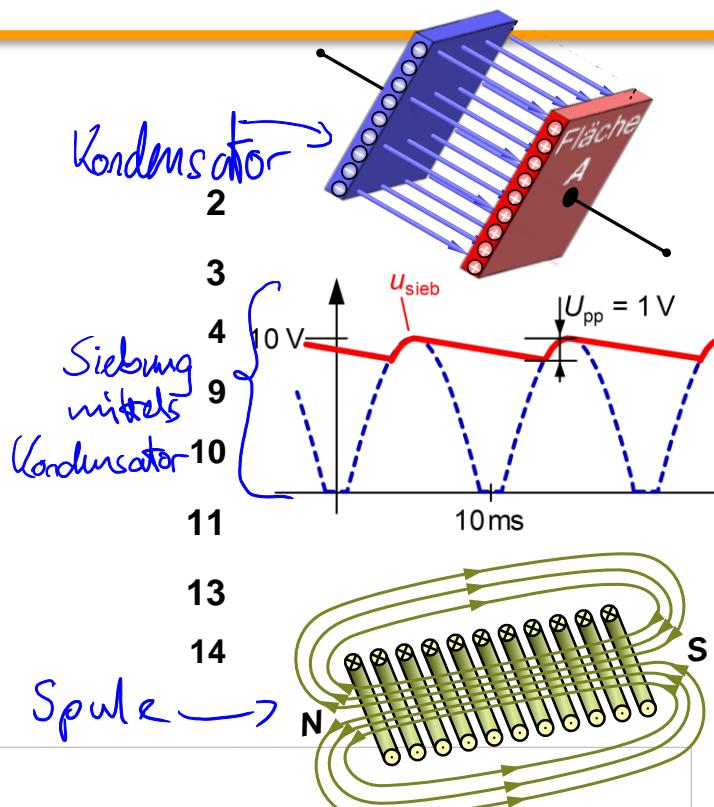


Reaktive Bauelemente:

Kondensator & Induktivität

Inhalt dieses Kapitels:

- Elektrisches Feld
- Kondensator
 - Kenngrößen
 - Anwendung in der IT
 - Entladung über einen Widerstand
- Magnetfeld
- Induktion
 - Transformator & Spule



Lernziele dieses Kapitels:

- ⇒ In diesem Kapitel lernen Sie, wie sich Kraft mit elektrischen und magnetischen Feldern erzeugen lässt, und auf welche Weise Kondensatoren und Induktivitäten Energie speichern.
- ⇒ Außerdem verstehen Sie die Funktion und kennen Anwendungsbeispiele von Kondensatoren, Transformatoren und Spulen in der Informationstechnik!

Taxonomie Kompetenzart	Kennen	Können	Verstehen
Fach-kompetenz	Ausprägung elektrischer und magnetischer Felder; Prinzip eines Transformators; Energieinhalt des Kondensators;	Bestimmung der Kraft und deren Richtung in el. & magn. Feldern; Ausgleichsvorgang: Ladung und Entladung eines Kondensators; Berechnung aller elektrischen Größen an einem idealen Transformator	Schaltung und Dimensionierung eines Kondensators zur Spannungsglättung nach einem Gleichrichter
Methoden-kompetenz		Bestimmung der Richtung der Lorenzkraft mit der Rechte-Hand-Regel	
Persönliche & soziale Kompetenz		Planung des Semesters: Sollte jetzt wirklich verinnerlicht sein...	Erkennen des Nutzens des Vorlesungsbesuchs ☺ → Freiwilliges Erscheinen, nicht aus Pflichtgefühl !



Elektrisches Feld

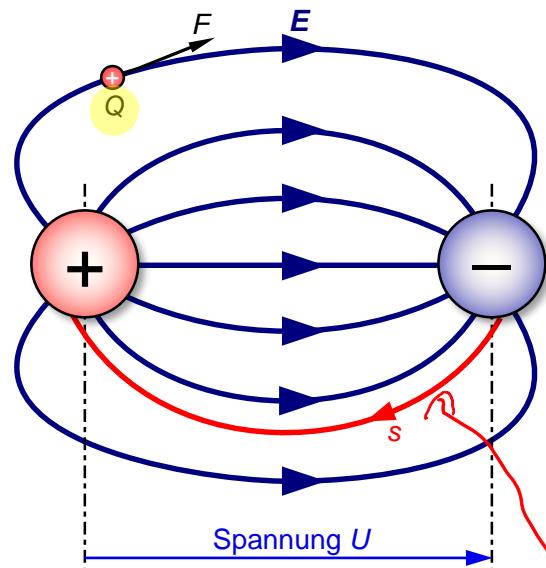
Der Kondensator in der IT

Elektrisches Feld

Feldlinien

Bereits im Kap. 1 wurde das elektrische Feld erwähnt, zur Definition der elektrischen Spannung: Zwischen geladenen Elektroden (Polen) gibt es immer ein elektrisches Feld in Richtung der Potentialdifferenz, also in Richtung der elektrischen Spannung. **Feldlinien** zeigen die Richtung und die Stärke des elektrischen Feldes:

- Elektrische Feldlinien beginnen an positiv geladenen und enden an negativ geladenen Körpern¹⁾.
- Auf der Oberfläche elektrisch leitender Körper stehen elektrische Feldlinien immer senkrecht.
- Je dichter die Feldlinien, desto stärker das Feld.
- Elektrische Feldlinien schniden sich nicht!



Auf eine Probeladung (**Bild o.**) Q im Feld²⁾ wirkt die Kraft F . Sie wirkt in Richtung der Feldlinie und ist proportional zur Ladung. Das Verhältnis aus

Kraft und Ladung ist die **elektrische Feldstärke E** :

$$E = \frac{F}{Q}$$

$$F = Q \cdot E$$

Um die nötige **Arbeit W_{\pm}** zu bestimmen, um die Probeladung entlang einer Feldlinie von der negativen zur positiven Ladung zu bringen, muss das Integral der Kraft über dem Weg berechnet werden.

$$\Delta W = F \cdot \Delta s = Q \cdot E \cdot \Delta s$$

$$W_{\pm} = \int_{\text{Weg } s} Q \cdot E \cdot ds$$

$$U = \frac{W_{\pm}}{Q} = \int_{\text{Weg } s} E \cdot ds$$

Damit ergibt sich (nach Kap. 1) wieder die **elektrische Spannung U** , als die pro Ladung aufzuwendende Arbeit:

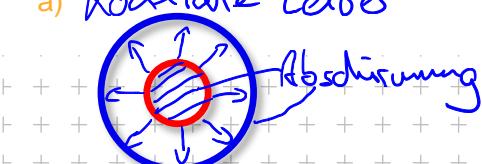
Im Umkehrschluss lässt sich die **elektrische Feldstärke E** also auch als **elektrische Spannung ΔU** pro Feldlinienstrecke Δs auffassen:
Die Einheit ist $[E] = \text{V/m}$ (Volt pro Meter).

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta s}$$

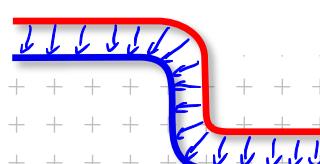
Beispiel Leiterformen und deren Feldstärkeverlauf

Skizzieren Sie Verlauf und Dichte der Feldlinien zwischen dem **positiven** und **negativen** Leiter:

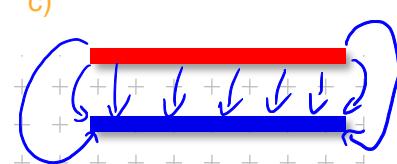
a) **Koaxiale Leiter**



b)



c)



¹⁾ Ausnahme: Es entstehen geschlossene elektrische Feldlinien senkrecht um sich ändernde Magnetfelder (Faraday'sches Induktionsgesetz)

²⁾ Die von der Probeladung selbst ausgehende und beigetragene Feldstärke wird hierbei nicht berücksichtigt!



