

Skripte zur Physik

# Elektrizitätslehre

von

Christian Wyss



Skripte zur Physik

# Elektrizitätslehre

von

Christian Wyss



mathema



© 2024 Dr. Christian Wyss

Verlagslabel: mathema ([www.mathema.ch](http://www.mathema.ch))

ISBN Hardcover: 978-3-384-38740-0  
Paperback: 978-3-384-38739-4

Auflage 1.2

Druck und Distribution im Auftrag des Autors:  
tredition GmbH, Heinz-Beusen-Stieg 5, 22926 Ahrensburg, Germany

Das Werk, einschliesslich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Für die Inhalte ist der Autor verantwortlich. Jede Verwertung ist ohne seine Zustimmung unzulässig. Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen, insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäss §44b UrhG („Text und Data Mining“) zu gewinnen, ist untersagt. Die Quellen der Bilder und deren Lizenzen sind im Anhang aufgeführt. Die Publikation und Verbreitung erfolgen im Auftrag des Autors, zu erreichen unter:  
Dr. Christian Wyss, Chemin du Clos 60, 2502 Biel-Bienne, Schweiz.

Die Philosophie steht in diesem grossen Buch geschrieben, das unserem Blick ständig offen liegt – ich meine das Universum –; aber das Buch ist nicht zu verstehen, wenn man nicht zuvor die Sprache erlernt und sich mit den Buchstaben vertraut gemacht hat, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und deren Buchstaben sind Kreise, Dreiecke und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Bild davon zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth herum.

Galileo Galilei: „*Il Saggiatore*“ (1623)



# Inhaltsverzeichnis

*Einleitende Worte*

*Zu den Inhalten der Skripte*

- I. Einführung in die Elektrizitätslehre
- II. Fortgeschrittene Elektrizitätslehre
- III. Elektrotechnik und Elektronik

*Ergänzende Bemerkungen*

*Demonstrationsexperimente*

*Schlussworte*





# Einleitende Worte

Die Skripte zur Physik sind im Rahmen des gymnasialen Unterrichts entstanden und sind primär als **unterrichtsbegleitendes Material** konzipiert. Sie können jedoch auch als eigenständiges Lern- und Übungsmaterial eingesetzt werden.

Die Skripte enthalten **Lückentexte**. Sie dienen der Festigung des erworbenen Wissens und sollten im Plenum mit der gesamten Klasse ausgefüllt werden. Diese handschriftlichen Einträge helfen, die Schlüsselbegriffe und Aussagen zu verinnerlichen und Herleitungen und Beweise besser nachzuvollziehen.

## Zu den Inhalten

### *Einführung in die Elektrizitätslehre*

#### *Behandelte Inhalte*

Die Ladung wird als neue Grundgrösse eingeführt und die Eigenschaften von Leitern und Isolatoren (sowie am Rande auch von Halbleitern) werden diskutiert. Der Gleichstrom wird mithilfe des Wassermodells erläutert, wobei insbesondere die Grössen Spannung, Stromstärke und Widerstand eingeführt werden und die elektrische Leistung behandelt wird. Die Kirchhoffschen Regeln werden hergeleitet und an einfachen Serien- und Parallelschaltungen angewendet.

Im zweiten Teil werden elektrostatische Phänomene betrachtet und das Coulomb-Gesetz wird behandelt. Im dritten und letzten Teil wird der Feldbegriff eingeführt, verschiedene Darstellungen von Vektorfeldern werden diskutiert und die Eigenschaften von elektrischen und magnetischen Feldern diskutiert sowie die Lorentzkraft eingeführt.

#### *Notwendiges Vorwissen*

Dieses Skript setzt grundlegende Kenntnisse der klassischen Mechanik voraus, insbesondere der Begriffe Kraft, Arbeit, Energie und Leistung. Um die physikalischen Konzepte klar und verständlich zu vermitteln, wird bewusst ein einfach zugängliches mathematisches Niveau gewählt. Dennoch sind grundlegende Kenntnisse in Algebra und Arithmetik erforderlich.

