

1.1.2 Aufladen und Entladen eines Kondensators; elektrische Ladung; Definition der Kapazität

Ladung und Stromstärke

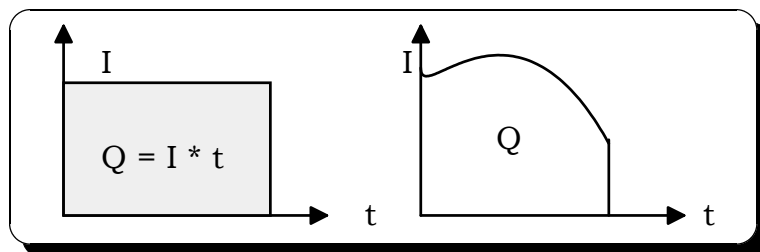
Die Einheit der Stromstärke wurde früher durch einen chemischen Prozess definiert; heute definiert man sie durch die Kraftwirkung zweier stromdurchflossener Leiter aufeinander.

Ferner gilt:

1. Zwei Ströme sind gleich, wenn sie bei gleicher Leiteranordnung die gleichen Kraftwirkungen hervorrufen.
2. Ein Strom I_2 ist n-mal so groß wie ein Strom I_1 , wenn er eine n-mal so große Kraftwirkung hervorruft wie der Strom I_1 .

Man stellt sich den elektrischen Strom als Bewegung geladener Teilchen vor. Für die elektrische Ladung hat man das Symbol Q eingeführt und folgende Zusammenhänge definiert:

1. Die Stromstärke I eines konstanten Gleichstroms ist gleich dem Quotienten aus Ladung Q und Zeit t : $I = \frac{Q}{t}$. Fließt die Ladung ΔQ während Δt nicht gleichmäßig, so gilt $I_{\text{mittl}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ $I_{\text{momentan}} = \frac{dQ}{dt}$.
2. Für die während t durch einen konstanten Gleichstrom I transportierte Ladung Q gilt: $Q = I \cdot t$ bzw. allgemein $Q = \int I \cdot dt$. Die beiden Zusammenhänge können so veranschaulicht werden:



Für die Einheit der Ladung gilt dann: $[Q] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ As} = 1 \text{ C}$ (Coulomb).

Die elektrische Ladung wird bereits im Unterricht der Mittelstufe durch geeignete Versuche qualitativ untersucht. Dabei erhält man folgende Ergebnisse:

1. Es gibt positive und negative elektrische Ladungen; damit hängen die Begriffe Elementarladung, Atomkern, Elektron, Positron, Ion zusammen.
2. Elektrische Ladungen erzeugen um sich ein elektrisches Vektorfeld.
3. Entgegengesetzte Ladungen ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab.
4. Positive und negative Ladungen gleicher Größe können einander neutralisieren.

-
5. Ladungen können durch Influenz getrennt werden.

Messung der elektrischen Ladung

Das Vorhandensein elektrischer Ladungen kann mit verschiedenen Geräten gemessen werden:

1. Das Elektrometer besteht aus einem Gehäuse und einem dagegen isolierten Zeigerpaar, das sich beim (gleichnamigen) Aufladen durch die entgegengesetzt wirkenden Kräfte spreizt.
2. Das ballistische Galvanometer ist ein Drehspulinstrument mit großer Schwingungsdauer, das bei kurzen Stromstößen mit einem zur geflossenen Ladung proportionalen Ausschlag reagiert.
3. Im stromempfindlichen Messverstärker wird der am Eingang auftretende Stromstoß so weit verstärkt, dass er mit relativ unempfindlichen Drehspulinstrumenten nachgewiesen werden kann.

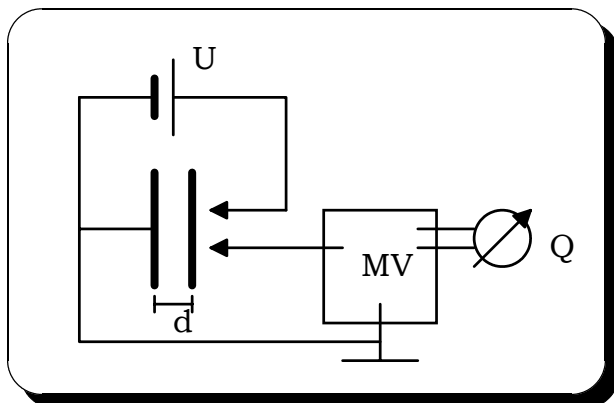
Der Kondensator

Definition: Zwei einander gegenüberstehende, durch ein isolierendes Medium getrennte Leiter bilden einen Kondensator. Im Sonderfall kann der zweite Leiter z. B. auch die Erde sein.

Grundidee zum Bau eines Kondensators ist es, möglichst große Ladungen Q je Spannung U auf den Kondensator zu bringen. Im einfachsten Fall handelt es sich bei einem Kondensator um zwei parallele, gegeneinander isolierte Platten (Plattenkondensator). Weitere gebräuchliche Kondensatortypen sind z. B. Kugel- und Blockkondensatoren.

