

Teil I: Elektrostatik

Das Thema des ersten Teils dieses Buchs ist die *Elektrostatik*, also die Lehre von ruhenden elektrischen Ladungen. Dementsprechend ist dieses erste Kapitel den Ladungen gewidmet, ihren Eigenschaften, Auswirkungen und ihrer Erzeugung. Das folgende Kapitel hat mit dem Coulombgesetz nur ein einziges Thema, die Kraft zwischen zwei Punktladungen. Mit dem elektrischen Feld wird im dritten Kapitel eine Größe eingeführt, die nicht nur für die Elektrostatik, sondern für den gesamten Elektromagnetismus zentral ist. In Kapitel 4 wird eine Reihe weiterer wichtiger Größen eingeführt und ausführlich diskutiert, so die elektrische Verschiebearbeit, das Potential und die Spannung. Das abschließende Kapitel dieses Teils beschäftigt sich dann mit Kondensatoren, also Bauelementen zur Speicherung von Ladung.

1 Dann macht es „Zack!“: Elektrische Ladungen

In diesem Kapitel...

- Effekte von Ladungen
- Es gibt viel Wissenswertes über Ladungen
- Ladungen können nicht erzeugt, sondern nur getrennt werden

In diesem ersten Kapitel dreht sich alles um Ladungen. Dabei wird sich zunächst zeigen, dass man Ladungen nur über ihre Wirkungen definieren kann. Im daran anschließenden Abschnitt werden die wichtigsten Fakten über Ladungen vorgestellt. Abschließend wird gezeigt, wie man Ladungen erzeugen oder besser gesagt trennen kann.

Sie können extrem sein: Effekte von Ladungen

Interessanterweise kann man *Ladungen* nicht durch eine Aussage: „Eine Ladung ist...“ definieren, sondern nur über ihre Effekte. Diese Effekte kann man am besten durch den folgenden Versuch demonstrieren (Abbildung 1.1):

Zwei metallisierte Tischtennisbälle sind nebeneinander an Fäden aufgehängt. Man nimmt einen Plastikstab und reibt ihn mit einem Tuch. Dann kann man die folgenden Beobachtungen machen:

- Berührt man beide Bälle entweder mit dem Tuch oder mit dem Stab, streben die Bälle auseinander, sie stoßen sich also gegenseitig ab (Skizzen a, b).
- Berührt man einen der Bälle mit dem Tuch, den anderen mit dem Stab, so bewegen sich die Bälle aufeinander zu, sie ziehen sich also an. Dieses Ergebnis ist unabhängig davon, welcher Ball mit welchem Gegenstand berührt wird (Skizzen c, d).

Tipp

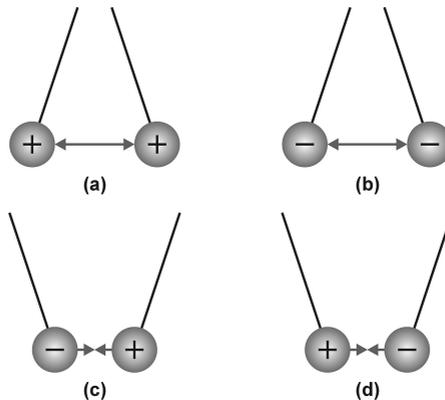


Abbildung 1.1 Kräfte zwischen Punktladungen

Dieser Versuch funktioniert am besten, wenn man statt des Tuchs ein Katzenfell benutzt.

Die Ergebnisse dieses Experiments können folgendermaßen interpretiert werden:

- Durch das Reiben des Stabs mit dem Tuch werden Ladungen erzeugt (genauer gesagt getrennt, wie weiter unten gezeigt wird).
- Diese Ladungen können durch Berührung auf die Kugeln übertragen werden.

- Es gibt offensichtlich zwei Arten von Ladungen (die Stabladung und die Tuchladung). Sie werden als *positive* und *negative* Ladungen bezeichnet.
- Gleichnamige Ladung stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich hingegen an.

Warnung

Wenn Sie elektrostatische Experimente durchführen wollen, sollten Sie die Wintermonate wählen. Die im Sommer zumeist relativ hohe Luftfeuchtigkeit bedingt eine rasche Entladung geladener Körper.

Es gibt viel Wissenswertes über Ladungen

In diesem Abschnitt wird eine Vielzahl wissenswerter Tatsachen über Ladungen zusammengetragen. Sie werden feststellen, dass diese Liste sehr lang ist.