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT

Magnetfeld Induktion

Transformator & Spule

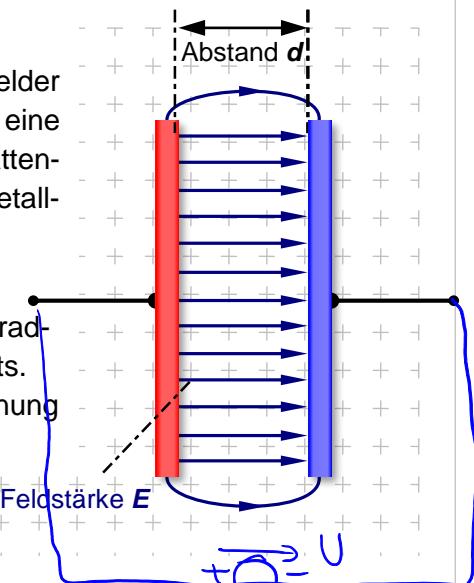
Plattenkondensator – Feldstärke und elektrische Flussdichte

Das homogene Feld eines Plattenkondensators

Da die Feldlinien senkrecht auf Leitern stehen, sind elektrische Felder im Allgemeinen inhomogen, d.h. überall im Raum hat das Feld eine andere Stärke und Richtung. Einen Sonderfall stellt der sog. Plattenkondensator dar, bei dem sich zwei unterschiedlich geladene Metallplatten im **Abstand d** parallel gegenüber stehen.

Wenn die Ausdehnung der Platten groß ist gegenüber s , so werden die Feldlinien im Inneren des Kondensators senkrecht, geradlinig und in gleichem Abstand auf den Platten stehen, s. **Bild** rechts. Da die Feldstärke somit überall konstant ist, kommt deren Berechnung ohne Differential aus:

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



~~Elektrische Flussdichte Flächenladungsdichte~~

Die Ladung Q und die Spannung U an einem Kondensator sind nicht unabhängig voneinander. Es gibt einen festen Zusammenhang zwischen der Feldstärke E und der sogenannten **Flächenladungsdichte σ** auf den Platten ist:

- Fluss- und Flächenladungsdichte haben die Einheit $[\sigma] = \text{C/m}^2$ (Coulomb pro Quadratmeter).
- Die Proportionalitätskonstante ϵ heißt **Permittivität**, sie hat die Einheit $[\epsilon] = \text{C/Vm}$ (Coulomb pro Voltmeter).

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \epsilon \cdot E$$

Ladung
Fläche

$Q \sim \text{Fläche } A \sim \frac{Feldstärke}{\epsilon}$

$$Q = \epsilon \cdot E \cdot A = \epsilon \cdot \frac{U}{d} \cdot A$$

Ladung auf einem luftgefüllten Plattenkondensator

Mit der vorherigen Formel $D = \epsilon \cdot E$ lässt sich die Ladung Q eines Kondensators bei der Spannung U bestimmen:

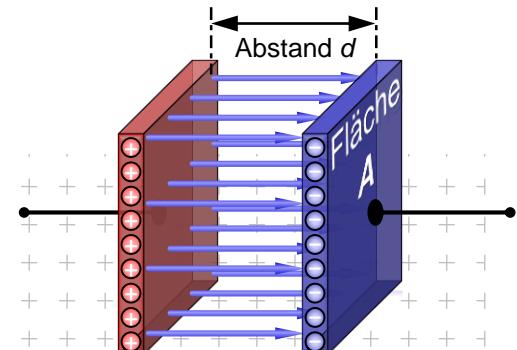
Die **Permittivität ϵ** ist eine Konstante, die vom Dielektrikum (d.h. dem Isoliermaterial) zwischen den Kondensatorplatten abhängt.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$$

ϵ_0 ist die **elektrische Feldkonstante** (alte Bezeichnung *Dielektrizitätskonstante*), und ϵ_r die **relative Permittivität** (alte Bez. *Dielektrizitätszahl*).

Wäre zwischen den Kondensatorplatten Vakuum oder Luft, so wie im **Bild** rechts, dann gilt $\epsilon = \epsilon_0$, d.h. $\epsilon_r = 1$.





Elektrisches Feld

Kondensator

Der Kondensator in der IT

Magnetfeld

Induktion

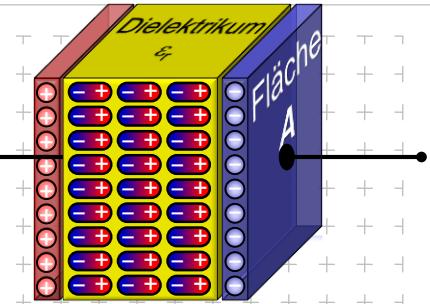
Transformator & Spule

Kondensator – Kapazität

Ladung auf einem Plattenkondensator mit Dielektrikum

Andere Dielektrika haben Dielektrizitätszahlen > 1 , d.h. auf Grund von molekularen Polarisationseffekten bewirken sie eine Erhöhung der Flussdichte D , und damit der Ladung, die nötig ist, um eine bestimmte Spannung zwischen den Platten aufzubauen, s. Bild rechts.

Flächenladungsdichte σ



Die nebenstehende **Tabelle** zeigt die Dielektrizitätszahlen einiger Dielektrika, die teilweise erheblich größer als 1 sein können:

Isolierstoff	ϵ_r
Luft	1
Silikonöl	2,8
Hartpapier	4...8
Glas	4...8
Keramik	10...10000

Kapazität eines Plattenkondensators

Die **Kapazität C** eines Kondensators quantifiziert die Ladung, die er bei einer bestimmten Spannung speichert:

Die Einheit der Kapazität ist
[C] = C/V = F (Farad¹⁾)

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

(aus $Q = \epsilon \cdot \frac{U}{d} \cdot A$ aus(3))

Beispiel Kapazität eines Kondensators

Ein Plattenkondensator mit dem Plattenabstand 0,5 mm hat eine Plattenfläche von 30 cm².

Welche Kapazität hat der Kondensator, wenn folgende Dielektrika zum Einsatz kommen:

- a) Luft,
- b) Hartpapier.

Geben Sie die Kapazität in Farad an, mit dem korrekten SI-Präfix.

c) Welche Ladung Q kann der Kondensator abgeben, nachdem er auf 10 V geladen wurde?

$$a) C = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/Vm} \cdot 1 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 53 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$b) C = \epsilon_0 \cdot 6 \cdot 6 \text{ m} = 319 \text{ pF}$$

$$c) Q = U \cdot C$$

¹⁾ nach Michael Faraday (1791-1867), englischer Physiker und Chemiker



Elektrisches Feld
Kondensator

Der Kondensator in der IT
Magnetfeld
Induktion
Transformator & Spule

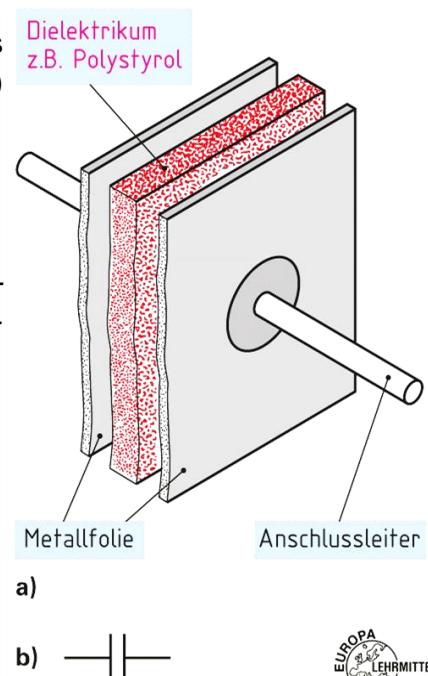
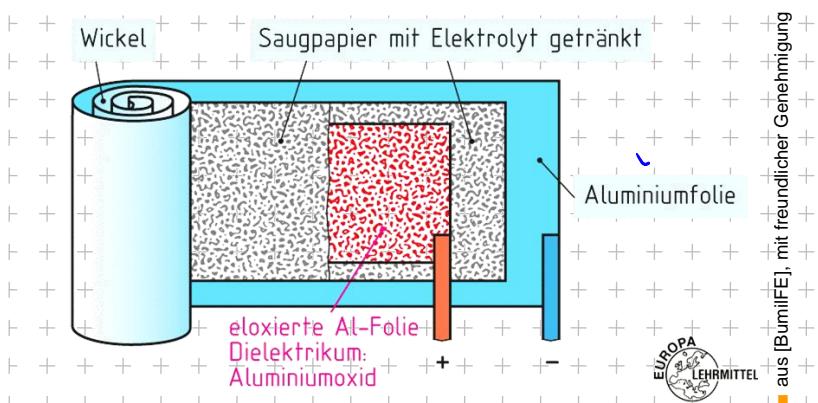
Kondensator – Bauformen und Schaltzeichen

Der Kondensator als Bauelement

Kondensatoren sind im einfachsten Fall aufgebaut, wie der bereits behandelte Plattenkondensator, dargestellt im Bild rechts oben (a) mit dem Schaltzeichen (zwei Kondensatorplatten) darunter (b).