Versuche mit Kondensatoren:

Versuch: Zwei Kondensatorplatten werden auf verschiedene Spannungen aufgeladen; die Ladungen werden nach Abtrennung der Kondensatorplatten von den Polen der Spannungsquelle mit einem empfindlichen Ladungsmessgerät gemessen (vgl. Skizze).



Ergebnisse: Auf beiden Platten befinden sich entgegengesetzte, aber gleich große Ladungen. Die Ladung auf einer Platte ist wesentlich größer als wenn nur eine Platte vorhanden ist und diese bei derselben Spannung geladen wird. Die Ladungen sind direkt proportional zur jeweils angelegten Spannung, d. h. $Q \sim U$.

Versuch: Bei fester Spannung zwischen den Kondensatorplatten wird der Plattenabstand variiert.

Ergebnis: Die Ladung Q ist indirekt proportional zum Plattenabstand d , d. h. $Q \cdot d = \text{const.}$ bzw. $Q \sim \frac{1}{d}$.

Versuch: Bei fester Spannung U zwischen den Kondensatorplatten und konstantem Plattenabstand d wird die Plattenfläche A variiert.

Ergebnis: Die Ladung Q ist proportional zur Plattenfläche A , d. h. $Q \sim A$.

Anmerkung: Unter der Ladung Q eines Kondensators versteht man die Elektrizitätsmenge auf einer der beiden Platten; die Gesamtladung auf beiden Kondensatorplatten wäre ja in jedem Fall Null!

Auswertung: Die Größe $\frac{Q}{U}$ ist offensichtlich eine für einen Kondensator kennzeichnende Größe; sie gibt an, wie groß die Ladung ist, die je 1 Volt angelegte Spannung auf jede Platte gebracht werden kann. $\frac{Q}{U}$ ist ein Maß für das "Fassungsvermögen" eines Kondensators und wird als Kapazität C bezeichnet.

Es ist offensichtlich, dass die Kapazität eines Kondensators von seiner Geometrie abhängt. Aus den Ergebnissen der letzten Versuche,

$$Q \sim A \text{ und } Q \sim \frac{1}{d}$$

bei Konstanz der jeweils übrigen Parameter, folgt unmittelbar

$$Q \sim \frac{A}{d}.$$

Da die beiden letzten Versuche bei konstanter Spannung durchgeführt wurden, gilt auch - wenngleich mit einer anderen Proportionalitätskonstanten -

$$\frac{Q}{U} \sim \frac{A}{d} \text{ bzw.}$$

$$\frac{Q}{U} = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}.$$

Anmerkung: Der letzte Zusammenhang gilt nur im Vakuum und für einen Plattenkondensator. Die Proportionalitätskonstante ϵ_0 heißt Influenzkonstante (Dielektrizitätskonstante).

Zusammenfassung: Die Platten eines Kondensators tragen einander entgegengesetzte, gleich große Ladungen. Diese Ladungen sind der Spannung U zwischen den entgegengesetzt geladenen Teilen direkt proportional:

$$Q = C \cdot U.$$

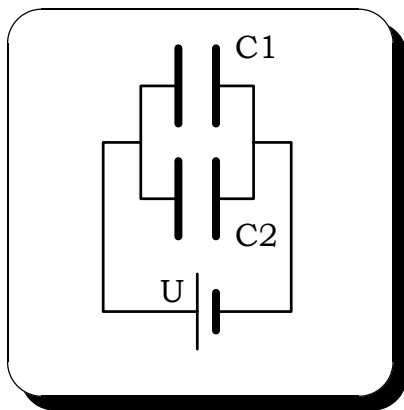
Unter der Kapazität C eines beliebigen Kondensators versteht man den von der Spannung unabhängigen Quotienten aus der Ladung Q und der Spannung U : $C = \frac{Q}{U}$. Die Einheit der Kapazität ist $1 \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1 \text{ Farad} = 1\text{F}$. Die Kapazität C eines Plattenkondensators ist der Plattenfläche A und dem

Kehrwert $\frac{1}{d}$ des Plattenabstands d proportional, solange das Feld hinreichend homogen ist: $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$. ϵ_0 heißt Dielektrizitätskonstante, ϵ_r ist eine Materialkonstante.

Kondensatorschaltungen

Wie andere elektrische Bausteine können auch Kondensatoren grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten zusammenschaltet werden, parallel und hintereinander. Für jede dieser Arten kann die Ersatzkapazität berechnet werden.

a) Parallelschaltung:



Zwischen den Verzweigungspunkten A und B liegt an jedem Kondensator dieselbe Spannung U . Auf die einzelnen Kondensatoren fließen dann folgende Ladungen:

$$Q_1 = C_1 \cdot U, \quad Q_2 = C_2 \cdot U, \quad Q_3 = C_3 \cdot U.$$

In der Sammelleitung fließt dann bei Be- oder Entladung des Kondensators insgesamt die Ladung

$$Q_{\text{ges}} = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) \cdot U.$$