Ladung ist quantisiert: Die Elementarladung

Zunächst wird die Einheit der Ladung vorgestellt und dargelegt, dass eine Ladung nicht unendlich klein sein kann, sondern dass es eine kleinste Ladung gibt:

- Die Einheit der Ladung ist das *Coulomb* (C), auf das im weiteren Verlauf noch näher eingegangen wird.
- Es gibt eine kleinste elektrische Ladung, die sogenannte *Elementarladung*. Sie beträgt $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Es gibt sowohl positive als auch negative Elementarladungen.
- Der kleinste Träger einer negativen Elementarladung ist das *Elektron*. Es gilt also:

$$q_{\text{elektron}} = -q_e = e$$

- Der kleinste Träger einer positiven Elementarladung ist das *Positron*, das Antiteilchen des Elektrons. Auch das *Proton* (einer der Kernbausteine) trägt eine positive Elementarladung. Es gilt demnach:

$$q_{\text{positron}} = q_{\text{proton}} = q_e$$

Tipp

Körper (wie zum Beispiel Teilchen) können nur ganzzahlige Vielfache der Elementarladung tragen. So ist eine Ladung von $1 \cdot q_e$ oder $2 \cdot q_e$ möglich, aber nicht $1,5 \cdot q_e$.

Die Materie ist voll von Ladungen

Im Folgenden werden noch einige Begriffe und Tatsachen aufgeführt, die im Verlauf dieses Buchs immer wieder eine Rolle spielen werden:

- *Atome* bestehen aus einem positiv geladenen Kern (die Ladung stammt von Protonen) und einer Elektronenwolke um diesen Kern. Die Anzahl der Elektronen entspricht der der Protonen. Atome sind also elektrisch neutral.
- Ein *Ion* ist ein Atom, dem ein oder mehrere Elektronen fehlen oder das über ein oder mehrere zusätzliche Elektronen verfügt. Ionen sind demnach positiv oder negativ geladen. Die Ladung beträgt also $\pm nq_e$, wobei n die Zahl der zusätzlichen bzw. fehlenden Elektronen ist.

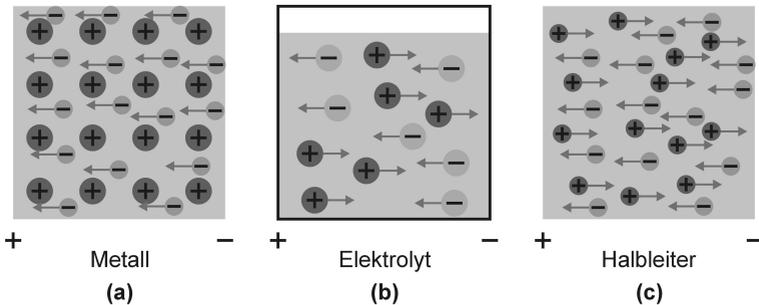


Abbildung 1.2 Ladungsträger a) in einem Metall, b) einem Elektrolyt und c) einem Halbleiter. Um die Beweglichkeit der Ladungsträger zu verdeutlichen, ist dargestellt, wie sie sich bewegen, wenn die ange deutete Spannung angelegt ist.

- In *metallischen Leitern* erfolgt der Stromfluss durch negativ geladene, bewegliche Elektronen. Die positiven Ionen, von denen die Elektronen stammen, sind ortsfest (Abbildung 1.2).
- In Halbleitern gibt es zwei Arten beweglicher Ladungsträger, Elektronen und Löcher (Kapitel 12).
- In Elektrolyten sind sowohl positive als auch negative Ionen beweglich.
- Ein Körper ohne bewegliche Ladungsträger ist ein *Isolator*.

- Ein Körper, der ebenso viele positive wie negative Ladungen enthält, wird *elektrisch neutral* genannt

BEISPIEL

Stellen Sie sich vor, sie haben ein Stück Metall vor sich und laden es mit einer Ladung von 1 C auf. Ändert sich die Masse des Metalls dadurch, und falls dies der Fall ist, wird es schwerer oder leichter? Wie groß ist dann die Massenänderung?

Aus der obigen Auflistung geht hervor, dass Metalle aus beweglichen negativen Elektronen und ortsfesten positiven Ladungen bestehen. Wenn man ein Metall positiv aufladen will, muss man also Elektronen entfernen, d.h. das Metall wird leichter. Die Ladung von 1 C entspricht einer Elektronenzahl von $1 \text{ C} / 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 6,24 \cdot 10^{18}$. Da die Elektronenmasse $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ beträgt, wird der Körper also um $5,7 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$ leichter. Dies ist zwar nicht viel, aber er wird leichter.