In der Praxis gibt es eine grobe Unterscheidung in

- ungepolte Kondensatoren, und
- gepolte Kondensatoren. Bei diesen sog. *Elektrolytkondensatoren* (Elkos, siehe Bild unten) ist das Dielektrikum eine hauchdünne Oxidschicht, die durch falsche Polarität zerstört würde:

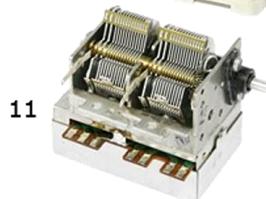


Schaltzeichen Elko.

Festkondensatoren



einstellbare Kondensatoren



Festkondensatoren:

- 1: SMD-Kondensatoren
- 2: Gepolte SMD-Elektrolytkondensatoren (Elko)
- 3: Gepolte Elektrolytkondensatoren
- 4: Gepolte Gold-Cap Kondensatoren (hohe Kapazität, sehr geringe Spannungsfestigkeit),
- 5: Keramikkondensatoren
- 6: MK-Kondensator (Metall-Kunststoff, selbstheilend bei Spannungsdurchschlag),
- 7: MK-Kondensator für hohe Spannungen.

Einstellbare Kondensatoren:

- 8: SMD-Trimmkondensatoren
- 9: Trimmkondensator
- 10: Kleiner Plattendrehkondensator für Radiogeräte
- 11: Plattendrehkondensator (einschließlich Tuner) eines alten Radioempfängers.

SMD → Surface-Mounted Device, Bauelement für die Oberflächenmontage

■ aus [KläEF], mit freundlicher Genehmigung



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT Magnetfeld Induktion Transformator & Spule

Kondensator – Übungsaufgaben

Energieinhalt eines Kondensators

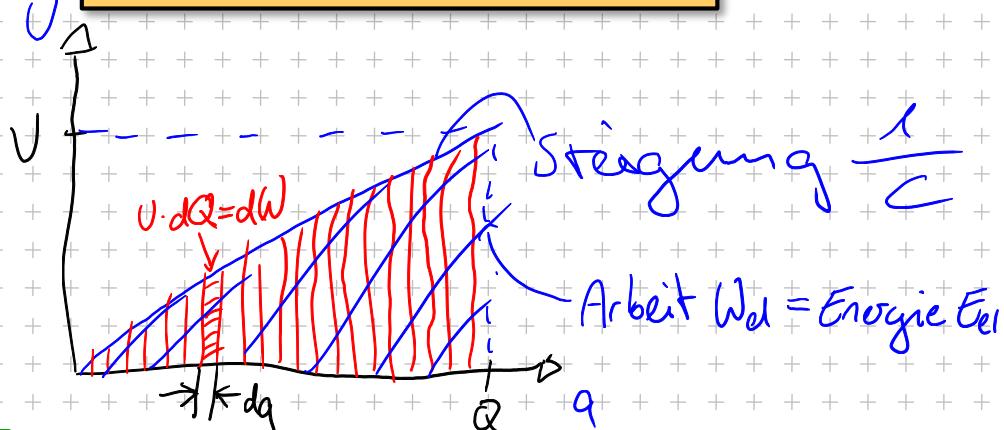
Beim Aufladen eines Kondensators auf die Spannung U muss die Ladung $Q = U \cdot C$ auf die Platten transportiert werden. Zur Berechnung der dazu nötigen elektrischen Arbeit W_{el} kann die Formel $W_{el} = U \cdot \Delta Q$ aus Kap. 1 genutzt werden. Allerdings ist die Spannung U beim Aufladevorgang nicht konstant, sondern steigt monoton mit zunehmender Ladung an (daher die Verwendung von Kleinbuchstaben):

$$u = \frac{q}{C}$$

Die **Gesamtarbeit** W_{el} beim Aufladen (entspricht dem **Energieinhalt** E_{el} des Kondensators) mit der Ladung $Q = C \cdot U$ ergibt sich dann durch Integration von $dW_{el} = u \cdot dq$:

$$W_{el} = E_{el} = \int_0^Q \frac{q}{C} \cdot dq = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$$



Übungsaufgabe Vergleich Kondensator ↔ Akku

⇒ Welche Kapazität müsste ein Kondensator haben, damit er bei 12 V die gleiche Energie speichern kann, wie eine Autobatterie mit 32 Ah?

$$\text{- Batterie: } E_{el} \approx Q \cdot U = 32 \text{ Ah} \cdot 12 \text{ V} = 384 \text{ Wh} = 1,38 \text{ MJ}$$

als Konstante e angenommen

$$\text{- Kondensator: } E_{el} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \Rightarrow C = \frac{2 E_{el}}{U^2} = 13,1 \text{ kF}$$

Übungsaufgabe Umrechnung Einheitenpräfixe

Geben Sie die Kapazität des dargestellten Kondensators an,

- a) in „nF“,
- b) in „pF“.





Elektrisches Feld

Der Kondensator in der IT

Induktion Transformator & Spule

Parallelschaltung von Kondensatoren

■ **Anschauliche Darstellung**

Wird – wie im **Bild** rechts – angenommen, dass zwei parallel geschaltete Kondensatoren C_1 und C_2 in Plattenbauweise mit identischem Abstand d aufgebaut sind; so unterscheiden sie sich nur durch ihre Plattenflächen A_1 und A_2 :

$$A_1 = C_1 \cdot \frac{d}{\epsilon} ; \quad A_2 = C_2 \cdot \frac{d}{\epsilon}$$

Die Parallelschaltung der beiden Kondensatoren wirkt wie ein einziger Kondensator mit der Fläche

$$A_g = A_1 + A_2$$

weil d und U
identisch sind

■ Berechnung der Gesamtkapazität

$$C_g = \epsilon \cdot \frac{A_g}{d} = \epsilon \cdot \frac{A_1 + A_2}{d} = C_1 + C_2$$

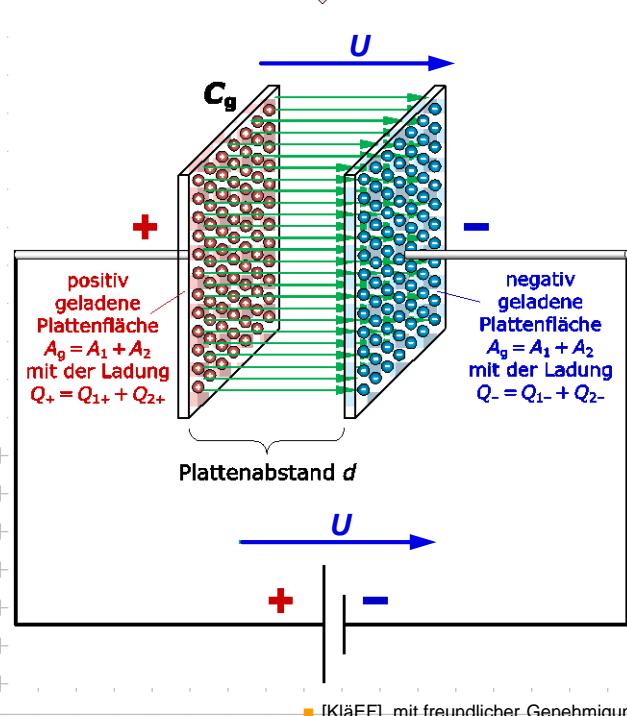
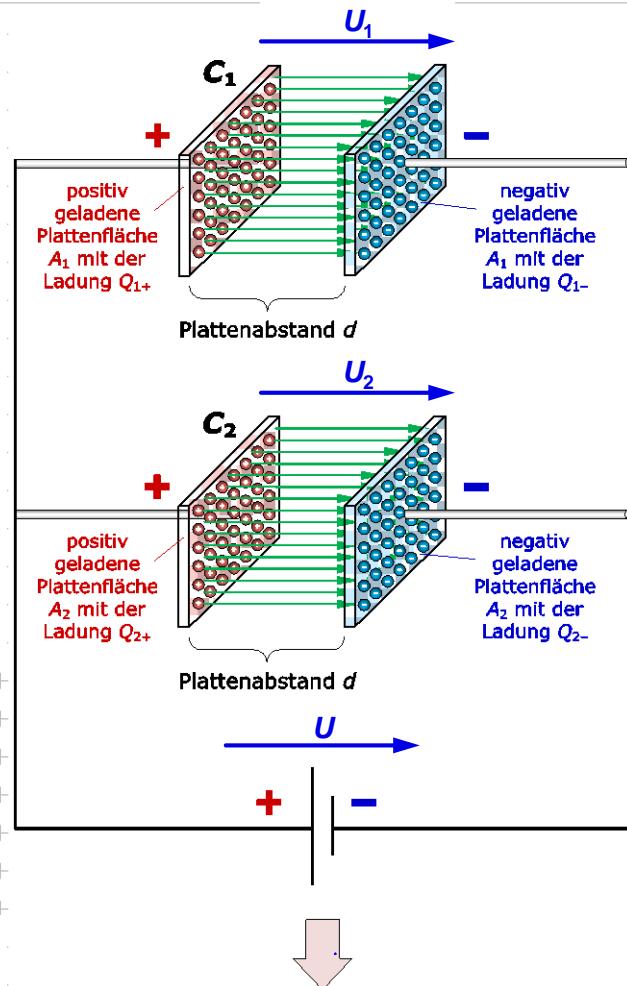
Allg.:

$$C = \sum_{\text{alle } M} C_n$$

Übungsaufgabe Parallelschaltung

Zwei Kondensatoren $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und $C_2 = 2200 \text{ nF}$ werden parallel geschaltet.

⇒ Berechnen Sie die Gesamtkapazität!



Reihenschaltung von Kondensatoren

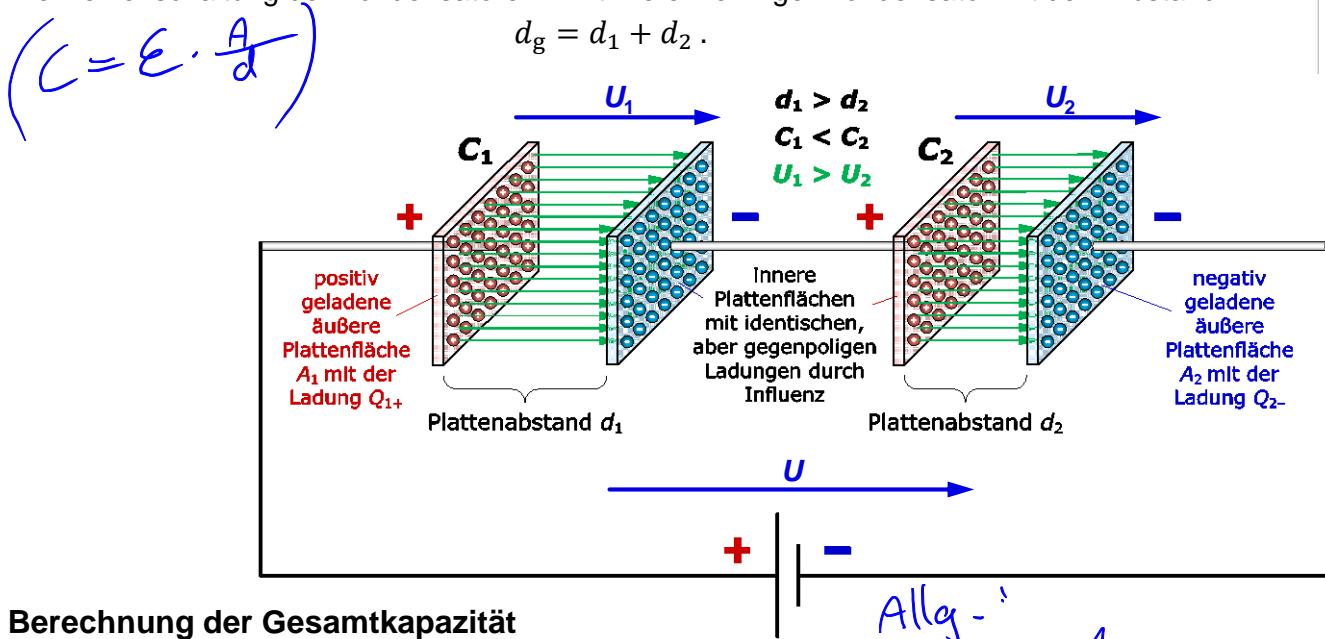
■ Anschauliche Darstellung

Wird – wie im **Bild** unten – angenommen, dass zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren C_1 und C_2 in Plattenbauweise mit identischer Fläche A aufgebaut sind; so unterscheiden sie sich nur durch ihre Plattenabstände d_1 und d_2 :

$$d_1 = \frac{A \cdot \epsilon}{C_1} \quad ; \quad d_2 = \frac{A \cdot \epsilon}{C_2}$$

Die Reihenschaltung der Kondensatoren wirkt wie ein einziger Kondensator mit dem Abstand

$$d_g = d_1 + d_2.$$



■ Berechnung der Gesamtkapazität

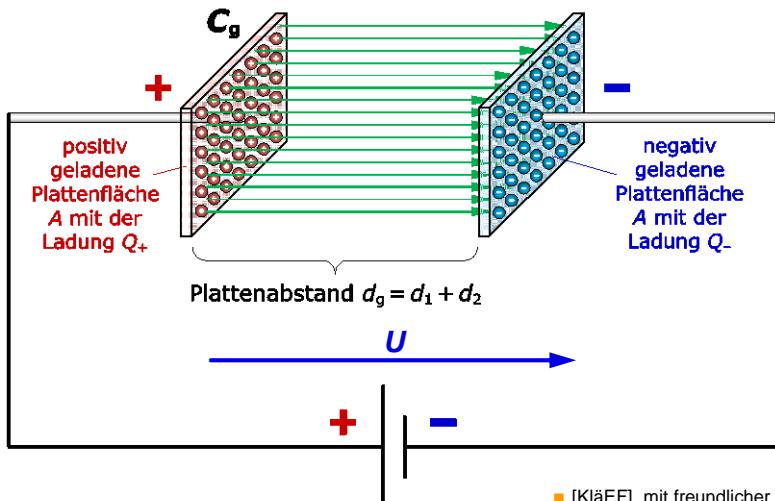
$$C_g = \epsilon \cdot \frac{A}{d_g} = \epsilon \cdot \frac{A}{d_1 + d_2}$$

$$= \epsilon \cdot \frac{A}{\frac{A \cdot \epsilon}{C_1} + \frac{A \cdot \epsilon}{C_2}}$$

$$= \epsilon \cdot \frac{A}{\frac{A \cdot \epsilon}{C_1} + C_2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

mit der
z. Vord.

$$Alg^{-1} = \frac{1}{\sum_{allC} \frac{1}{C_n}}$$



Zwei Kondensatoren

$C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und $C_2 = 2200 \text{nF}$
werden in Reihe geschaltet.

⇒ Berechnen Sie C_a .

- [KläEF], mit freundlicher Genehmigung



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator Magnetfeld

Induktion Transformator & Spule

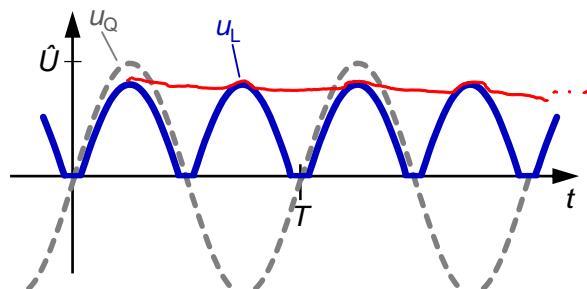
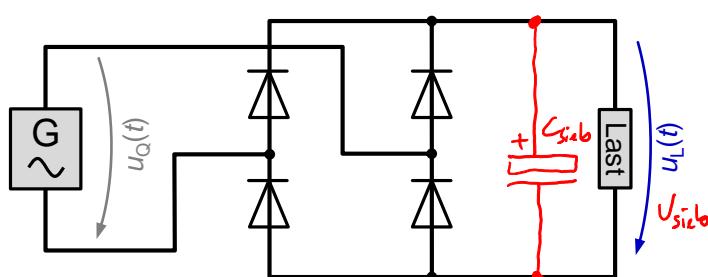
Kondensator – Anwendung in der IT

Qualitative Beschreibung der Funktion eines Kondensators in der Schaltung

Der Kondensator ist bestrebt, durch Aufnahme oder Abgeben von Ladung die Spannung an seinen Polen konstant zu halten. Er wird meist in Parallelschaltung genutzt.

