

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

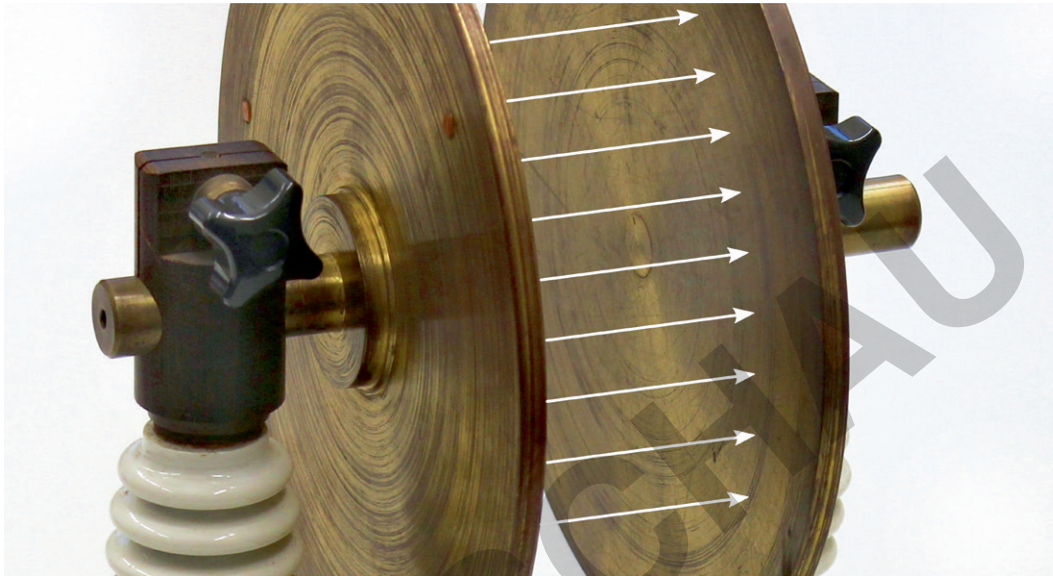


Foto: St. Völker, Jena

© RAABE 2020

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 überlagerten 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 (G9)
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
Zusatzmaterialien:	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 die riesigen Blitze gesehen und den darauffolgenden Donner gehört.
- Jeder hat genauso schon durch Reiben von Kunststofffolien, 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 mit skalaren 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 Maßeinheiten gerechnet. Dabei können die logischen Zusammenhänge des SI-Maßeinheitensystems gut vorgeführt 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. In einem zweiten Teil wird dann mehr auf die technischen Anwendungen eingegangen. Es werden auch Mess- 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.

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Hochspannungen

Einige der vorgeschlagenen Experimente benötigen Hochspannung weit über 1000 Volt. In den Versuchsbeschreibungen stehen keine expliziten Sicherheitshinweise. Wir gehen davon aus, dass Sie als Lehrer die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit Hochspannung kennen und einhalten. Führen Sie die Hochspannungsexperimente nur dann vor, wenn Sie sicher sind, dass dies gefahrlos möglich ist. Ansonsten können Sie auch auf **Videos aus dem Internet** zurückgreifen. Hinweise hierzu finden Sie bei den jeweiligen Experimenten.

Sicherheitshinweise:

- Vermeiden Sie berührungsfähliche Spannungen.
Eine berührungsfähliche Spannung liegt vor, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind¹:
Wechselspannung > 25 V oder Gleichspannung > 60 V
und
Kurzschluss-Wechselstromstärke > 3 mA oder Kurzschluss-Gleichstromstärke > 12 mA oder Entladungsenergie (z. B. bei Kondensatoren) > 0,35 J.
- Verwenden Sie eine Spannungsquelle mit eingebauter Strombegrenzung oder stecken Sie am nicht geerdeten Pol einen entsprechenden Schutzwiderstand ein.
- Verwenden Sie nur Kondensatoren, die nicht mehr als die angegebene Energie aufnehmen können.
- Halten Sie Sicherheitsabstände ein (Gefahr des Funkenüberschlags durch die Luft).
- Es muss einen Not-Aus-Schalter am Experiment geben, um es ggf. sofort spannungslos schalten zu können.
- Stellen Sie ein Gefahren-Zeichen beim Experiment auf.
- Führen Sie Hochspannungsexperimente als Lehrerexperiment selbst vor. Die Schüler dürfen nur mit ungefährlichen Spannungen experimentieren.
- Lesen Sie das angegebene Kapitel in der Publikation (siehe Fußnote) und beachten Sie die Hinweise.



