

4

Materie im elektrischen Feld

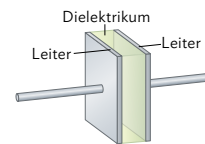
Ph12 Lernbereich 1: Statische elektrische und magnetische Felder

Die Schülerinnen und Schüler **modellieren die Wirkung elektrischer Felder auf Materie anhand der Phänomene der Influenz und Polarisation und erläutern die Auswirkung eines Dielektrikums auf die Kapazität eines Plattenkondensators, insbesondere im Kontext technischer Anwendungen im Alltag.**

Voraussetzung: Kondensator als Energiespeicher (Kapitel 2.2 im Buch)

Kondensator mit Dielektrikum

Im technischen Einsatz verwendet man keine luftgefüllten Kondensatoren, sondern Kondensatoren mit einer isolierenden Schicht zwischen den beiden leitenden Platten. Diese isolierende Schicht nennt man Dielektrikum (vgl. B1).



B1 | Kondensator mit Dielektrikum

Die Verwendung des Dielektrikums hat mehrere Vorteile:

- Da die elektrische Feldkonstante ϵ_0 mit $\epsilon_0 = 8,8541878128 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ sehr klein ist, beträgt die Kapazität bei luftgefüllten Kondensatoren meist weniger als 1 nF. Durch das Einbringen eines Dielektrikums kann die Kapazität deutlich erhöht werden.
- Die Platten können enger beieinander liegen, ohne dass sie sich berühren, weil das Dielektrikum dabei als mechanischer Abstandshalter dient und der Kondensator dadurch stabiler ist. Auch dies führt zu einer höheren Kapazität.
- Durch den Isolator kommt es nicht so schnell zum Spannungsdurchschlag wie bei luftgefüllten Kondensatoren, somit ist die maximal anlegbare Spannung höher.

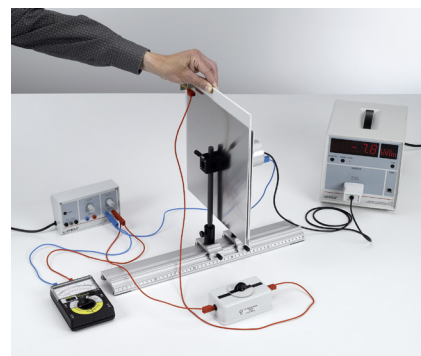
Hinweis: Beim Spannungsdurchschlag springt ein Funke von einer Kondensatorplatte zur anderen, es kommt zu einem schlagartigen Ladungsausgleich zwischen den Platten.

Betrachten wir nun im Experiment, wie sich ein Dielektrikum auf die Kapazität auswirkt.

Versuch 1: Q konstant

Ein Plattenkondensator wird mit 100 V aufgeladen und anschließend von der Spannungsquelle getrennt. Wird nun eine Kunststoffplatte zwischen die Platten geschoben, die den Zwischenraum vollständig ausfüllt, so kann man beobachten, dass die Spannung sinkt. Wird die Kunststoffplatte wieder entfernt, dann steigt die Spannung wieder auf den ursprünglichen Wert an.

Da zwischen der Spannung und der Ladung beim Plattenkondensator der Zusammenhang $Q = C \cdot U$ gilt und bei getrennter Spannungsquelle die Ladung auf den Platten näherungsweise konstant bleiben muss, muss sich durch die Kunststoffplatte die Kapazität des Kondensators erhöht haben.



B2 | Versuchsaufbau

Hinweis: Mithilfe des nebenstehenden Mediacodes gelangen Sie zu einer Simulation, mit der Sie den Einfluss des Dielektrikums auf die Kapazität selbst untersuchen können – sowohl im Zusammenhang mit dem oben beschriebenen Versuch 1, als auch bei Versuch 2 auf der nächsten Seite. Nutzen Sie dafür den mit „Dielektrikum“ beschrifteten Teil der Simulation.