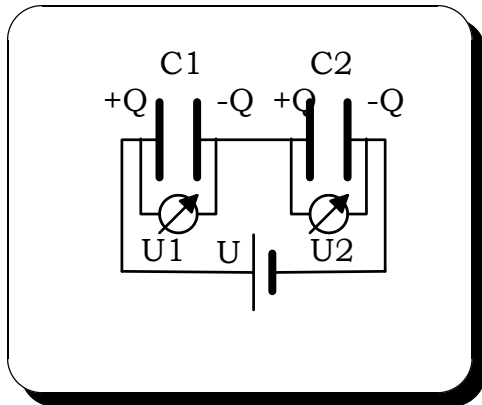
Die Parallelschaltung kann man sich durch einen Kondensator ersetzt denken, der die Kapazität

$C = \frac{Q_{\text{ges}}}{U}$ haben muss. Der Vergleich der letzten beiden Gleichungen liefert sofort

$$\frac{Q_{\text{ges}}}{U} = C_{\text{ges}} = C_1 + C_2.$$

Durch Parallelschaltung der Einzelkapazitäten wird also die Gesamtkapazität erhöht!

b) Serienschaltung:



Durch die Spannungsquelle erhalten nur die linke Platte des linken Kondensators die Ladung $+Q$ und die rechte Platte des rechten Kondensators die Ladung $-Q$ direkt zugeführt. Auf der rechten Platte des linken Kondensators wird aber eine Ladung $-Q$ induziert; dies wiederum hat eine Ladung $+Q$ auf der linken Platte des mittleren Kondensators zur Folge usw. Jede Platte der hintereinander geschalteten Kondensatoren trägt also eine dem Betrag nach gleiche Ladung Q . Die angelegte Teilspannung U teilt sich dagegen auf die Teilspannungen U_1 und U_2 an den einzelnen Kondensatoren auf.

Da sich aus der Kondensatorgleichung

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

unmittelbar

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

ergibt, folgt für die gemeinsame Ladung Q :

$$Q = C \cdot U = C \cdot (U_1 + U_2) \text{ bzw.}$$

$$U = \frac{Q}{C} = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2},$$

woraus durch Division durch Q sofort die Gleichung

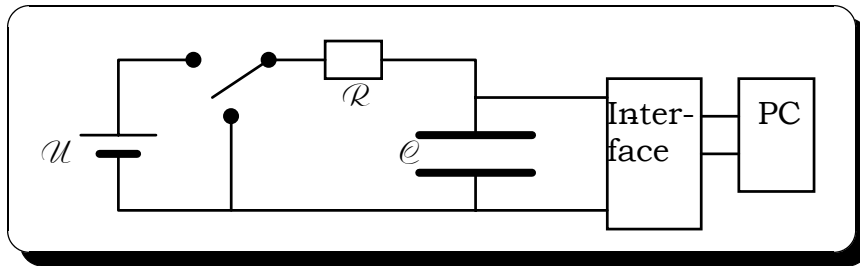
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \text{ folgt.}$$

Die Schaltung von Kondensatoren gehorcht also Gesetzen derselben Struktur wie die Schaltung von Widerständen, wenngleich die einzelnen Formeln "vertauscht" werden müssen.

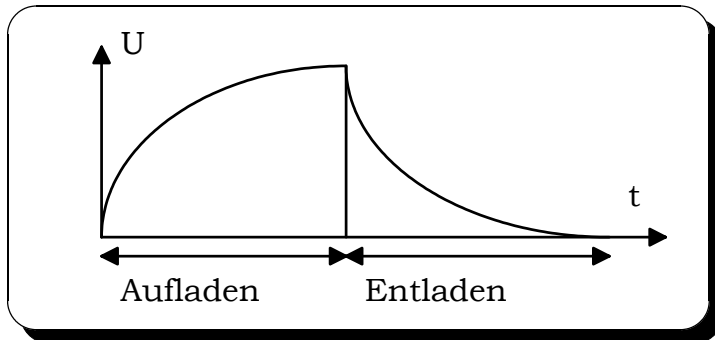
Laden und Entladen eines Kondensators

Während des Ladens bzw. Entladens eines Kondensators verlaufen Kondensatorspannung und Lade- bzw. Entladestrom nicht linear, wie der nachfolgende Versuch zeigt.

V.: Die zeitliche Abhängigkeit der Kondensatorspannung beim Laden bzw. Entladen eines Kondensators wird mit Hilfe eines Interfaces und eines geeigneten Auswertungsprogramms untersucht (vgl. die nachfolgende Schaltskizze).



Ergebnisse:



Die Kondensatorspannung zeigt beim Laden wie beim Entladen einen exponentiellen Verlauf.

Anmerkungen:

1. Der exponentielle Spannungsverlauf lässt sich z. B. dadurch zeigen, dass man die Spannung in logarithmischem Maßstab aufträgt; dann verlaufen die Graphen jeweils linear.
2. Die Lade- und Entladezeiten hängen von der Kondensatorkapazität und der Größe des Widerstandes ab.