

## II.C.14

### Elektrizitätslehre und Magnetismus

# Elektrische Felder und Kondensatoren – Teil 1

Dr. Jürgen Franke, Stuttgart

Fotos und Illustrationen von Dr. J. Franke und Dr. St. Völker, digitalisiert von Dr. W. Zettlmeier

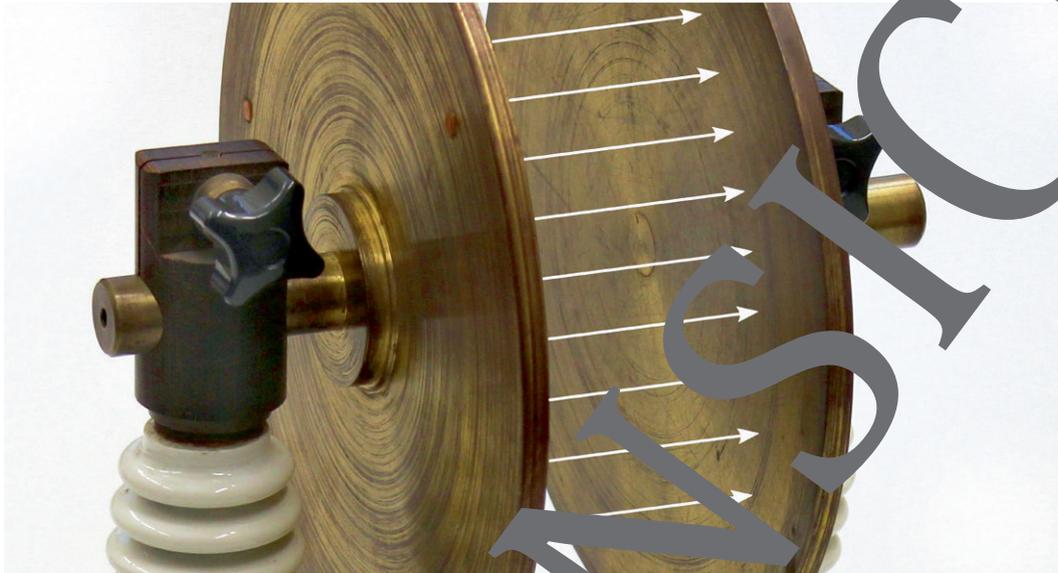


Foto: St. Völker, Jena

Kondensatoren findet man in vielen elektronischen Schaltungen. Dort speichern sie kleine Mengen Energie, sorgen für zeitlich verzögerte Signalweiterleitung, bestimmen die Frequenz von Schwingkreisen und filtern Gleichspannungsanteile aus verlogerten Gleich- und Wechselspannungen heraus. Rundfunk, Fernsehen, Mobilfunk, Computer, das Internet und vieles andere wären ohne Kondensatoren nicht möglich. Wodurch kommen die Effekte zustande, die die Kondensatoren in der Elektronik bewirken? Was sind die physikalischen Grundlagen?

#### KOMPETENZPROFIL

**Klassenstufe/Lernjahr:** 12 (20)

**Dauer:** 10 Unterrichtsstunden

**Kompetenzen:** 1. Physikalische Zusammenhänge erkennen; 2. einfache elektronische Schaltung verstehen; 3. Messdaten erheben; 4. mathematische Beschreibungen finden; 5. Daten auswerten

**Thematische Bereiche:** elektrostatische Kräfte, elektrische Felder, Energiespeicherung im Kondensator

**Medien:** Texte, Bilder, Videos, Audio

**Lehrmaterialien:** 2 Excel-Dateien und eine Audio-Datei zur elektrostatischen Auf- und Endladung

## Didaktisch-methodische Hinweise

### Zur Lerngruppe und den curricularen Vorgaben

Das Thema ist Bestandteil des Lehrplans der Klasse 12 am Gymnasium. Deshalb werden hier auch mathematische Argumentationen aus der **Differenzial- und Integralrechnung** verwendet. Prinzipiell könnte bei Überspringen einiger Herleitungen dieses Thema auch schon früher eingeführt werden. Ansonsten sind mathematische Kenntnisse zu folgenden Themen erforderlich: Umgang mit Gleichungen, Quadratzahlen und Wurzeln, Logarithmus und Exponentialfunktion.

### Einstieg über Alltagserfahrungen – das Unterrichtsgespräch

Steigen Sie über ein gelenktes Unterrichtsgespräch in das Thema „Elektrische Felder und Kondensatoren“ ein. Ihre Schüler können vermutlich aus eigener Erfahrung nachfolgende Erlebnisse bestätigen:

- Jeder hat schon mal ein Kunstfaser-Kleidungsstück ausgezogen und dabei das Knistern der elektrischen Entladungen gehört und, sofern es dunkel genug war, die Entladungen auch gesehen.
- Jeder ist schon mal über einen Teppich gelaufen, hat einen Metallgegenstand angefasst und dabei einen kleinen elektrischen Schlag abbekommen.
- Jeder hat auch schon mal bei Gewitter den Himmel beobachtet und riesigen Blitze gesehen und den darauffolgenden Donner gehört.
- Jeder hat genauso schon durch Reiben von Kunststoffen, aufgeblasenen Luftballons, Textilien o. Ä. an anderen Materialien die dadurch entstehenden Anziehungskräfte beobachten können.

### Historisches

Dass da irgendetwas Geheimnisvolles vor sich geht, wurde auch schon in der Antike in Griechenland beobachtet. Aus dem für die Erzeugung dieser Effekte gut geeigneten Material Bernstein, welches noch heute auf Griechisch „elektro“ („ήλεκτρο“) heißt, leitet sich die Bezeichnung Elektrizität ab.

### Zum Lernprozess

Der Einstieg erfolgt, indem Ihre Schüler Alltagserfahrungen mit statischer Elektrizität schildern. Der Plattenkondensator mit seinem homogenen elektrischen Feld vereinfacht die Verhältnisse dann stark, sodass Vektor- und skalare Größen gerechnet werden kann. Die mathematischen Herleitungen sind so gut zu demonstrieren und erfordern in den meisten Fällen nicht die volle mathematische Kompetenz von Schülern der Klasse 11 oder 12. Im Gegensatz zur Mathematik wird im Physikunterricht mit Maßzahlen gerechnet. Dabei können die logischen Zusammenhänge des SI-Maßeinheitensystems gut verdeutlicht werden. Beim Plattenkondensator treten verschiedene Effekte auf, die Sie gut nachvollziehbar im Experiment demonstrieren können. Zum besseren Verständnis dieser Lerneinheit erfolgt ganz am Anfang nochmal eine kurze Wiederholung der Begriffe *Strom* und *Spannung*, *Widerstand*, *Reihen-* und *Parallelschaltung*. Dies geschieht konkret anhand der Schaltung eines Spannungs- und eines Strommessgeräts und wird mit entsprechenden Übungsaufgaben ergänzt.

Im zweiten Teil wird dann mehr auf die technischen Anwendungen eingegangen. Es werden auch die Aufbau- und Auswertungsmethoden bei Experimenten erläutert. Als Option ist im zweiten Teil auch der Selbstbau eines einfachen Kondensators beschrieben.

### Mögliche Alternativen oder Erweiterungsmöglichkeit

Wenn keine Möglichkeit besteht, die Experimente mit dem Plattenkondensator live vorzuführen, kann auf **Videos** zurückgegriffen werden. Hinweise dazu finden Sie bei den jeweiligen Experimenten.