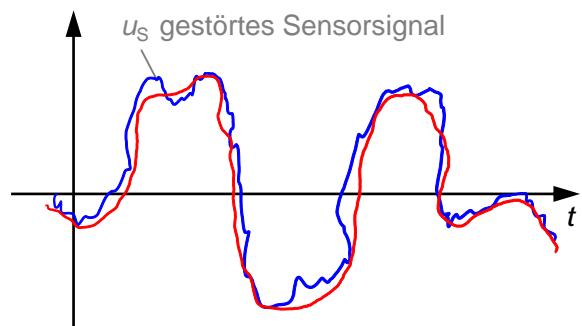
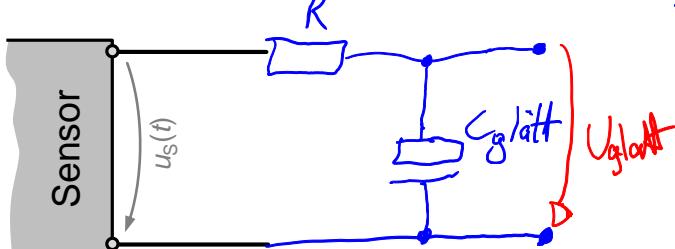
Je größer sein Kapazitätswert, desto kleiner ist die resultierende Spannungsänderung.

Siebung einer pulsierenden Gleichspannung



Unterdrückung von Rauschen und Störungen von Sensoren

"RC-Glied / Tiefpassfilter" zur Glättung



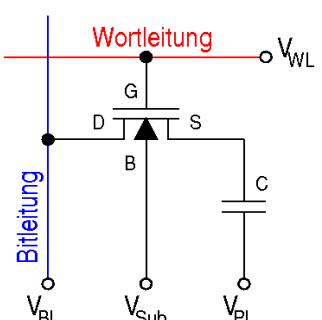
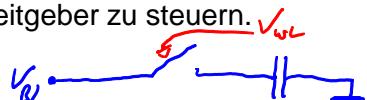
Zeit- und Frequenzbasis

Die Zeit, die ein Kondensator benötigt, um wiederholt mit einem bestimmten Widerstand aufgeladen zu werden, lässt sich als Takt verwenden, um Prozessoren oder Zeitgeber zu steuern. V_{WL}

Speichern von Daten

z.B. in einer D-RAM-Speicherzelle (speichert nur ein einziges Bit):

- Die Aufladung der **Kapazität C** definiert, ob eine „0“ oder eine „1“ im Speicher abgelegt wird.
- Speichern: Setzen der Spannung an der betreffenden Bitleitung und gleichzeitiges Setzen der Wortleitung.
- Auslesen: Setzen der Spannung an der betreffenden Wortleitung, danach **Auslesen** der Ladung an der Bitleitung.



commons.wikimedia.org



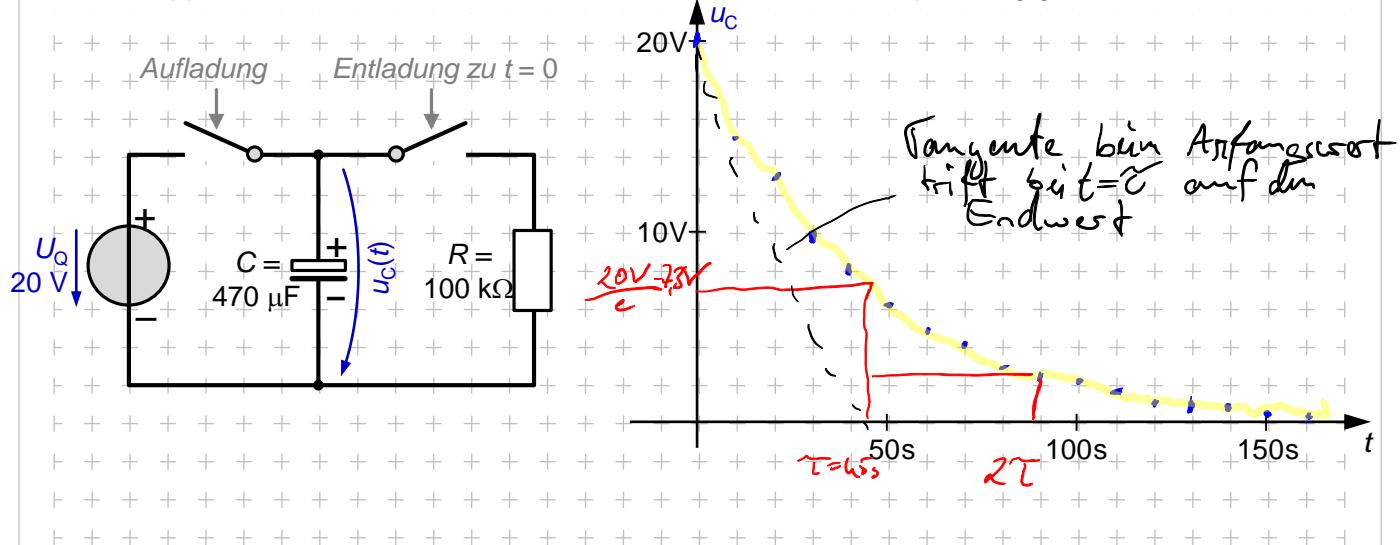
Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT Magnetfeld Induktion Transformator & Spule

Kondensator – Entladung über einen Widerstand

Demonstration Entladung eines Elektrolytkondensators

Ein Elektrolytkondensator $C = 470 \mu\text{F}$ wird auf $U_Q = 20 \text{ V}$ aufgeladen. Der anschließende Entladevorgang erfolgt über einen Widerstand mit $R = 100 \text{ k}\Omega$. Während des Entladevorgangs wird mit einer Stoppuhr und einem Voltmeter der Verlauf der Kondensatorspannung gemessen:



Formel für die Entladekurve

Der Entladeprozess stellt einen sog. **Ausgleichsvorgang** dar, denn die Änderungsgeschwindigkeit der Kondensatorspannung (d.h. deren Ableitung) du_C/dt ist proportional zur Spannung u_C selbst.

Die Spannung gehorcht der Formel

$$u_C = U_Q \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit der Zeitkonstante } \tau = R \cdot C \rightarrow$$

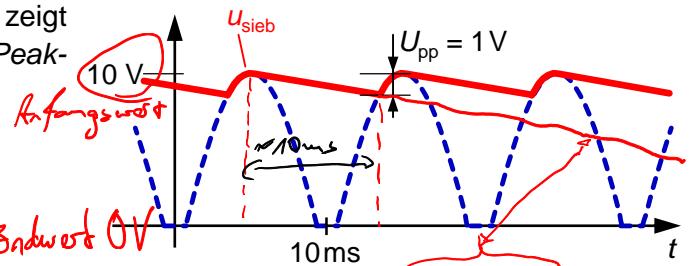
exponentieller Abfall

Abfall $1/e \approx 37\% \text{ bei } t=\tau$

Beispiel Auslegung der Siebung einer pulsierenden Gleichspannung

Eine Wechselspannung wird mittels Brückengleichrichter gleichgerichtet (siehe Seite 9), und mit Hilfe eines Sieb-Elkos geglättet. Das Bild rechts zeigt den Verlauf der Spannung u_{sieb} , die Welligkeit (Peak-to-Peak-Spannung) beträgt $U_{pp} = 1 \text{ V}$.