Fließende Ladungen: Der elektrische Strom

Das Thema dieses Teils des Buchs ist die Elektrostatik, es werden also nur ruhende Ladungen betrachtet. Da der Begriff des elektrischen Stroms im Laufe dieses Buchs immer wieder auftaucht, wird er hier im Vorgriff auf Kapitel 10 vorläufig definiert.

Der elektrische Strom ist die pro Zeit fließende elektrische Ladung:

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

Die Einheit des elektrischen Stroms ist das *Ampere* (Kapitel 6), eine der Basiseinheiten des SI-Systems. Damit ergibt sich für die Ladungseinheit Coulomb:

$$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$$

Ladungen können nicht erzeugt, sondern nur getrennt werden

Ladungen kann man nicht im eigentlichen Sinn dieses Wortes erzeugen. Sie sind in jedem Körper in Form von Elektronen und positiv geladenen Pro-

tonen in ungeheurer Anzahl vorhanden. Normalerweise sind die Körper auch in kleineren Bereichen elektrisch neutral. Dies gilt selbst für einzelne Atome. Man kann aber durch äußere Eingriffe erreichen, dass eine Trennung zwischen positiven und negativen Ladungen auftritt. Die beiden wichtigsten Mechanismen sind mechanische Reibung und die Influenz.

Erzeugung durch Reibung

Ladungstrennung durch Reibung haben Sie bereits zu Beginn dieses Kapitels im Zusammenhang mit Abbildung 1.1 kennengelernt. Im Folgenden werden zunächst die zugrunde liegenden Mechanismen erläutert, anschließend wird mit dem Bandgenerator ein Instrument vorgestellt, bei dem das Prinzip auf eindrucksvolle Weise ausgenutzt wird.

— Entscheidend sind Kontakt und Bewegung: Die Mechanismen

Abbildung 1.3 verdeutlicht die Vorgänge bei der Reibung geeigneter isolierender Materialien gegeneinander. Zu Beginn des Prozesses sind die Oberflächen beider Partner elektrisch neutral, es sind also auf jedem einzelnen gleich viele positive und negative Ladungen vorhanden. Reibt man die beiden Partner gegeneinander und trennt sie dann, ist eine der beiden Oberflächen positiv geladen, die andere negativ. Da die Materialien isolierend sind, verbleiben die Ladungen auch an den Oberflächen.

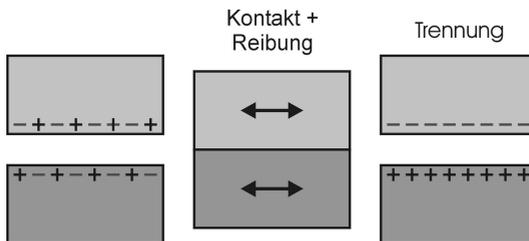


Abbildung 1.3 Ladungstrennung durch Reibung

BEISPIEL

Sie selbst haben in Ihrem Leben schon häufig Ladungstrennung durch Reibung durchgeführt, allerdings wahrscheinlich ohne sich dessen bewusst zu sein. Sie kennen die kleinen elektrischen Schläge, die man manchmal von einer Türklinke erfährt. Allerdings ist die Tür dabei völlig

unschuldig, denn Ursache sind Sie selbst. Sie haben sich zuvor beim Gehen durch Reibung elektrostatisch aufgeladen (auf Teppichen ist der Effekt besonders ausgeprägt). An der leitenden Türklinke entladen Sie sich dann.

— Enorme Spannungen durch Reibung: Der Van-de-Graaff-Generator

Ein *Van-de-Graaff-Generator* ist ein Gerät, mit dessen Hilfe man enorm hohe Spannungen (zur Definition der Spannung siehe Kapitel 4) erzeugen kann. Der Aufbau eines solchen Generators ist schematisch in Abbildung 1.4 dargestellt. Das zentrale Bestandteil ist ein breites endloses Gummiband, das