© Julija Kanivets /
iStock / Getty Images
Plus

¹ „Sicher experimentieren in Physik, Fachliche Grundlagen und praktische Hinweise zur Erstellung von Gefährdungsbeurteilungen“ vom Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München und der Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung https://www.isb.bayern.de/download/20114/isb_sicher_experimentieren_in_physik_interaktiv_5.pdf Kapitel 5.2 „Elektrische Gefährdung“ ab Seite 20

Auf einen Blick

SV = Schülerversuch, LV = Lehrerversuch

1./2. Stunde

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

3./4. Stunde

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

5.–8. Stunde

Thema:	Plattenkondensator und homogenes elektrisches Feld
M 5	Der Kondensator
M 6	Ladung und Strom
M 7 (LV)	Die Kraft im elektrischen Feld
M 8	Die Arbeit im elektrischen Feld
Benötigt:	siehe 9./10. Stunde

9./10. Stunde

Thema:	Der Plattenkondensator
M 9 (LV)	Die Kapazität eines Plattenkondensators
M 10	Die Arbeit beim Laden eines Kondensators
M 11 (LV)	Dielektrikum
Benötigt:	<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 in 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. Dann 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, gefilzt, 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 (z. B. aus einem 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. Berühren Sie die geriebene Stelle nicht. Bewegen Sie das Lineal über die Papierschnipsel. Was beobachten Sie?
- Reiben Sie das Lineal wieder, aber diesmal wischen 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 strahlen 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 Störquellen im Raum haben, sollten Sie nichts oder nur wenig in dem Radio hören. Sie können das Radio auch 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

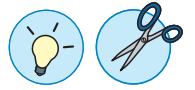
Erklären Sie, warum empfindliche integrierte Schaltungen bei Lagerung und Versand und bis zu ihrem Einbau in leitfähigen Schaumstoff gesteckt werden!

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



Abb. 1: Elektrostatisch geladenes Lineal zieht Papierschnipsel an

etwas auf das Lineal, das Sie mit der anderen Hand wieder entfernen können. Wenn Sie Ihren Finger in geringem 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 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 Knisterns immerhin hören können.



M 1, Versuch 3

Beim Reiben laden Sie 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 der Lang-, 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

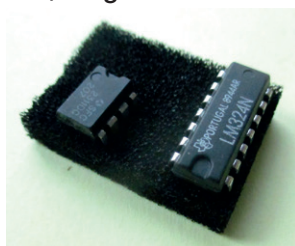
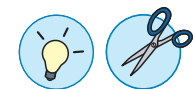


Abb. 2: Integrierte Schaltungen (IC) in leitfähigem Schaumstoff gesteckt



M 2

Strom und Spannung – frischen Sie Ihr Wissen auf!

**Information**

Elektrische **Spannung** kann man sich wie einen Druck vorstellen, mit dem die Spannungsquelle Elektronen in eine Leitung hineindrücken und aus der anderen Leitung herausaugen will. Physikalisch gesehen handelt es sich um eine **Potenzialdifferenz** zwischen den Anschlussklemmen der Spannungsquelle. Gibt es eine Verbindung, dann fließt ein **Strom**. Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern, es findet somit ein Ladungstransport statt. Gewöhnlich fließen Elektronen in Metalldrähten. Sie fließen aber auch in Halbleitern oder im Vakuum (Elektronenröhren). Genauso können aber auch Ionen in Elektrolytlösungen oder ionisierte Gase Ladung transportieren. Auch hier fließt ein elektrischer Strom.

Hat die Verbindung zwischen den Polen einer Spannungsquelle einen hohen Widerstand, dann fließt wenig Strom, ist der Widerstand klein, dann fließt viel Strom. Strom ist die Ladungsmenge, die pro Zeit (normalerweise durch einen Draht/Leiterquerschnitt) fließt. Ist die Spannung hoch, fließt mehr Strom, ist die Spannung niedrig, fließt wenig Strom.

Der elektrische Widerstand ist wie folgt definiert: $R = \frac{U}{I}$. Daraus folgt: $I = \frac{U}{R}$.