MC 67054-01

4 Materie im elektrischen Feld

Versuch 2: U konstant

Wieder wird der Plattenkondensator mit 100 V aufgeladen. Nun wird die Kunststoffplatte zwischen die Platten geschoben, ohne den Plattenkondensator zuvor von der Spannungsquelle zu trennen. Mithilfe eines Ladungsmessgeräts oder eines empfindlichen Stromstärkemessgeräts stellt man fest, dass Ladungen auf die Platten fließen. Beim Herausziehen der Platte kann man einen Stromfluss mit umgekehrter Polung feststellen, es fließen also wieder Ladungen von den Platten ab.

Auch bei diesem Versuch muss sich die Kapazität $C = \frac{Q}{U}$ erhöht haben, da die Spannung zwischen beiden Platten konstant gehalten wurde.

Wiederholt man beide Versuche mit einem anderen Material wie z. B. Glas als Dielektrikum, dann stellt man fest, dass die Änderung der Kapazität vom Material des Dielektrikums abhängt.

Ein Dielektrikum zwischen den Kondensatorplatten erhöht die Kapazität eines Kondensators um den materialabhängigen Faktor ϵ_r .

ϵ_r heißt **Dielektrizitätszahl** oder relative Permittivität des Dielektrikums.

Somit berechnet sich die Kapazität eines Kondensators mit Dielektrikum als $C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$.

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r

Die Dielektrizitätszahl heißt auch relative Permittivität, da sie den relativen Faktor bezogen auf einen Kondensator im Vakuum angibt. In der untenstehenden Tabelle ist außer der Dielektrizitätszahl gängiger Materialien auch ihre Durchschlagfestigkeit mit angegeben – also der größte Wert des elektrischen Feldes, für den noch kein direkter Ladungsfluss zwischen den Kondensatorplatten stattfindet.

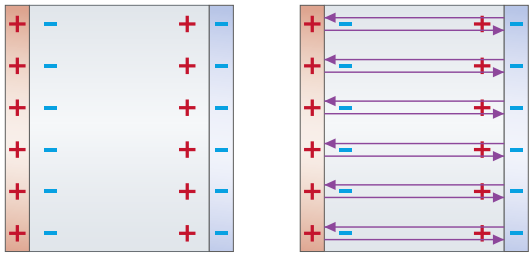
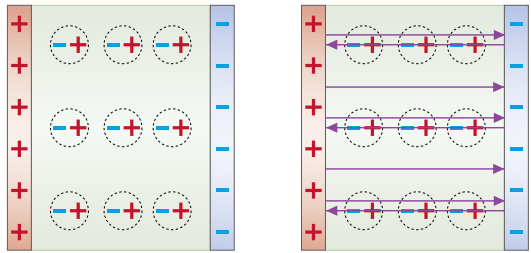
Material	Dielektrizitätszahl ϵ_r	Durchschlagfestigkeit in $\frac{kV}{mm}$
Glas	5,6	14
Luft	1,0006	3
Papier	3,7	16
Paraffin	2,1–2,5	10
Plexiglas	3,4	40
Polystryol	2,6	24
Porzellan	4,5–6,5	5,7
Wasser (20 °C)	81	65–70

Hinweis: Zwar beträgt ϵ_r von Luft 1,0006, meist rechnet man aber mit $\epsilon_r \approx 1$.

Leiter und Isolator im elektrischen Feld: Influenz und Polarisation

Betrachten wir den oben beschriebenen Versuch 2 genauer: Wenn Ladungen auf die Platten des Kondensators fließen, müsste die elektrische Feldstärke im Inneren des Kondensators zunehmen. Dies ist aber nicht möglich, da die Spannung unverändert bleibt und somit wegen $E = \frac{U}{d}$ auch die elektrische Feldstärke unverändert bleiben muss. Ein Teil der Ladungen auf den Platten muss also durch das Dielektrikum „neutralisiert“ worden sein.