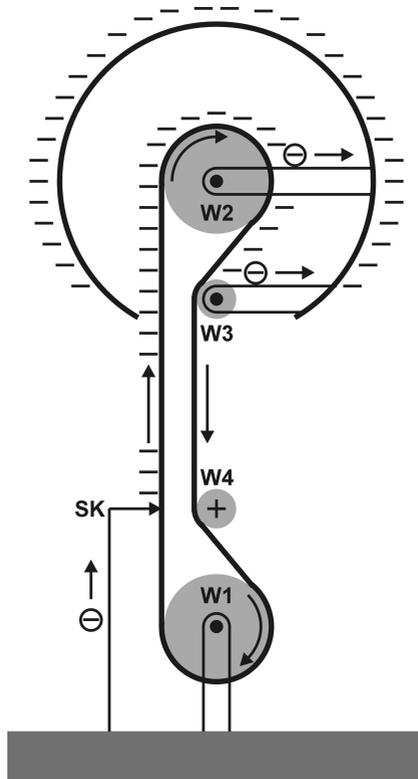


Abbildung 1.4 Ein Van-de-Graaff-Bandgenerator (schematisch)

um vier feststehende drehbare Walzen läuft, von denen W_1 bis W_3 aus einem leitenden Metall bestehen, W_4 hingegen aus einem Isolator (z. B. Plexiglas). W_4 wird als *Erregerwalze* bezeichnet. Das System wird von einem Motor in Gang gesetzt, sodass das Band umläuft.

Zwischen der Erregerwalze und dem Band tritt *Reibung* auf, die zu einer Ladungstrennung führt, wodurch die Walze positiv aufgeladen wird. Die negativen Ladungsträger werden vom Band mitgeführt und an der leitenden Walze W_1 abgegeben. Sie spielen im weiteren Prozessverlauf keine Rolle. Der zweite entscheidende Prozess tritt gegenüber der Walze W_4 auf. Dort befindet sich der sogenannte *Spitzenkamm* (SK). Durch die positive Ladung auf W_4 sammeln sich dort durch *Influenz* (siehe unten) negative Ladungen an, die dann auf das Band übertragen und von ihm zu den leitenden Walzen W_2 und W_3 transportiert werden. Von diesen gelangen sie auf eine große Hohlkugel aus Metall am oberen Ende des Generators, wo sie sich ansammeln. Auf diese Weise können Spannungen von einigen Millionen Volt erzeugt werden.

Tip

Bei der Spannungserzeugung mithilfe eines Van-de-Graaff-Generators sind die beiden wichtigsten Mechanismen der Ladungstrennung beteiligt: Die Reibung und die Influenz.

Ladungstrennung durch Influenz

Aus der Diskussion des Bandgenerators geht hervor, dass es neben der Reibung mit der *Influenz* noch einen zweiten wichtigen Effekt gibt, mit dessen Hilfe man Ladungen trennen kann. Die zugrunde liegenden Mechanismen werden im Folgenden diskutiert, anschließend werden zwei Anwendungen der Influenz vorgestellt.

— Influenz: Trennung durch Abstoßung und Anziehung

Betrachten Sie Abbildung 1.5. Sie zeigt eine Metallkugel, in der ortsfeste positive Ladungen und bewegliche negativ geladene Elektronen vorhanden sind. Nähert man von links einen negativ geladenen Körper an diese Kugel an, so werden die Elektronen durch die abstoßenden Kräfte auf die rechte Seite der Kugel gedrängt (wenn die angenäherte Ladung positiv ist, wandern die Elektronen nach links). An der rechten Seite können die jeweiligen Ladungen durch Kontakt auf einen weiteren Körper übertragen werden.

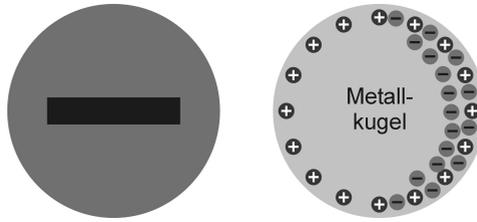


Abbildung 1.5 Ladungstrennung durch Influenz

— Es dient zur Messung von Ladungen: Das Elektroskop

Ein *Elektroskop* ist ein Instrument zum Nachweis von Ladungen, das auf der Influenz beruht. Der Aufbau eines solchen Elektroskops ist schematisch in Abbildung 1.6 dargestellt. In einem Gehäuse befindet sich ein leitender Stab, der isolierend angebracht ist. Sein oberes Ende zeigt nach außen. Am unteren Teil des Stabs ist ein ebenfalls leitender, beweglicher Zeiger angebracht. Im Normalfall sind positive und negative Ladungen in Zeiger und Stab gleichmäßig verteilt (Skizze a). Nähert man dem oberen Ende einen geladenen Körper (negativ in der Abbildung), so werden durch Influenz Elektronen in den unteren Teil gedrängt. Da dann sowohl das untere Ende des Stabs als auch der Zeiger negativ geladen sind, stoßen sie sich gegenseitig ab; infolgedessen spreizt sich der bewegliche Zeiger ab (Skizze b). Bringt man die Ladung noch näher heran, verstärkt sich der Effekt, und der Ausschlag wird größer (Skizze c). Wird ein Elektroskop nach geeigneter Kalibrierung für quantitative Messungen benutzt, spricht man auch von einem *Elektrometer*.