U ist die Spannung, gemessen in Volt (V), I der Strom in Ampere (A). R ist der Widerstand, gemessen in Ohm (Ω). Die elektrische Leistung P in Watt (W), die ein einfacher Widerstand vollständig in Wärme umwandelt, wird berechnet nach der Formel

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Beispiel

Hat man eine Batterie mit der Spannung 12 V und schließt daran einen 120- Ω -Widerstand an, dann fließt der Strom

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V}}{120 \Omega} = 0,1 \text{ A} \quad \text{und die Leistung ist} \quad P = U \cdot I = 12 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A} = 1,2 \text{ W}.$$

Es ist noch anzumerken, dass die Fließrichtung des Stroms früher von „Plus“ nach „Minus“ festgelegt und dies bis heute so beibehalten wurde. Die technische Stromrichtung ist also entgegengesetzt zum Elektronenfluss. Elektrizität war bereits lange bekannt, bevor man den Aufbau der Atome kannte und feststellte, dass die negativ geladenen Elektronen die bewegten Ladungsträger des elektrischen Stroms in Metallen sind. Der mit I beschriftete Pfeil in Abb. 3 (siehe **M 3**) zeigt die Stromrichtung an, der mit U beschriftete die Potenzialdifferenz (oder Spannungsdifferenz, allgemein auch nur Spannung genannt) zwischen den beiden Anschlüssen des Widerstands R.

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.

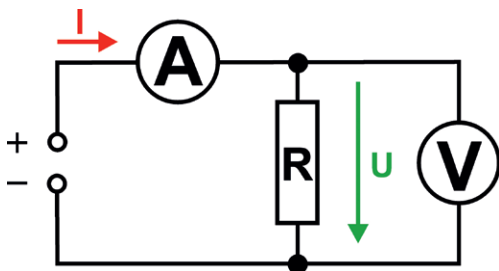


Abb. 3: Amperemeter und Voltmeter im Stromkreis

Beispiel

In **M 2** wurde der Strom bei einer Betriebsspannung von 12 V zu 100 mA berechnet. Angenommen, das Voltmeter hat einen Innenwiderstand von 60 k Ω . 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 Ω 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

$$\frac{I_{\text{Voltmeter}}}{I + I_{\text{Voltmeter}}} = \frac{0,2 \text{ mA}}{100,2 \text{ mA}} = 0,001996, \text{ also unter } 0,2 \text{ \%}.$$

Hinweis: Moderne Digitalvoltmeter haben gewöhnlich einen Innenwiderstand von 10 M Ω .

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, so gehen die Feldlinien auf diese zu. Per Definition verlaufen die Feldlinien immer von der positiven zur negativen Ladung. Zwischen zwei ebenen Platten ist das Feld, bis auf die Ränder, **homogen**, das bedeutet, dass alle Feldlinien parallel zueinander sind.

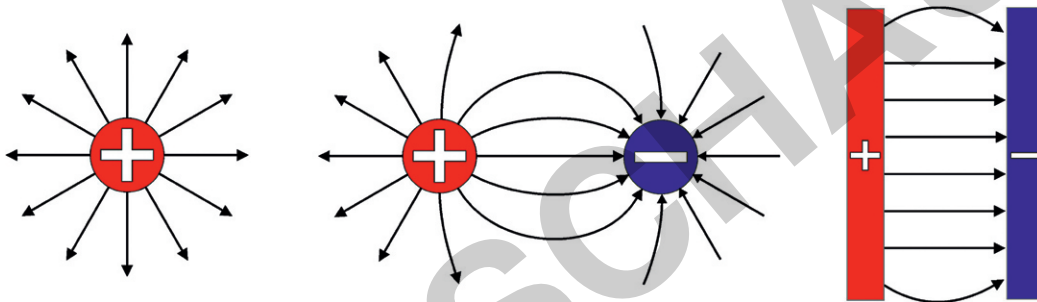


Abb. 6: Elektrische Felder einer Punktladung (links), zweier Punktladungen (Mitte), zweier ebenen Flächen (rechts)

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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad \epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

F ist die Kraft², 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 ϵ_0 ist die elektrische Feldkonstante³. 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, so ist die Kraft F anziehend.

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

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

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.