## Auf einen Blick

SV = Schülerversuch, LV = Lehrerversuch

### 1./2. Stunde

<b>Thema:</b>	Einführung: Elektrizität
<b>M 1 (SV)</b>	<b>Es knistert am Pullover – die elektrostatische Aufladung</b>
<b>M 2</b>	<b>Strom und Spannung – frischen Sie Ihr Wissen auf!</b>
<b>Hausaufgabe:</b>	Kleidungsstücke auf elektrostatische Aufladung testen
<b>Benötigt:</b>	<input type="checkbox"/> Kunststofflineal oder Geodreieck <input type="checkbox"/> Papier Taschentücher <input type="checkbox"/> analoges MW-Radio (batteriebetrieben)

### 3./4. Stunde

<b>Thema:</b>	Grundbegriffe der Elektrizitätslehre wiederholen
<b>M 3</b>	<b>Die Messung von Strom und Spannung</b>
<b>M 4</b>	<b>Elektrische Ladungen, Felder und Influenz</b>

### 5.–8. Stunde

<b>Thema:</b>	Plattenkondensator und homogenes elektrisches Feld
<b>M 5</b>	<b>Der Kondensator</b>
<b>M 6</b>	<b>Ladung und Strom</b>
<b>M 7 (LV)</b>	<b>Die Kraft im elektrischen Feld</b>
<b>M 8</b>	<b>Die Arbeit im elektrischen Feld</b>
<b>Benötigt:</b>	siehe 1. Stunde

### 9./10. Stunde

<b>Thema:</b>	Plattenkondensator
<b>M 9 (LV)</b>	<b>Die Kapazität eines Plattenkondensators</b>
<b>M 10</b>	<b>Die Arbeit beim Laden eines Kondensators</b>
<b>M 11 (LV)</b>	<b>Dielektrikum</b>
<b>Benötigt:</b>	<input type="checkbox"/> Plattenkondensator <input type="checkbox"/> Hochspannungsnetzteil <input type="checkbox"/> Hochspannungsmessgerät <input type="checkbox"/> Kabel und Schalter <input type="checkbox"/> Stativelemente <input type="checkbox"/> leitfähig beschichtete Kugel an nicht leitendem Faden aufgehängt <input type="checkbox"/> nicht leitende Scheiben als Dielektrikum für den Plattenkondensator <input type="checkbox"/> Kapazitätsmessgerät (wenn vorhanden)

## M 1

## Es knistert am Pullover – die elektrostatische Aufladung

**Materialien:**  verschiedene Kleidungsstücke  Kunststofflineal oder Geodreieck  
 Papiertaschentücher  analoges MW-Radio (batteriebetrieben)

**Schülerversuch 1**

Vielleicht ist Ihnen früher schon mal aufgefallen, dass es beim Ausziehen bestimmter Kleidungsstücke eigenartig knistert. Testen Sie zu Hause einige Ihrer Pullover, Sweatshirts, Jacken oder ähnliche Kleidungsstücke auf diesen Effekt. Ziehen Sie sich diese über einem Hemd oder T-Shirt an. Bewegen Sie sich darin, sodass das zu testende Kleidungsstück intensiv mit Ihrem Hemd oder T-Shirt in Kontakt kommt. Dann ziehen Sie dieses Kleidungsstück vorsichtig aus. Halten Sie es mit der einen Hand am Kragen und bewegen Sie den ausgestreckten Zeigefinger der anderen Hand langsam (ca. 1 cm bis 2 cm Abstand) über das Kleidungsstück. Es sollte dabei möglichst kein Geräusch und, wenn möglich, auch dunkel im Raum sein. Notieren Sie Ihre Beobachtungen. Es kann auch sein, dass Sie bei einigen Pullovern, Sweatshirts oder Jacken keinen Effekt feststellen. Das notieren Sie das ebenfalls. Sehen Sie jeweils auf dem Waschetikett nach, aus welchem Material das betreffende Kleidungsstück besteht, und schreiben Sie das zusammen mit der Art des Stoffes (z. B. gestrickt, gewebt, Fleece, Samt ...) auch in Ihre Aufzeichnungen. Notieren Sie zum Schluss auch noch, aus welchem Material Ihr Hemd bzw. T-Shirt besteht. Besprechen Sie Ihre Ergebnisse in der nächsten Unterrichtsstunde. Welche Materialien zeigen einen Effekt, welche nicht? Was könnte das Knistern verursachen?

**Schülerversuch 2**

- Legen Sie einige kleine Papierschnipsel (ca. 1 cm x 1 cm) in ein Locher, oder ca. 5 mm große Quadrate aus einem Blatt Papier geschnitten, auf den Tisch. Nehmen Sie ein Kunststofflineal, Geodreieck oder Ähnliches und reiben Sie dieses an einem Papiertaschentuch, einem Baumwolltuch oder an Ihrer Kleidung. Bewegen Sie die geriebene Seite nicht. Bewegen Sie das Lineal über die Papierschnipsel. Was beobachten Sie?
- Reiben Sie das Lineal wieder, aber diesmal bewegen Sie mit der anderen Hand leicht über die Reibungsstelle. Was passiert jetzt mit den Papierschnipseln, wenn Sie das Lineal darüberhalten?
- Reiben Sie das Lineal erneut. Nun bewegen Sie einen ausgestreckten Finger der anderen Hand wenige Millimeter über dem Lineal. Können Sie etwas hören?

**Schülerversuch 3**

In den vorhergehenden Versuchen haben Sie vermutlich kleine Funken beobachtet. Solche Funken sind auch elektromagnetische Wellen ab und diese können ggf. mit einem Radio empfangen werden. Schalten Sie ein batteriebetriebenes Radio auf MW-Bereich (evtl. auch AM-Bereich genannt) und stellen Sie den Tuner so ein, dass Sie keinen Rundfunksender hören (das ist vermutlich kein Problem, da es kaum noch MW-Sender gibt). Stellen Sie die Lautstärke ggf. höher. Wenn Sie nicht allzu viele Funkquellen im Raum haben, sollten Sie nichts oder nur wenig in dem Radio hören. Sie können das Radio drehen oder an einen anderen Platz bringen, um so die empfangenen Hintergrundsignale zu verringern. Wiederholen Sie Versuch 2 in der Nähe des Radios. Was hören Sie im Radio?

**Aufgabe 1**

Erklären Sie, warum empfindliche integrierte Schaltungen bei Lagerung und Versand und bis zu ihrem Einbau in leitfähigen Schaumstoff gesteckt werden!

## Tippkarten *Versuche zur elektrostatischen Aufladung (M 1)*

### M 1, Versuch 1 mit Kleidungsstücken

Wenn Sie Ihren Finger in 1 cm bis 2 cm Abstand über das betreffende Kleidungsstück bewegen, ist es möglich, dass Sie mehrmals an verschiedenen Stellen ein kurzes Knacken hören.

Falls es dunkel ist, sehen Sie vielleicht einen winzigen Blitz.

Wir wissen heute, dass es sich bei diesem Phänomen um **statische Elektrizität** handelt. Das Knacken ist also der „Donner“ eines kleinen Blitzes, der beim Ladungsausgleich zwischen Pullover und Hand entsteht. Da sich die Ladungen nicht entlang des Nichtleiters „Pullover“ auf dessen Oberfläche bewegen können, müssen Sie mit Ihrem Finger die ganze Pullover-Oberfläche „abscannen“, um den vollständigen Ladungsausgleich zu bewirken. Es gibt inzwischen auch antistatisch ausgerüstete Kleidung, um genau diesen Effekt zu vermeiden. Das wäre eine mögliche Erklärung, falls der Versuch mit Ihrem Pullover nicht funktioniert.

### M 1, Versuch 2 mit Papierschnipseln

Nach dem Reiben zieht das Lineal Papierschnipsel an.

Es kann sogar sein, dass die Schnipsel nach Berührung wieder abgestoßen werden und heftige Bewegungen zu beobachten sind.

Nach dem Reiben und nochmaliger Berührung werden nur noch wenige Papierschnipsel angezogen.