### *Fortgeschrittene Elektrizitätslehre*

#### *Behandelte Inhalte*

Dieses Skript ergänzt, präzisiert und erweitert die Inhalte des Skripts „Einführung in die Elektrizitätslehre“. Es behandelt die Eigenschaften des statischen elektrischen Feldes sowie spezielle Quellen des Feldes wie mehrere Punktladungen, Dipole und Plattenkondensatoren. Ausserdem wird die Bewegung von Teilchen im elektrischen Feld untersucht und Anwendungen wie der Millikan-Versuch, die Elektronenkanone, die Braun'schen Röhre, die Röntgenröhre und der Photomultiplier diskutiert. Das elektrische Potential wird eingeführt und verschiedene Darstellungen des elektrischen Feldes (Vektorpfeile, Feldlinien, Potentiallinien) erläutert.

Analog dazu werden die Eigenschaften des statischen magnetischen Feldes behandelt sowie spezielle Quellen des Feldes wie gerade Leiter, Leiterschleifen und Spulen betrachtet. Die Bewegung von Teilchen im magnetischen Feld wird untersucht und Anwendungen wie das Fadenstrahlrohr, der Wien-Filter, das Massenspektrometer, das Zyklotron und die Fernsehrohren werden diskutiert.

Der elektrische und magnetische Anteil der Lorentzkraft wird im Detail besprochen, insbesondere die Kraft auf stromdurchflossene Leiter, mit Anwendungen in Lautsprechern, Motoren, Hall-Sonden und Generatoren.

### *Notwendiges Vorwissen*

Vorausgesetzt wird, dass die Inhalte der „Einführung in die Elektrizitätslehre“ bereits behandelt wurden und die Grundlagen der klassischen Mechanik bekannt sind. Neben grundlegenden arithmetischen und algebraischen Fähigkeiten sollten die Schülerinnen und Schüler in der Lage sein, Funktionen abzuleiten und mit den Grundlagen der Vektorrechnung vertraut sein.

## ***Elektrotechnik und Elektronik***

### *Behandelte Inhalte*

Im ersten Teil werden die grundlegenden elektronischen Komponenten Widerstand  $R$ , Kapazität  $C$  und Induktivität  $L$  eingeführt. Dabei werden die wichtigsten Eigenschaften von Materie in Feldern beschrieben, insbesondere die elektrische Permittivität und die magnetische Permeabilität. Auch die in den Feldern gespeicherte Energie wird hergeleitet.

Als elektrotechnische Anwendungen werden der Zwei- und Dreiphasenwechselstrom behandelt sowie die Eigenschaften von elektrotechnischen Bauelementen wie Kabeln, Schaltern, Steckern und Transformatoren besprochen. Eine einfache Einführung in die Elektronik folgt, in der zunächst die Eigenschaften und Funktionsweisen von Halbleitern erläutert werden und insbesondere die Diode und der Transistor beschrieben werden. Verschiedene grundlegende elektronischen Schaltungen werden studiert.

### *Notwendiges Vorwissen*

Vorausgesetzt wird, dass die Inhalte der „Einführung in die Elektrizitätslehre“ sowie der „Fortgeschrittenen Elektrizitätslehre“ bereits behandelt wurden und die Grundlagen der klassischen Mechanik bekannt sind. Neben grundlegenden arithmetischen und algebraischen Fähigkeiten sollten die Schülerinnen und Schüler Funktionen ableiten und einfache Integrale berechnen können. Elektronische Schaltkreise können experimentell oder mithilfe von Simulationen untersucht werden. Für die Berechnung dieser Schaltkreise sind Kenntnisse in Differentialgleichungen und/oder komplexen Zahlen erforderlich.