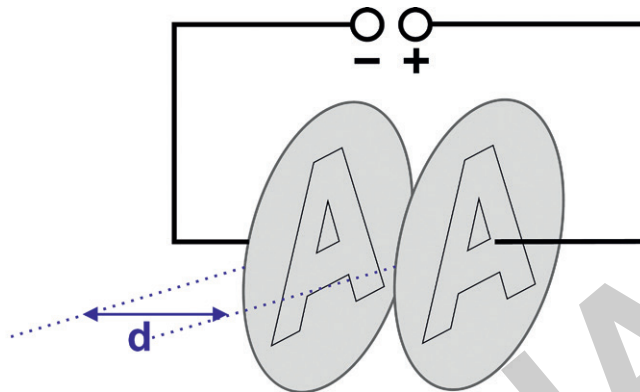


Abb. 9: Plattenkondensator mit der Plattenfläche A und dem Plattenabstand d

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

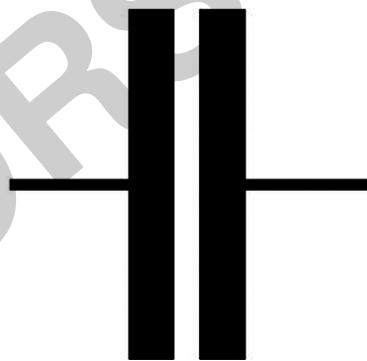


Abb. 10: Kondensator-Schaltssymbol

Die elektrische Feldstärke E 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.

$$E = \frac{U}{d} = \frac{3000 \text{ V}}{0,06 \text{ m}} = 50\,000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

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.

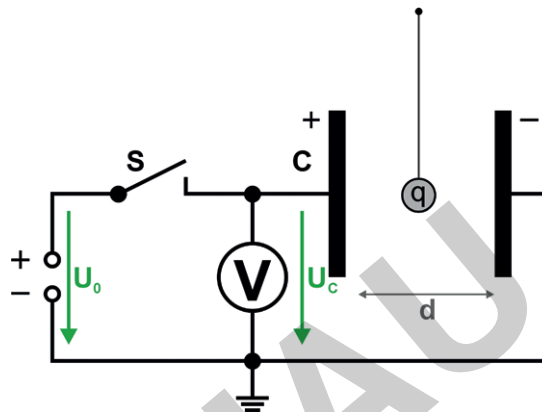


Abb. 11: Kraft auf eine Probeladung

Tipp: Vielleicht können Sie einen Tischtennisball dafür präparieren.

Laden Sie den Kondensator auf. Bringen Sie durch Berührung mit der negativen 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 langsam die Spannung am Kondensator. 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} C, die Feldstärke 50 000 V/m. Die Kraft, mit der sie zur negativ geladenen Platte gezogen wird, ist:

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

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 umgepolt geladen. Der ganze Vorgang bedeutet letztendlich einen Ladungstransport, der den Kondensator entlädt, sobald er von der Spannungsquelle getrennt wird.



Die Arbeit im elektrischen Feld

M 8



Information

Wenn man nun eine positive Probeladung entgegen der elektrischen Anziehungskraft von der negativen Platte hin zur positiven bewegen will, muss man nach dem Gesetz $W=F \cdot s$ Arbeit aufwenden. Ist der Weg s so groß wie der Abstand d der Platten, dann ist mit der Kraft auf eine Ladung $F=E \cdot q$ $W=F \cdot d=E \cdot q \cdot d$.

Beispiel

Wie groß ist die Arbeit, wenn man in dem Kondensator mit der Feldstärke $E = 50\,000\text{ V/m}$ und dem Plattenabstand $d = 0,06\text{ m}$ die Probeladung $q = 10^{-8}\text{ C}$ von der einen zur anderen Platte transportiert?

$$W = E \cdot q \cdot d = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 10^{-8}\text{ C} \cdot 0,06\text{ m} = 3 \cdot 10^{-5}\text{ VC} = 3 \cdot 10^{-5}\text{ J}$$

Einheiten:

$$1\text{ V} \cdot 1\text{ C} = 1\text{ V} \cdot 1\text{ As} = 1\text{ W s} = 1\text{ J}$$

Wenn man durch Bewegen der Probeladung entgegen der Anziehungskraft Arbeit aufgewendet hat, so besitzt dadurch diese Probeladung jetzt eine **potenzielle Energie** im elektrischen Feld.

Man kann nun einen Quotienten aus dieser potenziellen Energie und der Ladung bilden und für die elektrische Feldstärke im Plattenkondensator $E=U/d$ einsetzen:

$$\frac{W}{q} = \frac{E \cdot q \cdot d}{q} = E \cdot d = \frac{U}{d} \cdot d = U$$

$$\Rightarrow \frac{W}{q} = U.$$

Damit ist die Arbeit pro Ladung gleich der zwischen den Kondensatorplatten herrschenden Spannung. Der Plattenabstand ist unerheblich. Man kann die Spannung somit auch als die potenzielle Energie einer Ladung beschreiben. Befinden sich Ladungen in elektrischen Feldern, dann setzen sie sich normalerweise in Bewegung und die soeben berechnete potenzielle Energie wandelt sich in kinetische Energie um.