Offensichtlich bringen Sie durch die Reibung etwas auf das Lineal, das Sie mit der anderen Hand wieder entfernen können. Wenn Sie Ihren Finger in einem Abstand über das Lineal bewegen, kann es sein, dass Sie immer wieder mal ein kurzes Knacken hören.

Auch hier handelt es sich um **statische Elektrizität**. Durch die Reibung entsteht ein intensiver Kontakt zwischen zwei verschiedenen Materialien. Nach der Trennung verbleiben auf einem Material einige Ladungsträger, die dem anderen fehlen. Da unser Körper eine gewisse elektrische Leitfähigkeit aufweist, können wir mit dem Finger die Ladungsträger ableiten, entweder direkt durch Berührung oder aber die „Ableitung“ geschieht durch einen kleinen Blitz, den wir üblicherweise nicht sehen, aber in Form des Knackens und Wisterns immerhin hören können.

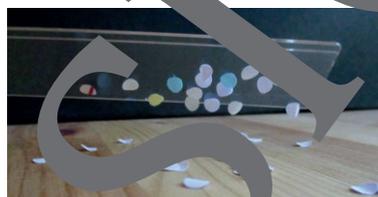


Abb. 1: Elektrostatich geladenes Lineal zieht Papierschnipsel an

Beim Reiben laden sich das Lineal auf und ein großer Teil dieser Ladungen wird sich noch während des Reibens wieder durch Funken entladen. Das können Sie in dem Radio hören. Auch die Funken, die von dem geladenen Lineal auf Ihren Finger überspringen, werden Sie hören. Die Empfindlichkeit des Radios, Mittel- und Kurzwellenbereiche gegenüber solchen Störungen, die auch durch andere elektrische Geräte und von Gewittern verursacht wurden, war sicherlich mit ein Grund, weshalb sich in den 1950er- und 1960er-Jahren der UKW-Rundfunk durchgesetzt hat.

### M 1, Versuch 3

Beim Reiben laden sich das Lineal auf und ein großer Teil dieser Ladungen wird sich noch während des Reibens wieder durch Funken entladen. Das können Sie in dem Radio hören. Auch die Funken, die von dem geladenen Lineal auf Ihren Finger überspringen, werden Sie hören. Die Empfindlichkeit des Radios, Mittel- und Kurzwellenbereiche gegenüber solchen Störungen, die auch durch andere elektrische Geräte und von Gewittern verursacht wurden, war sicherlich mit ein Grund, weshalb sich in den 1950er- und 1960er-Jahren der UKW-Rundfunk durchgesetzt hat.

### M 1, Aufgabe 1

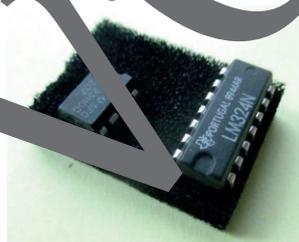


Abb. 2: Integrierte Schaltungen (IC) in leitfähigem Schaumstoff gesteckt

## Die Messung von Strom und Spannung

M 3

### Information

**Das Voltmeter:** Wenn man eine Spannung messen will, muss man ein **Voltmeter** parallel zu dem zu messenden Bauteil anschließen. Das Voltmeter muss über einen sehr hohen Innenwiderstand verfügen, damit es aus dem zu untersuchenden Stromkreis möglichst wenig Strom entnimmt. Ansonsten würde es ja als zweiter Verbraucher neben dem Widerstand  $R$  das Verhalten der Schaltung stören und das wiederum könnte zu Fehlern bei der Messung führen.

### Das Amperemeter:

Einen Strom misst man mit einem **Amperemeter**, welches in Reihe in den Stromkreis geschaltet wird. Es sollte einen möglichst niedrigen Innenwiderstand aufweisen, damit es nicht das Verhalten der Schaltung verändert. Am Amperemeter entsteht ein Spannungsabfall, welcher die Betriebsspannung des restlichen Stromkreises vermindert.

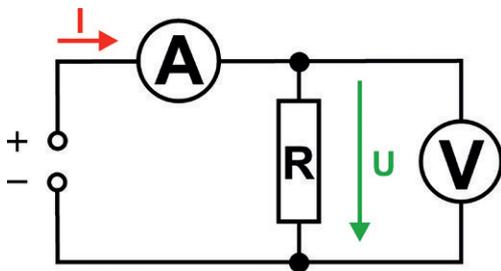


Abb. 3: Amperemeter und Voltmeter im Stromkreis

### Beispiel

In **M 2** wurde der Strom bei einer Betriebsspannung von  $12\text{ V}$  berechnet. Angenommen, das Voltmeter hat einen Innenwiderstand von  $60\text{ k}\Omega$ . Wie groß ist der Strom, den das Voltmeter der Spannungsquelle entnimmt? Welchen Anteil am Stromverbrauch der Schaltung hat es? (Der Innenwiderstand des Amperemeters soll für diese Rechnung zu  $0\ \Omega$  angenommen werden.)

$$I_{\text{Voltmeter}} = \frac{U}{R} = \frac{12\text{ V}}{6 \cdot 10^4\ \Omega} = 2 \cdot 10^{-4}\text{ A} = 0,2\text{ mA}$$

Der Anteil des Voltmeters am Stromverbrauch dieser Schaltung ist damit

$$\frac{I_{\text{Voltmeter}}}{I + I_{\text{Voltmeter}}} = \frac{0,2\text{ mA}}{100,2\text{ mA}} = 0,002\text{ } \ll 1, \text{ also unter } 1\%.$$

Hinweis: Moderne Digitalvoltmeter haben gewöhnlich einen Innenwiderstand von  $10\text{ M}\Omega$ .

**Beispiel**

Das Amperemeter habe einen Innenwiderstand von  $1 \Omega$ . Es bildet somit mit dem Widerstand  $R=120 \Omega$  eine Reihenschaltung (der Innenwiderstand des Voltmeters soll hier zu  $\infty$  angenommen werden). Welche Spannung liegt tatsächlich am Widerstand  $R$  an?

Zunächst wird der Gesamtwiderstand berechnet:

$$R_{\text{gesamt}} = R + R_{\text{Amperemeter}} = 120 \Omega + 1 \Omega = 121 \Omega.$$

Damit ergibt sich ein tatsächlicher Strom von

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{12 \text{ V}}{121 \Omega} = 0,09917 \text{ A}.$$

Am Widerstand  $R$  ( $R = 120 \Omega$ ) verbleibt bei diesem Strom die Spannung

$$U_r = R \cdot I_1 = 120 \Omega \cdot 0,09917 \text{ A} = 11,90083 \text{ V}.$$

Dem Widerstand  $R$  verbleibt also noch ein Anteil an der Versorgungsspannung von

$$\frac{U_r}{U} = \frac{11,90083 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 0,99174, \text{ also über } 99 \text{ \%}.$$

In vielen Fällen wird dies als hinnehmbare Störung betrachtet werden können. Wenn nicht, so muss man höheren messtechnischen Aufwand betreiben oder die Einflüsse der Messgeräte bei der Auswertung herausrechnen.

