

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

#3 Elektrische Energiespeicher Teil a –

„Kondensatoren und Supercaps“

#3 Electrical Energy Storage part a –

„Capacitors and Supercaps“

Vorlesung #3a

| Lecture #3a



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Capacitors and Supercaps**Content ⇒ Learning objectives**

- Functional principle, classification, historical applications
⇒ Introduction to the technology
- Physical basics, electrostatic fields, dielectric
⇒ Basic understanding of physical relationships
- Derivation of the mathematical-physical basic equations
⇒ Understanding of simple calculation equations

Elektrische Energiespeicher – Kondensatoren und Supercaps**Inhalt ⇒ Lernziele**

- Funktionsprinzip, Klassifizierung, historische Anwendungen
⇒ **Heranführung an die Technologie**
- Physikalische Grundlagen, Elektrostatische Felder, Dielektrikum
⇒ **Grundverständnis für physikalische Zusammenhänge**
- Herleitung der mathematisch-physikalischen Grundgleichungen
⇒ **Verständnis für einfache Berechnungsgleichungen**

1. Capacitors and Supercaps

Charge:

Charge separation or additionally formation of a double layer
Structure of the electric field

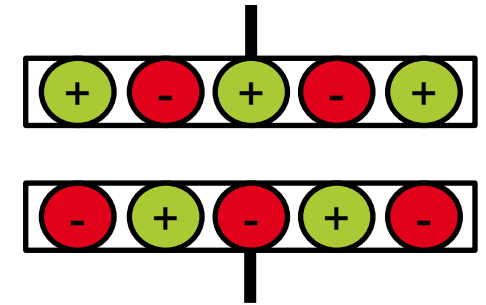
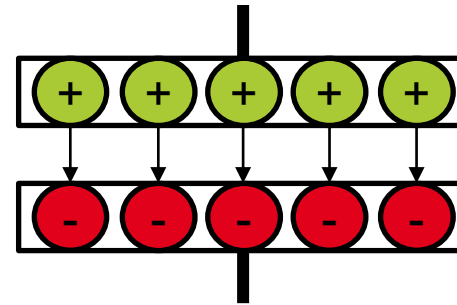
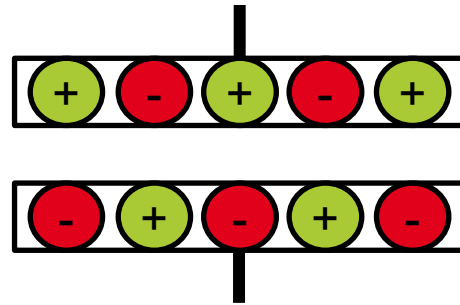
Storage

Separate charges on anode / cathode side or in the dielectric
Storage in the electric field

Discharge

Charge compensation on the electrodes
Degradation of the electric field

1. Kondensatoren und Supercaps



Einspeicherung

Ladungstrennung bzw. zusätzlich Ausbildung einer Doppelschicht, Aufbau des elektrischen Feldes

Speicherung

Getrennte Ladungen auf Anoden/Kathoden-Seite bzw. im Dielektrikum
Speicherung im elektrischen Feld

Ausspeicherung

Ladungsausgleich auf den Elektroden, Abbau des elektrischen Feldes

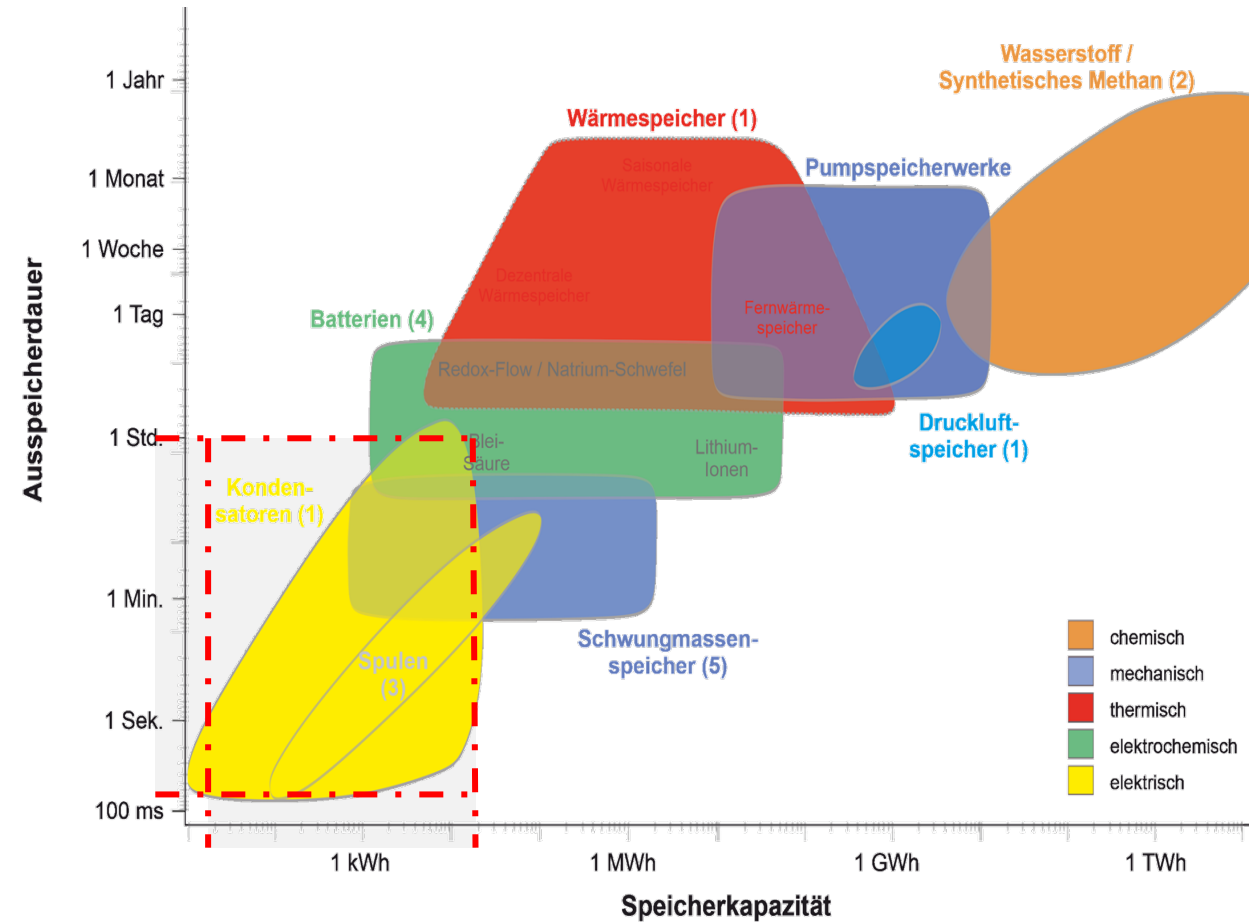
1. Capacitors and Supercaps

1.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

1. Kondensatoren und Supercaps

1.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

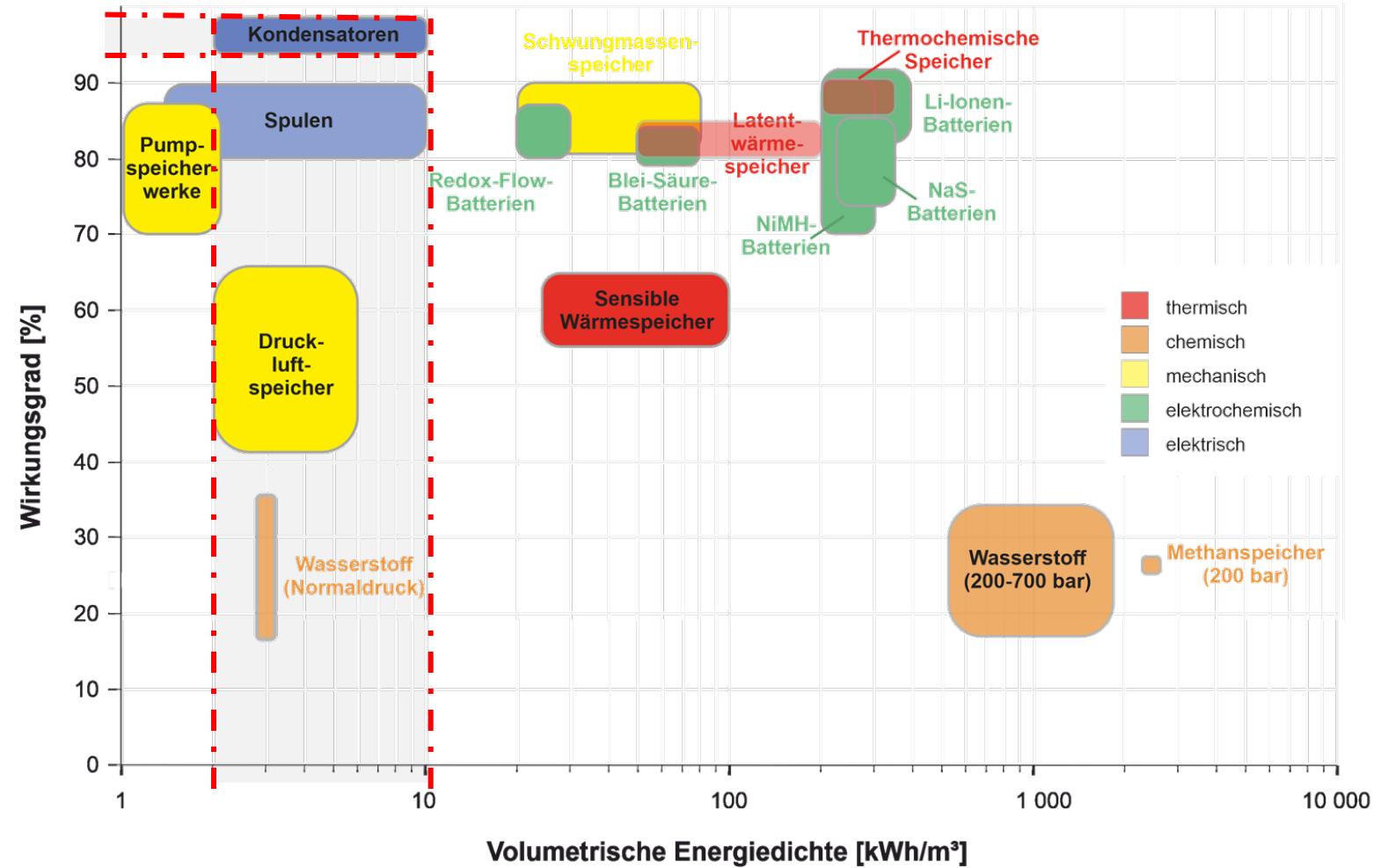


1. Capacitors and Supercaps

1.2 Classification according to efficiency and volumetric energy density

1. Kondensatoren und Supercaps

1.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



1. Capacitors and Supercaps

1.2 History

Leyden jar

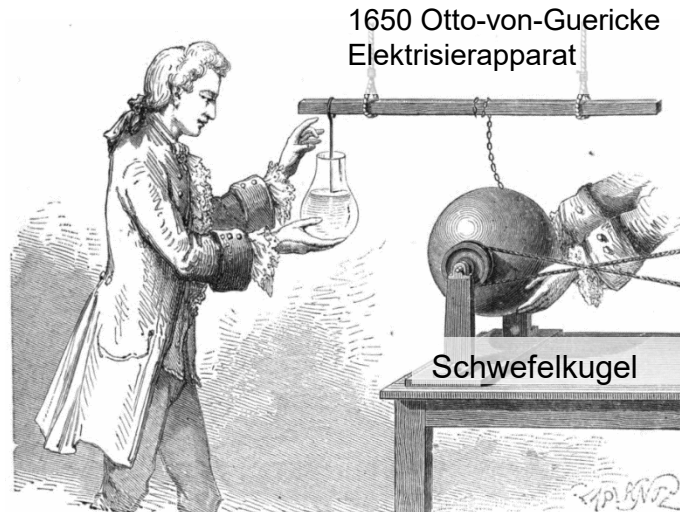
- 1745 Domdechant Ewald Georg von Kleist in Cammin (at that time Germany)
- 1746 by the physicist Pieter van Musschenbroek in Leiden (NL)
- Laboratory tests with corresponding glasses and metal parts connected with an "electrifying machine,"
- Metal / silver / tin foil outside and inside
- First capacitor
- Daniel Galath connected several bottles in parallel to a larger store
- Benjamin Franklin coined the term "battery" (see bottles side by side - like a battery of cannons)

1. Kondensatoren und Supercaps

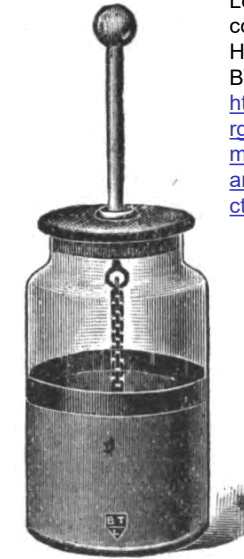
1.2 Historie

Erster Kondensator: „Leidener“ Flasche

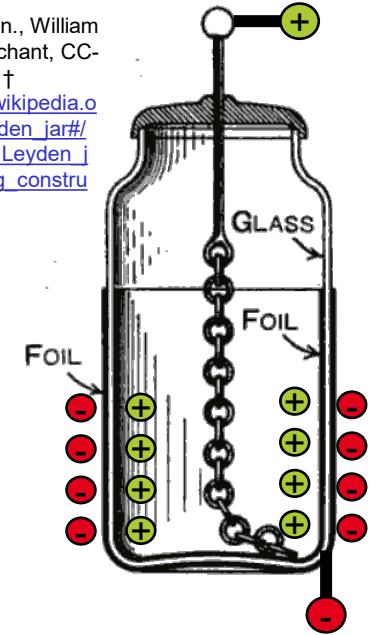
- 1745 Domdechant EWALD GEORG VON KLEIST in Cammin (damals DE) bzw. 1746 von dem Physiker PIETER VAN MUSSCHENBROEK in Leiden (NL): Laborversuchen mit entsprechenden Gläsern und Metallteilen verbunden mit einer „Elektriermaschine“
- Metall-/Zinn-/Silberfolie außen und innen
- Erster Kondensator



