC voltage; DC bedeutet direct current (Gleichstrom).

³ Das (elektrische) *Potential* ist eine auf einen festen Bezugspunkt bezogene Spannung. Ein Bezugspunkt kann z.B. die *Erde* sein, ein Anschluss, der elektrisch leitend mit der Erde verbunden ist.

Namen:

Tutor:

Die gleichen Überlegungen gelten auch für eine Batterie. Eine Blockbatterie mit einer Spannung von 9 V kann demnach, je nach Bezugspunkt, eine Spannung von + 9 V oder - 9 V liefern.

Vielfachmessgeräte (Multimeter)

Vielfachmessgeräte können, wie der Name sagt, je nach Schalterstellung zur Messung verschiedener elektrischer Größen eingesetzt werden. Die wichtigsten davon sind:

Gleichspannung: V $\overline{\sim}$, DC VWechselspannung: V \sim , AC VGleichstrom: A $\overline{\sim}$, DC AWechselstrom: A \sim , AC AWiderstand: Ω Kapazität: $\overline{\sim}$ 

Frontansichten einiger im Praktikum eingesetzter Multimeter

Bei Messung von Wechselspannungen oder Wechselströmen (AC-Messungen) zeigen die Messgeräte jeweils den *Effektivwert* (Index „eff“) an. Der Effektivwert einer Wechselgröße ist derjenige Wert, den eine Gleichgröße haben müsste, um an einem ohmschen Verbraucher die gleiche elektrische Leistung umzusetzen.

Vor der Benutzung eines Vielfachmessgerätes muss die zu messende Größe am Wahlschalter eingestellt werden. Erst danach dürfen die Kabel mit den Eingangsbuchsen verbunden werden.

Bei Widerstandsmessungen liefert ein Multimeter intern einen konstanten Teststrom I_T , der von der roten Buchse durch den zu messenden Widerstand zur schwarzen Buchse fließt. Durch interne Messung der Spannung U über dem Widerstand R ergibt sich dann der Anzeigewert zu $R = U / I_T$. Der Teststrom muss möglichst klein sein, um eine Erwärmung des Widerstandes zu vermeiden.

Funktionsgenerator

Ein Funktionsgenerator erzeugt eine Wechselspannung mit einstellbarer Frequenz und Amplitude. Besonders wichtig sind sinusförmige Wechselspannungen (wie zum Beispiel die Netzspannung mit 230 V Effektivwert), häufig werden aber auch Dreieck- oder Rechteckspannungen in der Messtechnik benötigt.

Manche Funktionsgeneratoren erlauben auch die Erzeugung von Gleichspannungen, die einer Wechselspannung überlagert werden kann. Solche Signale bezeichnet man dann als modulierte Gleichspannungen. Reine Wechselspannungen haben einen Mittelwert gleich Null, können also keine Gleichspannungskomponente aufweisen.

Oszilloskop

Während langsam veränderliche Gleichspannungen mit einem Vielfachinstrument gemessen werden können, benötigt man für die Untersuchung von Wechselspannungen und die Darstellung des zeitlichen Signalverlaufs ein Oszilloskop. Mit ihm lassen sich auch sehr hochfrequente Signale auf einem Schirm wiedergeben.



Frontansicht eines im Praktikum eingesetzten Oszilloskops

Oszilloskope besitzen zwei (manchmal auch mehr) Eingänge, die in der Mitte der Abbildung oben zu sehen sind. Mit Drehschaltern („Volts/Div“) können die Empfindlichkeiten der Signaleingänge eingestellt werden; 1 V bedeutet beispielsweise, dass die vertikale Auslenkung der Signalspur auf dem Schirm 1 V/cm beträgt.

Die Schreibgeschwindigkeit auf dem Schirm wird mit einer Zeitbasis eingestellt, die im rechten Bereich der Abbildung („Sec/Div“) zu finden ist. Die Einstellung 10 ms am Drehknopf bedeutet beispielsweise, dass die Ablenkung der Signalspur mit 10 Millisekunden je Zentimeter auf dem Schirm erfolgt.

3.2 Grundbegriffe der Elektrizität

Elektrische Ladung Q (Einheit Coulomb - C)

Es ist eine Erfahrungstatsache, dass Gegenstände elektrisch aufgeladen werden können und dass es sogenannte *positive* und *negative* Ladungen gibt. Ladungen werden mit dem Formelzeichen Q oder q bezeichnet und in der Einheit Coulomb (C) gemessen: $[Q]=C$.

Ein Gegenstand wird dadurch aufgeladen, dass eine bestimmte Menge elektrischer Ladung von einem anderen Gegenstand auf ihn übergeht. Was der eine Gegenstand an Ladung gewinnt, geht dem anderen an Ladung verloren: In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtsumme der Ladungen konstant, man

Namen:

Tutor:

spricht von *Ladungserhaltung*. Ein Körper ist elektrisch neutral, wenn die Gesamtheit seiner positiven Ladung mit der Gesamtheit der negativen Ladung übereinstimmt. Träger der negativen Ladung sind die Elektronen, die der positiven Ladung die Atomkerne. In festen Körpern sind die letzteren fest an ihre Plätze gebunden, während die Elektronen relativ frei beweglich sind.

Die Ladung eines Elektrons, die sogenannte *Elementarladung* e , ist die kleinste frei vorkommende Ladungsportion, sie kann nicht weiter unterteilt werden. Da die Elementarladung $1,602 \cdot 10^{-19}$ C beträgt, ist das Coulomb eine vergleichsweise 'große' Einheit: 1 C ist gleichbedeutend mit der riesigen Zahl von $6,24 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen. Zwischen elektrisch geladenen Teilchen wirken Kräfte (Coulomb-Kräfte), die 10^{40} mal stärker sind als die Gravitationskraft. Kräfte, die von Ladungen ausgehen, sind additiv (Superpositionsprinzip).

Elektrische Spannung U (Einheit Volt - V)

Um positive und negative Ladung voneinander zu trennen und so zwei Körper gegeneinander aufzuladen, muss man Energie aufwenden. *Spannung* ist definiert als der Quotient aus der Energie W , die zur Ladungstrennung aufgewendet werden muss und dem Betrag des Ladungsunterschieds $|Q|$; sie kann nur zwischen zwei Punkten bestehen, die eine Ladungsdifferenz aufweisen (der zu Spannung synonym verwendete Begriff *Potentialdifferenz* verdeutlicht den Sachverhalt besser).

Spannungen werden mit dem Formelzeichen U bezeichnet und in der Einheit Volt (V) gemessen: $[U]=V$. Die Spannung 1 V besteht dann, wenn durch einen Energieaufwand vom Betrag 1 Nm ein Ladungsunterschied vom Betrag 1 C hervorgerufen wird. Elektrische Spannung ist Ursache für den Strom. Entsprechend den "Stromarten" unterscheidet man Gleich-, Wechsel- und Mischspannung.

Elektrischer Strom I (Einheit Ampere - A)

Jede Bewegung elektrischer Ladungen stellt einen elektrischen Strom dar. Es ist dabei gleichgültig, ob sich Elektronen durch einen Metalldraht bewegen, ob positive oder negative Ionen durch einen Elektrolyten wandern oder ob ein geladener makroskopischer Körper relativ zu einem anderen auf mechanische Weise transportiert wird. Elektrische Ströme führen immer zu einem (zumindest teilweisen) Ladungsausgleich.

Als (konventionelle) Stromrichtung ist aus historischen Gründen die Bewegung der positiven Ladungsträger festgelegt. Ströme werden mit dem Formelzeichen I bezeichnet und in der Einheit Ampere (A) gemessen: $[I]=A$. Die Stromstärke 1 A besteht dann, wenn pro Sekunde die Ladung 1 Coulomb durch die Querschnittsfläche des Leiters fließt; allgemein gilt für den Zusammenhang zwischen Ladung und Stromstärke

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Ist der Strom konstant, geht diese Gleichung über zu

$$I = \frac{Q}{t}$$

Elektrischer Widerstand R (Einheit Ohm - Ω)

Verbindet man zwei Körper, zwischen denen eine Spannung besteht, mit einem *Leiter* (z.B. einem Metalldraht), so genügt schon eine kleine Spannung, um relativ starke Ströme zu erzeugen. Wählt man als Verbindung *Isolatoren* (z.B. einen Glasstab), so lässt sich auch bei großen Spannungen kaum ein Strom nachweisen. Zwischen den "guten" Leitern und den Isolatoren gibt es einen kontinuierlichen Übergang in der Fähigkeit, elektrische Ladungen zu transportieren.

Diese Fähigkeit wird beschrieben durch den elektrischen *Widerstand*, d.h. ein höherer Widerstand entspricht einer schlechteren Leitfähigkeit. Widerstände werden mit dem Formelzeichen R bezeichnet und in der Einheit Ohm (Ω) gemessen: $[R]=\Omega$. Der Widerstand ist definiert als der Quotient aus der Spannung, die an den Enden des Leiters anliegt und der dadurch verursachten Stromstärke:

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

Es ist also: $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$.