Aufgabe

In der Kernphysik werden Energien von Teilchen auch gerne in eV (Elektronenvolt) angegeben. Ein eV ist die (dann kinetische) Energie, die ein einfach geladenes Teilchen hat, wenn es 1 Volt Spannungsdifferenz durchlaufen hat. Rechnen Sie die Energie 1 eV in die Einheit Joule um.

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.

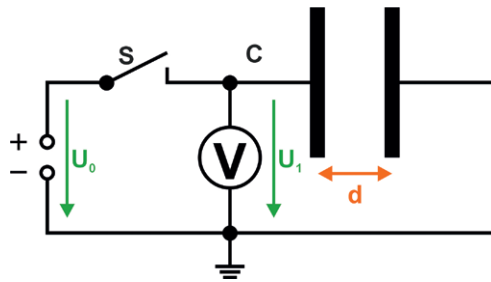


Abb. 15: Kapazitätsänderung durch Abstandsänderung der Kondensatorplatten

Beispiel

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

1. 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 er 40 pF Kapazität hat.
2. Der Kondensator aus Aufgabe 1 wird jetzt auf 1000 V aufgeladen. Berechnen Sie, auf welchen Abstand d man die Platten bringen muss, damit die Spannung auf 1500 V ansteigt.

Hinweis

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

(Uni Würzburg)

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

M 11

Dielektrikum

Lehrerversuch

Bauen Sie einen Plattenkondensator auf. Wählen Sie den Abstand der Platten so, dass Sie 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 ansteigen. 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).

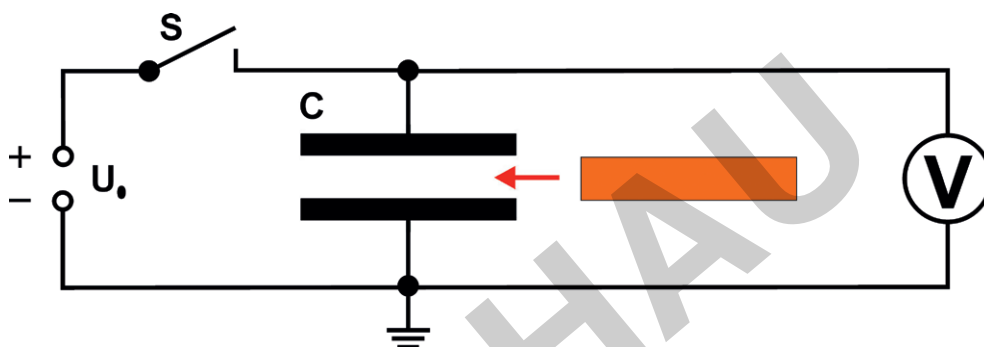


Abb. 16: Kondensatorspannung ohne und mit Dielektrikum bestimmen

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** ϵ_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 Feldlinien ausrichten. Es gibt auch Stoffe, die bereits elektrische Dipole beinhalten, die jedoch genau so 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 mit dieser Betrachtung ermittelt werden soll, um den Weg Δs 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?

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

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

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

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 handeln muss, 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 Elektrizität Entladung.mp3**“ (CD-ROM 58) enthält in der ersten Hälfte die von einem Mittelwellenradio wiedergegebenen Störungen durch die Funkenentladung, die beim Reiben eines Kunststofflineals mit einem Papiertaschentuch entstehen. Beim Reiben entstehen Ladungen auf dem Lineal, von denen sich ein großer Teil noch während des Reibungsvorgangs wieder durch kleine Funken entlädt. Die nach dem Reiben auf dem Lineal verbliebenen Ladungen können gezielt entladen werden, indem man den Finger wenige Millimeter über das Lineal bewegt. Diese Entladungsfunken sind in der zweiten Hälfte des Audios zu hören.

Aufgabe 1

Sehr empfindliche Schaltkreise können durch elektrostatische Entladungen beschädigt werden. Wie die Versuche gezeigt haben, entstehen schon 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 unbeabsichtigt 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 V dienen. Vollausschlag bei $0,1 \text{ mA}$. Welcher Widerstand muss in Reihe geschaltet werden, damit bei 20 V $0,1 \text{ mA}$ fließen?

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

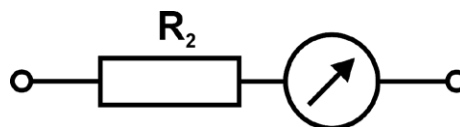


Abb. 19: Drehspulmesswerk als Voltmeter