1650 Otto-von-Guericke Elektrierapparat
Discovery of the Leyden jar, Augustin Privat Deschanel, Public Domain † https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar#/media/File:Andreas_Cunaeus_discovering_the_Leyden_jar.png



Leyden jar construction., William Henry Marchant, CC-BY-SA 3.0 † https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar#/media/File:Leyden_jar_showing_construction.png



Later more common type using metal foil, 1919, Robert Alexander Houstoun, Public Domain † https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar#/media/File:Leyden_jar_engraving.png

- DANIEL GRALATH verband mehrere Flaschen parallel zu einem größeren Speicher
- BENJAMIN FRANKLIN prägte den Begriff „**Batterie**“ (Flaschen nebeneinander sehen wie eine Batterie von Kanonen aus)



A battery of four water-filled Leyden jars, Alvinrune, CC-BY-SA 3.0 † https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar#/media/File:Leidse_flessen_Museum_Boerhave_december_2003_2.jpg

1. Capacitors and Supercaps

1.2 History

- 1775 Alessandro Volta constructed a capacitor consisting of two metal plates and an ebonite layer (hard rubber of natural rubber and sulfur) as a dielectric
- 1850 mica (mineral) as an insulating dielectric leads to a compact design
- 1876 wound paper capacitors made of metal foils
- 1896 Charles Pollak constructs "electrolytic capacitors" with a thin aluminum oxide layer as a dielectric
- 1900 Porcelain is used as a dielectricFirst capacitor
- After World War II, capacitors with voltage-resistant plastic films instead of paper.
- 1950 Tantalum capacitors with tantalum as anode and tantalum pentoxide layer as very thin dielectric. The cathode forms a liquid / solid electrolyte
- 1957 patent for the "double-layer capacitor with pseudo capacity
- Currently also silicon capacitors from the semiconductor industry
- Increasing the electrolyte conductivity in electrolytic capacitors by new polymer electrolyte systems

1. Kondensatoren und Supercaps

1.2 Historie

- 1775 ALESSANDRO VOLTA baute Kondensator aus zwei Metallplatten und einer Ebonitschicht (harter Gummi aus Naturkautschuk und Schwefel) als **Dielektrikum**
- 1850 Glimmer (Mineral) als isolierendes Dielektrikum führt zu kompakter Bauform
- 1876 **gewickelte Papierkondensatoren** aus Metallfolien
- 1896 CHARLES POLLAK baut „**Elektrolytkondensatoren**“ mit dünner Aluminiumoxidschicht als Dielektrikum
- 1900 Porzellan wird als Dielektrikum eingesetzt
- Nach 2. Weltkrieg Kondensatoren mit spannungsfesten **Kunststofffolien** anstatt Papier.
- 1950 Tantalkondesatoren mit Tantal als Anode und Tantalpentoxidschicht als sehr dünnes Dielektrikum. Die Kathode bildet ein flüssiger/fester Elektrolyt
- 1957 Patent für den „**Doppelschicht-Kondensator mit Pseudokapazität**“
- Aktuell auch Silizium-Kondensatoren aus der Halbleiterindustrie
- Erhöhung der Elektrolytleitfähigkeit bei Elektrolytkondensatoren durch neue Polymer-Elektrolytsysteme

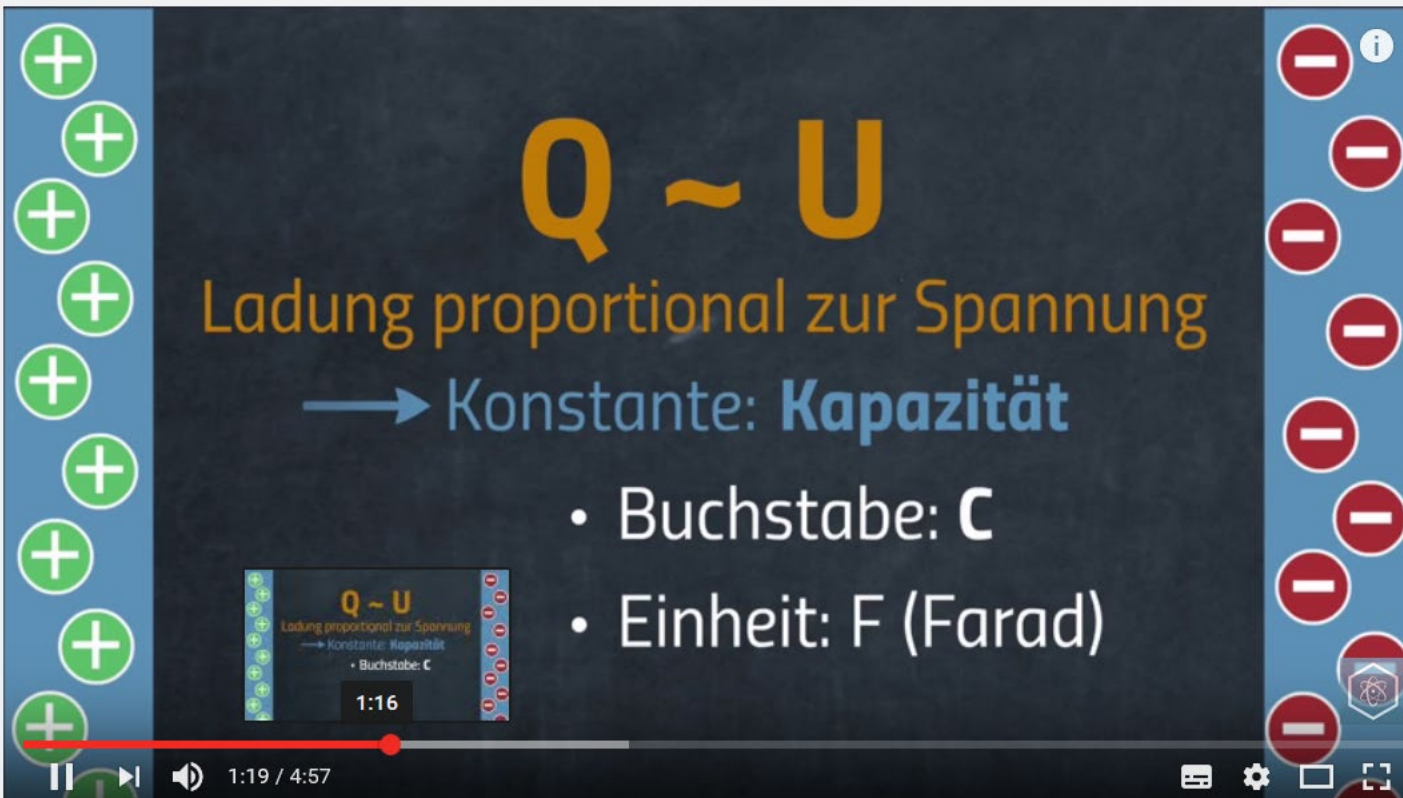
1. Capacitors and Supercaps

1.3 Short introduction - video

The capacity of a condensor

1. Kondensatoren und Supercaps

1.3 Kurzeinführung - Video

VIDEO: „Die Kapazität eines Kondensators“ [0:00 – 4:20]  Dt.

$Q \sim U$

Ladung proportional zur Spannung

→ Konstante: **Kapazität**

- Buchstabe: **C**
- Einheit: **F (Farad)**

1:19 / 4:57

<https://youtu.be/qfqEAEreMHE>

1. Capacitors and Supercaps

1.3 Short introduction

Charge:

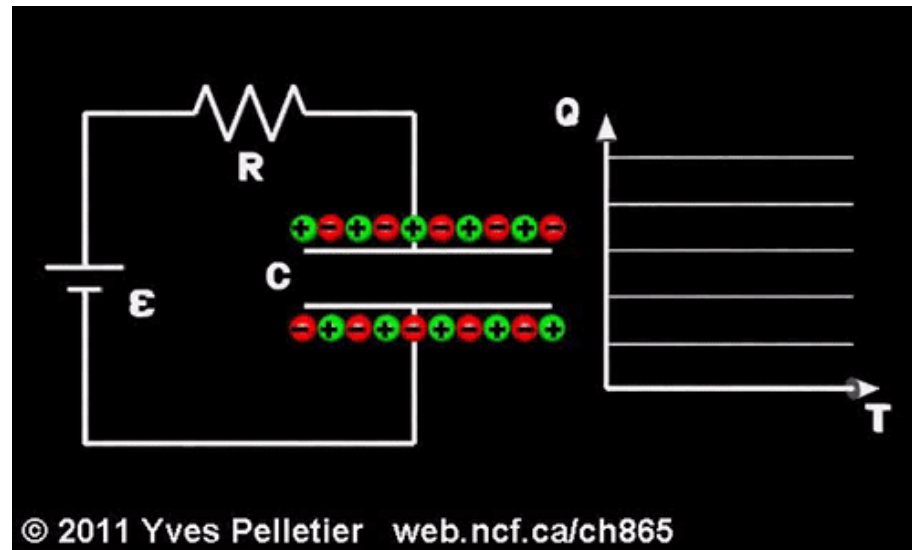
A capacitor stores electrical energy. The stored energy corresponds to the work that was done while charging the capacitor. You can see it this way: The charging process of the capacitor is not instantaneous. First, a small amount of charge dQ is applied. No work is needed yet as the plates are not loaded at the beginning. For the application of the next charge amount dQ then work against the repulsive Coulomb force already existing on the plates load is already necessary.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.3 Kurzeinführung

„Laden“ des Kondensators

Ein Kondensator speichert elektrische Energie. Die beim Aufladen geleistete Arbeit ist gleich der gespeicherten Energiemenge. Der Ladeprozess läuft (zeitlich) wie folgt ab: Zu Beginn wird eine kleine Ladungsmenge dQ aufgebracht, für die – da die Platten noch ungeladen (neutral) sind – keine Arbeit notwendig ist. Für das Aufbringen der nächsten Ladungsmenge dQ muss dann Arbeit gegen die (noch geringe) abstoßende Coulomb-Kraft geleistet werden. Mit jeder weiteren Ladungsmenge ist mehr Arbeit notwendig.



<https://www.youtube.com/watch?v=rzFmCLd0e44>

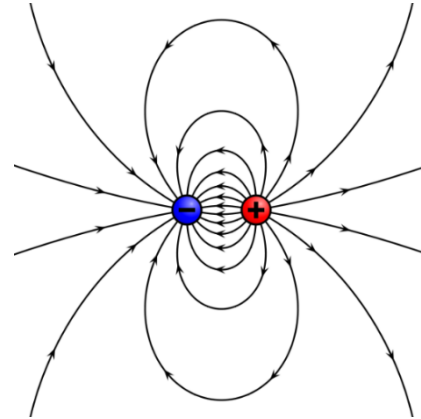
1. Capacitors and Supercaps

1.4 Physical basics

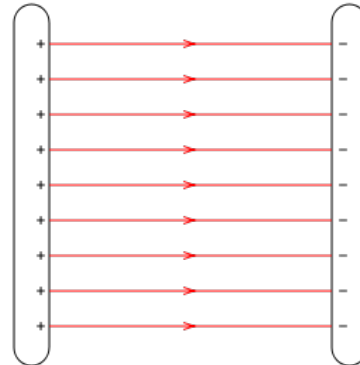
- Electrical charges of the same sign repel each other, unequal charges attract each other
- The effect of force is illustrated by lines of force and describes the electric field
- Lines of force are a model, they make it possible to represent the force vector in a point that results from the sum of all forces!
- At one point on the line of force, the tangent to the line of force is the resulting force vector $F = m \cdot a$
- Lines of force are NOT lines of movement!
(Example: A body at rest would move tangentially in the first step due to the force F . In the next infinitesimal step, the minimally different force vector would again act on the body in the direction of the line of force, but since it is already moving, the movement would not take place in the vector direction into the sum of the initial movement and the additional, new force vector.)
- Lines of force can NOT cross!
- Closer lines of force symbolize greater forces, lines of force that are further apart symbolize lesser forces (relative to each other)
- The force effect decreases the greater the distance between the charge carriers

1. Kondensatoren und Supercaps

1.4 Physikalische Grundlagen



Kraftlinien bei zwei Dipolen (oben) bzw. bei zwei (unendlich großen) Platten mit konstantem Abstand (unten)



Elektrisches Feld eines Dipols., Geek3, CC-BY-SA 3.0 †
https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Feld#/media/Datei:VFPT_dipole_electric.svg

Elektrisches Feld in einem Plattenkondensator, wdwd, CC-BY-SA 3.0 †
https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Feld#/media/Datei:PlattenkondensatorFeld.svg

- Elektrischen Ladungen gleichen Vorzeichens stoßen sich ab, ungleiche Ladungen ziehen sich an
- Kraftwirkung wird mittels Kraftlinien veranschaulicht und beschreiben das elektrische Feld
- Kraftlinien sind eine Modellvorstellung, sie ermöglichen den Kraftvektor in einem Punkt darzustellen, der sich aus der Summe aller Kräfte ergibt!
- In einem Punkt auf der Kraftlinie ist die Tangente an der Kraftlinie der resultierenden Kraftvektor $F = m \cdot a$
- Kraftlinien sind KEINE Bewegungslinien!
(Bsp: Ein ruhender Körper würde sich im ersten Schritt durch die Kraft F tangential bewegen. Im nächsten infinitesimalen Schritt würde der minimal andere Kraftvektor wiederum in Kraftlinienrichtung auf den Körper wirken, da dieser sich aber schon bewegt, würde die Bewegung nicht in Vektorrichtung erfolgen sondern in die Summe aus Ausgangsbewegung und zusätzlichem, neuen Kraftvektor.)
- Kraftlinien können sich NICHT kreuzen!
- Engere beieinanderliegende Kraftlinien symbolisieren größere Kräfte, weiter auseinanderliegende Kraftlinien symbolisieren geringere Kräfte (relativ zueinander)
- Die Kraftwirkung sinkt mit größerem Abstand der Ladungsträger zueinander

1. Capacitors and Supercaps

1.4 Physical basics - Electric field of a surface charge

- The electric field of a surface charge is

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

- The force effect (electric field E) increases with an increasing number of charges Q, i.e. proportionally to the area-related amount of charge Q / A

- In the case of a plate capacitor (two opposite surface charges of the same amount) the electric field E is twice as large (add up)

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

- At the same time, the electric field E in the plate capacitor is defined as the ratio of the voltage U between the plates and the distance d

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

- This results in the voltage U:

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

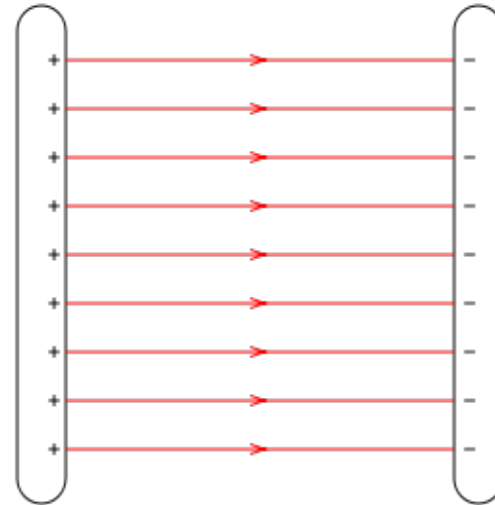
1. Kondensatoren und Supercaps

1.4 Physikalische Grundlagen – Elektrisches Feld einer Flächenladung

Das elektrische Feld E einer **Flächenladung** ist

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

Die Kraftwirkung (elektrische Feld E) steigt mit zunehmender Zahl an Ladungen Q, d.h. proportional zur flächenbezogenen Ladungsmenge Q/A



Elektrisches Feld in einem Plattenkondensator, wdw, CC-BY-SA 3.0
https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Feld#/media/Datei:PlattenkondensatorFeld.svg

Beim **Plattenkondensator** (zwei entgegengesetzte, vom Betrag gleiche Flächenladungen) ist das elektrische Feld E doppelt so groß (addieren sich)

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

Zugleich ist das elektrische Feld E im Plattenkondensator definiert als das Verhältnis der Spannung U zwischen den Platten und dem Abstand d

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

Daraus ergibt sich für die Spannung U:

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

1. Capacitors and Supercaps

1.4 Physical basics - The plate capacitor

- Two electrodes with a relatively large area A and a small distance d
- Dielectric (s) separates electrodes
- The capacitor constants A, d, er and the constant e0 are summarized in the parameter of the capacitance C of a capacitor with the unit Farad [F]

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

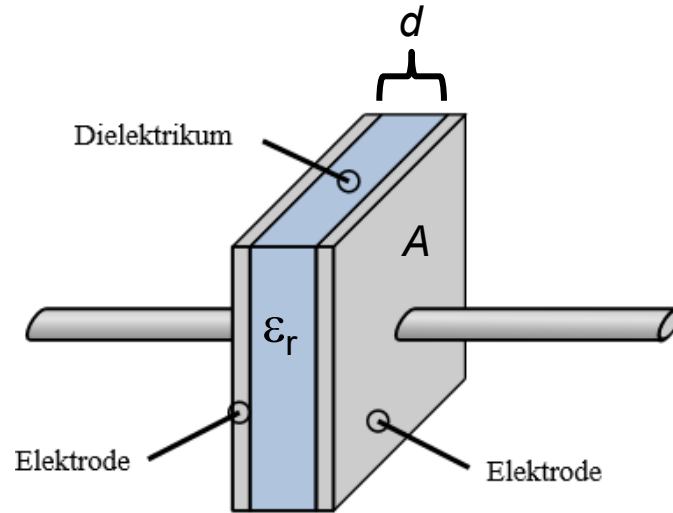
- The capacitance is proportional to the absolute permittivity e0 (for the vacuum), the relative permittivity er (material value of the dielectric), to the area of the capacitor A and inversely proportional to the plate spacing d
- This results in the charge Q (unit Coulomb C): $Q = C \cdot U$
- The charge Q in [C] for Coulomb or [As] is the product of the capacitance C in [F] for Farad and the voltage U in [V]

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

- A capacitor with a capacitance of one farad (F) can store a charge of one coulomb (C) by charging to a voltage of one volt (V)

1. Kondensatoren und Supercaps

1.4 Physikalische Grundlagen – Der Plattenkondensator



Prinzipdarstellung eines Kondensators mit Dielektrikum., Cepheiden, CC-BY-SA 3.0 †
[https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:Plate_Capacitor_DE.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)#/media/Datei:Plate_Capacitor_DE.svg)

Ein Kondensator mit einer Kapazität von einem Farad (F) kann durch das Aufladen auf eine Spannung von einem Volt (V) eine Ladung von einem Coulomb (C), d.h. 1 As speichern

- Zwei Elektroden mit relativ großer Fläche A und geringem Abstand d
- Dielektrikum (εr) separiert Elektroden
- Die Kondensator konstanten A, d, εr sowie die Konstante ε0 werden zusammengefasst in der Kenngröße der Kapazität C eines Kondensators mit der Einheit Farad [F]

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

ε0 = 8,854 · 10⁻¹² As/Vm
 [εr] = [-]
 [A] = m²
 [d] = m

- Die Kapazität ist proportional zur absoluten Permittivität ε0 (für das Vakuum), der relativen Permittivität εr (Stoffwert des Dielektrikums), zur Fläche des Kondensators A und umgekehrt proportional zum Plattenabstand d
- Daraus ergibt sich für die Ladung Q (Einheit Coulomb C): $Q = C \cdot U$
- Die Ladung Q in [C] für Coulomb bzw. [As] ist das Produkt aus Kapazität C in [F] für Farad und der Spannung U in [V]

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

1. Capacitors and Supercaps

1.4 Physical basics -- The dielectric

Dielectric – dipoles:

- In a capacitor filled with material, the charge carriers of the insulating material orient themselves to the electric field vector and produce a polarization field which counteracts and weakens the external field.
- As a result, more charge carriers can be "separated"
- Therefore the capacitor can take up more charge carriers and therefore ϵ_r is always greater than 1

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

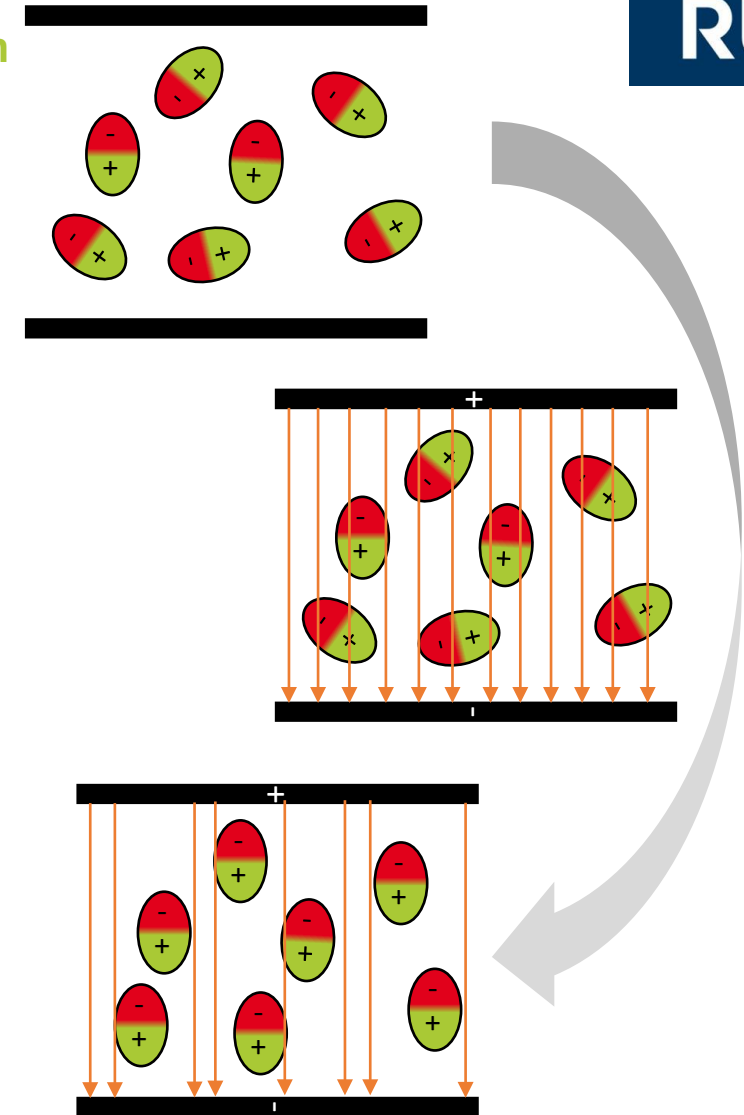
1. Kondensatoren und Supercaps

1.4 Physikalische Grundlagen – Das Dielektrikum

Dielektrikum - Dipole

- In einem mit Material gefüllten Kondensator orientieren sich die Ladungsträger des Isolationsmaterials am elektrischen Feldvektor und erzeugen ein Polarisationsfeld, das dem äußeren Feld entgegenwirkt und dieses schwächt.
- Dadurch können mehr Ladungsträger „getrennt“ werden
- D.h. der Kondensator kann mehr Ladungsträger aufnehmen und daher ist ϵ_r immer größer als 1, d.h. die Kapazität eines Kondensators wird mit einem Dielektrikum (an Stelle von Vakuum) größer:

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



1. Capacitors and Supercaps

1.4 Physical basics -- The dielectric

Dielectric:

- Material with very high specific resistance (10^8 - $10^{14}\Omega\text{m}$).
- Electrically almost nonconducting, but polarizable substances (electrical polarization)
- an ideal dielectric has no free charge carriers
- Dielectric behavior is found in all aggregate states (liquid, gaseous, crystalline as well as in amorphous solids)
- If an insulator is placed between the plates of a capacitor, polarization causes surface charges, which increase its capacity according to
 $C = \epsilon_r \cdot C_{\text{vacuum}}$, which has great technical importance and can also be used to measure ϵ_r .

1. Kondensatoren und Supercaps

1.4 Physikalische Grundlagen – Das Dielektrikum

Dielektrikum

- Material mit sehr hohem spezifischen Widerstand (10^8 - $10^{14}\Omega\text{m}$).
- elektrisch nahezu nichtleitende, aber polarisierbare Substanzen (elektrische Polarisation)
- ein ideales Dielektrikum hat keine freien Ladungsträger
- Dielektrisches Verhalten ist in allen Aggregatzuständen anzutreffen (flüssig, gasförmig, kristalline als auch amorphe Festkörper)
- Wird ein Isolator zwischen die Platten eines Kondensators gebracht, entstehen durch die Polarisation Oberflächenladungen (Influenzladungen), die dessen Kapazität gemäß $C = \epsilon_r \cdot C_{\text{Vakuum}}$ erhöhen, was große technische Bedeutung hat und auch zur Messung von ϵ_r benutzt werden kann.

| Material | Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ |
|--------------------------------------|--|
| BaTiO ₃ (Ferroelektrikum) | 10^2 - 10^3 (je nach Modifikation) |
| CaTiO ₃ (Ferroelektrikum) | 150-180 |
| Diamant | 16,5 |
| Eis | 16 (-20°C) |
| Glas | 5-10 |
| Porzellan | 7 |
| Neopren | 6,9 |
| Schwefel | 3,6-4,3 |
| Papier | 3,7 |
| Plexiglas | 3,4 |
| Hartgummi | 2,5-3,5 |
| Blausäure | 95 |
| Nitrobenzol | 37 (15°C) |
| Ethanol | 25,8 (20°C) |
| Petroleum | 2,1 (18°C) |
| Wasser | 88 (0°C) |
| Wasser | 81,1 (18°C) |
| Wasser | 73,4 (40°C) |
| Wasserdampf | 1,026 (110°C, 105Pa) |
| Luft | 1,000576 (0°C, 105Pa) |
| Luft | 1,05404 (0°C, 107Pa) |
| Wasserstoff | 1,000264 (0°C, 105Pa) |
| Schwefeldioxid | 1,0099 (0°C, 105Pa) |
| Stickstoff | 1,000606 (0°C, 105Pa) |
| Vakuum | 1 |

Daten: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/dielektrizitaetskonstante/3040>

1. Capacitors and Supercaps

1.5 Calculation equations plate capacitor

- The energy W in [J] for Joule, which is stored in a capacitor, is proportional to the capacitance C in [F] for Farad and to the square of the voltage U in [V] $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$
- Where C is defined as:

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

- If the plate distance is d and if an infinitesimally small charge dQ is brought to the other side, then the infinitesimal work dW must be done with the amount against the electric field. In order to conserve energy, this work must lead to an increase in the energy of the capacitor. However, this can only be found in the electrical field. The field strength increases by the amount due to the charge transfer

- Solving for dQ and inserting it into the work results in:

$$dW = dF \cdot d = E \cdot dQ \cdot d \quad dE = \frac{dQ}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

$$dW = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot E \cdot dE$$

- Integrating gives:

$$W = \int \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot E \cdot dE = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot E^2$$

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

results in

$$W = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

1. Kondensatoren und Supercaps

1.5 Berechnungsgleichungen Plattenkondensator

Energieinhalt – Herleitung mathematisch

Die Energie W in [J] für Joule, die in einem Kondensator gespeichert ist, ist proportional zur Kapazität C in [F] für Farad und zum Quadrat der Spannung U in [V]

Wobei C definiert ist als:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

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

Ist der Plattenabstand d und bringt man eine infinitesimal kleine Ladung dQ auf die andere Seite, dann muss gegen das elektrische Feld die infinitesimal Arbeit dW mit dem Betrag geleistet werden. Der Energieerhaltung wegen muss diese Arbeit zu einer Erhöhung der Energie des Kondensators führen. Diese kann aber nur im elektrischen Feld stecken. Durch den Ladungsübertrag erhöht sich die Feldstärke um betragsmäßige

Auflösen nach dQ und Einsetzen in die Arbeit ergibt:

$$dW = dF \cdot d = E \cdot dQ \cdot d \quad dE = \frac{dQ}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

$$dW = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot E \cdot dE$$

Integrieren ergibt:

$$W = \int \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot E \cdot dE = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot E^2$$

mit $E = \frac{U}{d}$ ergibt sich

$$W = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

1. Capacitors and Supercaps

1.5 Calculation equations plate capacitor

Energy content:

- Electrical work at constant current and constant voltage $W = U \cdot I \cdot t$
 - Whereby the amount of charge Q is defined as $Q = I \cdot t$
 - resulting from it $W = U \cdot Q$
-
- However, the voltage U across the capacitor increases linearly (1 / C) with the stored charge Q during the charging process $U = \frac{1}{C} \cdot Q$
 - This results in the following U to Q diagram, where the work done W is the area under the curve.
 - The area is calculated using the area of a triangle with $W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$
 - with $Q = C \cdot U$
 - results in $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$

1. Kondensatoren und Supercaps

1.5 Berechnungsgleichungen Plattenkondensator

Energieinhalt – Herleitung grafisch

 Elektrische Arbeit bei konstantem Strom und **konstanter Spannung**

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Wobei die Ladungsmenge Q definiert ist als

$$Q = I \cdot t$$

daraus ergibt sich

$$W = U \cdot Q$$

 Die Spannung U am Kondensator steigt **jedoch** während des Ladevorgangs linear (1/C) mit der gespeicherten Ladungsmenge Q

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

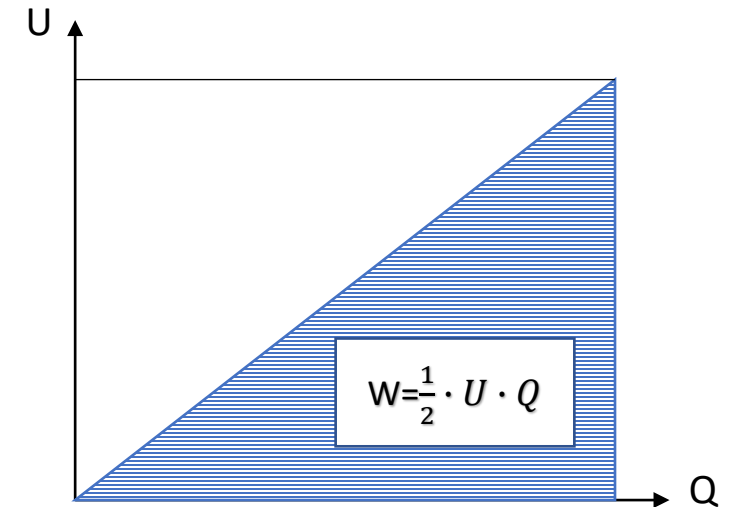
Daraus ergibt sich folgendes U zu Q Diagramm, wobei die geleistete Arbeit W die Fläche unter der Kurve ist.