Außer von der Art des verwendeten Leitermaterials hängt der Widerstand noch von der Geometrie des Leiters ab, und zwar wächst R proportional zur Leiterlänge l und umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche A :

$$R = \frac{R_{\text{spez}} l}{A}$$

Die temperatur- und druckabhängige Materialgröße R_{spez} heißt *spezifischer Widerstand*; ihre Einheit ist Ωm . Bei guten Leitern (Kupfer, Silber) liegt R_{spez} in der Größenordnung $10^{-8} \Omega\text{m}$ (z.B. für Kupfer $1,55 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$), während für Isolatoren der Widerstand bis zu 10^{21} mal größer ist.

Elektrische Arbeit/Energie W (Einheit Joule - J) elektrische Leistung P (Einheit Watt - W)

Der durch eine Spannungsquelle bzw. ihre Spannung bewirkte elektrische Strom setzt eine bestimmte elektrische Energie in Wärme, Licht, mechanische Bewegung oder in chemische Energie um. Die umgesetzte Energie – bzw. die vom elektrischen Strom verrichtete Arbeit – ist dem Produkt aus der Spannung U , der Stromstärke I und der Flusszeit des Stromes t proportional:

$$W = UIt \quad (2)$$

(Dabei ist angenommen, dass U und I konstant sind.) Für die in einem Leiter mit dem Widerstand R umgesetzte Wärmeenergie erhält man mit Gl. (1) das Joulesche Gesetz:

$$W = RI^2t$$

Mit dem physikalischen Begriff Energie hängt der Begriff *Leistung* eng zusammen. Allgemein (d.h. auch für nichtelektrische Leistung) ist Leistung definiert als das Verhältnis der umgesetzten Energie und der Zeit, in der diese Energie umgesetzt wird:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad \text{bzw. für konstante Leistung} \quad P = \frac{W}{t} \quad (3)$$

Hieraus folgt mit Gl. (2):
$$P = \frac{UIt}{t} = UI \quad (4)$$

Namen:

Tutor:

Für die Maßeinheit der Leistung erhält man aus der letzten Gleichung "Volt-Ampere"; hierfür ist die Bezeichnung "Watt" (Kurzzeichen W) eingeführt. Entsprechend ergibt sich als Maßeinheit für die elektrische Energie "Joule = Watt-Sekunde (Ws)" bzw. die größere Einheit "Kilowattstunde (kWh)".

Das Ohmsche Gesetz

Bei vielen Leitern ist der durchfließende Strom proportional zur anliegenden Spannung (konstante Temperatur vorausgesetzt); der Quotient R ist also unabhängig von der Spannung und deshalb konstant. Diese empirische Tatsache drückt das Ohmsche Gesetz aus:

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.} \quad \text{bei konstanter Temperatur}$$

tur

Leiter, die diese Bedingung erfüllen, heißen Ohmsche Leiter. Da die Stromstärke linear mit der Spannung zusammenhängt, bezeichnet man diese Leiter auch als "lineare" Widerstände.

Bei nichtlinearen Widerständen kann der Widerstandswert unter anderem abhängen von:

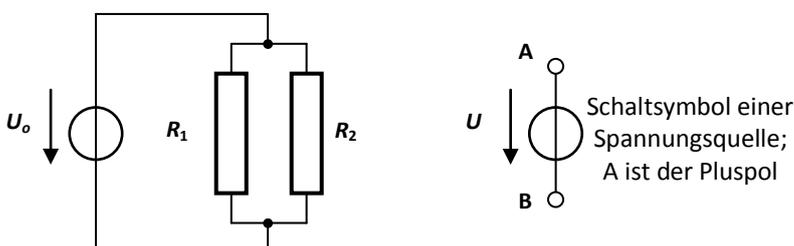
- dem Betrag der angelegten Spannung
- der Frequenz der angelegten Spannung
- der Intensität des eingestrahlt Lichts (Fotoelemente)
- von mechanischen Parametern wie Druck- oder Zugkräften (Sensoren)
- der herrschenden Temperatur (PTC- u. NTC, s.u.).

Schichtwiderstände besitzen in der Regel eine Farbkennzeichnung (Ringe oder Punkte) anhand derer sich der Widerstandswert ablesen lässt. Regelbare Widerstände sind insbesondere Potentiometer, also Widerstände, deren Widerstandswert mit Hilfe eines Schleifkontaktes einstellbar ist.

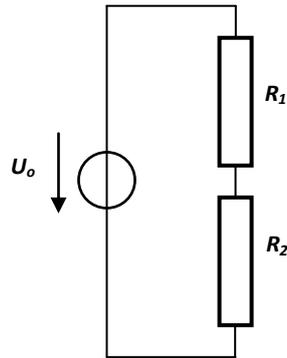
Die Kirchhoffschen Gesetze: Knoten- und Maschenregel

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Widerstände (in der Umgangssprache etwas missverständlich "Verbraucher" genannt) an Spannungsquellen anzuschließen. In Schaltung A sind zwei Widerstände parallel, in Schaltung B in Reihe (oder: Serie) geschaltet.

Schaltung A weist Punkte auf, an denen sich der Gesamtstrom aufteilt. Solche Punkte heißen auch *Knoten*. Beide Schaltungen weisen geschlossene Umläufe auf, sogenannte *Maschen* (z.B. besteht Schaltung B aus nur einer Masche, in Schaltung A findet man drei Maschen). In Maschen teilt sich die Gesamtspannung entsprechend der Schaltelemente (Widerstände) auf. Für die Knoten und Maschen, die auch kompliziertere elektrische Netzwerke zu strukturieren gestatten, gelten die *Kirchhoffschen Gesetze*.



Schaltung A: Parallelschaltung



Schaltung B: Reihenschaltung

Für Knoten gilt das 1. Kirchhoffsche Gesetz (*Knotenregel*):

An einem Knoten (einer Verzweigung) in einem Stromkreis bleibt die Spannung konstant, während sich die Stromstärken zu null addieren.

Für Maschen gilt das 2. Kirchhoffsche Gesetz (*Maschenregel*):

Innerhalb einer Masche (einem unverzweigten Stromkreis) ist die Stromstärke überall konstant, während sich die Spannungen zu null addieren.

Man ordnet den entsprechenden Teilspannungen an jedem Widerstand einem "Spannungszählpfeil" zu, dessen Länge dem Betrag der Teilspannung und dessen Orientierung der Stromrichtung entspricht. Man legt nun für die Masche einen Umlaufsinn fest und bildet die Summe. Läuft man dabei in Richtung des Zählpfeils, so wird die entsprechende Spannung negativ.

Aufgabe:

- Ergänzen Sie bitte die Grafiken der Schaltungen A und B durch Strompfeile.
- Zeichnen Sie neben die Widerstände die zugehörigen Spannungspfeile ein.

Mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze kann man nun berechnen, zu welchem Gesamtwiderstand (auch Ersatzwiderstand genannt) sich einzelne Widerstände addieren.

Bei *Reihenschaltung* von Widerständen addieren sich die Widerstände. Wir betrachten Schaltung B. Nach der Maschenregel gilt $U_0 = U_1 + U_2$. Da die Stromstärke überall gleich ist, ergibt sich $U_0 = R_{\text{gesamt}} I = R_1 I + R_2 I$. Die Stromstärke lässt sich herauskürzen. Allgemein folgt also

$$R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Bei *Parallelschaltung* von Widerständen addieren sich die Kehrwerte. Wir betrachten Schaltung A. Nach der Knotenregel gilt $I_0 = I_1 + I_2$. Da die Spannung überall

gleich ist, ergibt sich $I_0 = \frac{U}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$. Die Spannung lässt sich herauskürzen.

Allgemein folgt also:

$$\frac{1}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Namen:

Tutor:

Aufgabe:

Zeigen Sie durch Rechnung, dass im Fall zweier parallel geschalteter Widerstände R_1 und R_2 für den Gesamtwiderstand gilt:

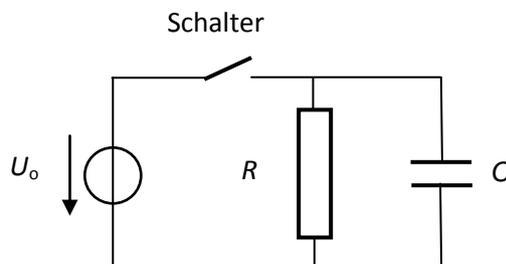
$$R_{\text{gesamt}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Spannungen und Ströme bei der Ladung und Entladung von Kondensatoren

Ein Kondensator besteht im Prinzip aus zwei metallischen Körpern beliebiger Form (den sogenannten *Belegungen*), die einander isoliert gegenüber stehen. Bei den üblicherweise verwendeten Kondensatoren bestehen die Belegungen meist aus dünnen Metallfolien, die – durch eine Isolierschicht voneinander getrennt – aufgewickelt und mit Anschlüssen versehen werden.

Wird ein Kondensator an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, so entsteht auf der einen Belegung ein Elektronenüberschuss, also negative Ladung, auf der anderen Belegung bildet sich ein Elektronenmangel, also positive Ladung. Zwischen den so aufgeladenen Belegungen besteht ein elektrisches Feld.

