Universität
Münster

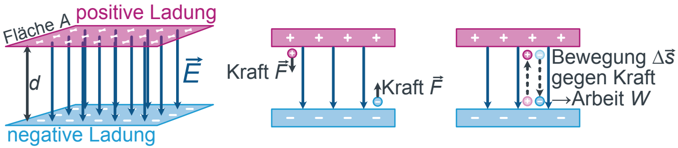
Physik
für Mediziner, Zahnmediziner und Pharmazeuten

Iris Niehues
Physikalisches Institut, Universität Münster

11.12.2025

Kondensator

- zwischen zwei unterschiedlichen Ladungen bildet sich ein elektrisches Feld $\vec{E}$ aus
- Feldlinien zeigen von der positiven zur negativen Ladung



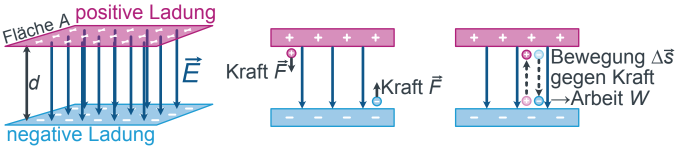
Kondensator

- zwischen zwei unterschiedlichen Ladungen bildet sich ein elektrisches Feld $\vec{E}$ aus
- Feldlinien zeigen von der positiven zur negativen Ladung

Plattenkondensator

zwei unterschiedlich geladene Platten mit Flächen A parallel im Abstand d

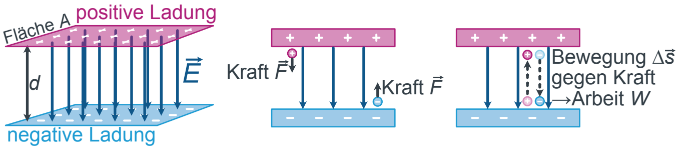
In Zellen findet man diese Situation z.B. wenn im Innern der Zelle anders geladene Ionen einen Überschuss haben als außerhalb.



Ladungen im Kondensator

- Auf positive Ladungen wirkt die Kraft entlang der Feldlinien, für negative entgegengesetzt

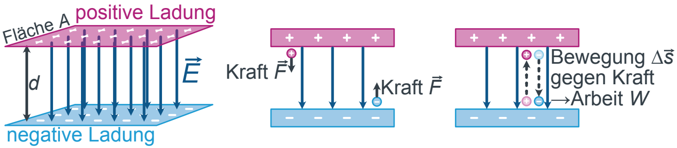
$$W = q \cdot \vec{E} \cdot \Delta\vec{s}$$



Ladungen im Kondensator

- Auf positive Ladungen wirkt die Kraft entlang der Feldlinien, für negative entgegengesetzt
- beliebige Ladung q im elektrischen Feld $\vec{E}$ um eine Strecke $\Delta\vec{s}$ bewegen $\rightarrow$ Arbeit W gegen die Kraft verrichten

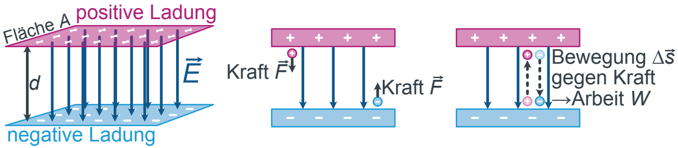
$$W = q \cdot \vec{E} \cdot \Delta\vec{s}$$



Ladungen im Kondensator

negative Ladung $q < 0$ von der oberen zur unteren Platte ($\Delta\vec{s} = -d \cdot \vec{e}_z$):
Spannung U als Potentialdifferenz zwischen den potentiellen Energien der Ladung

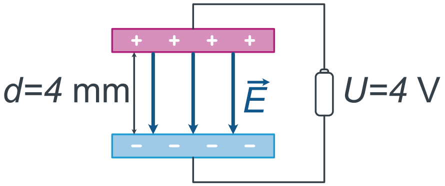
$$U = \frac{\Delta E_{\mathrm{pot}}}{q} = \frac{W}{q} = \frac{q \cdot (-E\vec{e}_z) \cdot (-d\vec{e}_z)}{q} = E \cdot d$$



Elektrisches Feld im Kondensator

$$\boxed{E = \frac{U}{d}} \qquad \text{Einheit: } [U] = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$$

U Spannung einer externen Spannungsquelle



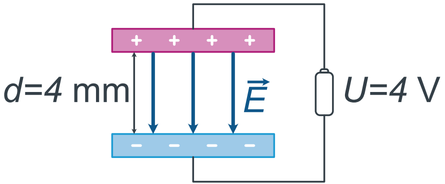
Elektrisches Feld im Kondensator

$$\boxed{E = \frac{U}{d}} \qquad \text{Einheit: } [U] = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$$

U Spannung einer externen Spannungsquelle

Stärke des Feldes

$$E = \frac{U}{d} = \frac{4\,\mathrm{V}}{4\,\mathrm{mm}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{mm}}$$