- Wie groß ist die Zeitkonstante τ etwa?
- Der Laststrom beträgt $I_L = 1 \text{ A}$. Wie groß ist die Kapazität C des Siebkondensators?



a.) Zeitkonstante τ : Tangente schneidet die t -Achse bei $t = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ V}} \cdot 10 \text{ ms} = 100 \text{ ms}$

b.) Lastwiderstand $R_L = \frac{U}{I_L} \approx \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 10 \Omega$

Kapazität $C = \frac{\tau}{R_L} = \frac{100 \text{ ms}}{10 \Omega} = 10 \text{ mF} = 10.000 \mu\text{F}$



Elektrisches Feld Kondensator

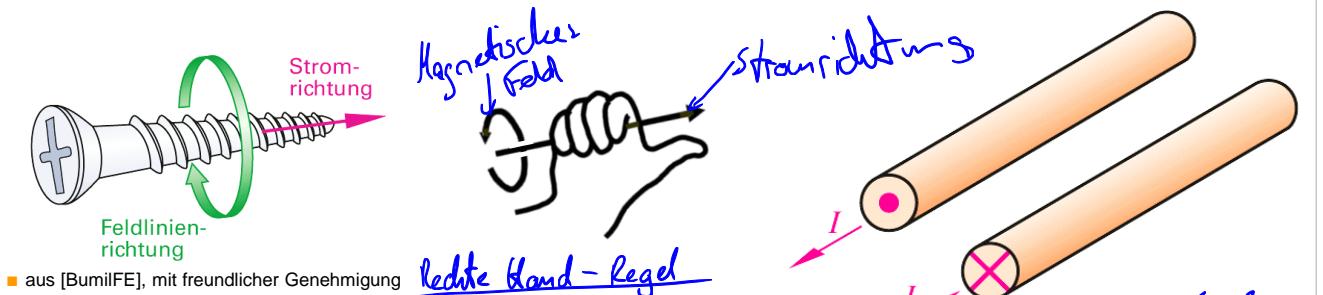
Der Kondensator in der IT

Magnetfeld Induktion Transformator & Spule

Magnetfeld

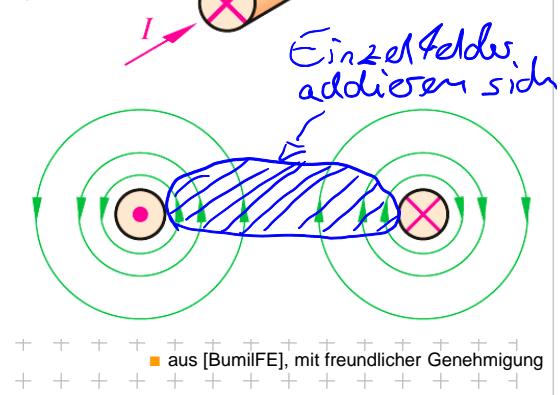
Jeder Ladungsfluss erzeugt ein Magnetfeld

Magnetfelder werden durch die Bewegung elektrischer Ladungen verursacht. Jeder Stromfluss bildet ein Magnetfeld, das im Uhrzeigersinn um die Stromrichtung rotiert, siehe die Bilder unten:



Besonderheiten des Magnetfeldes sind:

- Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen ohne Anfang und Ende (sog. Quellenfreiheit).
- Magnetische Feldlinien verlaufen außerhalb von Magneten vom Nordpol zum Südpol und innerhalb von Magneten vom Südpol zum Nordpol.

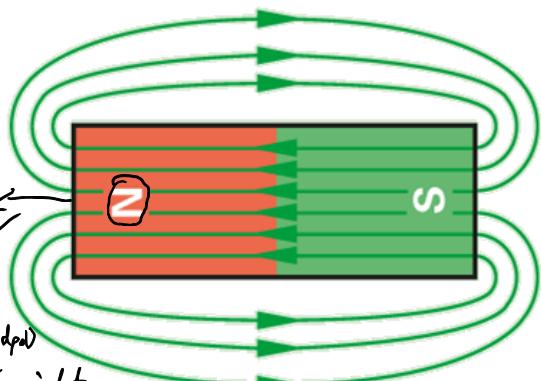


Permanentmagnet

Auch **Permanentmagnete** (im Bild rechts ein Stabmagnet) produzieren ihr Magnetfeld auf Grund elektrischer Ströme in atomaren Dimensionen: Das Kreisen der Elektronen um den Atomkern kann als Strom aufgefasst werden, ebenso ihr sogenannter Spin.

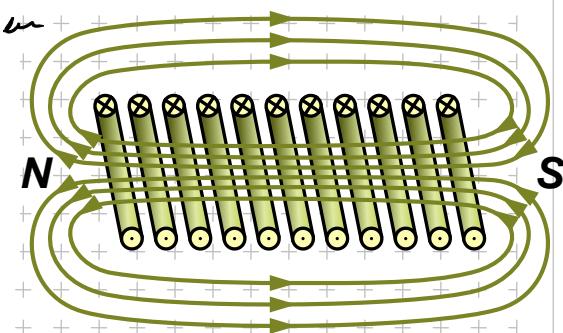
richtet
sich zum
Nordpol
des Brdes
(Nordpol ist
magnetischer Südpol)

Magnetfeld beginnt nicht
außerhalb des Magneten,
da es geschlossen



Spule

Wird ein Leiter aufgewickelt, entsteht eine **Spule**, wie rechts im Bild dargestellt. Bei einem Strom durch diesen Leiter überlagern sich die Magnetfelder aller Lagen zu einem Feld, dass einen ähnlichen Verlauf wie bei einem Stabmagneten hat.





• Elektrisches Feld

• Der Kondensator in der IT

• Magnetfeld

• Induktion

• Transformator & Spule

Magnetisches Feld – Kraft auf einen Leiter

Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter

Auf bewegte Ladungsträger im Magnetfeld wirkt die sog. **Lorentzkraft**¹⁾. Auch auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld (wie im Bild rechts) wirkt diese Kraft, die senkrecht auf dem Magnetfeld und senkrecht auf der Stromrichtung steht.

Rechte Hand-Regel ($V=V-W$ -Regel)

Strom I

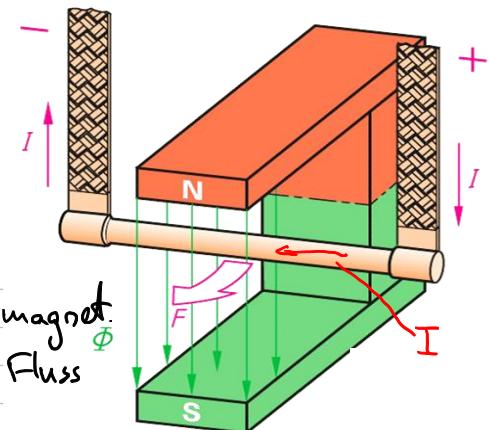
(= Ursache)

Kraft F

(= Wirkung)

Magnetfeld

(= Vom Hinteren)



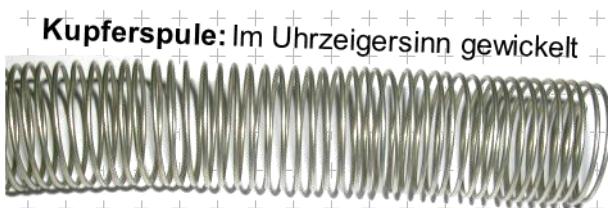
■ aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

Demonstration und...

Übungsaufgabe Ein einfacher Linearmotor

Eine AAA-Primärzelle hat an ihren beiden Polen starke Neodym-Magnete befestigt. Diese sind so ausgerichtet, dass die Nordpole beide nach außen zeigen. Die Magnete sind mit einer leitenden Metallschicht überzogen, so dass sie die Batteriespannung führen, links im Bild +, rechts im Bild -. Die Batterie mit den Magneten wird in der gezeigten Orientierung in eine Spule eingelegt, die im Uhrzeigersinn (d.h. wie eine normale, rechtsdrehende Schraube) gewickelt ist.

■ Bewegt sich die Batterie? Falls ja, in welche Richtung (nach rechts oder nach links)?



■ Weitere Infos zu diesem Spielzeug unter youtube.de, Suchbegriff „simplest electric train“

¹⁾ Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), niederländ. Mathematiker



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT

Magnetfeld Induktion Transformator & Spule

Induktion

Nochmals die Lorentzkraft

Ein stromloser Leiter ist senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfeldes orientiert. Wird dieser Leiter senkrecht zu den Feldlinien und senkrecht zu seiner Ausrichtung bewegt, so kann an dessen Enden eine **induzierte Spannung U** gemessen werden. Im **Bild** rechts beispielsweise ist eine Leiterschaukel im Feld eines Hufeisenmagneten dargestellt, an der eine Spannung induziert wird.