Das Verhältnis der Ladung Q des Kondensators zu der Spannung U an seinen Anschlüssen wird als *Kapazität* bezeichnet. Kapazitäten werden mit dem Formelzeichen C bezeichnet und in der Einheit Farad (F) gemessen: $[C]=F$.



Sobald der Kondensator bei geschlossenem Schalter aufgeladen ist, fließt kein Ladestrom mehr, obwohl die Spannungsquelle noch angeschlossen ist. Wird die Spannungsquelle durch Öffnen des Schalters entfernt, so bleibt der Ladezustand erhalten; der Kondensator selbst stellt eine Spannungsquelle dar.

Wir betrachten einen Kondensator, der bis zur Spannung U_0 aufgeladen sei. Dann ist die im Kondensator gespeicherte elektrische Ladung

$$Q = CU_0.$$

Nun klemmen wir die Spannungsquelle ab und lassen den Kondensator sich über einen Widerstand R entladen. Dadurch verringert sich die Ladung auf dem Kondensator exponentiell mit der Zeit nach dem Gesetz⁴

⁴ Zur Erinnerung: $e^z = \exp(z)$

$$U_C^{Entl}(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (5)$$

Für die Aufladung des Kondensators ergibt sich in ähnlicher Weise

$$U_C^{Auffl}(t) = U_\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)\right] \quad (6)$$

Dabei ist U_∞ die Ladung, mit der der Kondensator für $t \rightarrow \infty$ aufgeladen wird.

Nach der sog. Halbwertszeit t_h sinkt die Spannung am Kondensator vom Anfangswert auf die Hälfte ab. Gl. (5) liefert für diesen Fall

$$\frac{U_C^{Entl}(0)}{2} = U_0 \exp\left(-\frac{t_h}{RC}\right)$$

$$\frac{1}{2} = \exp\left(-\frac{t_h}{RC}\right) \quad \text{bzw.} \quad t_h = RC \ln 2 \approx 0,693 RC \quad (7)$$

Die letzten Gleichungen enthalten im Nenner des Exponenten das Produkt RC , dessen Maßeinheit die Dimension einer Zeit besitzt. RC ist die Zeit, in der die Spannung beim Entladen auf $e^{-1} = 0,368$ des Anfangswertes U_0 abgesunken bzw. beim Aufladen auf $1 - e^{-1} = 0,632$ des Endwertes U_∞ angestiegen ist. (Für die Zeiten $t = 2/3/4/5 RC$ steigt die Spannung auf $0,86 / 0,95 / 0,98 / 0,99 U_\infty$)

3.3 Simulation von Nervenzellen⁵

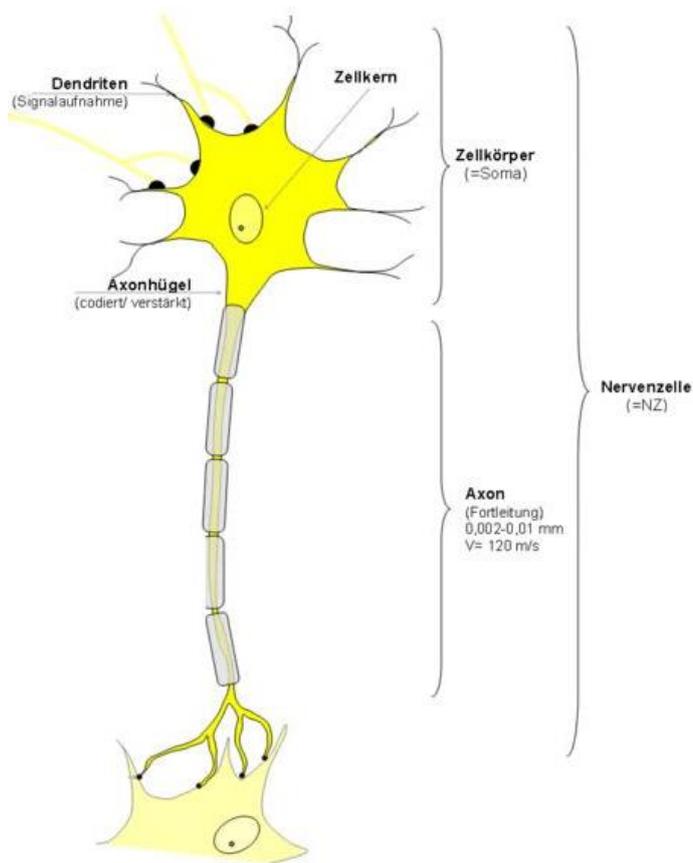
In diesem Versuch werden Sie einen Teil der Signalübermittlung durch Nervenzellen an einem Modell simulieren und untersuchen: die elektrotonische (passive) Ausbreitung von Erregung. Die für die Aufnahme, Verrechnung und Weiterleitung von Signalen wesentlichen Bestandteile einer typischen Nervenzelle sind:

- Die **Dendriten**: sie nehmen dort, wo Synapsen ansetzen, Signale anderer Nervenzellen auf, die sich über den Zellkörper zum Axonhügel ausbreiten (Input).
- Der **Axonhügel** (als Bestandteil des Zellkörpers): dort werden die einlaufenden Signale summiert. Ist das Summensignal hoch genug (überschwellig), werden dort Aktionspotentiale ausgelöst. (Verrechnung)
- Das **Axon**: es dient zur Weiterleitung der Erregung. Am Ende des Axons werden die Signale über Synapsen anderen Nervenzellen oder Muskelzellen zugeleitet. (Output)

⁵ Quelle dieses Abschnitts: Praktikumsskript Physik für Biologen der Ruhr-Universität Bochum

Namen:

Tutor:



Schematische Zeichnung einer Nervenzelle

Auf Dendriten und Zellkörper breiten sich die Signale über kurze Strecken (im Millimeterbereich) rein passiv (elektrotonisch) aus. Allein diese passive (elektrotonische) Erregungsausbreitung ist Gegenstand des Versuches. Ihre zeitlichen und räumlichen Parameter haben entscheidenden Einfluss darauf, ob am Axonhügel in der Summe eine überschwellige Erregung entsteht und Aktionspotentiale ausgelöst werden (das Neuron "feuert").

Bei den Signalen, die sich auf Nervenzellen ausbreiten, handelt es sich um elektrische Signale, das heißt zeitlich veränderliche Ströme und Spannungen. Deren Ausbreitung wird allein durch die elektrischen Eigenschaften der Nervenzelle bestimmt. Bei der elektrotonischen Erregungsausbreitung reichen hierfür Membrankapazität und Membranwiderstand als Eigenschaften der Zellmembran sowie der Längswiderstand als Eigenschaft eines längeren Zellabschnittes (z.B. Dendriten) aus. Reduziert auf diese elektrischen Eigenschaften lassen sich Teile der Nervenzelle (z.B. die Zellmembran) im Modell durch einfache Schaltungen aus Widerständen und Kondensatoren ersetzen.

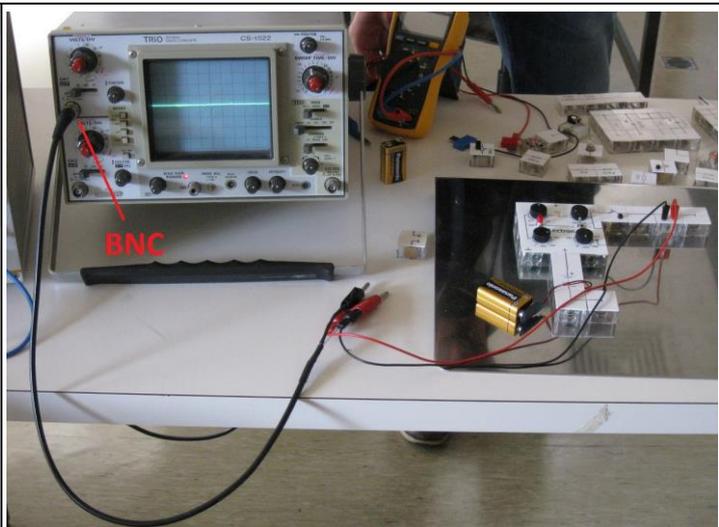
Im Versuch geht es zunächst darum, diese Reduktion auf die elektrischen Eigenschaften und die Umsetzung in die Modelle nachzuvollziehen. Anschließend sollen Sie das zeitliche und räumliche Verhalten elektrischer Signale an diesen Modellen untersuchen. Sie werden dabei die Membranzeitkonstante sowie die Längskonstante als charakteristische Parameter zur Beschreibung der elektrotonischen Erregungsausbreitung kennen lernen und bestimmen.

3.4 Aufgaben

Für die Experimente steht jeder Gruppe ein Koffer mit elektronischen Bauteilen zur Verfügung. Die Bauteile sind in Kunststoffgehäusen gefasst, welche an den Außenseiten Kontakte aufweisen und durch Aneinanderlegen elektrisch verbunden werden können.