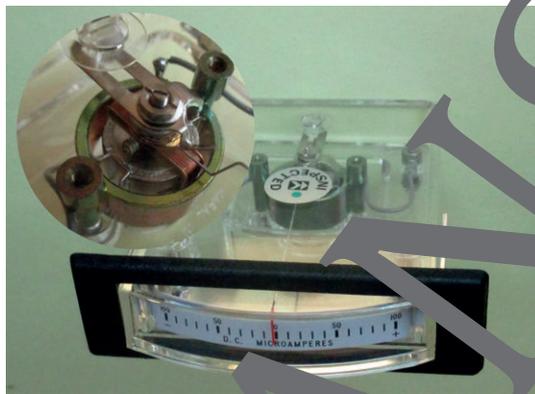


Abb. 4: Drehspulmesswerk (links) – Detailansicht der drehbaren Spule

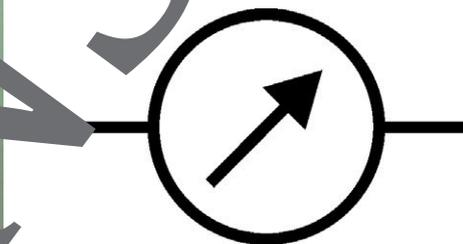


Abb. 5: Schaltzeichen für eine Messwertanzeige, z. B. ein Drehspulmesswerk

**Aufgaben**

1. Früher wurden Drehspulmesswerke für Ampere- und Voltmeter verwendet. Ein solches Zeigerinstrument hatte z. B. einen Innenwiderstand von  $1 \text{ k}\Omega$  und der Zeiger war bei seinem Vollausschlag, wenn man  $0,1 \text{ V}$  an das Instrument legte.

Berechnen Sie die Stromstärke, bei der dieses Instrument Vollausschlag zeigt.

Wie müssen Sie, wie das zuvor beschriebene Instrument durch einen zusätzlichen Widerstand beschreiben müssen, damit daraus ein Voltmeter für den Messbereich  $0$  bis  $20 \text{ V}$  wird.

**Tipp:** Sie benötigen hier die Gesetzmäßigkeiten der Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen.

Das gleiche Instrument soll jetzt als Amperemeter für einen Messbereich  $0$  bis  $0,2 \text{ A}$  dienen. Erklären Sie, wie es jetzt beschaltet werden muss.

# Elektrische Ladungen, Felder und Influenz

M 4

## Information

Normalerweise ist die Anzahl positiver und negativer Ladungen in Materie gleich groß. Die positiven Ladungen befinden sich in den Atomkernen, die negativen, in Form der Elektronen, bewegen sich um die Atomkerne herum. Nach außen hin ist Materie, egal ob fest, flüssig oder gasförmig, normalerweise neutral.

Nun kann es aber vorkommen, dass durch **Reibung**, **äußere elektrische Felder** oder auch durch **Spannungsquellen**, wie Batterien, eine **Ladungstrennung** verursacht wird. Bekannt ist dies von der **Reibungselektrizität**, wenn im direkten Kontakt zweier verschiedener Materialien nach Trennung auf dem einen Material einige negative Ladungsträger mehr vorhanden sind, die auf dem anderen fehlen. In diesem Fall entsteht ein **elektrisches Feld**. Elektrisch geladene Partikel können jetzt angezogen oder abgestoßen werden. Von einer punktförmigen Ladung gehen die Feldlinien **radial** nach außen (**radialsymmetrisches Feld**). Ist eine negative Ladung in der Nähe, gehen die Feldlinien auf diese zu. Per Definition verlaufen die Feldlinien immer von positiven zu negativen Ladung. Zwischen zwei ebenen Platten ist das Feld, bis auf die Ränder, **homogen**, das bedeutet, dass alle Feldlinien parallel zueinander sind.

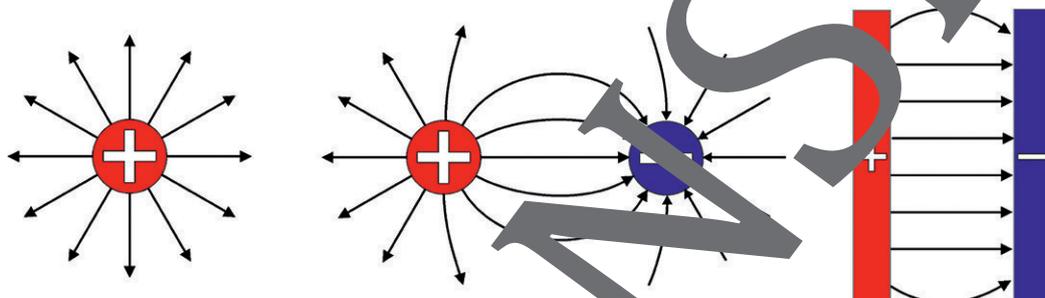


Abb. 6: Elektrische Felder einer Punktladung (links), zweier Punktladungen (Mitte), zweier ebenen Flächen (rechts)

Gegensätzliche Punktladungen (siehe Abb. 6, Mitte) ziehen sich an. Die dabei auftretende Kraft beschreibt das **Coulomb'sche Gesetz**.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

F ist die Kraft<sup>2</sup>, die die Ladung  $Q_2$  im Feld der Ladung  $Q_1$  erfährt.  $Q_1$  und  $Q_2$  sind die beiden Punktladungen,  $r$  ist der Abstand der beiden Ladungen und  $\epsilon_0$  ist die elektrische Feldkonstante<sup>3</sup>. Haben beide Ladungen  $Q_1$  und  $Q_2$  das gleiche Vorzeichen, dann ist die Kraft F abstoßend. Haben  $Q_1$  und  $Q_2$  verschiedene Vorzeichen, dann ist die Kraft F anziehend.

<sup>2</sup> Die Kraft ist ein Vektor. Wir verzichten hier der Einfachheit halber auf den Pfeil und betrachten nur die Beträge.

<sup>3</sup> In Material M 12 befindet sich die Beschreibung eines Versuchs, mit dem die elektrische Feldkonstante bestimmt werden kann.

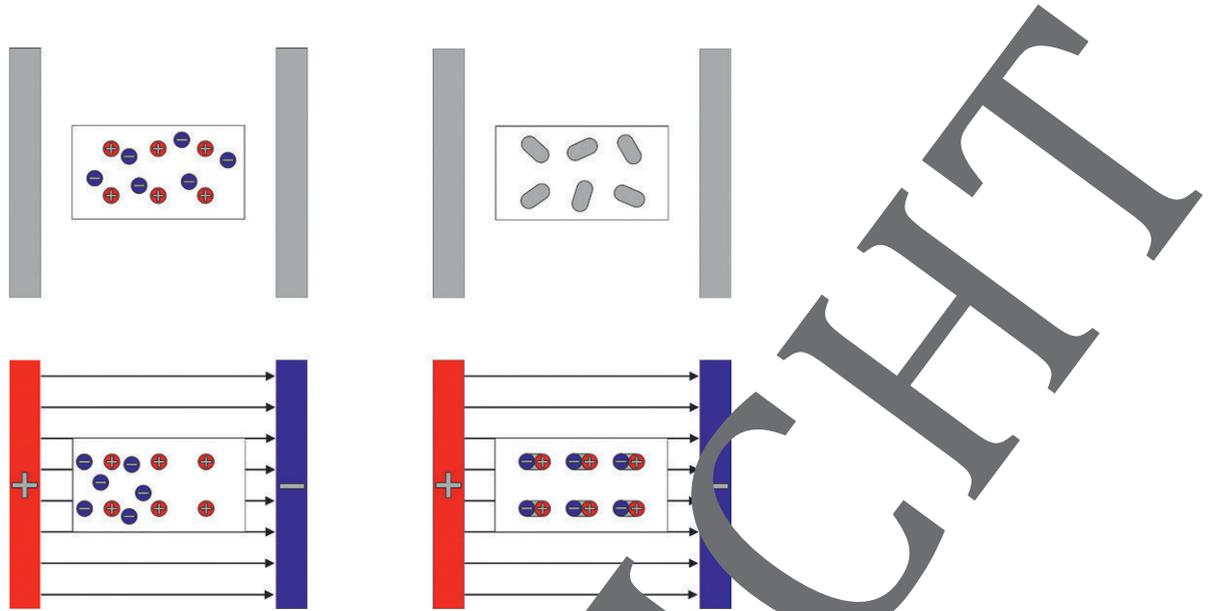


Abb. 7: Leiter (links) und Nichtleiter (rechts) im elektrischen Feld

Bringt man einen Gegenstand in ein elektrisches Feld, so sorgt dieses für eine Ladungsverchiebung auf dem Gegenstand (siehe Abb. 7). Ist der Gegenstand elektrisch leitfähig, sind die Elektronen also leicht beweglich, werden die Elektronen weiter entgegen der Feldrichtung verschoben. Das nennt man **Influenz**. Ist der Gegenstand ein Nichtleiter, dann bilden sich durch das äußere Feld **Dipole** durch **lokale Ladungsverchiebung**. Diese Dipole richten sich dann nach dem Feld aus, sind aber ansonsten unbeweglich. In diesem Fall spricht man von **Polarisation**. So entstehen auch elektrostatische Anziehungskräfte. Kleinfischnetze oder Kleinfischnetze werden angezogen, obwohl Papier keinen Strom leiten kann (siehe **M 1** Versuch 2).