Die Fläche berechnet sich nach der Fläche eines Dreiecks

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

mit
$$Q = C \cdot U$$

Ergibt sich
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$



Konstante Spannung

Spannung steigt linear mit Ladung

1. Capacitors and Supercaps

1.5 Calculation equations plate capacitor

- The energy W in [J] for Joule, which is stored in a capacitor, is proportional to the capacitance C in [F] for Farad and to the square of the voltage U in [V]

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

- Higher amounts of energy can be stored through:
 - larger electrode surfaces
 - smaller electrode gaps - higher permittivity
 - higher voltage
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$
- Real capacitors can only be charged up to a maximum permissible voltage, which results from the dielectric strength of the dielectric

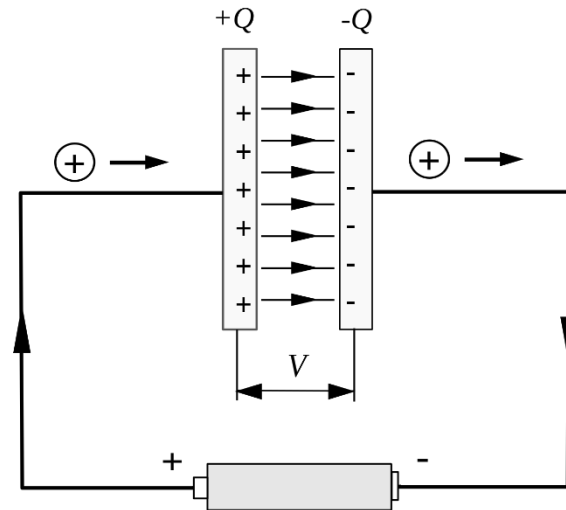
1. Kondensatoren und Supercaps

1.5 Berechnungsgleichungen Plattenkondensator

Erhöhung des Energieinhalts bzw. der Kapazität eines Kondensators








$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

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



- Die Energie W in [J] für Joule, die in einem Kondensator gespeichert ist, ist proportional zur Kapazität C in [F] für Farad und zum Quadrat der Spannung U in [V]
- Höhere Energiemengen lassen sich speichern durch:
 - größere Elektrodenoberflächen
 - geringere Elektrodenabstände
 - höhere Permittivität
 - höhere Spannung
- Reale Kondensatoren können nur bis zu einer maximal zulässigen Spannung, die sich aus der Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums ergibt, geladen werden

Daarstellig vom Brinzip vom e Stroomfluss dur e Kondänsör, Sirius Domain, Public Domain †
[https://als.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:Kapacitans.svg](https://als.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)#/media/Datei:Kapacitans.svg)
[https://als.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:Kapacitans.svg](https://als.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)#/media/Datei:Kapacitans.svg)

| †CC-Lizenzen | Bezeichnung | Version | Link zum Lizenz-/Vertragstext |
|---|--|--|--|
|  | CC0 Bedingungslose Lizenz | Vers. 1.0 | https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode |
|  | CC-BY Attribution (Namensnennung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode |

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



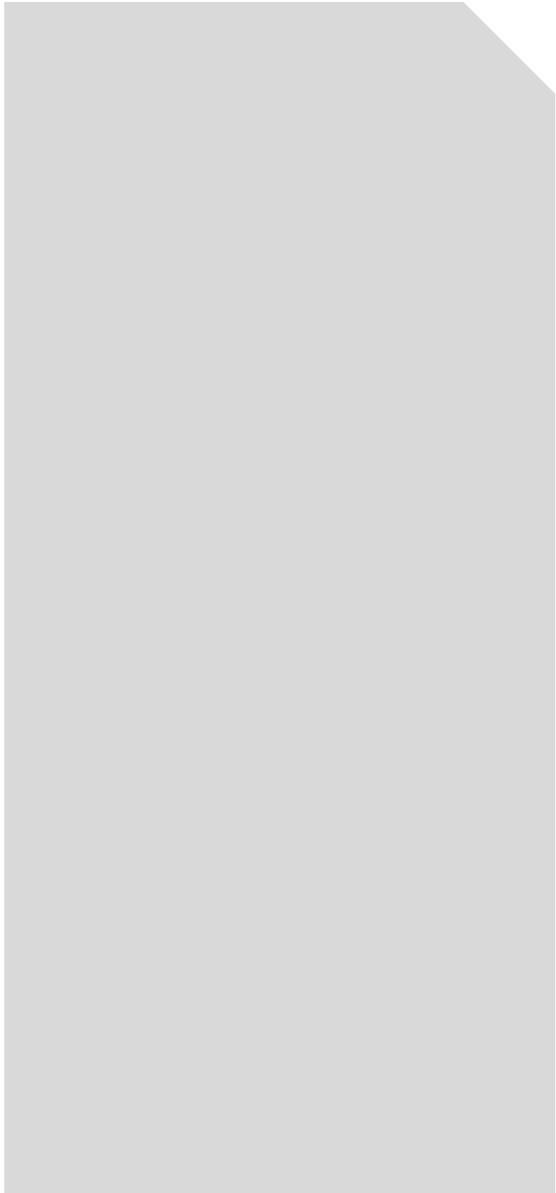
INNOVATION DURCH KOOPERATION

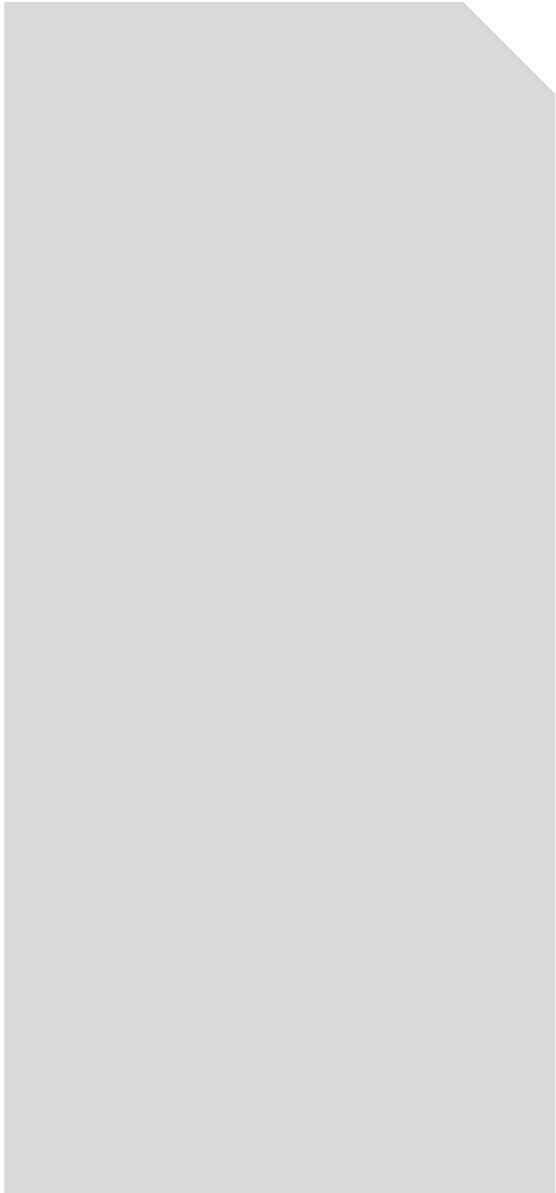
Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0





Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

#3 Elektrische Energiespeicher Teil b –
 „Kondensatoren und Supercaps“

#3 Electrical Energy Storage part b –
 „Capacitors and Supercaps“

Vorlesung #3b | Lecture #3b



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



1. Capacitors and Supercaps

Content ⇒ Learning objectives

- Charge / discharge behavior and curves
⇒ Basic understanding of this characteristic
- Derivation of the charge-discharge curves by means of a differential equation
⇒ Understanding why this characteristic is mathematically present
- Half-life, meaning and derivation
⇒ Understanding why this characteristic is present and what it means
- Circuit variants of capacitors and their calculation
⇒ Ability to calculate capacitors and their interconnection

Elektrische Energiespeicher – Kondensatoren und Supercaps

Inhalt ⇒ Lernziele

- Laden-/Entlade-Verhalten und -kurven
⇒ Grundverständnis für diese Charakteristik
- Herleitung der Lade-Entladekurven mittels Differentialgleichung
⇒ Verständnis warum diese Charakteristik mathematisch vorliegt
- Halbwertszeit, Bedeutung und Herleitung
⇒ Verständnis warum diese Charakteristik vorliegt und was sie bedeutet
- Schaltungsvarianten von Kondensatoren und deren Berechnung
⇒ Fähigkeit Kondensatoren und Verschaltung davon zu berechnen

1. Capacitors and Supercaps

1.6 Mathematical derivation - discharge curve (hom. DGL 1st order)

Condensor: current and voltage when switching on and off

1. Kondensatoren und Supercaps

1.6 Lade-/Entladeverlauf - Kurzeinführung

VIDEO: „Kondensator beim Ein- und Ausschalten“ [0:00-4:36]



KONDENSATOR BEIM EINSCHALTEN

Ladekurve:

Masche: $U_0 = U_R + U_C$

2:03 / 5:03

<https://youtu.be/1VUrNbBESd0>

1. Capacitors and Supercaps

1.6 Mathematical derivation - discharge curve (hom. DGL 1st order)

A capacitor with the capacitance C , which was charged with a voltage U_0 with the charge Q_0 , is discharged via a resistor R . According to Kirchhoff's 2nd law (mesh rule), the equation applies at every point in time t of the discharge process

$$U_R(t) + U_C(t) = 0$$

where the voltage $U_C(t)$ across the capacitor is calculated as positive and the voltage $U_R(t)$ across the resistor is calculated as negative because of the current direction opposite to the charging process.

With

$$U_R(t) = R \cdot I(t) \text{ (Ohm's law),}$$

$I(t)$: current in the circuit during the discharge process and $U_C(t) = Q(t) / C$ (capacitor equation: $Q(t)$: charge on the capacitor during the discharge process)

results with $I(t) = \dot{Q}(t) = dQ(t) / dt$

This is the homogeneous first order differential equation for the charge $Q(t)$ on the capacitor during the discharge process. The largest $\tau = R \cdot C$ is called the time constant.

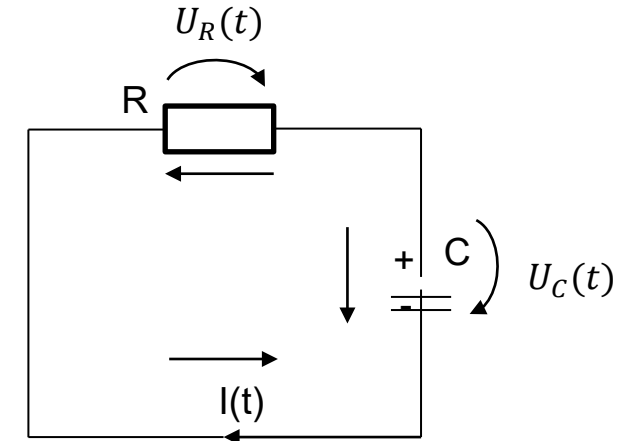
1. Kondensatoren und Supercaps

1.6 Mathematische Herleitung – Entladeverlauf (hom. DGL 1. Ordnung)

Ein Kondensator mit der Kapazität C , der mit einer Spannung U_0 mit der Ladung Q_0 aufgeladen wurde, wird über einen Widerstand R entladen. Es gilt nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz (Maschenregel) zu jedem Zeitpunkt t des Entladevorgangs die Gleichung

$$U_R(t) + U_C(t) = 0$$

wobei die Spannung $U_C(t)$ über dem Kondensator positiv und die Spannung $U_R(t)$ über dem Widerstand wegen der gegenüber dem Aufladevorgang entgegengesetzten Stromrichtung negativ gerechnet wird.



Mit

$$U_R(t) = R \cdot I(t) \text{ (Ohm'sches Gesetz),}$$

$I(t)$: Stromstärke im Stromkreis während des Entladevorgangs und $U_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$ (Kondensatorgleichung: $Q(t)$: Ladung auf dem Kondensator während des Entladevorgangs)

$$\text{ergibt sich mit } I(t) = \dot{Q}(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

Dies ist die homogene Differentialgleichung 1. Ordnung für die Ladung $Q(t)$ auf dem Kondensator während des Entladevorgangs. Die Größe $\tau = R \cdot C$ heißt Zeitkonstante.

$$U_R(t) + U_C(t) = 0$$

$$\Leftrightarrow R \cdot I(t) + \frac{Q(t)}{C} = 0$$

$$\Leftrightarrow R \cdot \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{C} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot Q(t) = 0$$

1. Capacitors and Supercaps

1.6 Mathematical derivation - discharge curve (hom. DGL 1st order)

Solution of the homogeneous differential equation $y' + a \cdot y = 0$ with y as a function of x .