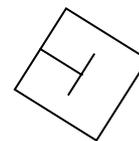
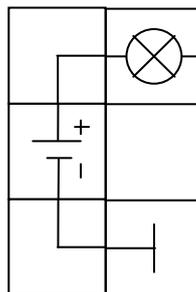
Experimentierkoffer für elektrische Experimente



Aufbau der Bauteile auf einer elektrisch leitenden Platte, welche die Masse darstellt, und Anschluss an ein Oszilloskop

Die Bauteile und ihre Verwendung

Stromkreis mit Massebaustein – wie sind die einzelnen Bausteine aufgebaut?
Wie schließt man den Stromkreis?



Schaltung 1

1. Setzen Sie den Batteriebaustein auf die Aufbauplatte und schieben Sie den Glühlampenbaustein an den + Seitenkontakt des Batteriebausteines und einen Massebaustein an den - Seitenkontakt. Bringen Sie mit einer Münze das Lämpchen zu kurzem Aufleuchten. Wo fließt jetzt der Strom?
2. Legen Sie die Münze zur Seite und fügen statt ihrer den bereitliegenden zweiten Massebaustein ein.
3. Untersuchen Sie den Massebaustein genauer. Wie viele Kontaktplatten hat er? Wo sind sie angebracht?

Namen:

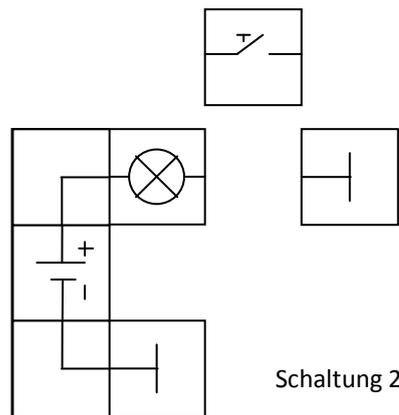
Tutor:

4. Sind im Inneren des Massebausteines Verbindungen zu erkennen? Welchen Weg kann der Strom nehmen?

Den Massebaustein werden wir im Folgenden öfter verwenden, um den Stromkreis zu schließen. Der verbindet die Schaltung über die Aufbauplatte mit anderen Massebausteinen. Die Massebausteine sind die einzigen, die einen Kontakt nach unten zur Platte haben. Alle anderen haben zwar unten einen Magneten, aber keine leitende Verbindung dorthin.

Es kann nur dann ein Strom fließen, wenn der Stromkreis geschlossen ist!

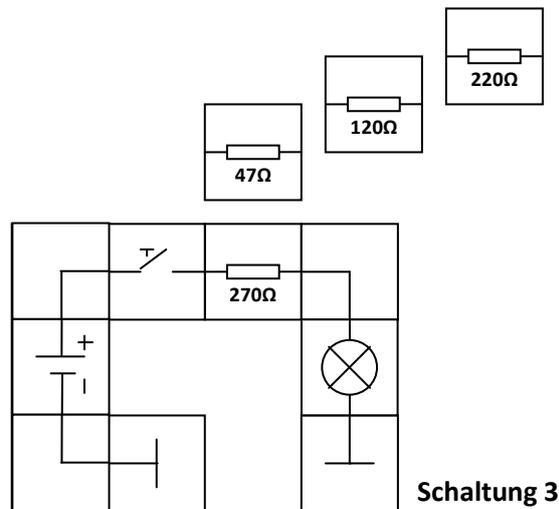
Ein Schalter im Stromkreis



1. Bauen Sie Schaltung 2 auf. Zwischen Glühlampe und Massebaustein bleibt eine Lücke. Setzen Sie hier einen Schalterbaustein ein. Der Schalterbaustein wird in viele der folgenden Schaltungen eingebaut werden. (Er dient hauptsächlich dazu, die Batterie zu schonen. Strom fließt dann nur, wenn der Schalter auch gedrückt gehalten wird.)
2. Der Stromkreis ist nur geschlossen, solange der Schalter gedrückt gehalten wird. Welche der folgenden Schalter arbeiten genauso?

Wandschalter für Deckenleuchten	Zugschalter für Wandleuchten
Klingelknopf	Druckschalter in Nachttischlampen
Kaffeemühlenschalter	Autohupe
Schalter am Fernsehgerät	Drehschalter am Elektroherd

Ein Widerstand im Stromkreis



1. Es werden jetzt verschiedene elektrische Widerstände in den Stromkreis eingebaut. Bauen Sie die Schaltung so auf, dass der Strom von der Batterie durch die Lampe, den Schalter, den Winkelbaustein und dann durch einen zusätzlichen Widerstandsbaustein mit $R=270\ \Omega$ fließt. Betätigen Sie den Schalter. Erklärung?
2. Ersetzen Sie den Widerstand von $270\ \Omega$ nacheinander durch die Widerstände mit $220\ \Omega$, $120\ \Omega$ und $47\ \Omega$. Ergebnis?
3. Vergleichen Sie jedes Mal die Helligkeit der Lampe mit der Zahl auf dem Baustein. (Im Inneren eines Widerstandsbausteins kann man ein kurzes Stäbchen entdecken, den sogenannten Widerstand. Die farbigen Ringe kennzeichnen in einem Farbcode die jeweilige Größe des Widerstandswertes. Eine Anleitung zum Lesen des Codes findet man z.B. auf: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/1109051.htm>)

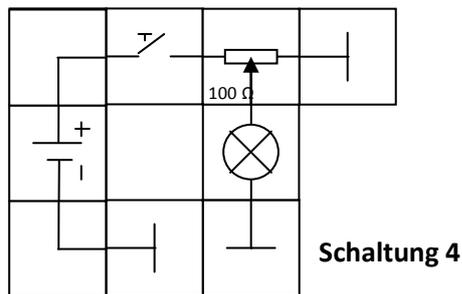
Platz für Ihr Protokoll

Die Helligkeit der Lampe hängt offensichtlich davon ab, welchen zusätzlichen Widerstand R man in den Stromkreis einbringt. Wir wollen diesen Zusammenhang im nächsten Versuch genauer untersuchen.

Namen:

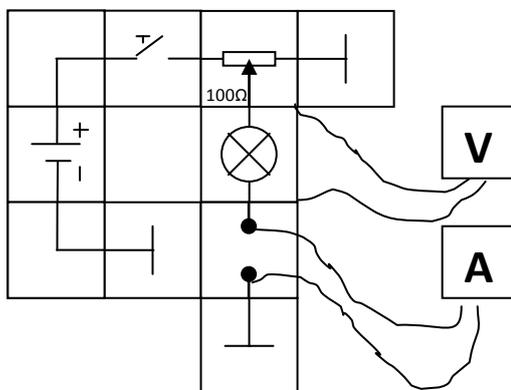
Tutor:

Spannung, Strom und Widerstand – das Ohmsche Gesetz



Schaltung 4

1. Bringen Sie nun statt der Widerstände ein *Potentiometer* (Widerstandsbaustein mit Drehknopf) in den Stromkreis ein. Durch Drehen an dem kleinen Knopf kann man die Größe des Widerstandswertes zwischen 0 und 100 Ω variieren. Das Potentiometer arbeitet als *Spannungsteiler*. Es lässt nur einen *Teil* der Spannung über dem Ast mit der Glühlampe abfallen. (Die Lampe leuchtet je nach Spannung dann auch unterschiedlich hell.)
2. Überprüfen Sie mit dem Ohmschen Gesetz das Verhalten der Glühlampe bei unterschiedlichen Betriebsspannungen. Messen Sie dazu für unterschiedliche Einstellungen des Potentiometers die Spannung U über der Glühlampe und die Stromstärke, die durch die Lampe fließt (siehe Schaltung 5; Strom im Bereich 60 mA, Spannung im Bereich 9 V).



Schaltung 5

Messung	$U/V \pm 2\%$	$I/A \pm 2\%$	R/Ω	$\Delta R/\Omega$
	gemessen	gemessen	berechnet	berechnet
1				
2				
3				
4				

5				
---	--	--	--	--

1. Tragen Sie die Wertepaare mit Fehlerbalken in ein Diagramm ein (U auf der y- und I auf der x-Achse). Was für ein Verlauf der Messkurve ergibt sich? Was sagt der Verlauf der Kurve über den Widerstand der Glühlampe aus?
2. Was für einen Verlauf erwarten Sie für einen Ohmschen Widerstand von 120Ω ? Zeichnen Sie ihn ebenfalls in das Diagramm ein. Was für Unterschiede bestehen zwischen den beiden Kennlinien? Wie lassen sie sich erklären?

Platz für Ihr Protokoll

3. Die messgrößenabhängigen Eingänge sorgen dafür, dass innerhalb des Messgeräts ein entsprechender Widerstand zugeschaltet wird. Bei der Messung der Stromstärke soll der Durchfluss durch das Messgerät den Aufbau so wenig wie möglich stören, also muss der Widerstand des Messgerätes *sehr klein* sein. Bei Messung der Spannung wiederum ist das Messgerät parallel geschaltet. Hier benötigt es einen *großen* Widerstand, damit nicht viel Strom über das Messgerät abfließt. Es bleibt aber in beiden Fällen eine Störung der Schaltung durch diese sogenannten *Innenwiderstände* des Messgerätes bestehen. Das bedeutet, dass die Ergebnisse der Messung durch die Verwendung der Messgeräte beeinflusst werden. In Schaltung 5 werden Strom und Spannung im Stromkreis gleichzeitig gemessen. Welche der beiden Messgrößen wird dabei aufgrund der Innenwiderstände der Messgeräte leicht fehlerbehaftet gemessen?