Auch für diesen Effekt der **Induktion** ist wieder die **Lorentzkraft** verantwortlich: Die Bewegung der Leiterschleife mitsamt Ihren Ladungsträgern wirkt auf atomarer Ebene wie viele kleine elektrische Ströme, die ein seitliches (senkreiches) Ausscheren der Ladungsträger bewirken, s. **Bild** rechts.

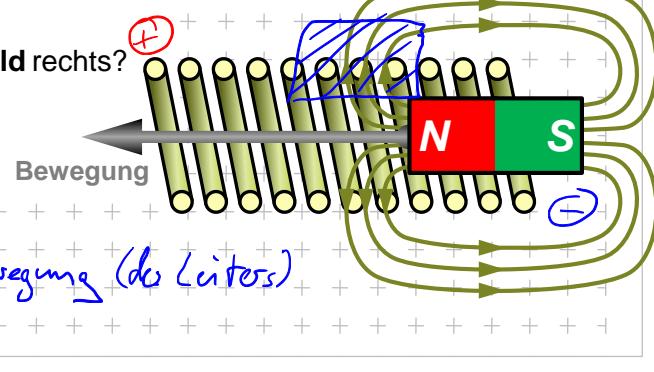
- Anwendung
 - Fahrraddynamo
 - Generatoren
 - Festplatte: Schreiber / Lesekopf
 - Teilchenbeschleuniger

Demonstration Induktionsspannung in einer Spule

Den oben beschriebenen Induktionseffekt gibt es auch bei einer Spule – wenn mehrere Windungen von dem sich bewegenden Magnetfeld durchflossen werden, addieren sich die Induktionsspannungen (Maschenregel!).

Übungsaufgabe Magnet in der Spule

- Welche Polarität hat die induzierte Spannung im **Bild** rechts?
- Was geschieht, wenn – wenig später – der Magnet gänzlich in die Spule eingetaucht ist?





Elektrisches Feld Kondensator

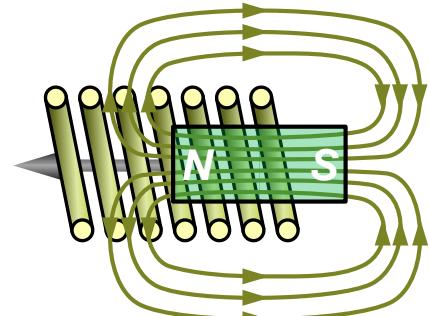
Der Kondensator in der IT Magnetfeld Induktion Transformator & Spule

Transformer

■ Induktion der Ruhe (Transformatorenprinzip)

In einer Spule wird nicht nur dann eine Spannung induziert, wenn sich ein Magnetfeld quer zu den Leitern bewegt (vorherige Seite unten), sondern allgemein immer dann, wenn sich das Magnetfeld, in ihrem Inneren ändert:

- In einer Spule wird eine Spannung induziert, wenn sich die Anzahl der von der Spule umfassten Feldlinien (der sog. **magnetische Fluss Φ**) ändert, s. Bild rechts.
- Die induzierte Spannung ist umso größer, je schneller sich der magnetische Fluss Φ ändert.
- Ein Eisenkern verstärkt den magnetischen Fluss Φ in der Spule, und damit die durch seine Änderung induzierte Spannung.
- Die induzierte Spannung ist proportional zur **Windungszahl N** .



- Wird die zeitliche Änderung $\Delta\Phi/\Delta t$ des magnetischen Flusses in der Spule nicht durch einen bewegten Permanentmagneten erzeugt, sondern durch eine weitere Spule, so erhält man einen Transformator. Das Bild unten zeigt einen Transformator mit zwei Spulen, die um einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Die Quelle links versorgt die **Primärspule 1**, die **Sekundärspule 2** liefert die von der Quelle hineingesteckte Leistung wieder ab.
- Die Übertragung funktioniert ausschließlich für Wechselspannungen!

■ Idealer Transformer

Im Idealfall erfolgt die Übertragung verlustlos, d.h. die gesamte Leistung der Quelle kommt an der Sekundärspule an. Die effektiven Spannungen und Ströme an der Primär- und Sekundärspule stehen daher in einem festen **Übersetzungsverhältnis $\dot{\nu}$** zueinander, welches das Verhältnis der beiden Windungszahlen angibt:

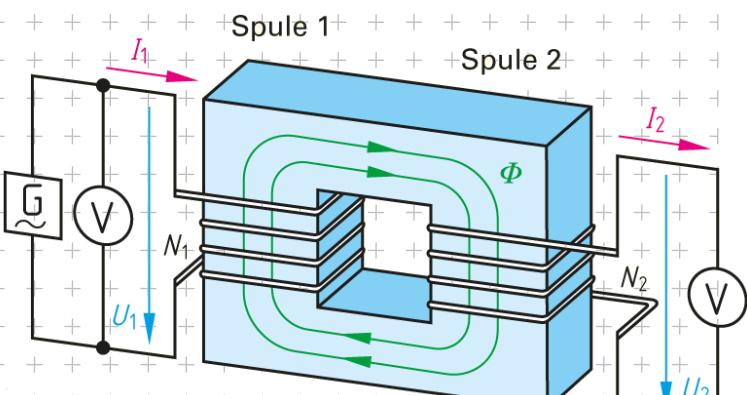
$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

Annahme idealer Trafo:

$$P_1 = P_2$$



aus [BumilFE], mit freundlicher Genehmigung

Reale Transformatoren haben einen Wirkungsgrad η im Bereich 80...95%. Verluste in Form von Wärme gibt es sowohl in den Spulendrähten, als auch im Eisenkern.



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator Magnetfeld

Induktion Transformator & Spule

Einsatzgebiete von Transformatoren

- Auf Grund zweier wesentlicher Eigenschaften sind Transformatoren in vielen Geräten des Alltags zu finden:

1. Galvanische Trennung:

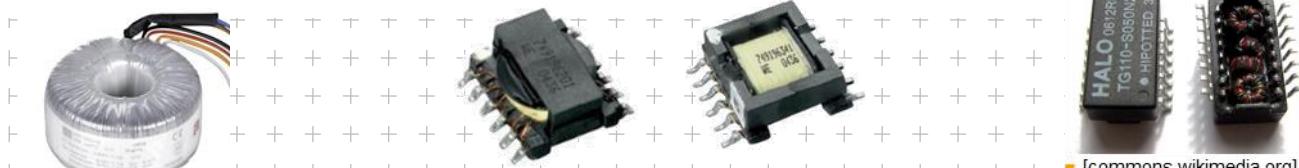
Zwischen den Spulen des Primär- und des Sekundärstromkreises fließen keinerlei Ströme, so dass die Stromkreise auf völlig unterschiedlichen Spannungspegeln arbeiten können – z.B.:

- ⇒ Trennung von Geräten mit berührbaren Teilen vom 230-V-Stromversorgungsnetz, um eine Gefährdung der Benutzer auszuschließen, beispielsweise Computer, Spielzeuge, Batterieladegeräte, Niederspannungsbeleuchtungsanlagen.
- ⇒ Trennung eines Computernetzwerkanschlusses (*LAN, Ethernet*) von der Peripherie.

2. Umsetzung von kleinen zu großen Spannungen oder umgekehrt:

- ⇒ Betrieb von elektrischen und elektronischen Geräten, die für Niederspannung konzipiert sind am 230 V-Stromversorgungsnetz, beispielsweise Computer, Spielzeuge, Batterieladegeräte, Niederspannungsbeleuchtungsanlagen.
- ⇒ Erzeugung von Funken zur Zündung explosiver Gemische in Verbrennungsmotoren. Solche Trafos werden auch Zündtrafos oder -spulen genannt.
- ⇒ Transport der von Kraftwerken gelieferten elektrischen Leistung in Form von Hoch- oder Mittelspannung, um die Transportverluste zu reduzieren.