1. Kondensatoren und Supercaps

1.6 Mathematische Herleitung – Entladeverlauf (hom. DGL 1. Ordnung)

Lösung der homogenen Differentialgleichung $y' + a \cdot y = 0$ mit y als Funktion von x .

$$y' + a \cdot y = 0 \xrightarrow{-a \cdot y} y' = -a \cdot y \xrightarrow{:y} \frac{y'}{y} = -a \xrightarrow{\int}$$

$$\int \frac{y'}{y} dx = \int -a dx \xrightarrow{\text{s.o.}} \ln y = -a \cdot x + c$$

$$\xrightarrow{\exp()} y = e^{-a \cdot x + c} \xrightarrow{} y = e^{-a \cdot x} \cdot e^c = c_0 \cdot e^{-a \cdot x} \quad \text{mit } c_0 = e^c$$

Also ist $y = c_0 \cdot e^{-a \cdot x}$ eine Lösung der Differentialgleichung $y' + a \cdot y = 0$

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} Q(t) = 0$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$$

1. Capacitors and Supercaps

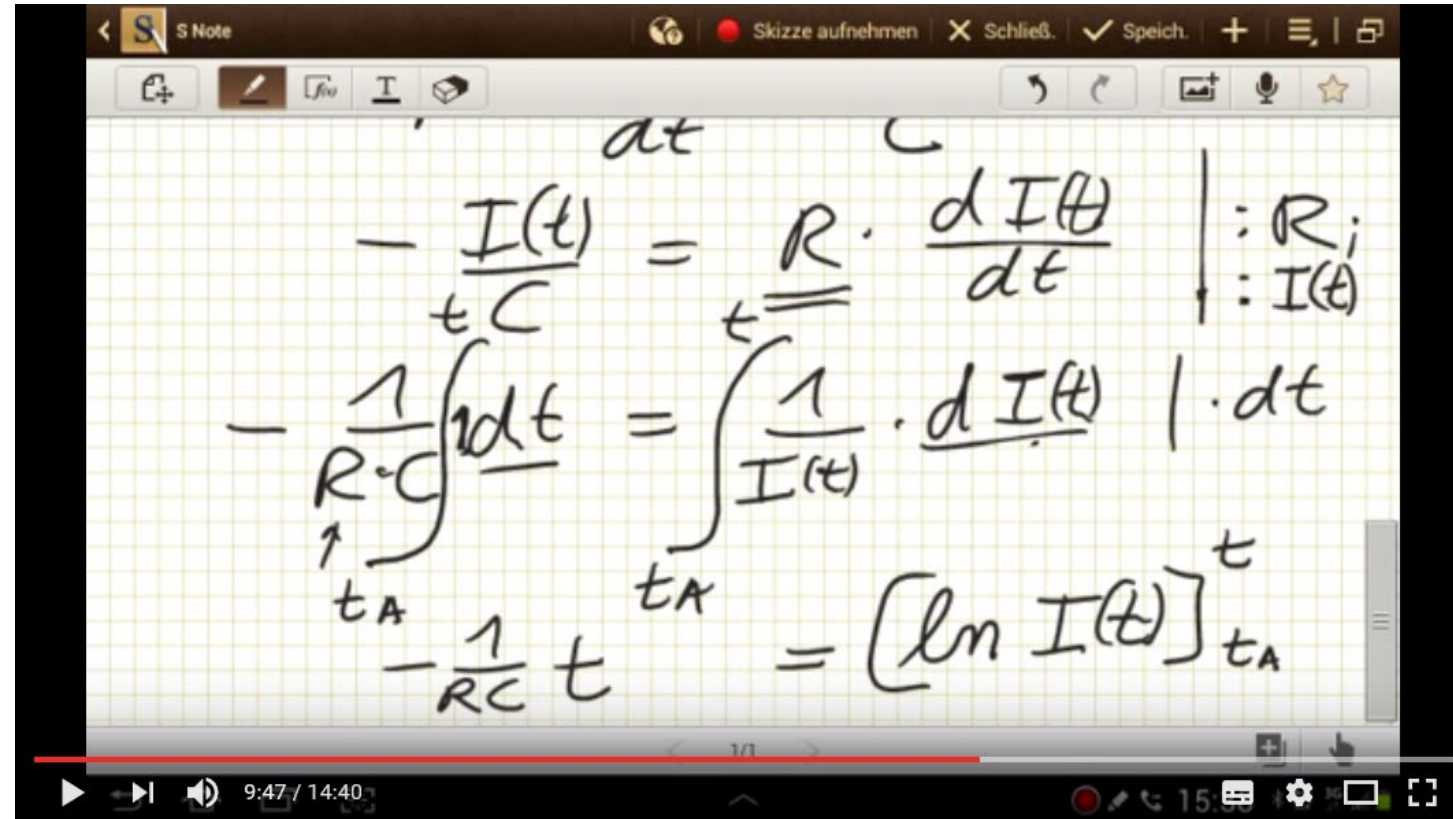
 1.6 Mathematical derivation - charge curve
(inhom. DGL 1st order)

Charging a capacitor in the DC circuit

1. Kondensatoren und Supercaps

1.6 Mathematische Herleitung – Ladeverlauf (inhom. DGL 1. Ordnung)

 VIDEO: „Das Aufladen eines Kondensators“ [0:00 – 14:40]  Dt.



$$\begin{aligned}
 -\frac{I(t)}{tC} &= R \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad \left| \begin{array}{l} : R; \\ : I(t) \end{array} \right. \\
 -\frac{1}{R \cdot C} \int dt &= \int \frac{1}{I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{I(t)} \cdot dt \\
 -\frac{1}{RC} t &= \left[\ln I(t) \right]_{t_A}^t
 \end{aligned}$$

<https://youtu.be/oqcWjm5ybK8>

1. Capacitors and Supercaps

1.6 Mathematical derivation - discharge curve

- Load curve
- Current curve
- Voltage curve

1. Kondensatoren und Supercaps

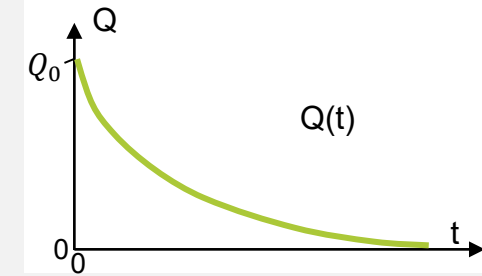
1.6 Mathematische Beschreibung – Entladungsverlauf-Kurve

Entladen eines Kondensators

Ladungsverlauf

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

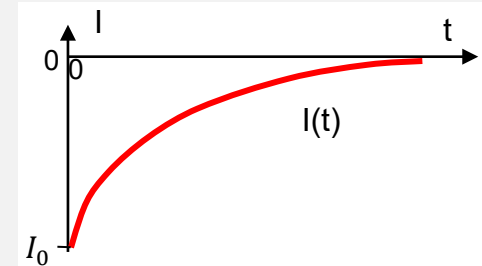
mit $Q_0 = -C \cdot U_0$



Stromverlauf

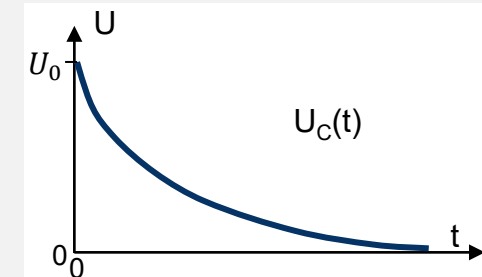
$$I(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

mit $I_0 = -\frac{U_0}{R}$



Spannungsverlauf

$$U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$



1. Capacitors and Supercaps

1.6 Mathematical derivation - discharge curve

- Load curve
- Current curve
- Voltage curve

1. Kondensatoren und Supercaps

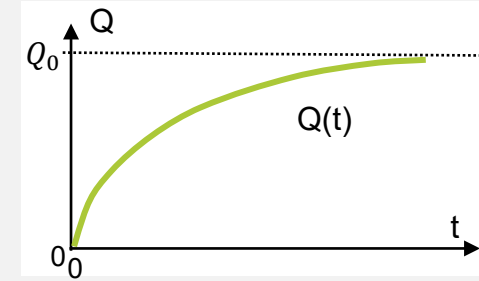
1.6 Mathematische Beschreibung – Ladungsverlauf-Kurve

Laden eines Kondensators

Ladungsverlauf

$$Q(t) = Q_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\right)$$

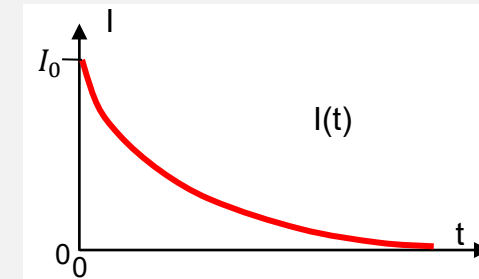
$$\text{mit } Q_0 = -C \cdot U_0$$



Stromverlauf

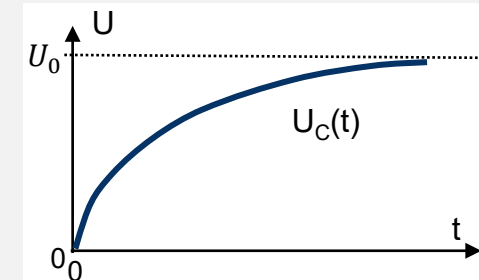
$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

$$\text{mit } I_0 = -\frac{U_0}{R}$$



Spannungsverlauf

$$U_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\right)$$



1. Capacitors and Supercaps

1.7 Half-life period - Mathematical Derivation

At the time t_1 is the charge Q_1 on the capacitor, at time t_2 , at which the charge Q_2 is present on the capacitor, which is only half of the charge Q_1 . The time span $T_{1/2} = t_2 - t_1$ can be calculated as follows:

The formula shows that the time in which the capacitor loses half of its charge is always constant, regardless of how much charge is currently on the capacitor. This period, which only depends on the size of the resistance R and the capacitance C , is called the half-life period $T_{1/2} = R \cdot C \cdot \ln 2 \approx R \cdot C \cdot 0.693$

The product $\tau = R \cdot C$ is called the time constant of the RC element

The relationship between half-life period and time constant is: $T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$

Because the formulas have the same structure and are independent of the charge, the size of the half-life also applies to the voltage and the current strength.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.7 Halbwertszeit – Mathematische Herleitung

Bedeutung der Konstante $\tau = R \cdot C$ als Zeitkonstante des RC-Gliedes, Halbwertszeit

Zur Zeit t_1 sei auf dem Kondensator die Ladung Q_1 , zur Zeit t_2 , zu der auf dem Kondensator die Ladung Q_2 vorhanden ist, die nur noch die Hälfte der Ladung Q_1 beträgt.
Die Zeitspanne $T_{\frac{1}{2}} = t_2 - t_1$, kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_2 = \frac{1}{2} \cdot Q_1 \quad \text{und} \quad Q_1(T_{\frac{1}{2}}) = Q_1 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot T_{\frac{1}{2}}} \quad \xrightarrow{: Q_1} \quad \frac{1}{2} = e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\xrightarrow{\ln()} \quad -\ln 2 = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot T_{\frac{1}{2}} \quad \xrightarrow{\cdot (-R \cdot C)} \quad R \cdot C \cdot \ln 2 = T_{\frac{1}{2}}$$

Die Formel zeigt, dass die Zeit, in der der Kondensator die Hälfte seiner Ladung verliert, immer konstant ist, unabhängig davon, wie viel Ladung sich gerade auf dem Kondensator befindet. Diesen Zeitraum, der nur von der Größe des Widerstandes R und der Kapazität C abhängt, nennt man „Halbwertszeit“ $T_{\frac{1}{2}} = R \cdot C \cdot \ln 2 \approx R \cdot C \cdot 0,693$

Das Produkt $\tau = R \cdot C$ nennt man **Zeitkonstante des RC-Gliedes**

Der Zusammenhang zwischen Halbwertszeit und Zeitkonstante lautet: $T_{\frac{1}{2}} = \tau \cdot \ln 2$

Wegen der Strukturgleichheit der Formeln und der Unabhängigkeit von der Ladung gilt die Größe der Halbwertszeit auch für die Spannung und die Stromstärke.