Infobox: Zur Messung von Spannung und Stromstärke

Bei der elektrischen Spannung handelt es sich um eine *Potentialdifferenz*. Um die Spannung zu messen, muss man daher das Messgerät (Voltmeter: Multimeter auf Gleichspannung „V –“ stellen) an den Punkten im Stromkreis anschließen, zwischen denen man die Spannungsdifferenz messen will. Dazu stehen die kleinen Messsonden zur Verfügung, die man zwischen zwei Bausteine einschieben kann. Ist der Stromkreis geschlossen, fließt aufgrund der anliegenden Spannung ein *Strom*. Um die *Stromstärke* zu messen, muss das entsprechende Messgerät (Amperemeter: Multimeter auf Gleichstrom „A –“ stellen) direkt *in* den Stromkreis eingebracht werden, um sozusagen den *Durchfluss* zu messen. Verwenden Sie dazu einen *Trennbaustein*. Bei Multimetern, die zur Messung von Spannungen, Stromstärken und auch Widerständen eingesetzt werden können, muss unbedingt immer darauf geachtet werden, dass die Messkabel in die richtigen Eingänge gesteckt werden. Meist besitzt das Messgerät einen Eingang "com(mon)", in den immer eins der Kabel gesteckt wird. Der Eingang für das zweite Kabel hängt dann davon ab, was gemessen werden soll, und ist mit A (für Ampere, also Stromstärke), V (Volt, also Spannung) oder Ω (Ohm, also Wider-

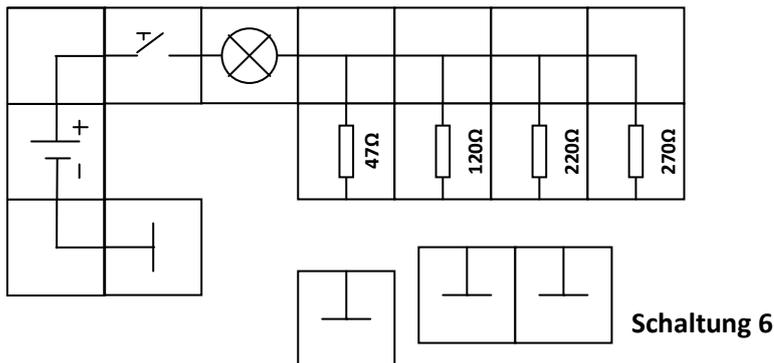
Namen:

Tutor:

stand) gekennzeichnet.

Platz für Ihr Protokoll

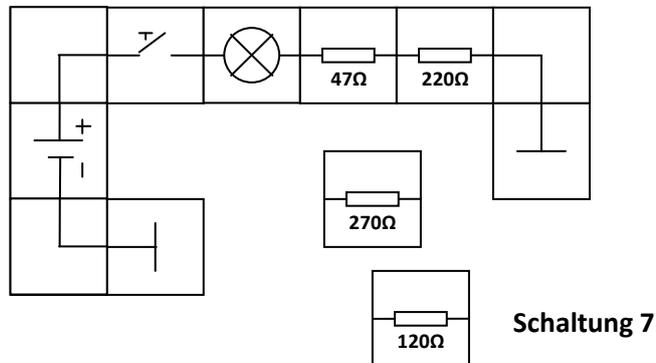
Parallelschaltung von Widerständen – 1. Kirchhoffsches Gesetz (Knotenregel)



1. Bauen Sie Schaltung 6 auf und setzen Sie einen Massebaustein an den 220 Ω Widerstand an. Betätigen Sie den Schalter. Ergebnis? Welchen Weg nimmt der Strom?
2. Setzen Sie einen weiteren Massebaustein an jeweils einem der anderen Widerstände an. Wird die Lampenhelligkeit gegenüber Versuch 1 zu- oder abnehmen? (Wegen der Lage der Widerstände zueinander nennt man diese Art der Schaltung „Parallelschaltung“.) Welchen Weg nimmt der Strom?
3. Es werden nur die Widerstände 220 Ω und 270 Ω parallel geschaltet. Gesucht ist ein Widerstandsbaustein, der für sich allein dem Strom einen ebenso großen Widerstand entgegensetzt wie die Bausteine 220 Ω und 270 Ω in Parallelschaltung zusammen. Die Lampenhelligkeit kann dabei als Maß für die Stromstärke dienen. Ermitteln Sie den nötigen Ersatzwiderstand experimentell und prüfen Sie rechnerisch anhand der entsprechenden Formel nach.
4. Prüfen Sie das 1. Kirchhoffsche Gesetz (Knotenregel) experimentell. Schalten Sie dazu wieder die Widerstände 220 Ω und 270 Ω parallel. Untersuchen Sie mit Hilfe der Messsonden, welche Spannung über jeweils einem der Widerstände abfällt. Stimmt es mit der Voraussage der Knotenregel überein? Schalten Sie nun mit Hilfe des Trennbausteins ein Amperemeter statt des Voltmeters hinzu. (Wie muss man es in den Stromkreislauf einbringen?) Welcher Strom fließt durch die Lampe, bzw. durch die einzelnen Widerstände? Stimmen die Ergebnisse mit der Knotenregel überein?

Platz für Ihr Protokoll

Reihenschaltung von Widerständen – 2. Kirchhoffsches Gesetz (Maschenregel)



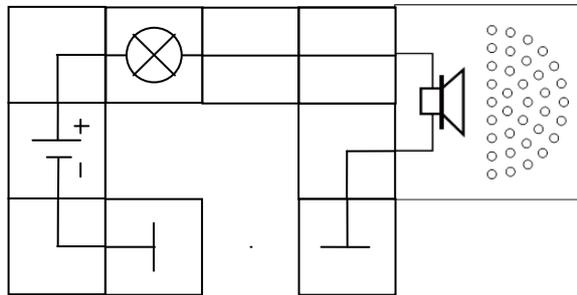
1. Bauen Sie Schaltung 7 auf. Die Glühlampe, der Widerstand 47Ω und der Widerstand 220Ω liegen in einer Reihe nebeneinander. Sie sind „in Reihe“ geschaltet. Beachten Sie die Lampenhelligkeit. Welchen Weg nimmt der Strom?
2. Es soll ein Ersatzwiderstand ermittelt werden, der für sich allein dem Strom einen ebenso großen Widerstand entgegensetzt wie die beiden Widerstandsbausteine 47Ω und 220Ω zusammen. Ergebnis? Wie lässt sich das berechnen?
3. Schalten Sie die Widerstände 47Ω , 120Ω , 220Ω und 270Ω mit der Glühlampe in Reihe. Leuchtet die Lampe noch? Sind die Reihenfolge der Widerstände oder die Position der Lampe von Bedeutung?
4. Nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz (Maschenregel) fließt durch alle Widerstände einer Masche der gleiche Strom. Prüfen Sie experimentell nach.
5. Bringen Sie wieder mit Hilfe der Messsonden das Voltmeter zur Messung in den Stromkreis ein. Welche Spannung liegt über der Lampe und über den jeweiligen Widerständen an? Stimmen die Ergebnisse mit der Maschenregel überein?

Platz für Ihr Protokoll

Namen:

Tutor:

Ströme akustisch hörbar machen: Der Lautsprecher als elektroakustischer Wandler



Schaltung 8

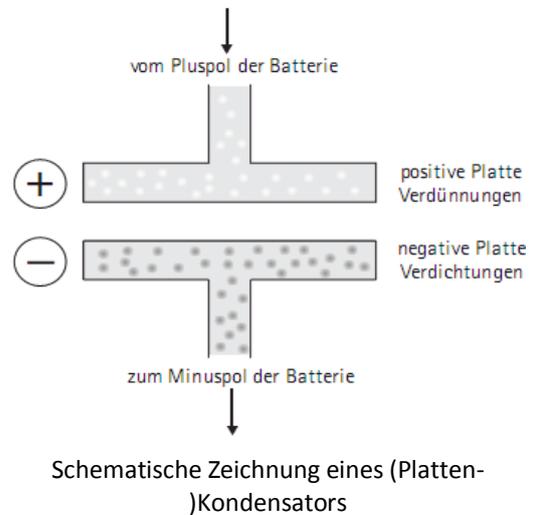
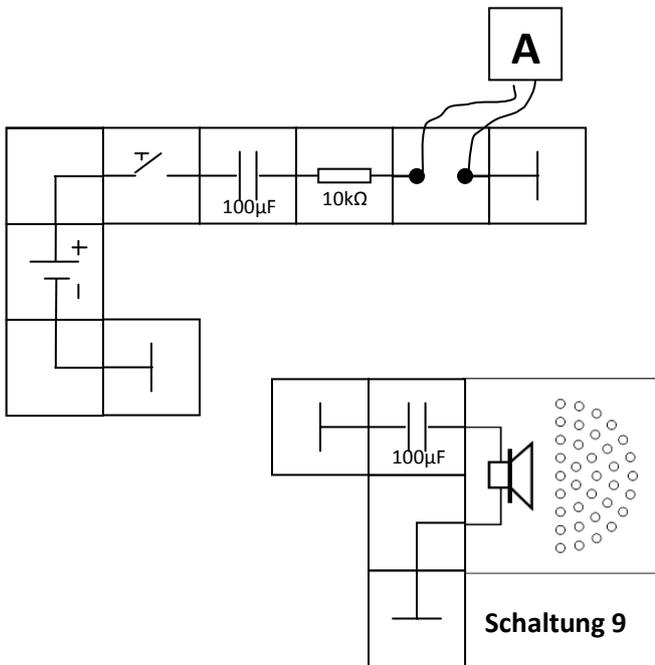
1. Schalten Sie den Lautsprecherbaustein wie abgebildet mit der Glühlampe in Reihe (Schaltung 8). Schrauben Sie die Glühlampe los und wieder fest. Stellen Sie durch leichtes Bewegen der Glühlampe einen Wackelkontakt her. Ist etwas zu hören? Welche Rolle spielt die locker in der Fassung sitzende Glühlampe? Beschreiben Sie den Stromkreis.
2. Schließen Sie nur den Schalterbaustein und den Lautsprecher an den Batteriebaustein an und schließen Sie an beiden Enden den Stromkreis durch Massebausteine. Wann ist etwas zu hören, wann nicht?

Der Lautsprecher macht Ströme dann hörbar, wenn sie sich zeitlich verändern - zum Beispiel bei einem Wackelkontakt, wenn der Stromfluss ständig wieder unterbrochen wird.

Der Kondensator

1. Zwischen Schalter und einem analogen Amperemeter (Zeigermessgerät) wird ein Kondensator in den Stromkreis eingebaut (Schaltung 9). Als Messbereich des Amperemeters wählen Sie nach Möglichkeit 2,5 mA. Der zusätzliche Widerstand sorgt nur für eine Verlangsamung des Aufladevorgangs. Betätigen Sie den Schalter (und zwar nur *einmal!*) und beobachten Sie dabei das Amperemeter. Warum schlägt der Zeiger aus?
2. Wiederholen Sie den Versuch und betätigen Sie den Schalter mehrere Male hintereinander. Ergebnis? Wie lässt sich das erklären? Wie verläuft der Stromkreis?
3. Nehmen Sie den Kondensator aus der Schaltung heraus und setzen Sie ihn neben den Lautsprecher. Nach Anfügen des zweiten Massebausteins ist der Stromkreis geschlossen. Was hört man in diesem Augenblick? Erklärung? Wo ist die Stromquelle zu suchen?
4. Kann man den letzten Versuch mehrmals hintereinander wiederholen? Warum / warum nicht?
5. Betrachten Sie das Schaltsymbol des Kondensators auf dem Baustein. Hilft es bei der Erklärung der zuvor gemachten Beobachtungen?
6. Betrachten Sie die folgende Abbildung, die schematisch einen Kondensator zeigt. Der Strom fließt vom Plus- zum Minuspol (technische Stromrichtung: die Elektronen tragen negative Ladung und fließen deswegen vom Minus- zum Pluspol). Beschreiben Sie den Stromweg. Was

passiert, wenn man den Schalter mehrmals hintereinander betätigt? Was passiert, wenn man vor dem zweiten Schalten die Seitenkontakte des Kondensatorbausteines mit Daumen und Zeigefinger anfasst?



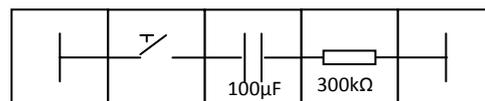
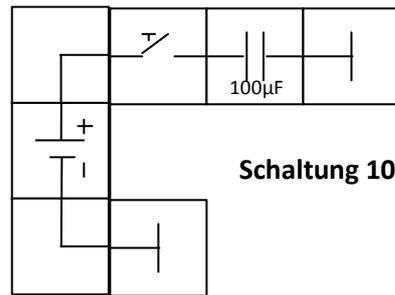
Platz für Ihr Protokoll

Ladestrom und Ladezeit eines Kondensators; Aufnahmen der Stromzeitkurve - Abhängigkeit des Entladestromes von der Dauer der Entladung

1. Bauen Sie Schaltung 10a auf. Verwenden Sie als Kondensator einen mit der Kapazität $100\mu\text{F}$. Bei Betätigung des Schalters wird der Kondensator aufgeladen. Welche Spannung liegt nun zwischen den Kondensatorplatten an? Messen Sie mit Hilfe der Messsonden und einem Voltmeter nach. Welche Seite ist positiv, welche negativ geladen?

Namen:

Tutor:



2. Im aufgeladenen Kondensatorzustand sind die Ladungen auf den Platten dicht gepackt. Schließt man den Kondensator kurz, wie in Schaltung 10b zu sehen, dann können die beweglichen Elektronen von der negativ geladenen Platte auf die positive Platte überfließen und die Ladungsdifferenz wieder ausgleichen: der Kondensator entlädt sich. Dieser Vorgang geht aufgrund der gegenseitigen Abstoßung der Ladungen am Anfang sehr zügig und wird dann mit abnehmender Ladungsdichte auf den Platten langsamer. Außerdem wird der Prozess durch den Widerstand verlangsamt. Er „bremst“ sozusagen die Bewegung der Elektronen während des Entladungsvorgangs. Wie wird sich bei der Entladung die Spannung, die zwischen den Platten anliegt, mit der Zeit vermutlich verändern? Skizzieren Sie Ihre Befunde.

Platz für Ihr Protokoll

3. Die skizzierte Entladekurve, also die zeitliche Änderung der Spannung zwischen den Kondensatorplatten, soll nun experimentell überprüft werden. Bringen Sie dazu ein Voltmeter in die Schaltung ein und notieren Sie in kurzen zeitlichen Abständen die Spannung während der Entladung. Die Spannung soll über dem Kondensator gemessen werden. Zur Spannungsmessung kann der eine Versuchspartner am besten den Spannungsverlauf kontrollieren und ansagen, wann jeweils ein ganzzahliger Wert (8V, 7V usw.) durchlaufen wird, während der andere die zugehörige Zeit auf der Stoppuhr abliest.
4. Tragen Sie die aufgenommenen Werte in ein Diagramm ein. Wie verläuft die Spannungskurve? Entspricht sie den zuvor aufgestellten Vermutungen?

5. Als *Zeitkonstante* bezeichnet man die Zeit τ , in welcher die Ladespannung um etwa 63% (oder auf ca. ein Drittel, $\frac{1}{e} = \frac{1}{2.71828}$) der Ausgangsspannung abgesunken ist. Wie groß ist τ in der aufgenommenen Entladekurve?
6. Tragen Sie die Messwerte auch halblogarithmisch auf (also $\ln U$ gegen t). Aus der Steigung lässt sich nach Gleichung 3.5 die Zeitkonstante RC ermitteln.
7. Prüfen Sie die ermittelten Werte für RC auch rechnerisch für die verwendeten Werte von R und C nach. Welche möglichen Fehlerquellen existieren?
8. Wie groß ist die Halbwertszeit bei der Entladung?

Platz für Ihr Protokoll

Das Oszilloskop und der Funktionsgenerator

Wechselspannungen und Wechselströme

Bisher haben wir nur sogenannte Gleichspannungen und Gleichströme betrachtet, wie sie eine Batterie liefert. Minus- und Pluspol sind bei Gleichspannungsquellen festgelegt, und der Stromfluss erfolgt immer in die gleiche Richtung (konventionell festgelegte Stromrichtung: von Plus nach Minus, die Elektronen bewegen sich tatsächlich von Minus nach Plus). In Vorbereitung auf den nächsten Versuchsteil, der Simulation einer Nervenzelle anhand elektronischer Bauteile, wollen wir uns aber auch mit sogenannten Wechselspannungen und –strömen befassen. Wir bleiben dabei aber bei dem einfachen Beispiel der Rechteckspannung, deren einzelne Periode aus einem Spannungsspeak und einer „Ruhezeit“ besteht:

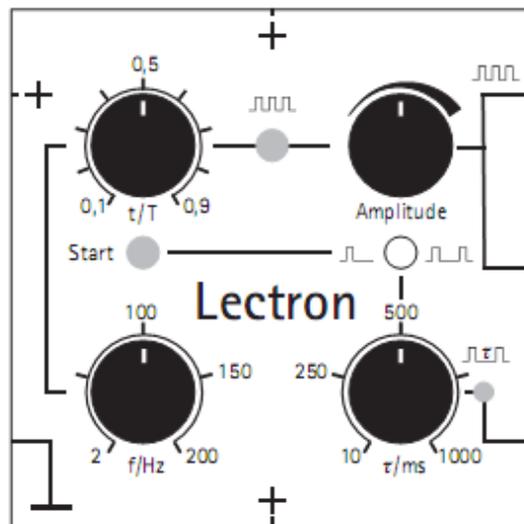
Die Rechtecksignale werden von einem sogenannten *Funktionsgenerator* geliefert.