# Einführung in die Elektrizitätslehre

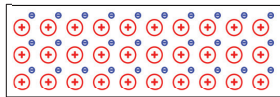


Ein Blitz ist in der Natur eine Funkenentladung oder ein kurzzeitiger Lichtbogen zwischen Wolken oder zwischen Wolken und der Erde aufgrund der hohen Spannung zwischen Erde und Wolken. In aller Regel tritt ein Blitz während eines Gewitters infolge einer elektrostatischen Aufladung der wolkenbildenden Wassertröpfchen oder der Regentropfen auf. Dabei werden elektrische Ladungen (Elektronen oder Gas-Ionen) ausgetauscht, das heisst, es fließen elektrische Ströme. Obwohl Gewitterblitze zu den am längsten studierten Naturphänomenen gehören, sind die der natürlichen Blitzentstehung zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmässigkeiten bis heute noch nicht bis ins letzte Detail erforscht. In der Bibel werden Blitze (und Donner) zum Beispiel für den Zorn Gottes verwendet. Die Germanen deuteten den Blitz als sichtbares Zeichen dafür, dass Thor seinen Hammer zur Erde geschleudert hatte. In der Antike waren Zeus bzw. Jupiter für Blitz und Donner zuständig.

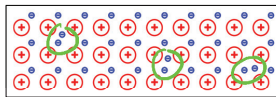
# 1. Die Ladung

## Grundlegende Eigenschaften

In der Elektrizitätslehre wird von ..... Ladungen ..... gesprochen. Eine Ladung ist nicht sichtbar. Die ..... Wirkungen ..... von Ladungen können jedoch sichtbar sein. Ladungen können sich ..... anziehen ..... oder ..... abstoßen ..... Um alle elektrischen Phänomene, die wir kennen, erklären zu können, reichen genau zwei... Ladungsarten aus. Wir nennen sie positiv ..... (+) und negativ ..... (-). Die wichtigsten Ladungsträger sind das Elektron... (negative Ladung) und das Proton... (positive Ladung). In der Regel gleichen sich die negative und die positive Ladung aus und der Körper ist neutral....., d.h. er ist nicht geladen.



..... neutral .....



..... negativ .....

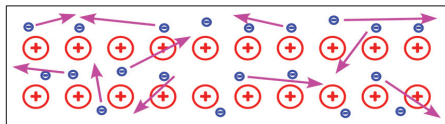


..... positiv .....

## Ladungstransport

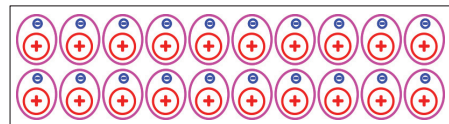
Ladungen lassen sich in bestimmten Materialien verschieben, in anderen nicht.

Materialien, in denen die elektrischen Ladungen beweglich sind, heißen ..... Leiter .....



Beispiele: ..... Metalle, .....  
..... Leitungswasser, .....  
..... Graphit .....

Materialien, bei denen die Ladungen nicht verschiebbar sind, nennen wir ..... Isolatoren .....



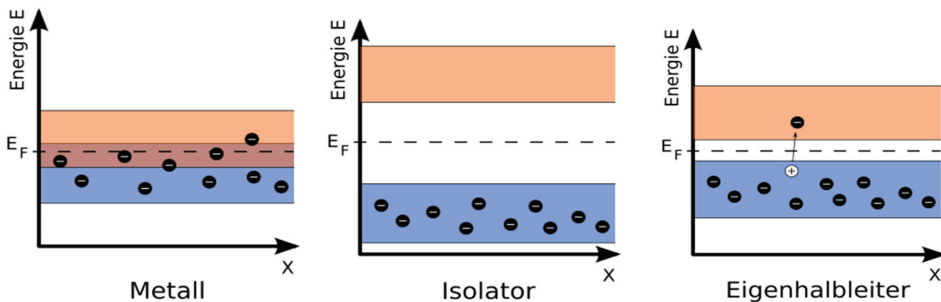
Beispiele: ..... Keramik, .....  
..... dest. Wasser, .....  
..... Plastik .....