Feldstärke im Kondensator

- hängt nicht von der Fläche der Kondensatorplatten ab
- ist proportional zur Gesamtladung Q auf den Platten $E \sim Q$
- elektrische Feld wächst, wenn die gleiche Ladung auf einer kleineren Platte ist $E \sim \dfrac{1}{A}$

Feldstärke im Kondensator

- hängt nicht von der Fläche der Kondensatorplatten ab
- ist proportional zur Gesamtladung Q auf den Platten $E \sim Q$
- elektrische Feld wächst, wenn die gleiche Ladung auf einer kleineren Platte ist $E \sim \frac{1}{A}$

insgesamt

$$E \sim \frac{Q}{A}$$
$$\rightarrow Q \sim E \cdot A$$
$$\rightarrow Q = \varepsilon_0 \cdot E \cdot A$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}\,\frac{\mathrm{A\,s}}{V\,m}$ **elektrische Feldkonstante**

Einheiten $[\varepsilon_0] = \frac{[Q]}{[E] \cdot [A]} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V\,m^{-1}\,m^2}} = \frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}}$

Kapazität eines Kondensators C

$$Q = \underbrace{\frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d}}_{C} \cdot U = C \cdot U$$

Maß wieviel Ladung bei gegebener Spannung gespeichert werden kann

Einheit $[C] = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} = \mathrm{F}$ Farad

Kapazität eines Kondensators C

$$Q = \underbrace{\frac{\varepsilon_0 \cdot A}{d}}_{C} \cdot U = C \cdot U$$

Maß wieviel Ladung bei gegebener Spannung gespeichert werden kann

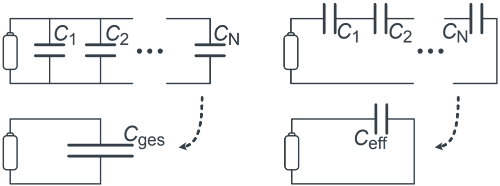
Einheit $[C] = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} = \mathrm{F}$ Farad

Die Kapazität hängt von der Geometrie des Kondensators ab:

- wächst, wenn die Fläche A wächst, da mehr Ladung gespeichert werden kann
- sinkt, wenn der Abstand der Platten wächst $\rightarrow$ E-Feld sinkt

Übungsaufgabe 10.7: Kondensator

Schaltungen mit Kondensatoren

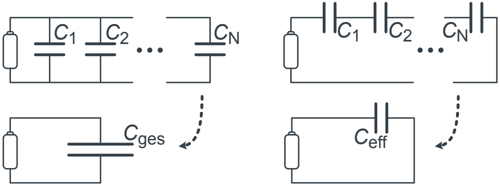


Parallelschaltung: Kapazitäten addieren sich

$$C_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

da sich die Flächen aufaddieren

Schaltungen mit Kondensatoren



Parallelschaltung: Kapazitäten addieren sich

$$C_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

da sich die Flächen aufaddieren

Reihenschaltung: Kehrwerte addieren sich zur effektiven Kapazität

$$\frac{1}{C_{\text{eff}}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i}.$$

Die Ladungen können sich auf den inneren Platten nicht halten $\rightarrow$ gleichen sich mit den benachbarten Platten aus

TED 20-5.54-F98

Wie berechnet sich die Gesamtkapazität C der abgebildeten Serienschaltung zweier Kondensatoren der Einzelkapazitäten C_1 und C_2?

A $C = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)$

B $C = C_1 + C_2$

C $C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

D $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1 + C_2}$

E $\frac{1}{C} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 \cdot C_2}$

TED 20-5.54-F98

Wie berechnet sich die Gesamtkapazität C der abgebildeten Serienschaltung zweier Kondensatoren der Einzelkapazitäten C_1 und C_2?

A $C = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)$

B $C = C_1 + C_2$

C $C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

D $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1 + C_2}$

E $\frac{1}{C} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 \cdot C_2}$

Energie im Kondensator

Gesamtenergie eines geladenen Kondensators: Aufladen

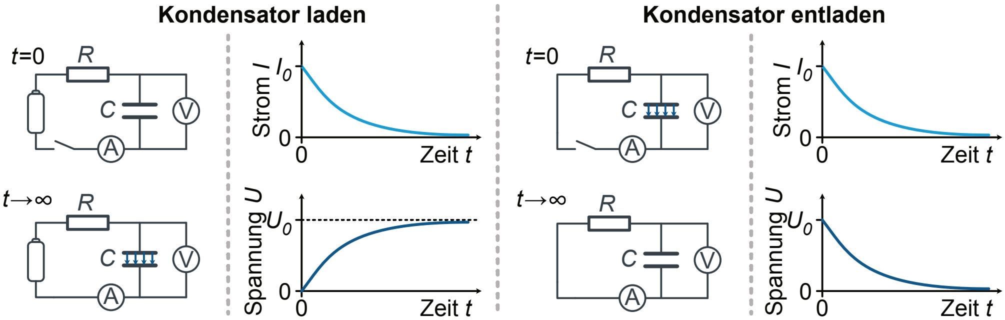
Immer mehr Ladungen gegen das wachsende Feld von der einen zur anderen Platte bringen