Handhabung des Funktionsgenerators

Der Funktionsgenerator benötigt eine *Versorgungsspannung* von 9V. Dazu wird der Pluspol des Batteriebausteins mit einem der beiden +Eingänge des Funktionsgenerators verbunden. Der Minuspol wird auf Masse gelegt.

Namen:

Tutor:



Funktionsgenerator

Am Ausgang rechts oben kann ein Rechtecksignal abgegriffen werden.

1. Bauen Sie den Funktionsgenerator auf der Arbeitsplatte auf und stellen Sie die Versorgungsspannung mit Hilfe des Batteriebausteins her. Bei korrekter Versorgung leuchtet die Kontrolllampe des Funktionsgenerators auf.
2. Da es sich um ein sich zeitlich veränderndes Signal handelt, lässt sich diese Signalfrequenz mit Hilfe des Lautsprechers wieder hörbar machen. Bringen Sie dazu den Lautsprecher an den oberen Signalausgang an (Massebaustein am Ende nicht vergessen!) und variieren Sie langsam die Frequenz f von kleinen zu großen Werten.
3. Fügen Sie einen Kondensatorbaustein hinzu. Was ist nun zu hören? Wie lässt sich das erklären?

Infobox

Der Kondensator kann in der Elektrotechnik als sogenannter „Hochpass“ eingesetzt werden. Wie wir in Schaltung 9 gesehen haben, lädt er sich in Verbindung mit einer Gleichspannung zunächst schnell, dann aufgrund der schon auf den Kondensatorplatten vorhandenen Ladungen immer langsamer auf. Der Stromfluss kommt so schließlich zum Erliegen.

Bei einer sich ständig umpolenden Wechselspannung ist das anders. Hier kann tatsächlich ein Strom durch den Stromkreis mit Kondensator fließen, sofern der Stromfluss bereits die Richtung ändert, bevor der Kondensator voll aufgeladen ist und den Stromfluss bremst.

In Nervenzellen hingegen werden elektrische Signale erzeugt und weitergeleitet, die als „Impulse“ bezeichnet werden und einem Rechtecksignal gleichen. Wie solche Signale einen Kondensator passieren, wollen wir im Folgenden näher untersuchen. Wir wollen dazu das Spannungssignal auf dem Bildschirm eines Oszilloskops darstellen.

Durch eine andere Art der Beschaltung des Kondensators entsteht ein sogenannter „Tiefpass“. Informieren Sie sich bitte in der Literatur über diesen Schaltungstyp.

Platz für Ihr Protokoll

Das Oszilloskop

Wir wollen uns nun das Signal des Funktionsgenerators mit Hilfe des Oszilloskops ansehen.

1. Setzen Sie dazu den Trennbaustein mit Masse an den Ausgang (rechts oben) des Funktionsgenerators und schließen Sie zwei Kabel an. Mit Hilfe eines Banane-BNC-Kabels können Sie das Signal nun auf den ersten Eingang des Oszilloskops geben („INPUT CH 1“).
2. Mit Hilfe des darüber liegenden großen Drehknopfes („VOLTS/DIV“) lässt sich die vertikale Skalierung der Anzeige regulieren. Probieren Sie aus. Der darüber liegende kleine Drehknopf („Y-POS. 1“) verschiebt das Signal nach oben und unten.
3. Der große Drehknopf ganz rechts („TIME/DIV“) reguliert die horizontale Skalierung. Das Signal wird durch Drehen des Schalters in die Länge gezogen oder gestaucht. Probieren Sie aus.
4. Wenn das Signal nun auf dem Oszilloskopschirm zu sehen ist, können Sie es am Funktionsgenerator noch variieren. Welchen Einfluss haben die Drehknöpfe des Funktionsgenerators auf das Signal?
5. Stellen Sie ein Rechtecksignal von 2V Amplitude und einer Frequenz von 100 Hz ein.

Das bedeutet: Wenn die horizontale Skalierung des Oszilloskopeingangs („VOLTS/DIV“) auf 1 steht, entspricht ein Kästchen gerade einem Volt. Bei einer Amplitude von 2 V liegt dann die untere Kante des Rechtecksignals gerade auf der mittleren horizontalen Linie, die obere Kante zwei Kästchen darüber. Das Signal können Sie mit Hilfe von „Y-POS. 1“ verschieben, die Amplitude regulieren Sie mit dem Funktionsgenerator (oben rechts).

Für die Einstellung der Frequenz stellen Sie die horizontale Skalierung des Oszilloskops (also die zeitliche Achse) auf 2 ms ein („TIME/DIV“). Das Verhältnis zwischen Peak und Ruhezeit des Rechtecksignals kann man am „t/T“ Drehknopf oben links am Funktionsgenerator variieren. Wählen Sie die Dauer des Peaks und der Ruhezeit gleichlang und variieren Sie die Frequenz des Signals am Funktionsgenerator („f/Hz“), bis eine Periode auf dem Oszilloskopbildschirm gerade fünf Kästchen breit ist. Dann hat das Signal die Periodendauer $5 \cdot 2 \text{ ms} = 10 \text{ ms}$ oder $0,01 \text{ s}$.

Die Frequenz ist gerade der Kehrwert davon, also $f = \frac{1}{0,01 \text{ s}} = 100 \text{ Hz}$.

Simulation von Nervenzellen mit Hilfe elektronischer Bauteile

In den folgenden Versuchen wollen wir nun alle die bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse auf die biologische Situation einer Nervenzelle anwenden. Dazu wird eine biologische Membran anhand elektronischer Bauteile simuliert, und wir wollen untersuchen, wie elektrische Signale durch diese Nervenmembran weitertransportiert werden.

Namen:

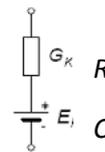
Tutor:

Beim Aufbau des Modells sind zwei Eigenschaften der Membran zu berücksichtigen:

Die Membran einer Nervenzelle trennt das Innere der Zelle vom Äußeren. Auf beiden Seiten der Membran befindet sich Elektrolytflüssigkeit, also ein elektrischer Leiter. Die Doppellipidschicht der Membran isoliert die Membranaußen- von ihrer Innenseite. Eine solche Anordnung verhält sich wie ein Kondensator: auf beiden Seiten des Isolators (bei der Membran: Doppellipidschicht) können elektrische Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens gespeichert werden, und der Isolator verhindert, dass diese sich durch Stromfluss ausgleichen. Die "Speicherfähigkeit" der Anordnung heißt wie beim Kondensator auch hier *Kapazität* (Membrankapazität C). Wir simulieren die Doppellipidschicht der Membran durch einen elektrischen Kondensator der Kapazität $0,47 \mu\text{F}$.



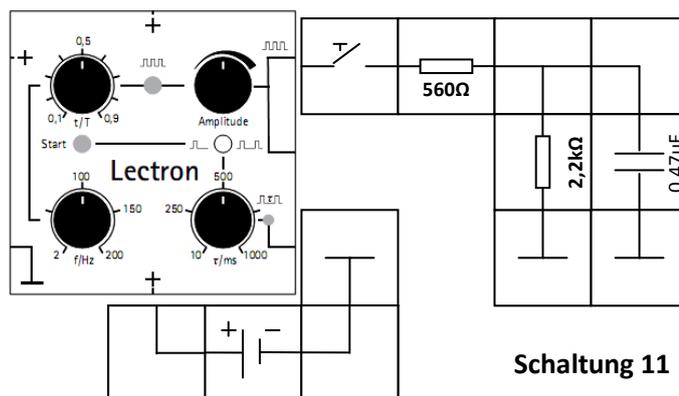
Ionenkanal mit Ionenleitfähigkeit g kann simuliert werden durch Widerstand mit $R = 1 / g$



Ionenkanal und elektronische Simulation

Wir brauchen allerdings noch einen weiteren elektrischen Baustein für unsere Simulation: Die Elektrolyte innerhalb und außerhalb der Zelle sind durch die Membran nicht vollständig gegeneinander isoliert. Durch passive (ständig geöffnete) Ionenkanäle, die in die Membran eingelagert sind (siehe Abbildung), können Ionen und damit elektrische Ströme durch die Membran fließen. Die elektrischen Eigenschaften von Ionenkanälen (d.h. die Parallelschaltung einer Vielzahl von Ionenkanälen auf einem kleinen Membranabschnitt) können durch einen elektrischen (Ohmschen) Widerstand beschrieben werden. Wir ergänzen darum die Schaltung um einen Widerstand mit $2,2\text{k}\Omega$. Er verbindet die Innen- mit der Außenseite der Membran.