Kurzer Einheiten-Check:
 - Widerstand Ohm bzw. V/A
 - Kapazität in Farad bzw. As/V
 d.h. $R \cdot C$ hat die Einheit Sekunde

1. Capacitors and Supercaps

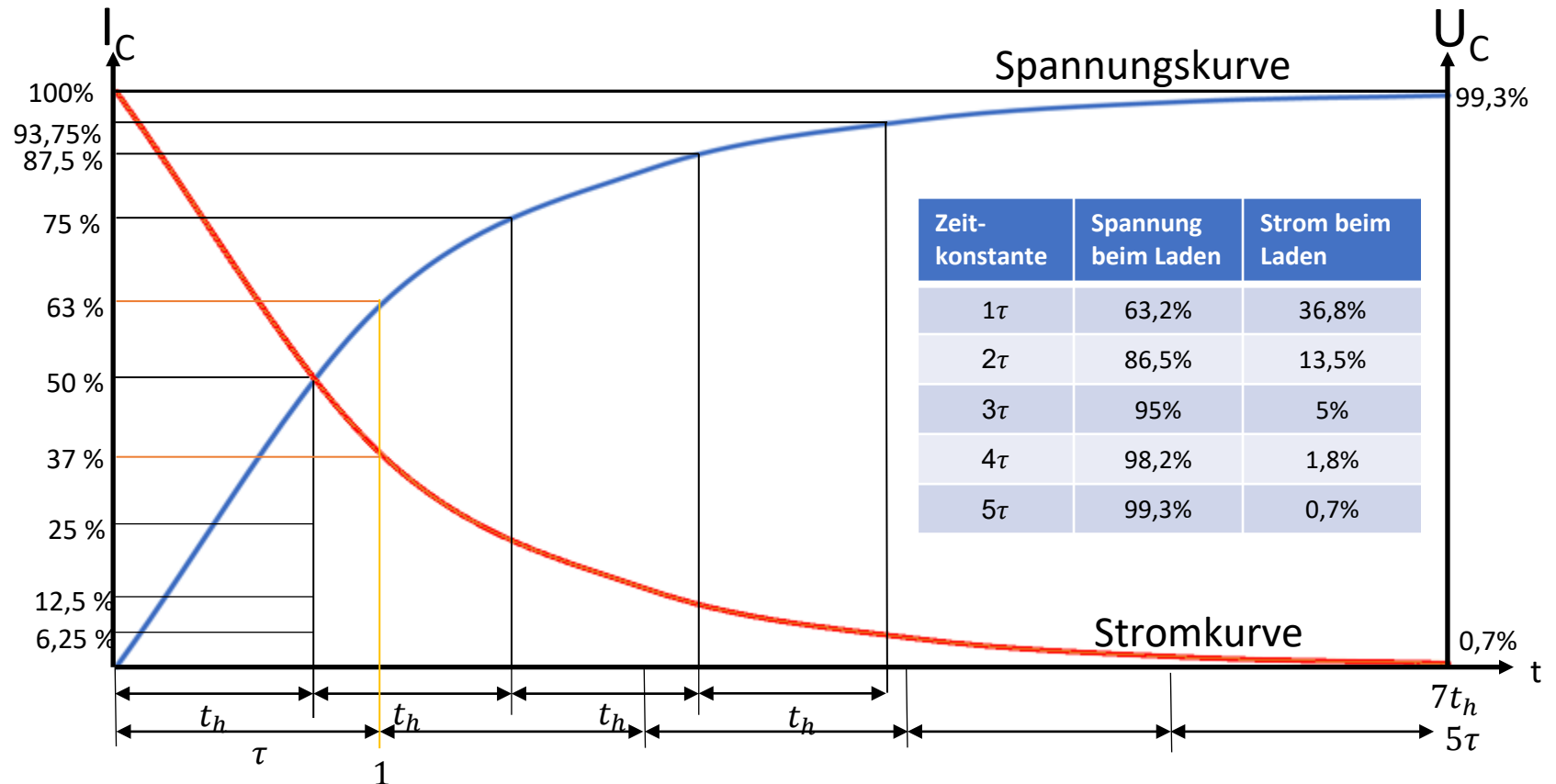
1.7 Half-life period - Significance and relation to RC

The following diagram shows the exact charging process of a capacitor. After about seven half-live periods, the capacitor can be considered charged (99.3%). The exact current end value of 0% is never reached. The current and voltage curves approach their final values asymptotically.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.7 Halbwertszeit – Bedeutung und Relation zu RC

Das folgende Diagramm stellt den genauen **Ladevorgang** eines Kondensators dar. Nach rund sieben Halbwertszeiten τ (ca. 5 fachen der Zeitkonstanten $R \cdot C$) kann der Kondensator mit 99,3% als praktisch aufgeladen betrachtet werden. Der exakte Stromendwert von 0% wird nie erreicht. Die Strom- und Spannungskurven nähern sich asymptotisch ihren Endwerten.



1. Capacitors and Supercaps

1.8 Interconnection - parallel connection

When capacitors (here two) are connected in parallel, their plates (shown here as “left” and “right”) are each at the same potential. The same potential difference U thus prevails between the plates.

Accordingly, the following applies:

$$U_{ges} = U_1 = U_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U = (C_1 + C_2) \cdot U$$

This means that a single capacitor with the same charge and potential difference would have the total capacitance

$$U_{ges} = U_1 = U_2$$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2$$

$$U_i = Q_i / C_i$$

$$C_{ges} = C_1 + C_2$$

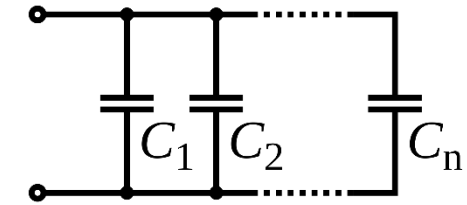
1. Kondensatoren und Supercaps

1.8 Verschaltung - Parallelschaltung

Bei der **Parallelschaltung** von Kondensatoren (hier zwei) sind ihre Platten (hier als „links“ und „rechts“ dargestellt) **jeweils auf demselben Potential**. Zwischen den Platten herrscht damit die gleiche Potentialdifferenz U.

Demnach gilt: $U_{ges} = U_1 = U_2$

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U = (C_1 + C_2) \cdot U$$



Damit hätte ein einzelner Kondensator mit derselben Ladung und Potenzialdifferenz die Gesamtkapazität

$$U_{ges} = U_1 = U_2$$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2$$

$$U_i = Q_i / C_i$$

$$C_{ges} = C_1 + C_2$$

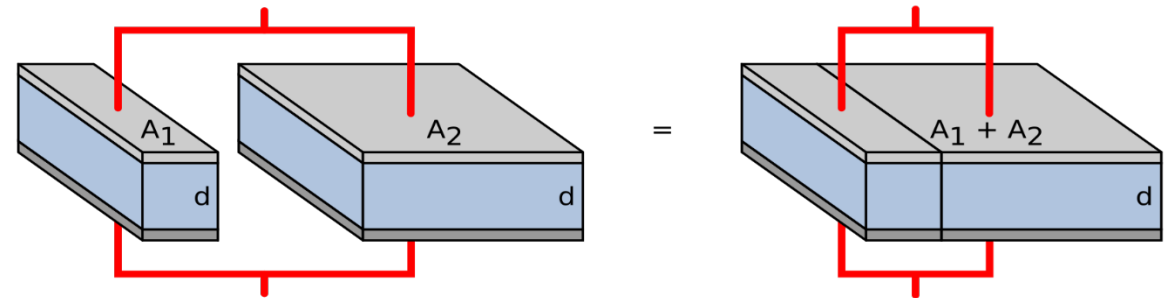


Illustration of the serial connection of two capacitors, Honina, CC0 + https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kondensator_C1_plus_C2.PNG#/media/File:Kondensator_C1_plus_C2.svg

1. Capacitors and Supercaps

1.8 Interconnection - serial connection

When capacitors are connected in series (here two or three), the charge Q, which results from the separation of the charges on the first capacitor, is automatically the same as that which then arises on the second and then on the third. This means that the charge Q is the same on all three capacitors. The total potential difference across all three capacitors is the sum of the three individual potential differences and must correspond to the charging voltage. Accordingly, the following results:

$U = U_1 + U_2$ zugleich gilt $U_i = Q_i / C_i$ und $Q_{ges} = Q_1 = Q_2$

It follows $\frac{Q}{C_{ges}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$

Respectively $\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

$Q_{ges} = Q_1 = Q_2$

$U_{ges} = U_1 + U_2$

$U_i = Q_i / C_i$

$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

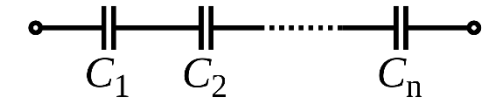
1. Kondensatoren und Supercaps

1.8 Verschaltung - Serienschaltung

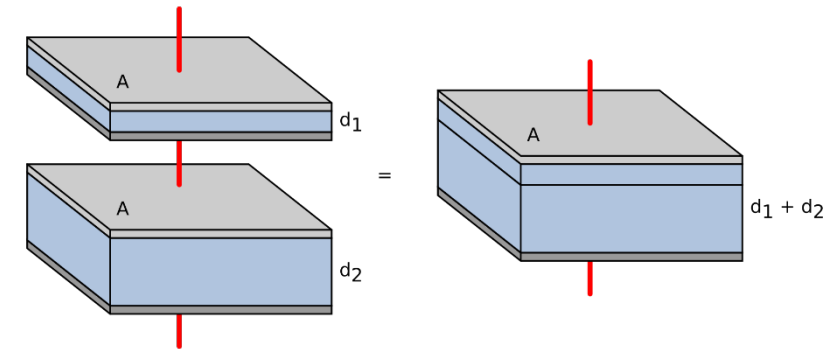
Bei der **Reihenschaltung** von Kondensatoren (hier zwei bzw. drei) ist die **Ladung Q**, die sich durch Trennung der Ladungen auf dem ersten Kondensator ergibt automatisch **genauso groß, wie die, die sich dann auf dem zweiten und danach auf dem dritten Kondensator einstellt**. D.h. die Ladung Q ist auf allen drei Kondensatoren gleich groß. Die Gesamtpotenzialdifferenz über alle drei Kondensatoren ist die Summe der drei einzelnen Potenzialdifferenzen und muss der Ladespannung entsprechen. Demnach gilt:

$U = U_1 + U_2$ zugleich gilt $U_i = Q_i / C_i$ und $Q_{ges} = Q_1 = Q_2$

Daraus folgt: $\frac{Q}{C_{ges}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$ bzw. $\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$



$Q_{ges} = Q_1 = Q_2$
 $U_{ges} = U_1 + U_2$
 $U_i = Q_i / C_i$
 $\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$



Kondensator C1 C2 Reihe, Honina, CC0 †

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kondensator_C1_plus_C2.PNG#/media/File:Kondensator_C1_C2_Reihe.svg

1. Capacitors and Supercaps

1.8 Interconnection - summary

Energy content with parallel or series connection of capacitors:

The single capacitor

- Assumptions: $C = 0.1 \text{ F}$; $U = 2\text{V}$
- $W = \frac{1}{2} \cdot 0.1 \text{ F} \cdot (2\text{V})^2 = 0.2\text{J}$

Two identical capacitors connected in parallel

- $C_{ges} = 0.1 \text{ F} + 0.1 \text{ F} = 0.2 \text{ F}$
- $W = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \text{ F} \cdot (2 \text{ V})^2 = 0.4 \text{ J}$

-> The energy content adds up!

Two identical capacitors connected in series

- $1 / C_{ges} = 1 / (0.1 \text{ F}) + 1 / (0.1 \text{ F}) = 20 / \text{F}$

- $C_{ges} = 0.05 \text{ F}$ (total capacity halved)

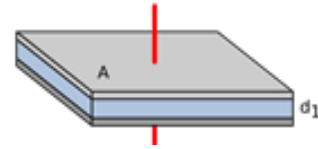
- The voltage may be twice as high (!).

- $W = \frac{1}{2} \cdot 0.05 \text{ F} \cdot (4\text{V})^2 = 0.4\text{J}$

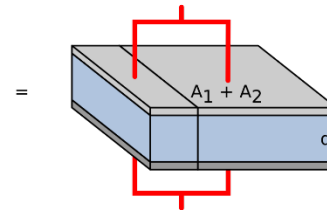
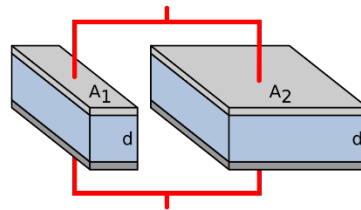
-> The energy content adds up! Q.e.d.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.8 Verschaltung - Zusammenfassung



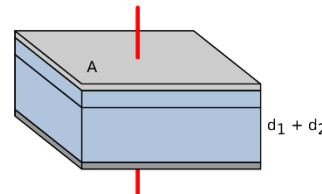
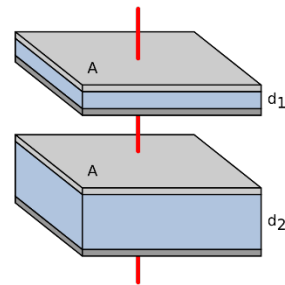
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$



$$U_{ges} = U_1 = U_2$$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2$$

$$C_{ges} = C_1 + C_2$$



$$Q_{ges} = Q_1 = Q_2$$

$$U_{ges} = U_1 + U_2$$

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Beispiele:

Der einzelne Kondensator

- Annahmen: $C=0,1 \text{ F}$; $U=2 \text{ V}$
- $W = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \text{ F} \cdot (2 \text{ V})^2 = 0,2 \text{ J}$

Zwei identische Kondensatoren parallel geschaltet

- $C_{ges} = 0,1 \text{ F} + 0,1 \text{ F} = 0,2 \text{ F}$
- $W = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \text{ F} \cdot (2 \text{ V})^2 = 0,4 \text{ J}$
- ⇒ Der Energieinhalt addiert sich !







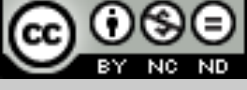
Zwei identische Kondensatoren seriell geschaltet

- $1/C_{ges} = 1/(0,1 \text{ F}) + 1/(0,1 \text{ F}) = 20/\text{F}$
- $C_{ges} = 0,05 \text{ F}$ (Gesamtkapazität halbiert sich)
- Die Spannung darf (!) doppelt so hoch sein.
- $W = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \text{ F} \cdot (4 \text{ V})^2 = 0,4 \text{ J}$

⇒ Der Energieinhalt addiert sich !

Q.e.d.