Um eine Erklärung dafür zu finden, betrachten wir die physikalischen Vorgänge im Inneren von Leitern und Isolatoren im elektrischen Feld genauer:

Leiter im elektrischen Feld	Isolatoren im elektrischen Feld
<p>Leiter haben viele frei bewegliche Ladungen. Wird ein Leiter nun in ein elektrisches Feld gebracht, dann richten sich die Ladungen entgegengesetzt zum äußeren Feld aus.</p> <p>Diese Verschiebung der Ladungen im Leiter nennt man Influenz.</p> <p>Im Inneren des Leiters entsteht ein elektrisches Feld, das dem äußeren Feld entgegengesetzt gerichtet ist und genauso groß ist. Das Innere des Leiters ist also feldfrei.</p>	<p>In Isolatoren können sich die Ladungen nur innerhalb der Atome oder Moleküle verschieben. Wird ein Isolator in ein elektrisches Feld gebracht, dann werden die einzelnen Moleküle zu Dipolen.</p> <p>Durch das elektrische Feld kommt es zur Polarisation. Im Inneren des Isolators entsteht ein elektrisches Feld, das dem äußeren Feld entgegengesetzt gerichtet ist, aber schwächer ist. Das elektrische Feld wird also abgeschwächt.</p>
 <p>Influenz im Leiter $E = 0$</p>	 <p>Polarisation im Isolator E abgeschwächt</p>

Durch die Polarisation im Dielektrikum wird das elektrische Feld also abgeschwächt. Dadurch kann wegen $E = \frac{U}{d}$ mehr Ladung bei gleicher Spannung im Kondensator gespeichert werden. Die Kapazität des Kondensators erhöht sich also.

Dabei gilt: Je größer die Dielektrizitätszahl des Dielektrikums ist, desto mehr Ladung wird durch das äußere Feld verschoben und umso mehr wird das äußere Feld abgeschwächt.

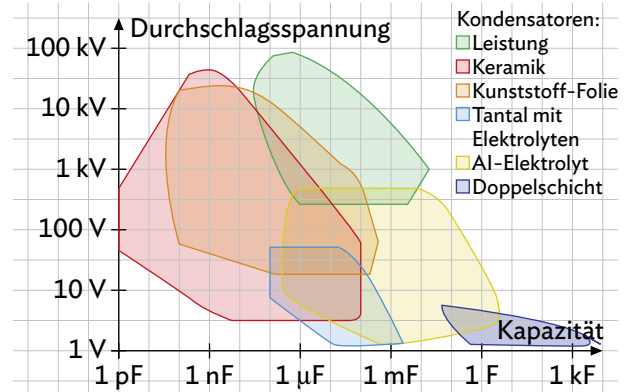
Wird ein Leiter in ein elektrisches Feld eingebracht, führt die Verschiebung der Ladungen (**Influenz**) im Leiter dazu, dass das Innere des Leiters feldfrei ist.

Wird ein Isolator in ein elektrisches Feld eingebracht, führt die Verschiebung der Ladungen innerhalb der Atome und Moleküle (**Polarisation**) im Leiter dazu, dass das elektrische Feld im Innern des Isolators (= Dielektrikums) abgeschwächt wird. Die Abschwächung ist abhängig von der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Dielektrikums.

Technische Anwendungen

Es gibt eine Vielzahl von Kondensatoren, die unterschiedliche Einsatzbereiche abdecken. Einen ersten Überblick über typische Kapazitäten und die Durchschlagsspannung verschiedener Bauarten findet man in B3.

Im technischen Bereich werden häufig Blockkondensatoren, Keramik Kondensatoren, Elektrolytkondensatoren, Superkondensatoren und Gold Caps eingesetzt. Am häufigsten findet man Kondensatoren als Speicher oder als Sensoren.



B3 | Durchschlagsspannung und Kapazität verschiedener Kondensatortypen

Kondensatoren als Speicher

Kondensatoren werden oft als Energiespeicher genutzt. Gegenüber Batterien oder Akkus haben sie den Vorteil, dass sie Energie schneller speichern und auch schneller wieder abgeben können. Außerdem sind deutlich mehr Ladezyklen als bei herkömmlichen Akkus möglich. Dafür können Kondensatoren allerdings im Vergleich weniger Energie speichern und geben diese aufgrund des schnellen Spannungsabfalls nicht konstant ab.