Influenz sorgt auch dafür, dass ein **Elektrometer** elektrische Felder und Spannungen anzeigen. Hier findet die **Ladungsverchiebung** eine gleichartige Ladung auf der festen und beweglichen Platte statt, sodass diese sich abstoßen und damit ein Zeigerausschlag entsteht. Ohne elektrische Felder wird der Zeiger durch sein Gewicht in Ruhelage gehalten. Das Elektrometer ist für sehr hohe Spannungen besser geeignet als das in **M 3** besprochene Voltmeter. Dafür ist das Elektrometer kein dauerhafter Strom geeignet, da es idealerweise einen unendlich hohen Widerstand.

Den Effekt der Influenz machte man sich früher zur Erzeugung von Hochspannung nutzbar. Durch geeignete Anordnung und Kontaktierung von vielen kleinen Kondensatorplatten auf rotierenden Scheiben kann Ladungstrennung durch Influenz und Erhöhung der Spannung durch Entfernen der geladenen Platten erreicht werden. Die genaue Funktion dieses **Hochspannungsgenerators**, bekannt als „**Wimshurst-Maschine**“ soll an dieser Stelle nicht erläutert werden. Für Interessierte sei auf die Links im Abschnitt „Mediathek“ verwiesen.

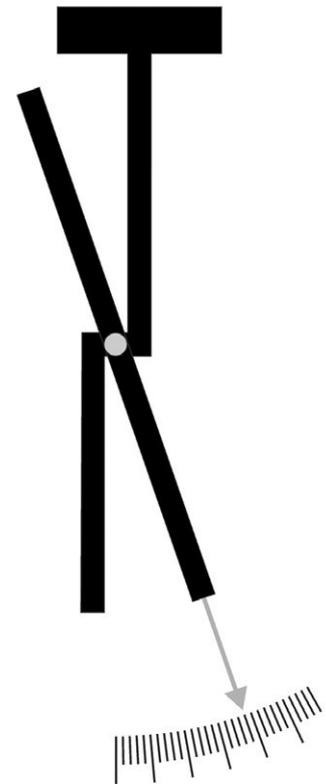


Abb. 8: Prinzipieller Aufbau eines Elektrometers

## Der Kondensator

M 5

### Information

Man kann zwei parallele Metallplatten, die sich aber nicht berühren dürfen, an eine Spannungsquelle anschließen. Die Spannungsquelle wird aus einer Platte Elektronen entziehen und in die andere hineindrücken. Damit lädt sich eine Platte positiv und die andere negativ auf. Dadurch, dass die Platten eben und parallel sind, entsteht ein **homogenes Feld**, bei dem alle Feldlinien parallel sind. Sind die Flächen nicht parallel oder handelt es sich um Kugeln, Zylinder oder etwas anderes, dann ist das Feld nicht mehr homogen.

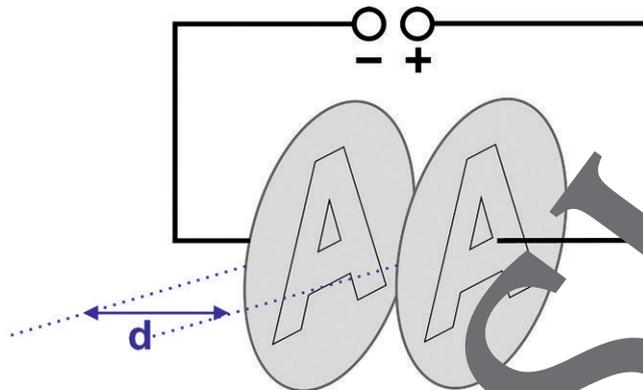


Abb. 9: Plattenkondensator mit der Plattenfläche A und dem Plattenabstand d

Die Anordnung von zwei Metallplatten der Fläche A in einem Abstand d zueinander nennt man **Kondensator**. Aus dieser prinzipiellen Anordnung leitet sich das Symbol für Kondensatoren in elektronischen Schaltplänen ab (Abb. 10).



Abb. 10: Kondensator-Schaltsymbol

Die elektrische Feldstärke im homogenen Feld des Plattenkondensators ist die Spannung geteilt durch den Abstand. Die Feldstärke wird in „Volt pro Meter“ angegeben.

$$E = \frac{U}{d}$$

### Beispiel

Die Kondensatorplatten werden auf 3000 V aufgeladen. Ihr Abstand beträgt 6 cm.

$$E = \frac{U}{d} = \frac{3000 \text{ V}}{0,06 \text{ m}} = 50000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

## Die Kraft im elektrischen Feld

M 7

### Information: Kraft auf Punktladung

Wenn man nun eine Probeladung  $q$  in das Feld bringt, dann wird sie mit einer Kraft angezogen. Diese Kraft ist proportional zur Ladung und proportional zur Feldstärke. Ist die Probeladung negativ, dann wird sie zur positiv geladenen Platte mit der Kraft  $F$  angezogen.

$$F = E \cdot q$$

### Lehrerversuch

Bauen Sie einen Plattenkondensator auf. Schließen Sie ihn an eine Hochspannungsquelle an. Schließen Sie auch ein Spannungsmessgerät zur Anzeige der Kondensatorspannung an. Wählen Sie den Plattenabstand so, dass sich darin eine leichte Kugel einige Zentimeter hin und her bewegen kann. Hängen Sie an einem nicht leitenden Faden eine mit Metall oder Graphit beschichtete, leichte Kugel zwischen die Kondensatorplatten.

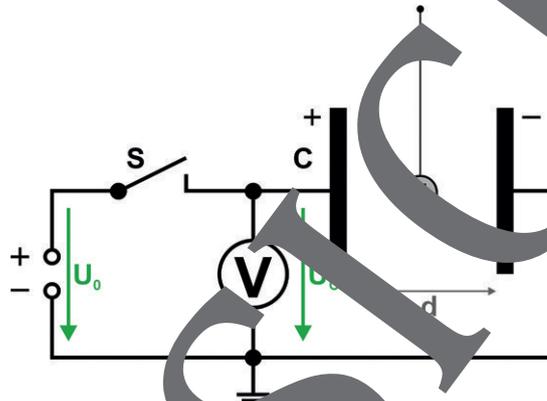


Abb. 11: Kraft auf eine Probeladung

**Tipp:** Vielleicht können Sie einen Tischtennisball dafür präparieren.

Laden Sie den Kondensator auf. Bringen Sie durch Berührung mit der negativ geladenen Platte Ladung auf die Kugel und stellen Sie die Spannung wieder auf null. Wenn die Kugel nun frei zwischen den Platten hängt und nicht mehr schwingt, erhöhen Sie die Spannung des Kondensators. Die Kugel wird aus der Ruhelage ausgelenkt. Die Auslenkung steigt mit der Kondensatorspannung. Sollte die Kugel die sie anziehende Kondensatorplatte berühren, so wird sie sofort abgestoßen und schwingt zur anderen Platte. Dort wird sie wieder zurückgestoßen und pendelt nun so lange hin und her, bis Sie den Kondensator von der Spannungsquelle trennen. Die Kondensatorspannung sinkt nun langsam ab, bis die Kugel die Kondensatorplatten nicht mehr berühren kann.