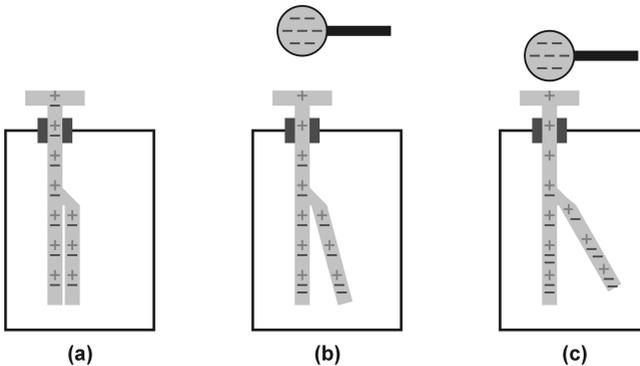


Abbildung 1.6 Wirkungsweise eines Elektroskops

— Sie dient zur Trennung von Ladungen in großem Maßstab:
Die Influenzmaschine

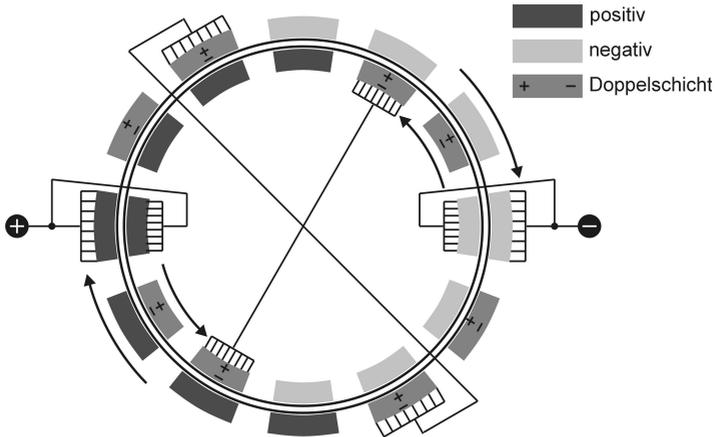


Abbildung 1.7 Die Funktionsweise einer Wimshurst-Influenzmaschine (schematisch)

Mithilfe der Influenz kann man sowohl hohe Spannungen als auch hohe Ströme erzeugen. Im 19. Jahrhundert, also vor der Einführung des Generators, wurde eine Vielzahl sogenannter *Influenzmaschinen* entwickelt. Als Beispiel ist in Abbildung 1.7 eine *Wimshurst-Maschine* schematisch dargestellt, Abbildung 1.9 zeigt ein Foto einer solchen Maschine.

Eine Wimshurst-Maschine besteht aus zwei vertikal angebrachten Scheiben aus einem isolierenden Material, die sich gegenläufig drehen. Auf beiden Scheiben befinden sich metallisch leitende Segmente.

Jede der beiden Scheiben besitzt einen *Neutralisator*, durch den jeweils zwei gegenüberliegende Segmente elektrisch miteinander verbunden sind. Zudem gibt es auf beiden Seiten (rechts und links) je einen Abnehmer, der die Ladungen abgreift. Sie können diese entweder zu einem Hochspannungskondensator leiten (im 19. Jahrhundert waren dies *Leydener Flaschen*) oder auf gegenüberliegende Kugeln, die dann eine Funkenstrecke bilden.

Der wichtigste Mechanismus bei der Arbeit einer Wimshurst-Maschine ist, dass ein geladenes Segment auf einer der Scheiben auf dem gerade gegenüber befindlichen auf der anderen eine entgegengesetzte Ladung influenziert. Wichtig an dieser Stelle ist, dass dieses Segment als Ganzes elektrisch neutral bleibt (es kann kein Strom fließen); vielmehr trägt dieses Element

(der Influenz entsprechend) außen eine andere Ladung als innen. Die ist in Abbildung 1.8a dargestellt.