..... Halbleiter ..... sind Festkörper, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von elektrischen Leitern und der von Nichtleitern liegt. Die Leitfähigkeit von Halbleitern hängt stark von der Temperatur ab. Jedoch auch andere äussere Grössen (wie zum Beispiel Licht) können die Leitfähigkeit von Halbleitern verändern.

## Das Bändermodell

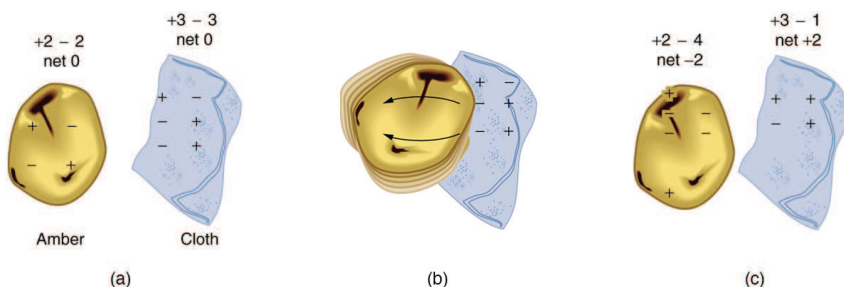
Das Bändermodell ist ein Modell zur Beschreibung von elektronischen Energiezuständen in einem Kristall. Bei der Betrachtung der elektrischen Eigenschaften eines Kristalls ist es von Bedeutung, ob die Energieniveaus in den energetisch höchsten Energiebändern (dem Valenz- und dem Leitungsband) des Kristalls nichtbesetzt, teilweise oder voll besetzt sind. Die gute elektrische Leitfähigkeit von Metallen kommt durch das teilweise besetzte Leitungsband zustande. Ein Isolator hat ein nicht besetztes Leitungsband und eine so grosse Bandlücke, dass bei Raumtemperatur und auch bei deutlich höheren Temperaturen nur sehr wenige Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband thermisch angeregt werden. Daher leitet ein solcher Festkörperkristall sehr schlecht.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei einem kristallinen Halbleiter, jedoch ist die Bandlücke hier so klein, dass sie durch thermische Energiezufuhr oder Absorption eines Photons (Lichtteilchens) überwunden werden kann. Ein Elektron kann ins Leitungsband angehoben werden und ist hier beweglich. Zugleich hinterlässt es im Valenzband eine Lücke, die durch benachbarte Elektronen aufgefüllt werden kann. Somit ist im Valenzband die Lücke beweglich. Man bezeichnet sie auch als Loch. Bei Raumtemperatur weist ein Halbleiter dadurch eine geringe Eigenleitfähigkeit auf, die durch Temperaturerhöhung gesteigert werden kann. Die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern steigt aber steil mit der Temperatur an, so dass sie bei Raumtemperatur, je nach material-spezifischem Abstand von Leitungs- und Valenzband, mehr oder weniger leitend ist.



## Ladungserhaltung

Ladung kann zwar verschoben werden, sie kann jedoch nicht .....*erzeugt*..... oder .....*vernichtet*..... werden. In einem .....*abgeschlossenen*..... System ist die elektrische Ladung konstant.





## Die Einheit der Ladung

Die Ladung ist eine weitere Grundgrösse der Physik.  
Wir führen für die Ladung also eine weitere Einheit ein:

Ladung  $Q$  [ $Q$ ] = Coulomb... = C

Das Coulomb ist eine sehr grosse Einheit. Ein Coulomb ent.  
hält  $6'240'000'000'000'000'000 = 6.24 \cdot 10^{18}$  Elektronen.

**Aufgabe 1:** Es gibt eine kleinste Ladung, die nicht mehr in  
Teile zerlegt werden kann, die Elementarladung  $e$ .  
Ein Elektron trägt eine negative Elementarladung  $e$ .  
Berechne die Elementarladung in Coulomb, wenn wir  
wissen, dass ein Coulomb  $6.24 \cdot 10^{18}$  Elementarladungen  
enthält.