**Aufgabe:** Erklären Sie das beobachtete Phänomen.

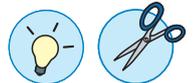
### Beispiel

Die Probeladung ist  $10^{-8} \text{ C}$ , die Feldstärke  $50\,000 \text{ V/m}$ . Die Kraft, mit der sie zur negativ geladenen Platte gezogen wird, ist:

$$F = E \cdot q = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 10^{-8} \text{ C} = 0,0005 \text{ VC} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

### Tippkarte zu M 7, Versuch

Durch das Berühren mit der jeweiligen Kondensatorplatte übernimmt die Kugel etwas Ladung von der Platte und wird abgestoßen. Beim Berühren der anderen Platte gibt sie Ladung ab und wird umgepolung geladen. Der ganze Vorgang bedeutet letztendlich einen Ladungstransport, der den Kondensator entlädt, sobald er von der Spannungsquelle getrennt wird.



**Aufgabe 1**

a) Schlagen Sie die Zusammenhänge der Maßeinheiten im SI-System nach.

**Tipp:** Formelsammlung

b) Zeigen Sie mit den bekannten Zusammenhängen der Maßeinheiten im SI-System, wie Sie in der Gleichung  $F = E \cdot q$  von den elektrischen Größen „Volt“ und „Coulomb“ auf die Maßeinheit der Kraft, „Newton“, umrechnen können.

**Aufgabe 2**

Im homogenen Feld eines Plattenkondensators hängt eine geladene Kugel (Abb. 12). Durch die Ladung wird sie auf eine Seite gezogen. Ohne Ladung würde sie dagegen senkrecht nach unten am Faden hängen. Der Plattenabstand ist  $d = 10 \text{ cm}$ , die Spannung  $U = 15\,000 \text{ V}$ , die Kugel wiegt  $m = 1 \text{ g}$ , die Ablenkung beträgt  $10 \text{ Grad}$ , die Masse des Fadens wird vernachlässigt.

Berechnen Sie, wie viel Ladung sich auf der Kugel befindet.

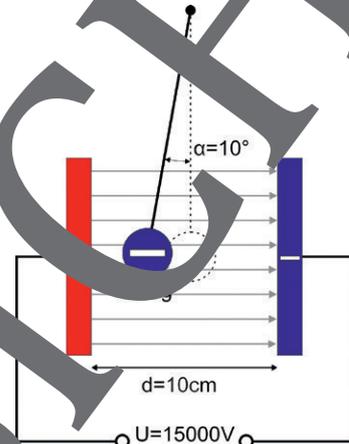


Abb. 12: Ablenkung einer geladenen Kugel im E-Feld

**Aufgabe 3**

In einer Braun'schen Röhre fliegen Elektronen mit der Geschwindigkeit  $v$  in Richtung des Bildschirms. Durch die Steuerspannung  $U_{st}$  an den Kondensatorplatten (Abstand  $d$ ) werden sie abgelenkt. Hinter den Kondensatorplatten fliegen sie geradeaus weiter und treffen an der Position  $y$  auf den Bildschirm.

Bestimmen Sie allgemein, wie der Wert  $y$  von der Steuerspannung  $U_{st}$  abhängt, wenn die anderen Größen  $v$ ,  $d$ ,  $l_k$  und  $l_A$  konstant bleiben.

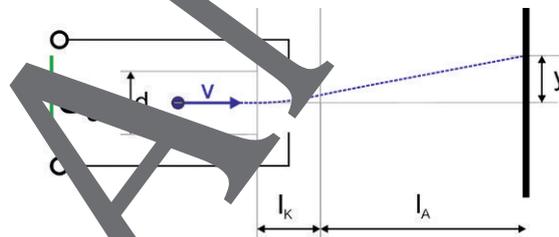


Abb. 13: Ablenkung von Elektronen im E-Feld der Ablenkeplatten einer Braun'schen Röhre

**Hinweise**

**Video:** Ein an zwei Fäden hängendes, verbundenes Kugelpaar wird durch Aufladung zum Dipol geladungsträger und anschließend einem elektrischen Feld ausgesetzt. (Uni Würzburg)

<https://portal.physik.uni-wuerzburg.de/video/lehre1/e1versuch1.html>

**Video:** Erklärung und Vorführung eines Versuchs über Ladungstransport mit einem Pendel im elektrischen Feld. (A. Wendt)

<https://www.youtube.com/watch?v=cN9Y4TWvObA> von Minute 6:11 bis 7:23

## M 9

## Die Kapazität eines Plattenkondensators

Wie viel Ladung passt auf die Kondensatorplatten?



## Information

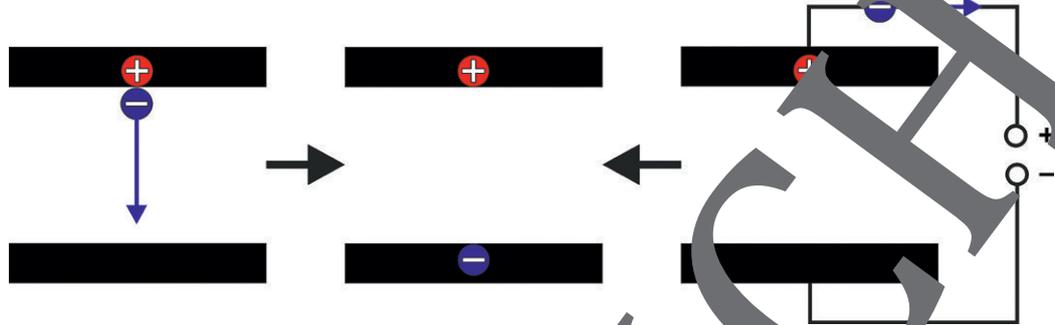


Abb. 14: „Mechanischer“ Ladungstransport im E-Feld. Ladungsträger, die durch eine äußere Spannungsquelle führen zum gleichen Zustand

Man kann sich vorstellen, dass Ladungsträger aus einer Platte herausgeholt und zur anderen Platte gebracht werden. Das braucht Energie, die dort als potentielle Energie im Kondensator vorhanden ist. Mit jeder so transportierten Ladung steigt die Spannung und damit die elektrische Feldstärke und auch die Arbeit, die zum Ladungstransport notwendig ist. Der Zustand des Kondensators wird auch erreicht, wenn eine außen angelegte Spannungsquelle den Ladungstransport übernimmt. Es wird also elektrische Energie aus der äußeren Spannungsquelle im Kondensator gespeichert.

Um die Energie im Kondensator berechnen zu können, muss eine neue Größe eingeführt werden. Das ist die Kapazität  $C$  eines Kondensators. Sie wird in der Einheit F (Farad) gemessen.

Die Kapazität gibt an, wie viel Ladung pro Spannung gespeichert werden kann.

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{Die Einheit ist Farad} \quad 1 \text{ F} = 1 \text{ C} / 1 \text{ V.}$$

Ein Kondensator mit der Kapazität 1 Farad nimmt bei 1 Volt Spannung die Ladung 1 Coulomb auf.

Aus Versuchen mit Plattenkondensatoren weiß man, dass die Kapazität mit der Fläche  $A$  der Platten ansteigt und umgekehrt proportional zu deren Abstand  $d$  ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$ .

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

<sup>4</sup> In Material **M 12** befindet sich die Beschreibung eines Versuchs, mit dem die elektrische Feldkonstante bestimmt werden kann.