$\rightarrow$ Arbeit nimmt zu

$$
\begin{aligned}
W_{\mathrm{ges}} &= \sum_i W(q_i) = \sum_i \frac{W(q_i)}{\Delta q_i} \Delta q_i \\
&\rightarrow \int_0^Q U(q)\,\mathrm{d}q = \int_0^Q \frac{q}{C}\,\mathrm{d}q = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \\
&= \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2
\end{aligned}
$$

Laden und Entladen des Kondensator

Experiment



Laden des Kondensators

- $t = 0$: Ladungen fließen leicht von der einen Kondensatorplatte zur anderen $\rightarrow$ hoher Strom
- wachsendes elektrischen Feld $\rightarrow$ Ladungstransport zunehmend erschwert $\rightarrow$ Strom sinkt
- mit dem elektrischen Feld steigt die Spannung

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right) = I_0 e^{-t/\tau}$$

$$U(t) = U_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right)\right] = U_0 \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$\tau = \frac{1}{R \cdot C}$ *Zeitkonstante* des Schaltkreises

Entladen des Kondensators

- elektrische Feld und Spannung hoch $\rightarrow$ Ladungsträger werden von der Spannung durch den Stromkreis *gedrückt* $\rightarrow$ großer Strom
- elektrisches Feld und Spannung sinken $\rightarrow$ Ladungen weniger stark durch den Stromkreis *gedrückt* $\rightarrow$ Strom sinkt

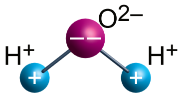
$$I(t) = -I_0 \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right) = -I_0 e^{-t/\tau}$$

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right) = U_0 e^{-t/\tau}$$

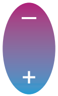
Dielektrikum im Kondensator

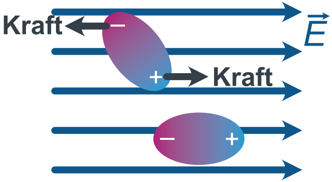
- Dielektrikum erhöht Kapazität
- Dielektrikum besteht aus Teilchen, die elektrisch neutral sind

Wassermolekül



Dipol-Modell

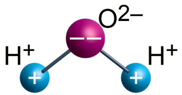




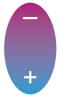
Dielektrikum im Kondensator

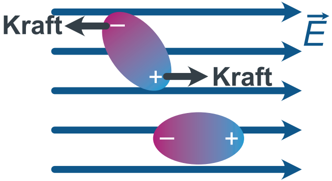
- Dielektrikum erhöht Kapazität
- Dielektrikum besteht aus Teilchen, die elektrisch neutral sind
- Wassermoleküle: positive und negative Ladung getrennt $\rightarrow$ **Dipol**
- Dipole richten sich entlang der Feldlinien aus $\rightarrow$ zusätzlichen Energiespeicherung

Wassermolekül

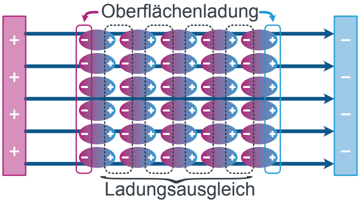


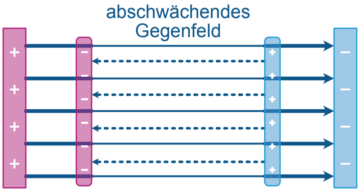
Dipol-Modell





Dielektrikum im Kondensator



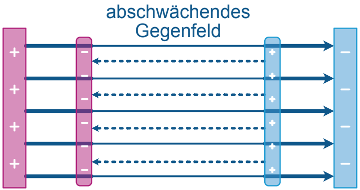


Die Feldlinien dieses dielektrischen Kondensators zeigen in die entgegengesetzte Richtung des eigentlichen Kondensators und schwächen diese dadurch ab

$$
\begin{aligned}
Q &= C \cdot U \quad \left| U = E \cdot d \right. \\
&= C \cdot d \cdot E \\
\Leftrightarrow C &= \frac{Q}{d \cdot E}
\end{aligned}
$$

Dielektrikum im Kondensator

Experiment



E-Feld wird kleiner: Kapazität steigt, wenn sich Ladung *Q* und Plattenabstand *d* nicht ändert

$$C_{\mathrm{Diel}} = \varepsilon_{\mathrm{r}} C_{\mathrm{Vakuum}}$$

Kondensator vollständig mit Dielektrikum gefüllt

ε_{r} **Dielektrizitätskonstante**