Die elektrische Ladung beträgt stets ein ganzzahliges  
Vielfaches der **Elementarladung**  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

**Aufgabe 2:** Beim Reiben eines Kunststoffstabs mit einem  
Wolltuch erhält der Stab eine Ladung von  $0.8 \mu\text{C}$ . Wie  
viele Elektronen werden dabei vom Tuch auf den Stab  
übertragen?

**Aufgabe 3:** Statische Aufladungen durch Reibungselektrizität  
sind im Alltag häufig. Diese Aufladungen entstehen  
beispielsweise beim Kämmen, insbesondere durch  
Reibung zwischen Kamm und Haar. Ebenso können sie  
beim Gehen auf Filzböden zwischen den Schuhsohlen  
und dem Boden oder beim Abziehen eines Klebebands  
von der Rolle zwischen dem Kleber und dem Band  
auftreten – das Band neigt dazu, wieder an der Rolle zu  
haften. Manchmal spüren wir sogar einen leichten  
elektrischen Schlag. Aber was genau ist statische  
Aufladung? Erläutere die folgenden Fragen:

- Was bedeutet es, wenn ein Körper „elektrisch neutral“ ist?
- Was bedeutet es, wenn ein Körper „elektrisch geladen“ ist?
- Welcher Ladungsträger ist im Überschuss, wenn ein Körper positiv bzw. wenn er negativ geladen ist?



Charles Augustin de Coulomb  
(\*1736 Angoulême; † 1806 Paris)

Objekt / Körper	Ladung [C]
Elektron	$-1.6 \cdot 10^{-19}$
Urankern	$1.5 \cdot 10^{-17}$
typische Schulversuche	$10^{-7}$
Kondensatoren	$10^{-3}$
atmosphärische Blitz	1 – 10
Erdoberfläche	$9 \cdot 10^5$

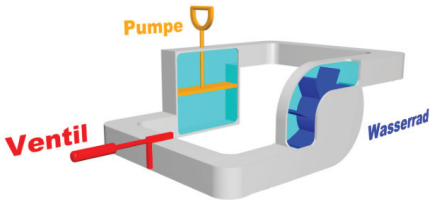
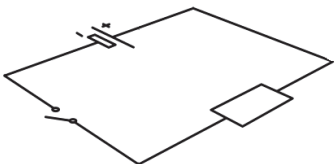




## 2. Der Gleichstrom

### Das Wassermodell

Die elektro-hydraulische Analogie kann beim Verständnis von Gleichströmen helfen:

Wassermodell	Gleichstrom
	
<p>H<sub>2</sub>O-Moleküle</p> <p>Pumpe</p> <p>Wasserrad</p> <p>Ventil</p> <p>Röhren</p>	<p>Elektronen</p> <p>Batterie</p> <p>Verbraucher</p> <p>Schalter</p> <p>Leitung / Kabel</p>
<p>Wasservolumen V</p> <p>[V] = m<sup>3</sup></p>	<p>Ladung Q</p> <p>[Q] = C</p>
<p>Wasserstrom = <math>\frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit}}</math></p> <p>[Wasserstrom] = <math>\frac{\text{m}^3}{\text{s}}</math></p>	<p>Strom = <math>\frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}}</math></p> <p>[Strom] = <math>\frac{\text{C}}{\text{s}}</math></p>
<p>Druckdifferenz = <math>\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Volumen}}</math></p> <p>[Druckdifferenz] = <math>\frac{\text{J}}{\text{m}^3}</math></p>	<p>Spannung = <math>\frac{\text{Arbeit}}{\text{Ladung}}</math></p> <p>[Spannung] = <math>\frac{\text{J}}{\text{C}}</math></p>

## Der Strom

Fließt Wasser durch ein Rohr, wird die Stärke des Wasserstroms durch die pro Zeiteinheit fließende Wassermenge bestimmt. Analog dazu wird die Stärke des elektrischen Stroms durch die Menge der pro Zeiteinheit fließenden Ladungen gemessen:

$$\text{Strom} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}} \quad I = \frac{Q}{t}$$

$$[I] = \frac{C}{s} = \text{Ampere} = A$$



André-Marie Ampère  
(\*1775 bei Lyon, † 1836 Marseille)

Aufgabe 4: Eine Batterie liefert eine Stunde lang einen gleichbleibenden Strom von 1 A.