Im Alltag findet man häufig sog. Gold Caps; sie eignen sich mit ihrer hohen Kapazität gut als Energiespeicher für Fahrradbeleuchtungen oder auch für Modellflugzeuge.

Kondensatoren als Sensoren

Auch eine Vielzahl von Sensoren beruht auf dem Einsatz von Kondensatoren; man nennt sie kapazitive Sensoren. Es gibt z. B. kapazitive Füllstandanzeiger, Luftfeuchtigkeitsmesser, Regensensoren und auch Fingerabdrucksensoren. Sie alle beruhen auf dem Prinzip, dass sich die Kapazität des Kondensators durch äußere Einflüsse, wie z. B. die Luftfeuchtigkeit, ändern kann. Diese Kapazitätsänderung wird gemessen. Ein weiteres Anwendungsgebiet von Kondensatoren mit Dielektrika sind kapazitive Tastaturen und Touchscreens von Smartphones, Tablets und Computern.

Musteraufgabe

Ein Plattenkondensator mit quadratischen Platten der Länge 20 cm und Plattenabstand 4,0 mm wird mit einem Dielektrikum aus Plexiglas ($\epsilon_r = 3,4$) vollständig gefüllt und anschließend an eine Spannungsquelle mit $U = 100 \text{ V}$ angeschlossen. Nachdem der Kondensator voll aufgeladen ist, wird die Spannungsquelle wieder abgetrennt.

- Bestimmen Sie die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie.
- Nun wird das Dielektrikum wieder entfernt. Zeigen Sie, dass die im Kondensator gespeicherte Energie 3,4-mal so viel wie zuvor beträgt.
- Erläutern Sie, woher die zusätzliche Energie kommt, und erklären Sie den Effekt auf molekularer Ebene.

Lösung

a) Kapazität des Kondensators: $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 3,4 \cdot \frac{(0,20 \text{ m})^2}{4,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,30 \text{ nF}$.

Somit erhält man als Energie $E_{\text{el}} = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,30 \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot (100 \text{ V})^2 = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ J}$.

- b) Da der Kondensator von der Spannungsquelle getrennt wird, befindet sich weiterhin die Ladung $Q = C \cdot U = 30 \text{ nC}$ auf ihm, die Kapazität beträgt ohne Dielektrikum aber nur noch $C_{\text{neu}} = \frac{C}{3,4} = 8,8 \cdot 10^{-11} \text{ F}$ und somit erhält man als jetzt im Kondensator gespeicherte Energie den Wert

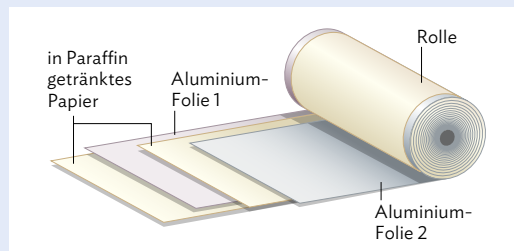
$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C_{\text{neu}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(30 \cdot 10^{-9} \text{ C})^2}{8,8 \cdot 10^{-11} \text{ F}} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ J} = 3,4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ J}.$$

- c) Die im Kondensator gespeicherte Energie nimmt zu, weil Arbeit verrichtet werden muss, um das Dielektrikum aus dem Kondensator zu entfernen. Diese Arbeit ist nötig, weil die Dipole an den Rändern des Dielektrikums von den Ladungen der Platten angezogen werden.