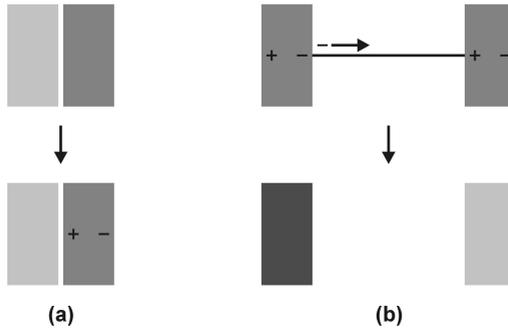


Abbildung 1.8 Die wichtigsten Mechanismen einer Wimshurst-Influenzmaschine

Der zweite beim Betrieb einer Wimshurst-Maschine wichtige Mechanismus kann anhand von Abbildung 1.8b erläutert werden. Aus Abbildung 1.7 geht hervor, dass die beiden Neutralisatoren jeweils derartige durch Influenz erzeugte Doppelschichten verbinden, genauer gesagt eine positive Teilschicht mit einer negativen. Durch den Neutralisator ist ein Stromfluss möglich; aufgrund der in der Skizze dargestellten Verhältnisse fließen Elektronen von links nach rechts. Nach Passieren des Neutralisators ist also das rechts dargestellte Segment vollständig positiv aufgeladen, das links vollständig negativ. Beim Starten einer solchen Maschine ist keine Startladung erforderlich, da es

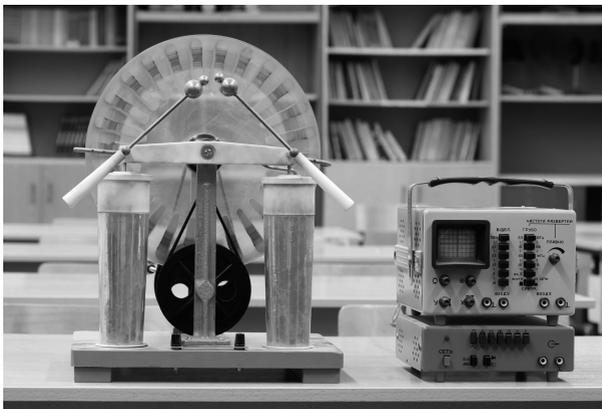


Abbildung 1.9 Eine Wimshurst-Influenzmaschine

immer zumindest geringe Störungen des neutralen Gleichgewichts gibt, die ausreichen, die oben beschriebenen Mechanismen in Gang zu setzen. Je nach Stellung der Neutralisatoren in Bezug auf die Abnehmer kann man entweder hohe Ströme oder hohe Spannungen erzeugen.

AUF EINEN BLICK

- Es gibt zwei Arten von Ladungen, positive und negative.
- Ladungen üben Kräfte aufeinander aus: Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.
- Die Einheit der Ladung ist das Coulomb. Es gilt $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$.
- Es gibt eine kleinste Ladung, die Elementarladung. Sie beträgt $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- Die kleinsten Träger einer Elementarladung sind das Elektron (negativ) und das Positron (positiv)
- In einem Metall sind nur Elektronen frei beweglich, jedoch keine positiven Ladungsträger.
- In einem Isolator gibt es keine frei beweglichen Ladungsträger.
- Ladungen können nicht erzeugt, sondern nur getrennt werden.
- Ladungstrennung kann entweder durch Reibung oder durch Influenz erfolgen.

— Übungsaufgaben zu diesem Kapitel

— Aufgabe 1.1

Wie viele frei bewegliche Ladungsträgerarten und welche gibt es in den folgenden Materialklassen: metallische Leiter, Halbleiter, Elektrolyte und Isolatoren? Gibt es in einem Isolator überhaupt Ladungen?

— Aufgabe 1.2

Wie viele Elektronen sind in einem Liter Wasser vorhanden? Ein Sauerstoffatom besitzt acht Elektronen, ein Wasserstoffatom eines. Wie groß ist die Gesamtladung des Wassers?

— Aufgabe 1.3

Was passiert, wenn zwei metallisierte, entgegengesetzt geladene Tischtennisbälle aufeinandertreffen. Was passiert, *bevor* zwei stark geladene Körper aufeinandertreffen?

— Aufgabe 1.4

Bei einem Bandgenerator (Van-de-Graaff-Generator) wird die große Kugel am oberen Ende mit einer sehr großen negativen Ladung aufgeladen. Was passiert, wenn man eine ungeladene Metallkugel in der Nähe der großen Kugel aufhängt (Abbildung 1.10).

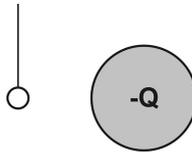


Abbildung 1.10 Zu Aufgabe 1.4