- Wie viele Elektronen fließen in dieser Zeit durch die Batterie?
- Ändert sich die elektrische Ladung der Batterie während dieses Vorgangs?
- Was bedeutet der Ausdruck „die Batterie wird entladen“ genau?

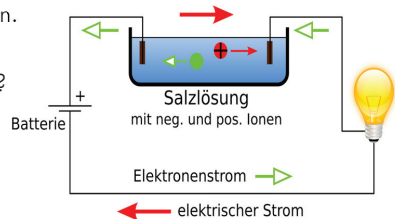
Aufgabe 5: Ein konstanter Strom von 2.0 A fließt durch einen Draht.

- Berechne die elektrische Ladung, die in 5 Minuten durch den Draht fließt.
- Bestimme die Anzahl der Elektronen, die dieser Ladung entsprechen.

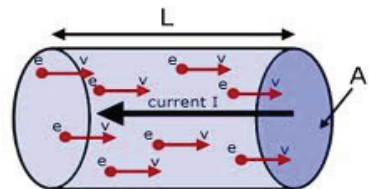
Aufgabe 6: An eine Batterie wird eine Lampe angeschlossen. In welche Richtung bewegen sich die Elektronen im Leiter? In welche Richtung fließt der elektrische Strom?

Die Elektronen fließen von  $-$  nach  $+$ .

Die technische Stromrichtung ist von  $+$  nach  $-$ .



- ★ Aufgabe 7: Wenn Du einen Lichtschalter betätigst, geht das Licht nahezu verzögerungsfrei an. Bedeutet das, dass sich die Elektronen im Draht sehr schnell bewegen? Nicht unbedingt. Man kann sich das ähnlich vorstellen wie bei einem mit Wasser gefüllten Schlauch: Die hinteren Wassermoleküle schieben die vorderen fast ohne Verzögerung an. Es stellt sich also die Frage: Wie schnell bewegen sich die Elektronen durch den Draht? Betrachten wir dazu einen Aluminiumdraht mit einem Querschnitt von  $A = 1 \text{ mm}^2$ , durch den ein Strom von  $I = 1 \text{ A}$  fließt. In Aluminium gibt jedes Atom ein Elektron an die Leitungselektronen ab. Die Anzahl der Elektronen pro Volumen beträgt  $n = 6 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ .



Die Elektronen in einem Leiter fließen nur sehr langsam..... (Driftgeschwindigkeit).

Der Strom breitet sich fast mit Lichtgeschwindigkeit. (ca. 300'000 km/s) aus.

## Die Spannung

Die Leistung, die eine Wasserströmung beim Antreiben einer Turbine erbringt, hängt von der Strömungsmenge ab. Ebenso entscheidend ist der dabei zu überwindende Druck. Diese Druckdifferenz bestimmt, wie viel Arbeit eine bestimmte Wassermenge verrichten kann. In Analogie dazu wird im elektrischen Stromkreis die Spannung angegeben.



Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Graf von Volta  
1745 in Como, † 1827 bei Como (Italien).  
Alessandro Volta demonstriert Napoleon Bonaparte seine Batterie.

Spannung =  $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Ladung}}$   $U = \frac{W}{Q}$   
 $[U] = \frac{J}{C} = \text{Volt} = V$

Aufgabe 8: Durch einen Motor fließt eine Ladungsmenge von 1 Coulomb bei einer Spannung von 220 Volt. Wie viel Arbeit verrichtet diese Ladung?