Illustration of the serial connection of two capacitors, Honina, CC0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kondensator_C1_plus_C2.PNG#/media/File:Kondensator_C1_plus_C2.svg
 Kondensator C1 C2 Reihe, Honina, CC0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kondensator_C1_plus_C2.PNG#/media/File:Kondensator_C1_C2_Reihe.svg

| †CC-Lizenzen | Bezeichnung | Version | Link zum Lizenz-/Vertragstext |
|---|--|--|--|
|  | CC0 Bedingungslose Lizenz | Vers. 1.0 | https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode |
|  | CC-BY Attribution (Namensnennung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode |

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



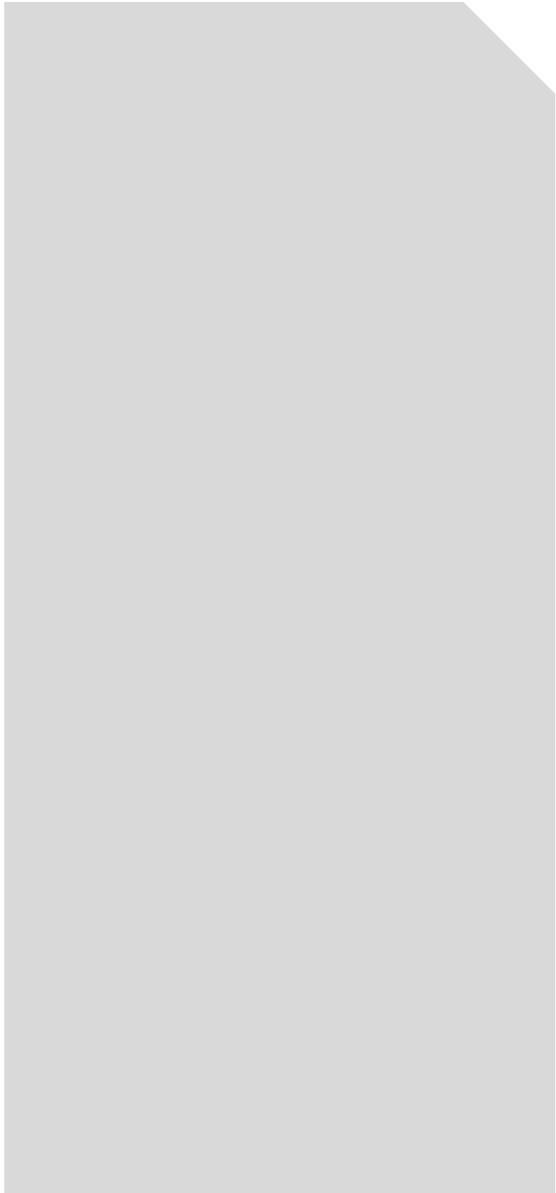
INNOVATION DURCH KOOPERATION

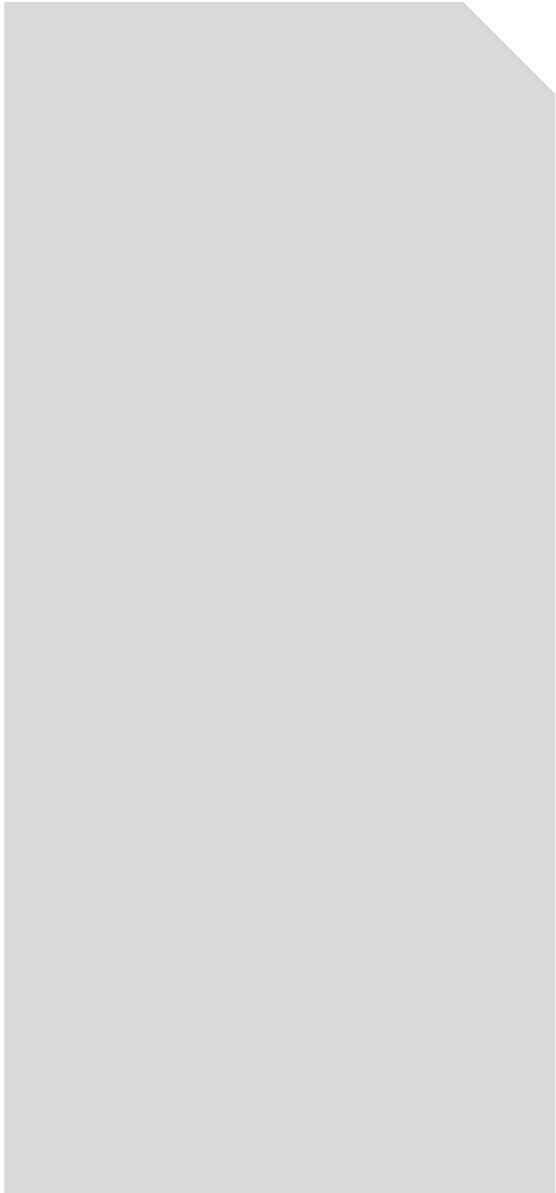
Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0





Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

#3 Elektrische Energiespeicher Teil c –
 „Kondensatoren und Supercaps“

#3 Electrical Energy Storage part c –
 „Capacitors and Supercaps“

Vorlesung #3c | Lecture #3c



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



1. Capacitors and Supercaps

Content ⇒ Learning objectives

- Different capacitor principles: Electrostatic capacitors (non-polarized, polarized), electrochemical capacitors (double-layer capacitors, pseudo-capacitors)
⇒ Approach to the technology, overview of the basic variants
- Characteristics of the different capacitors also in comparison to conventional battery storage systems
⇒ Basic understanding of advantages and disadvantages of different types
- Half-life, meaning and derivation
⇒ Understanding why this characteristic is present and what it means
- Supercaps: short circuit current compared to conventional batteries and calculation
⇒ Understanding of simple calculation equations

Kondensatoren und Supercaps

Inhalt ⇒ Lernziele

- Unterschiedliche Kondensatorprinzipien: Elektrostatische Kondensatoren (Nicht-polarisiert, polarisiert), Elektrochemische Kondensatoren (Doppelschichtkondensatoren, Pseudokondensatoren)
⇒ Heranführung an die Technologie, Übersicht über die Grundvarianten
- Charakteristika der verschiedenen Kondensatoren auch im Vergleich zu konventionellen Batteriespeichern
⇒ Grundverständnis für Vor- und Nachteile verschiedener Typen
- Supercaps: Kurzschlussstrom im Vergleich zu konventionellen Batterien und Berechnung
⇒ Verständnis für einfache Berechnungsgleichungen

1. Capacitors and Supercaps
1.9 Different types of capacitors

Capacitors

-Electrostatic capacitors

Non-polarized capacitors

- "Standard condenser (c)" - capacitors:
- Vacuum, air, mica -C
- Ceramic - C
- Plastic film - C
- Paper - C

Polarized capacitors

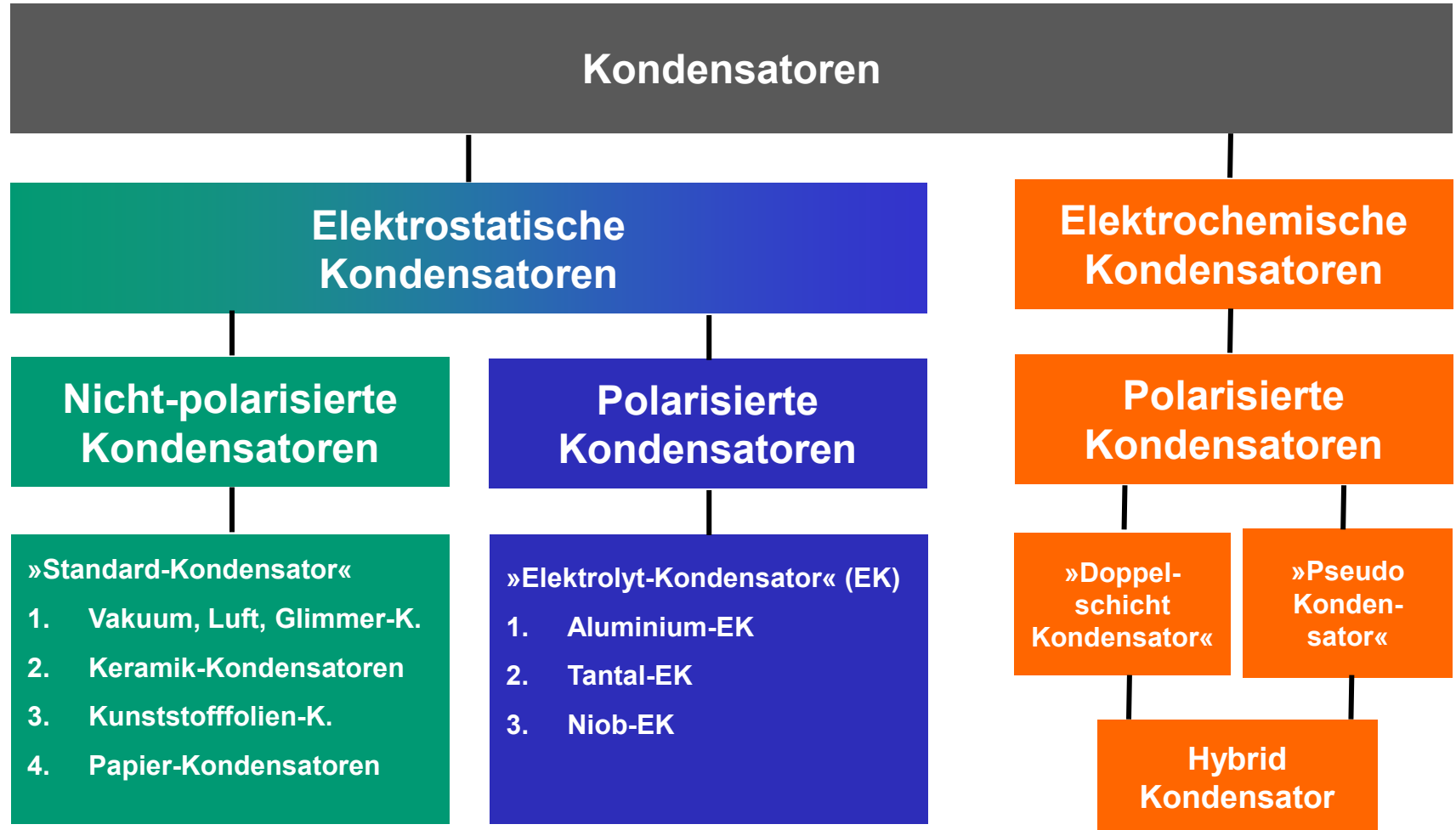
- "Electrolytic capacitor" (EK)
- Aluminum - EK
- Tantalum -EK
- Niobium – EK

-Electrochemical capacitors

Polarized capacitors

- "Double-layer capacitor"
- "Pseudo capacitor"
- Hybrid capacitor

1. Kondensatoren und Supercaps
1.9 Weitere Kondensator-Typen



1. Capacitors and Supercaps
 1.9 Different types of capacitors

- Ceramic capacitors
- Plastic film capacitors
- Electrolytic capacitors

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen – Nicht-polarisierte Kondensatoren

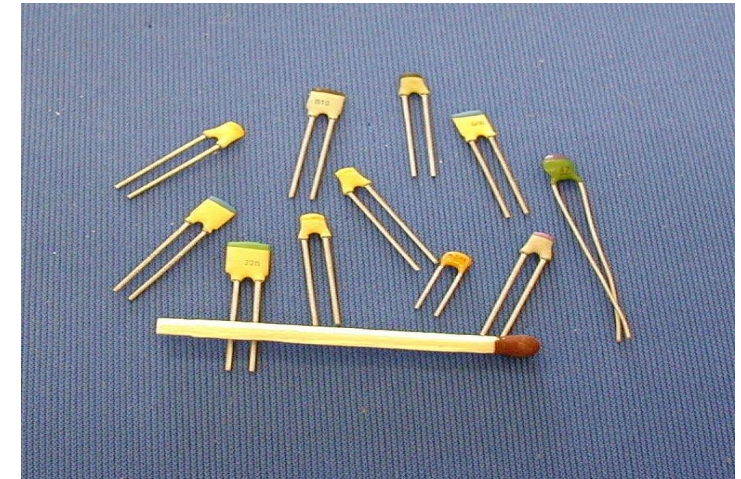


Keramik-Kondensatoren

Kunststofffolien-Kondensatoren



Elektrolyt-Kondensatoren



Quelle: RWTHAachen, ISEA

1. Capacitors and Supercaps

1.9 Electrolyte / double layer capacitor

Difference capacitor / double layer capacitor:

Electrolytic capacitor

Cross-section through the structure of an aluminum electrolytic capacitor with the anode foil, the overlying oxide (dielectric), the paper spacer and the cathode foil.

- Large area through micro- and macroscopically roughened anode surface
- Extremely thin electrochemically applied non-conductive dielectric layer
- Cathode ("backplate") is formed by (conductive) electrolyte
- Separator as short-circuit lock

The "classic" capacitor

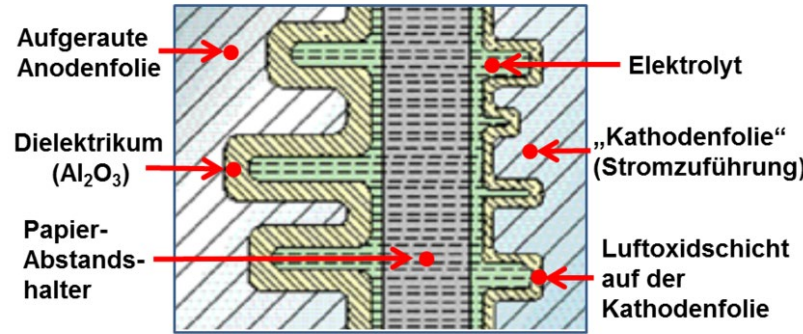
- Electric field between TWO electrically conductive plates
- Dielectric (weakens electric field), increases capacity and increases dielectric strength (higher voltage!)

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen - Polarisierter-Kondensator

»Elektrolyt-Kondensator«

Querschnitt durch den Aufbau eines Aluminium-Elektrolytkondensators mit der Anodenfolie, dem aufliegenden Oxid (Dielektrikum), dem Papier-Abstandshalter und der Kathodenfolie

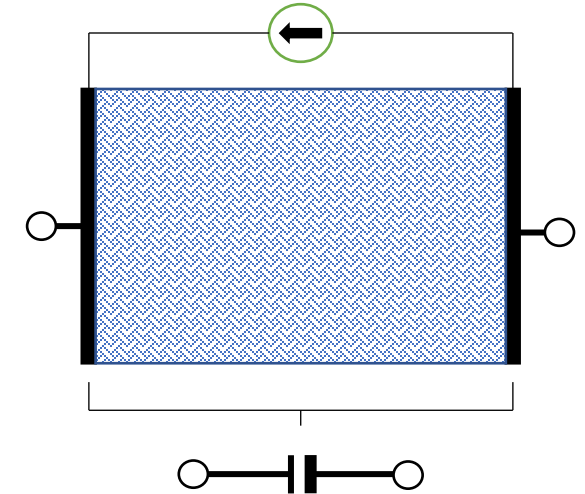


Querschnitt durch den Aufbau eines Aluminium-Elektrolytkondensators, Elcap, CC0 † <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolytkondensator#/media/Datei:Elko-Prinzipschnittbild.png>

Der Elektrolyt-Kondensator

- Große Fläche durch mikro- und makroskopisch aufgeraute Anodenoberfläche
- Extrem dünne elektrochemisch aufgebraachte nichtleitende Dielektrikumsschicht
- Kathode („Gegenplatte“) wird durch (leitfähigen) Elektrolyt gebildet
- Separator als Kurzschlussperre

Vgl: »Standard-Kondensator«



Der klassische Platten-Kondensator

- Elektrisches Feld zwischen ZWEI elektrisch leitenden Platten
- Dielektrikum (schwächt elektr. Feld), erhöht Kapazität und erhöht Durchschlagfestigkeit (höhere Spannung!)