### Lehrerversuch

Bauen Sie einen Plattenkondensator auf. Schließen Sie ein Spannungsmessgerät an, um die Spannung des Kondensators anzuzeigen. Laden Sie ihn auf und trennen Sie ihn von der Spannungsquelle. Ändern Sie jetzt den Plattenabstand. Bei größerem Abstand wird die Spannung ansteigen, bei kleinerem abnehmen. Versuchen Sie eine Messreihe  $U = f(d)$  aufzunehmen. Wenn Ihr Kondensator nicht durch Leckströme zu schnell entladen wird, sollten Sie den Zusammenhang mit der Kapazität demonstrieren können.

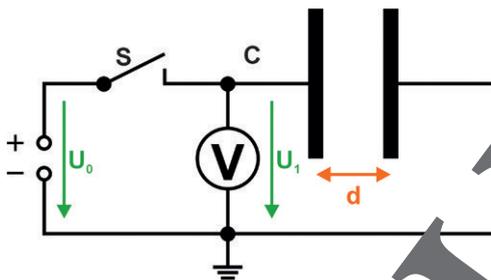


Abb. 15: Kapazitätsänderung durch Abstandänderung der Kondensatorplatten

### Beispiel

Berechnung der Kapazität eines Plattenkondensators, wenn dieser mit zwei runden Metallplatten vom Durchmesser  $D = 35,7 \text{ cm}$  aufgebaut ist, die sich in einem Abstand von  $d = 6 \text{ cm}$  zueinander befinden.

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{0,357 \text{ m}}{2}\right)^2 = \pi \cdot 0,031862 \text{ m}^2 = 0,1 \text{ m}^2$$

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{0,1 \text{ m}^2}{0,06 \text{ m}} = 1,4757 \cdot 10^{-11} \frac{\text{As}}{\text{V}} \approx 1,47 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 14,7 \text{ pF}$$

### Merke:

Weil Kondensatorkapazitäten in der Regel sehr klein sind, werden gewöhnlich die folgenden Bezeichnungen verwendet:

Mikrofarad	$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$
Nanofarad	$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$
Pikofarad	$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$

### Aufgaben

- Der soeben betrachtete Kondensator ( $A = 0,1 \text{ m}^2$ ) soll mehr Kapazität bekommen. Das erreicht man durch Annäherung der Kondensatorplatten. Berechnen Sie, auf welchen Abstand  $d$  man die Platten bringen muss, damit  $10 \text{ pF}$  Kapazität ist.
- Der Kondensator von Aufgabe 1 wird jetzt auf  $1000 \text{ V}$  aufgeladen. Berechnen Sie, auf welchen Abstand  $d$  man die Platten bringen muss, damit die Spannung auf  $1500 \text{ V}$  ansteigt.

### Hinweis

**Video:** Ein Plattenkondensator wird geladen und dann der Plattenabstand geändert.

von Würzburg

<https://pawm.physik.uni-wuerzburg.de/video/lehre1/e1versuch7.html>

## M 10



## Die Arbeit beim Laden eines Kondensators

## Information

Wenn Ladung von einer zur anderen Platte transportiert wird, dann erhöht sich die Spannung und damit die Feldstärke. Die nachfolgende Ladungsmenge wird dann gegen eine höhere Spannung bzw. Feldstärke transportiert und benötigt entsprechend mehr Energie. Die Spannung errechnet sich aus der bereits transportierten Ladung. Oder man berechnet die Ladung aus Kapazität und Spannung, weil Letztere leichter gemessen werden kann.

$$C = \frac{Q}{U} \quad U = \frac{Q}{C} \quad Q = C \cdot U$$

Der Transport einer kleinen Ladungsmenge  $q$  benötigt die Energie  $dW = q \cdot U(q)$ . Es wird hier  $U(q)$  geschrieben, um anzudeuten, dass  $U$  sich mit  $q$  ändert.

Werden die Ladungsmengen winzig klein, dann wird daraus  $dW = U(q)dq$ .

Die gesamte Energie im Kondensator ist also das Aufsummieren, bzw. das Integrieren der vielen kleinen Ladungsmengen  $dq$  und deren potenzieller Energie  $dW$ , die ja von der sich auch erhöhenden Spannung  $U(q)$  abhängt.

$$W = \int_0^W dW = \int_0^Q U(q)dq$$

Je mehr Ladung transportiert wurde, umso höher ist die Spannung am Kondensator. Bei bekannter Kondensatorkapazität kann auch  $U(q) = \frac{q}{C}$  als Funktion der bisher übertragenen Ladung  $q$  angegeben werden.

$$U(q) = \frac{q}{C}$$

$$W = \int_0^Q U(q)dq = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \int_0^Q \frac{1}{C} q dq = \left[ \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right]_0^Q = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

$$Q = C \cdot U \quad Q^2 = C \cdot U^2 \quad W = \frac{1}{2} \frac{C^2 \cdot U^2}{C} = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

## Beispiel

Der in M 9 mit einer Kapazität von 14,7 pF behandelte Kondensator wurde auf 3000 V aufgeladen. Welche Energie wurde dadurch gespeichert?

b) Wie viele Elektronen wurden dadurch von einer zur anderen Platte transportiert?

## M 11

## Dielektrikum

## Lehrerversuch

Bauen Sie einen Plattenkondensator auf. Wählen Sie den Abstand der Platten so, dass ein flaches Material, z. B. eine Kunststoffscheibe, genau zwischen die Platten schieben können. Laden Sie den Kondensator auf, ein Spannungsmessgerät sollte die Spannung am Kondensator anzeigen, und trennen Sie ihn von der Spannungsquelle. Sobald Sie die Kunststoffscheibe zwischen die Platten einfügen, wird die Spannung sinken, wenn Sie sie wieder entfernen, wird die Spannung wieder steigen. Wenn Ihnen ein Kapazitätsmessgerät zur Verfügung steht, messen Sie die Kapazität des (zuvor wieder entladenen) Kondensators mit und ohne Kunststoffscheibe. Wenn Sie verschiedene Materialien der gleichen Dicke zur Verfügung haben, messen Sie die Kapazität mit den anderen Materialien zwischen den Kondensatorplatten (Abstand  $d$  bleibt immer gleich).

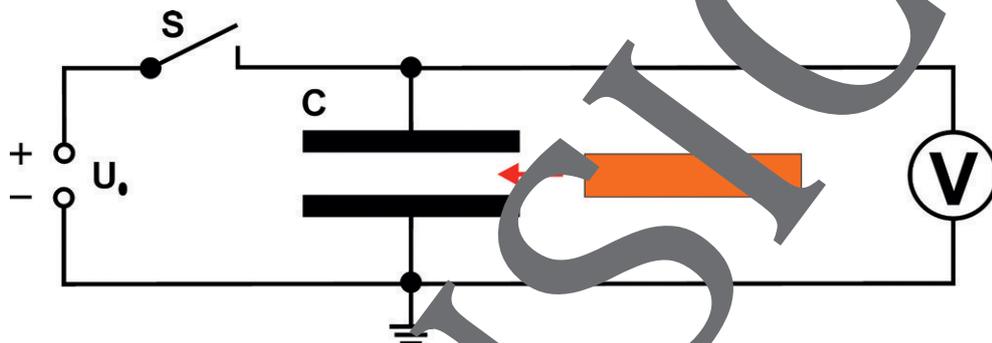


Abb. 16: Kondensatorspannung ohne und mit Dielektrikum bestimmen

## Information

Man beobachtet beim Einbringen von nicht leitenden Materialien zwischen die Platten eines Kondensators einen Anstieg der Kapazität, der spezifisch für das eingebrachte Material ist. Dieser spezifische Faktor wird als **relative Permittivität**, **Permittivitäts-** oder **Dielektrizitätszahl**  $\epsilon_r$  bezeichnet. Damit ergibt sich die Kapazität eines Plattenkondensators, der festes oder flüssiges nicht leitendes Material zwischen seinen Platten hat, zu

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$\epsilon_r = 1$  gilt für **Vakuum** zwischen den Platten und angenähert auch für Luft und andere Gase. Alle anderen Materialien haben ein  $\epsilon_r > 1$ . Ein Dielektrikum ist ein nicht leitender Stoff, in dem durch das äußere elektrische Feld kleine elektrische Dipole induziert werden, welche sich dann nach den Feldrichtungen ausrichten. Es gibt auch Stoffe, die bereits elektrische Dipole beinhalten, die jedoch genauso erst durch ein elektrisches Feld ausgerichtet werden (**Paraelektrika**). Stoffe, die ausgerichtete Dipole besitzen, welche auch ohne ein äußeres elektrisches Feld ausgerichtet bleiben, werden als **Ferroelektrika** bezeichnet. Auf diese Unterschiede soll aber hier nicht näher eingegangen werden.