Arbeitsauftrag

- 1 Ein Plattenkondensator wird an eine Spannungsquelle mit 100 V angeschlossen. Anschließend wird er vollständig mit einer Porzellan-Platte gefüllt.
 - a) Beschreiben Sie, wie sich die Kapazität, die Ladung und die elektrische Feldstärke durch das Dielektrikum ändern.
 - b) Erläutern Sie anhand von a), dass zur Speicherung elektrischer Energie in technischen Anwendungen ausschließlich Kondensatoren verwendet werden, die ein Dielektrikum besitzen.
- 2 Ein Kondensator mit der Kapazität $0,10 \mu\text{F}$ hat eine Glasplatte als Dielektrikum. An den Kondensator werden Spannungen von maximal 10 kV angelegt. Bestimmen Sie, wie dick die Glasplatte sein muss und welche Plattenfläche der Kondensator haben sollte.

- 3 Blockkondensatoren bestehen aus schmalen, aber sehr langen Bändern Alufolie, die mit Zwischenschichten aus Paraffin-Papier aufgewickelt und dann in ein Gehäuse verpackt werden.



B4 Blockkondensator mit Paraffin-Papier als Dielektrikum

- a) Ein Blockkondensator besteht aus zwei 5,0 cm breiten und 100 m langen Alufolien. Dazwischen liegt ein 0,050 mm dickes, in Paraffin getränktes Papier. Zeigen Sie, dass die Kapazität des Kondensators etwa $2 \mu\text{F}$ beträgt. Verwenden Sie hierzu vereinfachend die Dielektrizitätszahl von Paraffin.
- b) Berechnen Sie die Ladung, die der Kondensator bei einer Spannung von 10 V aufnimmt.
- c) Planen Sie ein Experiment zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl von Paraffin-Papier und führen Sie es anschließend durch.

- 4 Elektrolytkondensatoren (kurz Elkos) liefern hohe Kapazitäten bei relativ geringen Kosten.



B5 Elektrolytkondensatoren

- a) Recherchieren Sie den Aufbau eines Elkos - speziell auch, wie das Dielektrikum im Elko hergestellt wird.
 - b) Für elektronische Bauteile verwendet man häufig Aluminium als Anodenmaterial und Aluminiumoxid mit $\epsilon_r = 9,6$ als Dielektrikum. Berechnen Sie die Kapazität eines solchen Elkos mit Plattenfläche 40 cm^2 und einer Dicke des Dielektrikums von 10^{-4} mm .
 - c) Bestimmen Sie einen Richtwert für die Spannung, die höchstens angelegt werden darf, wenn die Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums $350 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ beträgt.
 - d) Erläutern Sie die Gründe dafür, dass Elkos in vielen technischen Anwendungen zum Einsatz kommen. Gehen Sie dabei vor allem auf die Vorteile gegenüber Kondensatoren ein, die kein Dielektrikum besitzen.
- 5 In dieser Aufgabe sollen verschiedene Beobachtungen zu den Dielektrika auf molekularer Ebene betrachtet werden.
 - a) Erklären Sie Versuch 1 auf molekularer Ebene.
 - b) Erläutern Sie, dass ein Dielektrikum für die Erhöhung der Durchschlagfestigkeit des Kondensators sorgt.
 - c) Die Dielektrizitätszahl von Wasser ist mit $\epsilon_r = 81$ deutlich höher als die anderen Werte in der Tabelle. Erklären Sie dies mithilfe der Dipol-Eigenschaft von Wasser. Führen Sie dazu ggf. eine kurze Recherche durch.
 - d) Erläutern Sie die Funktionsweise eines Regensensors. Vergleichen Sie dafür die Kapazitätsänderung eines mit Luft und eines mit Wasser gefüllten Kondensators. Erläutern Sie auch, wie der Sensor unterschiedliche Regenmengen abschätzen kann.
 - 6 Erstellen Sie in Ihrem Kurs ein Erklärvideo zum Thema „Kondensatoren in Tablets, Smartphones und Tastaturen“. Erstellen Sie zunächst gemeinsam im Kurs mithilfe Ihrer Lehrkraft einen zweckmäßigen Arbeitsplan für das Video, bevor Sie sich in Kleingruppen aufteilen.