Bauformen von Transformatoren



[commons.wikimedia.org]

? Konde
richt (is)

Schaltnetzteil-Übertrager Ethernet-Trafo

Beispiel Der ideale Transformator

Es sind die Parameter eines Transfornators zu bestimmen, der zum Betrieb einer **12V/60W-Halogenglühlampe** am Stromnetz (**$U_1 = 230 \text{ V}$**) verwendet wird. Der Trafo hat sekundärseitig eine Windungszahl **$N_2 = 100$** und wird vereinfachend als ideal angenommen.

a) Bestimmen Sie die primärseitige Windungszahl N_1 des Trafos.

b) Wie groß sind die Ströme I_2 und I_1 im Sekundär- und im Primärkreis?

$$a) N_1 = N_2 \cdot \frac{230 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 1917; b) I_2 = \frac{60 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 5 \text{ A}; I_1 = \frac{60 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 261 \text{ mA}$$

Übungsaufgabe Generelle Frage zum Transformator

Was passiert beim Anlegen einer Gleichspannung an einen Trafo? Begründen Sie Ihre Antwort!



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT Induktion Transformator & Spule

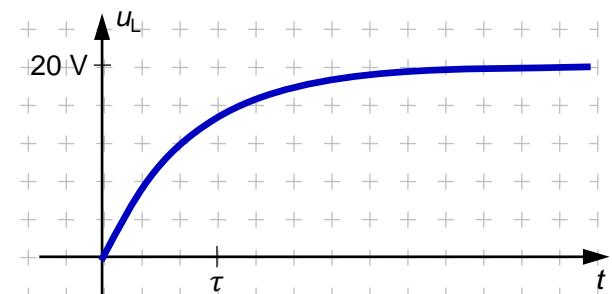
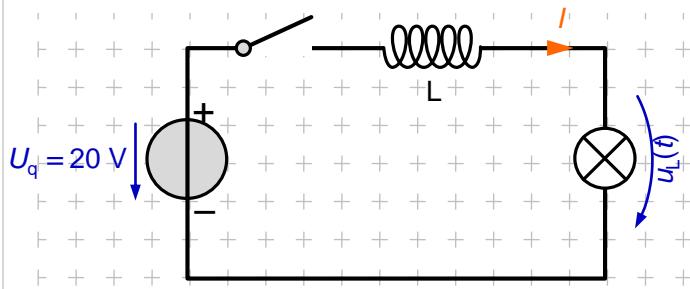
Selbstinduktion und Spulen

Selbstinduktion

Auf Seite 14 wurde die *Induktion der Ruhe* beschrieben, bei der ein sich ändernder magnetischer Fluss Φ in einer Spule eine Spannung induziert. Diese Induktion tritt dabei nicht nur in einer Sekundärspule, sondern auch in derselben Spule auf, die den magnetischen Fluss erzeugt!

Demonstration Spule im Stromkreis

Eine Spule L ist in Reihe in einem Stromkreis mit einem Lämpchen geschaltet:



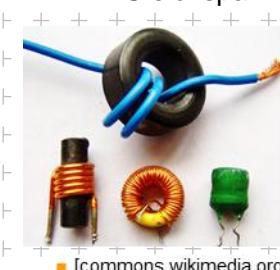
- **Beobachtung:** Wenn der Schalter geschlossen wird, beginnt das Lämpchen nicht sofort zu leuchten. Die Spannung am Lämpchen steigt langsam und nähert sich dann exponentiell dem Maximalwert an. Würde man die Spannung über der Zeit aufzeichnen, ergäbe die Kurve einen Ausgleichsvorgang, ähnlich wie auf der Seite 10 für die Kondensatorentladung beschrieben.
- **Hintergrund:** Beim Schließen des Schalters wird das Magnetfeld (magnetischer Fluss Φ) der Spule aufgebaut. Da das Feld Energie enthält, kann der Aufbau nicht beliebig schnell gehen. Im Moment des Einschaltens bewirkt die Änderung des magnetischen Flusses $\Delta\Phi/\Delta t$ eine Induktionsspannung, die sich der angelegten Spannung entgegenstellt (*Lenz'sche Regel*). Beim Einschalten fällt daher zunächst die gesamte Spannung an der Spule ab! Danach nimmt die Änderung des magnetischen Flusses stetig ab, bis die gesamte Spannung an der Lampe abfällt.

Qualitative Beschreibung der Funktion einer Spule in der Schaltung

Die Spule ist bestrebt, den Strom konstant zu halten. Sie wird meist in Reihenschaltung genutzt.
Je größer der **Induktivitätswert L** , desto kleiner ist die resultierende Stromänderung.

Anwendung und Bauformen von Spulen in der IT

Sog. Drossel: Siebung (= Glättung) der Gleichspannung in Netzteilen



■ [commons.wikimedia.org]

Sog. Mantelwellenfilter: Sicherstellung von EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit), Vermeidung von Funkstörungen



■ [commons.wikimedia.org]



Elektrisches Feld Kondensator

Der Kondensator in der IT

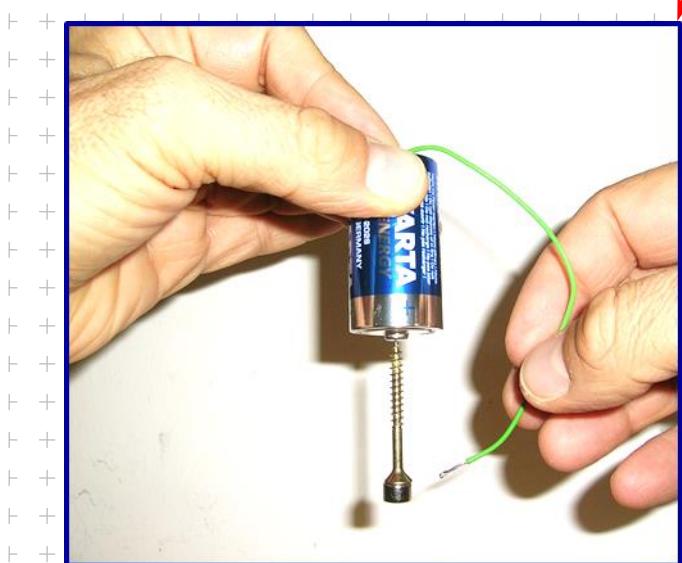
Magnetfeld Induktion

Transformator & Spule

Abschließende Demonstration für alle: Unipolar-Elektromotor!

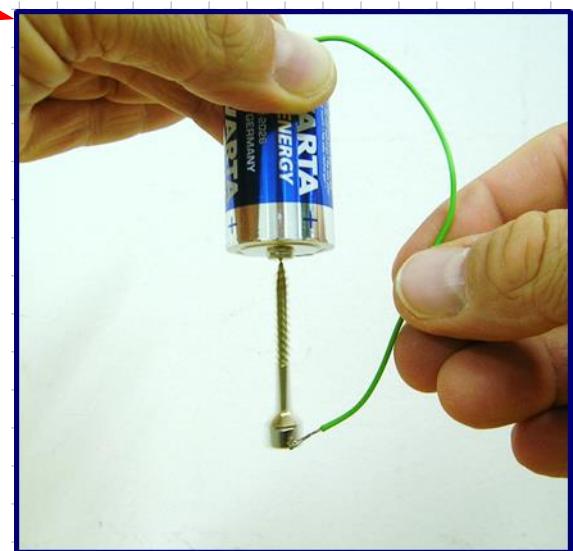
Anleitung zum Aufbau

- Entfernen Sie die Schraube zusammen mit dem Magneten von der Batterie.
- Bitte lassen Sie den Magneten am Schraubenhaupt. Der Magnet soll genau mittig darauf sitzen!
- Hängen Sie die Schraube nun mit der Spitze an den Pluspol (Spitze) der Batterie, so dass sie sich ganz leichtgängig drehen lässt.
- Verbinden Sie jetzt mit dem Draht den Minuspol der Batterie mit dem Rand des Magneten. Dieser darf den Magneten nur ganz leicht berühren!



Erläuterung der Funktion

Der stromdurchflossene Draht schneidet die Feldlinien des Magneten senkrecht. Auf den Draht wirkt tangential eine Lorentzkraft \Rightarrow Der Magnet dreht sich weg!



Rückgabelogistik – bitte beachten (u.a. damit die Transporttasche nicht abraucht...):

- a) Heften Sie die Schraube mit dem Magneten an den (glatten) Minuspol der Batterie, möglichst genau zentriert:



- b) Bitte die Batterie mit der Schraube vorsichtig (die Magnetfelder sind sehr stark!) in die Kiste neben die anderen einordnen.



Danke!