## M 12



## Die Kraft auf die Kondensatorplatten

## Information

Die Platten des Kondensators sind entgegengesetzt geladen und ziehen sich deshalb an. Um die hierbei auftretende Kraft zu berechnen, wird die Arbeit betrachtet, die man aufbringen muss, um die Platten auseinanderzuziehen. Der Energiegehalt des Kondensators ist

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} C \left( \frac{Q}{C} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}, \quad \text{mit } C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \text{ für den Plattenkondensator wird daraus}$$

$$W = \frac{1}{2} d \frac{Q^2}{\epsilon_0 A}.$$

Wenn der Kondensator mit einer Ladung  $Q$  geladen wird und diese auf den Kondensatorplatten verbleibt, dann ist die im Kondensator gespeicherte Energie proportional zum Plattenabstand. Die Energie beim aktuellen Plattenabstand  $d$  wird jetzt  $W_0$  genannt:

$$W_0 = \frac{1}{2} d \frac{Q^2}{\epsilon_0 A}.$$

Nun werden die Platten gegen deren Anziehungskraft, die ja in dieser Betrachtung ermittelt werden soll, um den Weg  $\Delta s$  auseinandergezogen. Im Kondensator ist jetzt die Energie  $W_1$  gespeichert. Der Abstand beträgt jetzt  $d + \Delta s$ . Die Ladung  $Q$  ist unverändert geblieben.

$$W_1 = \frac{1}{2} (d + \Delta s) \frac{Q^2}{\epsilon_0 A}.$$

Die Energiedifferenz ist dann

$$\Delta W = W_1 - W_0 = \left( \frac{1}{2} (d + \Delta s) \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \right) - \left( \frac{1}{2} d \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \right) = \left( \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \right) (d + \Delta s - d)$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \Delta s.$$

Arbeit ist Kraft mal Weg. Der Weg wäre jetzt eine kleine Änderung des Plattenabstands.

Damit ist die Kraft gleich der Differenz der Arbeit dividiert durch die Wegdifferenz

$$\Delta W = F \cdot \Delta s \quad F = \frac{\Delta W}{\Delta s} = \frac{\frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \Delta s}{\Delta s} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A}$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} \quad \text{mit } Q = C \cdot U \quad \text{und} \quad C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{wird daraus}$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{C^2 U^2}{\epsilon_0 A} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0^2 \frac{A^2}{d^2} U^2}{\epsilon_0 A} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{A}{d^2} U^2.$$

## Beispiel

Wie groß ist die Kraft, mit der die beiden Platten (Abmessungen wie in den vorangegangenen Beispielen, also  $A = 0,1 \text{ m}^2$ ,  $d = 0,06 \text{ m}$ ,  $U = 3000 \text{ V}$ ) durch das elektrische Feld zwischen ihnen angezogen werden?

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{A}{d^2} U^2 = \frac{1}{2} \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{0,1 \text{ m}^2}{(0,06 \text{ m})^2} \cdot (3000 \text{ V})^2$$

$$F = 4,4271 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 27,7777 \cdot 9 \cdot 10^6 \text{ V}^2 = 1,107 \cdot 10^{-3} \frac{\text{AsV}}{\text{m}} = 1,107 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ws}}{\text{m}}$$

$$F = 1,107 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{m}} = 1,107 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{m}} = 1,107 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

## Erläuterungen und Lösungen

### M 1 Es knistert am Pullover – die elektrostatische Aufladung

Mit den Versuchen 1 und 2 in **M 1** konnte gezeigt werden, dass nach der Trennung verschiedener Materialien auf diesen etwas verbleibt, was man auch wieder entfernen kann. Es treten kleine Funken auf und es entstehen Kräfte. Das Mittelwellenradio hat gezeigt, dass es sich um etwas handelt, das das elektromagnetische Wellen aussendet (sonst könnte man es ja nicht im Radio hören). Es sind elektrische Ladungen, die auf Materialien verbleiben und dann wieder entladen werden. Vor allem mit dem heutigen Wissen über den Aufbau der Materie sind die beobachteten Phänomene gut zu erklären.

#### Hörbeispiel Versuch 3

Die Datei „**Statische Elektrizitaet Entladung.mp3**“ (CD-ROM 5) enthält in der ersten Hälfte die von einem Mittelwellenradio wiedergegebenen Störungen durch die elektrostatische Aufladung, die beim Reiben eines Kunststofflineals mit einem Papiertaschentuch entstehen. Beim Reiben entstehen Ladungen auf dem Lineal, von denen sich ein großer Funke noch während des Reibungsvorgangs wieder durch kleine Funken entlädt. Die nach dem Reiben auf dem Lineal verbleibenden Ladungen können gezielt entladen werden, indem man den Finger wenige Millimeter über das Lineal bewegt. Diese Entladungsfunken sind in der zweiten Hälfte des Hörbeispiels zu hören.

#### Aufgabe 1

Sehr empfindliche Schaltkreise können durch elektrostatische Entladungen beschädigt werden. Wie die Versuche gezeigt haben, entstehen durch relativ einfache Vorgänge bei üblichen Alltagsmaterialien elektrostatische Aufladungen. Der leitfähige Schaumstoff sorgt nun dafür, dass zwischen den Anschlusspins des integrierten Schaltkreises sich keine Spannung aufbauen kann und dass somit auch nicht ein unabsichtlich Strom durch den Schaltkreis fließen kann.

### M 3 Die Messung von Strom und Spannung

#### Aufgabe 1

Drehspulmesswerk mit  $1 \text{ k}\Omega$  Innenwiderstand und Vollausschlag bei  $0,1 \text{ V}$ . Wie groß ist der Strom, bei dem dieses Instrument Vollausschlag zeigt:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,1 \text{ V}}{1000 \Omega} = 10^{-4} \text{ A} = 0,1 \text{ mA}$$

#### Aufgabe 2

Das in Aufgabe 1 beschriebene Drehspulmesswerk soll als Voltmeter für den Messbereich  $0$  bis  $20 \text{ V}$  dienen.

Vollausschlag bei  $0,1 \text{ mA}$ . Welcher Widerstand muss in Reihe geschaltet werden, damit bei  $20 \text{ V}$   $0,1 \text{ mA}$  fließt?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{20 \text{ V}}{10^{-4} \text{ A}} = 2 \cdot 10^5 \Omega = 200 \text{ k}\Omega$$

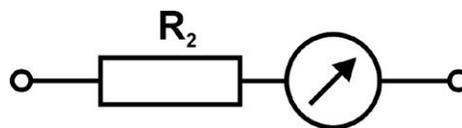


Abb. 19: Drehspulmesswerk als Voltmeter

# Der RAABE Webshop: Schnell, übersichtlich, sicher!



## Wir bieten Ihnen:



Schnelle und intuitive Produktsuche



Übersichtliches Kundenkonto



Komfortable Nutzung über  
Computer, Tablet und Smartphone



Höhere Sicherheit durch  
SSL-Verschlüsselung

**Mehr unter: [www.raabe.de](http://www.raabe.de)**