Zeitliche Änderung des Membranpotentials, Entstehung von Erregung



Schaltung 11

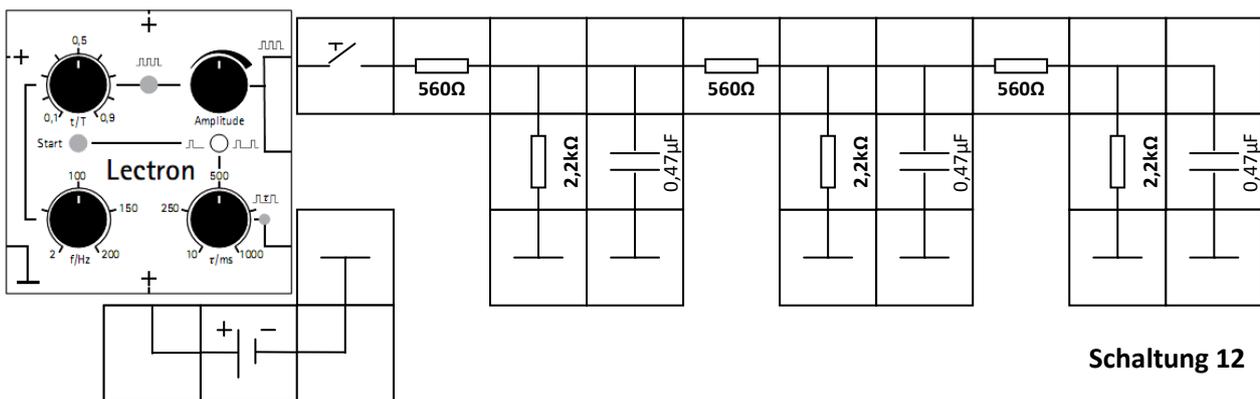
Bauen Sie Schaltung 11 auf. Mit Hilfe der Messsonden können Sie sich das Signal auf dem Oszilloskop ansehen. Betrachten Sie zunächst das ursprüngliche Signal am Ausgang des Funktionsgenerators (Signal mit einer Sonde am Ausgang des Funktionsgenerators abgreifen, die andere auf Masse legen). Vergleichen Sie mit dem Signal über der Kondensator-Widerstand-Membran (z.B. zwischen T- und Winkelbaustein abgreifen, die andere Sonde wieder auf Masse). Wie hat sich das Signal verändert? Kommt Ihnen der Verlauf des Spannungssignals bekannt vor?

Übernehmen Sie den auf dem Oszilloskop angezeigten Signalverlauf in Ihr Protokoll und werten Sie es aus: Im Gegensatz zu Schaltung 10 betrachten wir jetzt die Aufladekurve: Die Membranzeitkonstante τ_M ist definiert als die Zeit, in der die Spannung der Membran auf ca. 63% des Endwertes angestiegen ist (wenn also nur noch $1/e$ bis zur vollen Spannung fehlt). Wie groß ist die Zeitkonstante in diesem Fall? Besteht auch hier ein Zusammenhang zwischen τ_M , R und C ?

Platz für Ihr Protokoll

Räumliche Ausbreitung von Signalen

Wir betrachten nun eine langgestreckte Zelle und wollen untersuchen, wie ein elektrisches Signal durch die Membran weitertransportiert wird.



1. Bauen Sie dazu noch zwei weitere RC-Glieder zu Schaltung 11 hinzu: Die 560Ω Widerstände simulieren den Längswiderstand durch die Membran. Vergleichen Sie die Spannungssignale über jedem einzelnen der Glieder. Wie verändert sich das Signal über die Membran hinweg?
2. Notieren Sie jeweils die Maximalspannungen des Signals und tragen Sie sie in ein Diagramm ein (U auf der y - und die Nummer n des Abschnitts auf der x -Achse).

Legen Sie eine möglichst glatte Kurve durch die vier Punkte. Man kann nun die sogenannte *Membranlängskonstante* λ bestimmen: Sie gibt (analog zur schon behandelten Zeitkonstante) an, nach wie vielen Membranabschnitten die **Signalspannung um 63% im Vergleich zur Ausgangsspannung** abgefallen ist (wenn also nur noch $1/e$ der Ausgangsspannung übrig ist). In dieser Auftragsung können Sie bisher nur eine Aussage treffen, nach wie vielen RC-Gliedern dies der Fall ist. Nehmen Sie an, dass ein Gliedabschnitt im Modell einer Länge von $0,5 \text{ mm}$ der Membran entspricht und berechnen Sie λ (Einheit mm). Wie schätzen Sie die Genauigkeit Ihres Wertes ein?

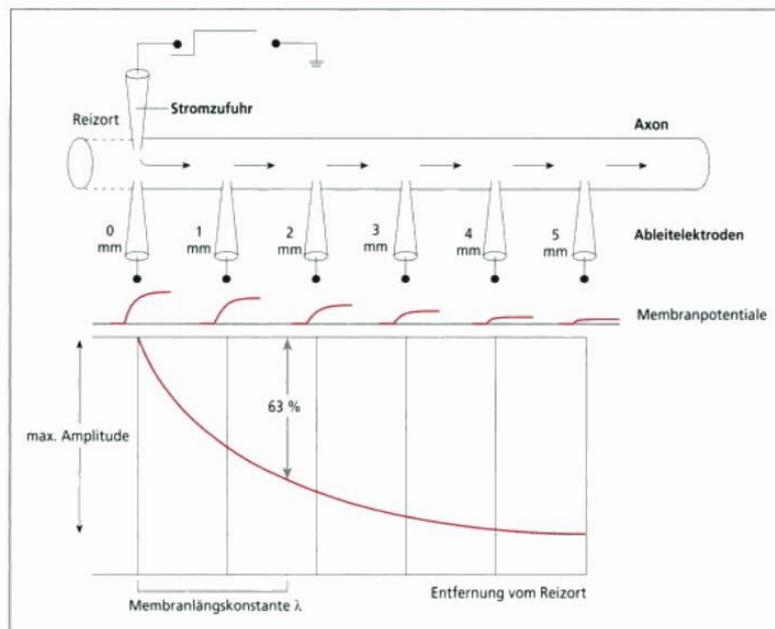
λ wird von den gewählten Größen der elektronischen Bausteine abhängig sein. Wenn noch Zeit zur Verfügung steht, können Sie noch andere Kombinationen der Widerstände und Kondensatoren ausprobieren.

Namen:

Tutor:

Platz für Ihr Protokoll

3.3 Verlauf des elektronischen Potentials im Axon eines Neurons nach einem unterschwelligen Reiz. Oben Applikation eines unterschwelligen Stromstoßes in ein Axon und abgeleitete Membranantworten in unterschiedlichen Entfernungen (in mm) vom Applikationsort, unten Darstellung des jeweiligen Plateauwertes (Amplitude) als Funktion der Entfernungen vom Reizort. Es kommt zu einem Potentialabfall mit wachsender Entfernung vom Reizort. Die Membranlängskonstante λ gibt die Entfernung vom Reizort an, bei der die Amplitude um 63% des Ausgangswertes abgefallen ist.



Aus: v. Engelhardt, Breves, Physiologie der Haustiere, Enke Verlag 2005

Infobox:

Die Analogie des „Wassermodells“

Wasserkreislauf	Stromkreis
In einem Wasserkreislauf fließt Wasser.	In einem elektrischen Stromkreis bewegen sich Elektronen.
Das geschieht nur, wenn eine Pumpe vorhanden ist, die das Wasser in Bewegung hält.	Das geschieht nur, wenn eine Spannungsquelle die Aufgabe der Pumpe übernimmt. Die Elektronen werden am Minuspol der Spannungsquelle in den Stromkreis eingeführt und wandern zum Pluspol der Spannungsquelle.
Durch die Pumpe wird das Wasser in einem Teil des Kreislaufs auf ein höheres Niveau gehoben, von dem aus es über ein Gefälle durch die übrigen Rohre fließen kann.	Durch den Spannungsdifferenz werden die Elektronen ... Vervollständigen Sie selbst.
Verzweigt sich der Stromkreis, teilt sich der Wasserstrom auf die verschiedenen Seitenarme auf. Durch ein dickeres Rohr fließt dann ein größerer Anteil des Gesamtstroms als durch ein dünneres. Der gesamte Wasserstrom, der durch alle Seitenarme fließt, muss allerdings gleich dem Strom sein, der zur Verzweigung hingeflossen ist, da sonst vor dem Knoten ein Stau entstehen würde.	Bei einer Parallelschaltung elektrischer Widerstände teilt sich der elektrische Strom auf die verschiedenen elektrischen Leitungen auf. Durch einen kleineren Widerstand fließt dabei mehr Strom als durch einen größeren. Der Gesamtstrom, der durch alle Seitenarme fließt, muss allerdings gleich dem Strom sein, der zur Verzweigung hingeflossen ist, da sonst vor dem Knoten ein Stau entstehen würde, also $I_1 + I_2 + I_3 + \dots = I$.
Im unverzweigten Rohrlauf erfährt das Wasser in dünneren Rohrabschnitten einen größeren Widerstand als in dickeren. Damit der Strom gleich bleibt, d.h. die gleiche Wassermenge pro Zeit transportiert wird, muss das Gefälle dünnerer Rohrabschnitte größer sein als über dickeren	Damit der Strom gleich bleibt, muss die Spannungsdifferenz bei größeren Widerständen größer sein als bei kleineren Widerständen.