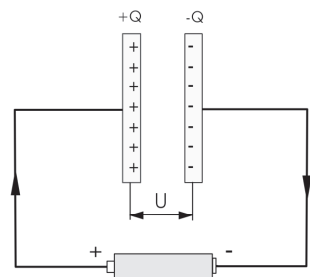
Aufgabe 9: Eine Glühlampe gibt 10'000 Joule Strahlungsenergie ab. Wie viel Ladung muss durch die Lampe fließen, wenn die anliegende Spannung 110 Volt beträgt?

Aufgabe 10: Die Kapazität einer Batterie beträgt 4'200 Coulomb Ladung und hat eine Spannung von 12 Volt. Der Strom beträgt 12 mA.

- Wie lange dauert es, bis die Batterie entladen ist?
- Wie viel Arbeit (z.B. in einem Elektromotor) verrichtet 1 Coulomb Ladung, das aus der Batterie durch den Verbraucher fließt?
- Wie viel Arbeit ist insgesamt in der Batterie gespeichert?
- In welcher Form ist diese Energie in der Batterie gespeichert?
- Welche Leistung gibt die Batterie ab?

★ Aufgabe 11: Ein Pingpong-Ball ( $m = 5 \text{ g}$ ) berührt eine Platte eines Plattenkondensators (zwei parallele, geladen Metallplatten), der mit einer Spannung von 10'000 Volt geladen ist, und wird dabei mit  $1 \mu\text{C}$  aufgeladen. Der Ball wird nun gleichmässig in Richtung der gegenüberliegenden Platte beschleunigt.

- Welche kinetische Energie hat der Ball unmittelbar vor dem Aufprall auf die zweite Platte?
- Welche Geschwindigkeit hat der Ball unmittelbar vor dem Aufprall?
- Der Flug dauert 0.15 Sekunden. Welche Beschleunigung erfährt der Ball?
- Wie weit sind die Platten voneinander entfernt?
- Welche Kraft wirkt während des Flugs auf den Ball?



## Das Ohm'sches Gesetz

Wenn wir einen Strom  $I$  messen wollen, so müssen wir ein Messgerät in Serie zum Widerstand schalten. Wenn wir eine Spannung  $U$  über einem Widerstand messen wollen, so wird das Messgerät parallel zum Widerstand geschaltet.

In einem Ohm'schen Leiter ist die Stromstärke proportional zur Spannung.

Widerstand = \_\_\_\_\_  $R = \frac{U}{I}$

$[R] = \frac{V}{A} = \text{Ohm} = \Omega$

Der Widerstand des Strommessgeräts (Ampèremeter) muss möglichst klein sein.

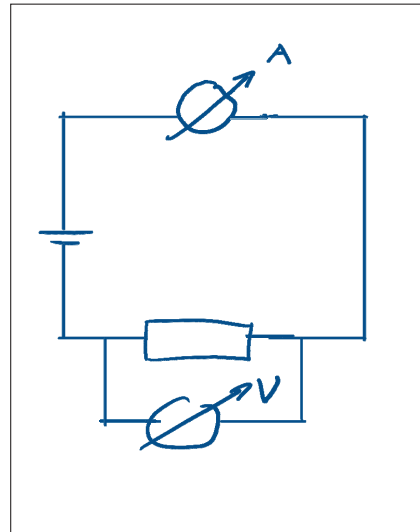
Der Widerstand des Spannungsmessgeräts (Voltmeter) muss möglichst gross sein.

Aufgabe 12: Durch einen Widerstand fliesst ein Strom von 0.2 A bei einer Spannung von 15 Volt. Wie gross ist  $R$ ?

Aufgabe 13: Ein Strom der Stärke 1.5 A fliesst durch einen Draht mit einem Widerstand von 3  $\Omega$ . Wie gross ist der Spannungsabfall über den Draht hinweg?

Aufgabe 14: Eine Glühlampe hat einen Widerstand von 200  $\Omega$ . Wie gross ist die angelegte Spannung, wenn der Strom 0.7 Ampère beträgt?

Aufgabe 15: Eine Kochplatte hat einen Widerstand von 5  $\Omega$ . Wie gross ist der Strom, wenn die Spannung 380 Volt beträgt?



U [.....]	I [.....]