1. Capacitors and Supercaps
1.9 Different types of capacitors

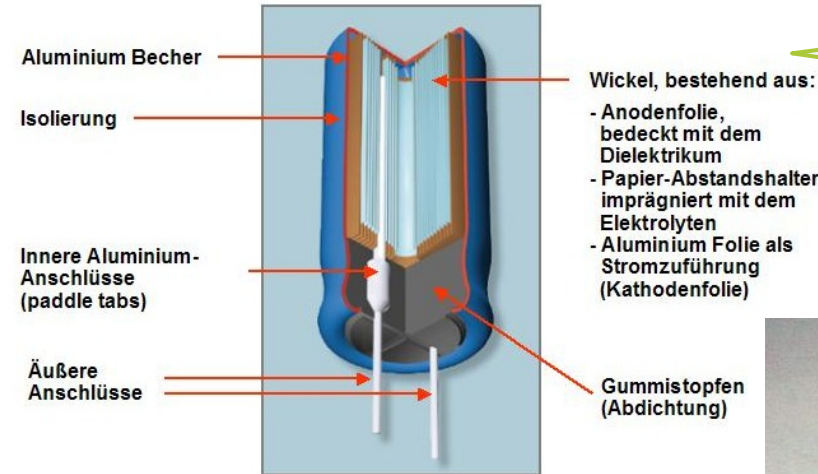
Electrolytic capacitor - Structure and product

- Structure of a typical radial (single-ended) aluminum electrolytic capacitor with liquid electrolyte
- A disassembled 100 µF electrolytic capacitor

Schnittbild eines radialen Aluminium-Elektrolytkondensators, Elcap, CC-BY-SA 3.0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Al-Elko-Single-Ended-Wiki-07-02-18.jpg>

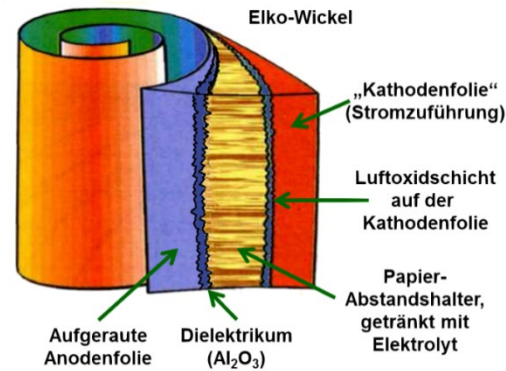
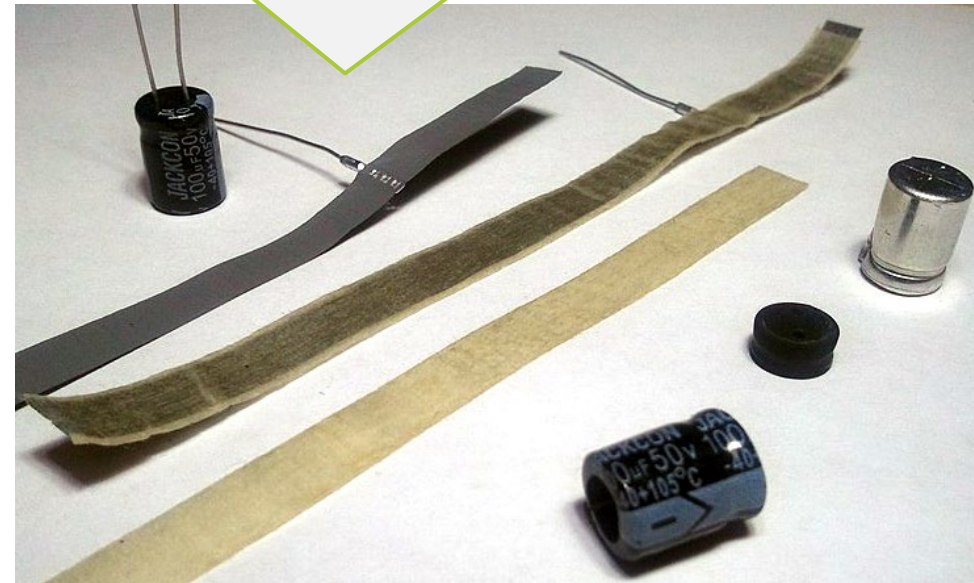
1. Kondensatoren und Supercaps
1.9 Weitere Kondensator-Typen - Elektrolyt-Kondensator

»Elektrolyt-Kondensator« - Aufbau und Produkt



Aufbau eines typischen radialen (single-ended) Aluminium-Elektrolytkondensator mit flüssigem Elektrolyten

Komponenten eines 100µF Elektrolytkondensators



Darstellung eines Wickels eines Aluminium-Elektrolytkondensator, Elcap, CC0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elko-Wickelaufbau.png>

A disassembled 100uF electrolytic capacitor, Seapong, CC-BY-SA 3.0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ElectrolyticCapacitorDisassembled.jpg>

1. Capacitors and Supercaps

1.9 Different types of capacitors

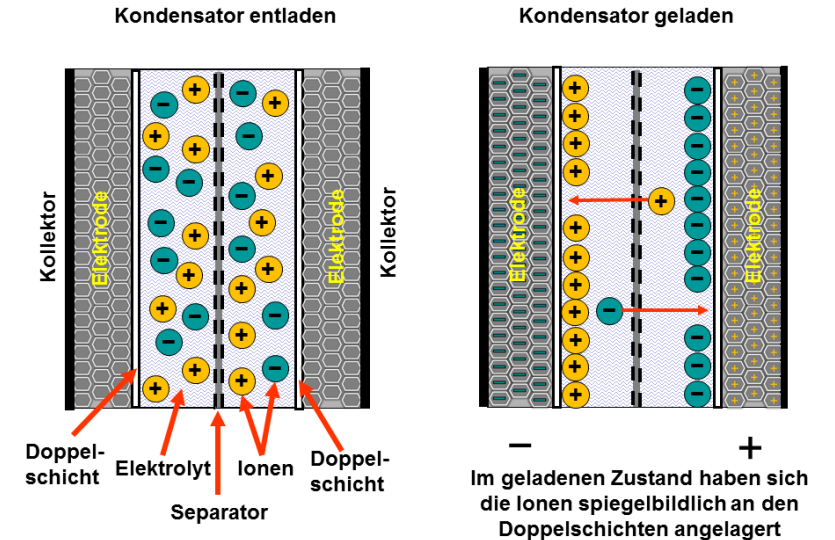
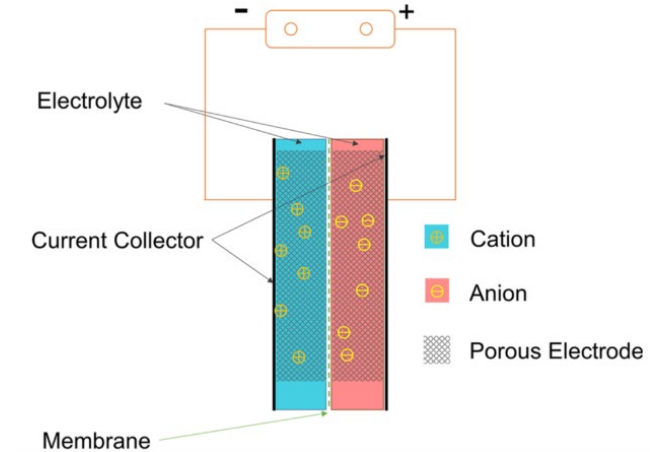
The double layer capacitor

- Both electrodes consist of activated carbon (up to 3000 m²/g) applied to the collectors
- Between the two electrodes are the liquid electrolyte and a membrane, the separator, which protects the two electrodes against short circuits. While the ions can diffuse through the separator, the latter forms a barrier for electrons.
- When a voltage is applied to the collectors, the positive ions migrate from the collector with the positive voltage to the negative electrode, and vice versa. There they form a wafer-thin dielectric only a few molecular layers ($\approx 1\text{nm}$) thick.
- An electric field forms between the charge carriers of the electrodes and the thin ion layer, separating the two charge layers.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen - Doppelschicht-Kondensator

- Beide Elektroden bestehen aus Aktivkohle (bis 3000 m²/g), die auf den Kollektoren aufgebracht sind.
- Zwischen den beiden Elektroden befinden der flüssige Elektrolyt und eine Membran, der Separator, der die beiden Elektroden gegen Kurzschlüsse schützt. Während die Ionen durch den Separator diffundieren können, bildet dieser für Elektronen eine Sperre.
- Wird eine Spannung an die Kollektoren angelegt, wandern die positiven Ionen vom Kollektor mit der positiven Spannung zur negativen Elektrode, und umgekehrt. Dort bilden sie ein hauchdünnes, nur wenige Moleküllagen ($\approx 1\text{nm}$) dickes Dielektrikum.
- Zwischen den Ladungsträgern der Elektroden und der dünnen Ionenschicht bildet sich ein elektrisches Feld, das die beiden Ladungsschichten voneinander trennt.



Aufbau und Funktionsweise eines idealen Doppelschichtkondensators, Elcap, CC0 †
https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#/media/File:Schematic_illustration_of_a_supercapacitor.png

1. Capacitors and Supercaps

1.9 Different types of capacitors

The double layer capacitor

Difference capacitor / double layer capacitor:

The "classic" capacitor

- Electric field between TWO electrically conductive plates
- Dielectric (weakens electric field), increases capacity and increases dielectric strength (higher voltage!)

The double layer capacitor

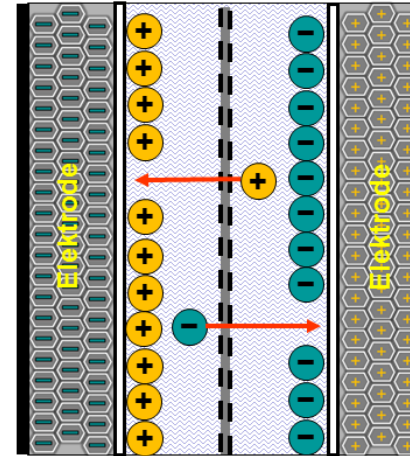
- The capacitance ($A = \text{up to } 3,000 \text{ m}^2/\text{g}$, $d \approx 1 \text{ nm}$) is over 1 farad and can be up to several hundred farads.
- The dielectric strength is relatively low at 2.5 V.
- In terms of construction, the double-layer capacitor differs from electrolytic capacitors in that the electrodes are much larger and their distance from each other is much smaller.

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen - Doppelschicht-Kondensator

»Doppelschicht-Kondensator«

Im geladenen Zustand haben sich die Ionen spiegelbildlich an den Doppelschichten angelagert

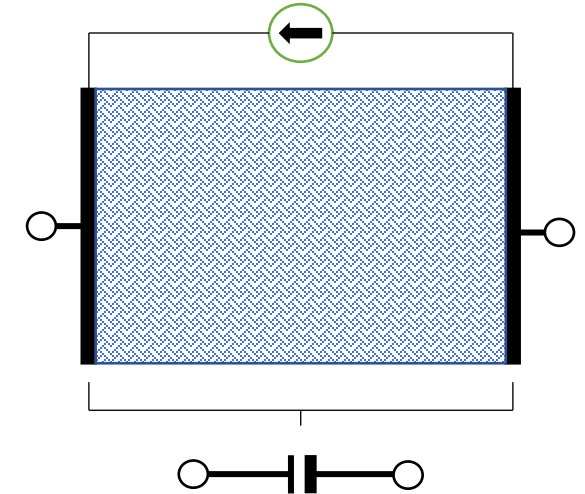


Der Doppelschicht-Kondensator

- Die Kapazität ($A = \text{bis zu } 3.000 \text{ m}^2/\text{g}$, $d \approx 1 \text{ nm}$) liegt bei über 1 Farad und kann bis zu einigen hundert Farad betragen.
- Die Spannungsfestigkeit ist mit 2,5 V relativ gering.
- Vom Aufbau her unterscheidet sich der Doppelschichtkondensator gegenüber Elektrolytkondensatoren dadurch, dass die Elektroden wesentlich größer sind und ihr Abstand zueinander wesentlich geringer ist.

Aufbau und Funktionsweise eines idealen Doppelschichtkondensators, Elcap, CC0 †
https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor#/media/File:Schematic_illustration_of_a_supercapacitor.png

Vgl: »Standard-Kondensator«



Der klassische Platten-Kondensator

- Elektrisches Feld zwischen ZWEI elektrisch leitenden Platten
- Dielektrikum (schwächt elektr. Feld), erhöht Kapazität und erhöht Durchschlagfestigkeit (höhere Spannung!)

1. Capacitors and Supercaps

1.9 Different types of capacitors

Double layer capacitor - structure and product

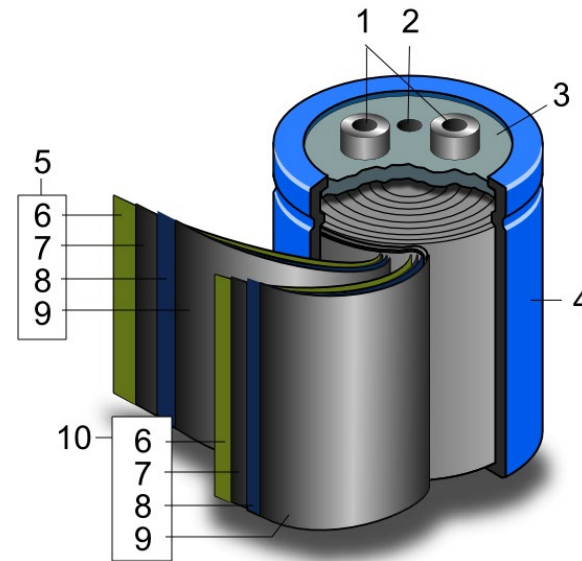
- 1: Connections
- 2: Safety valve
- 3: Sealing washer
- 4: Cup
- 5: Positive electrode
- 6: Separator
- 7-9: Double-sided electrode with central collector
- 10: Negative electrode

Radial and axial types from 3 F to 3400 F, with screw, solder and weld connections

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen - Doppelschicht-Kondensator

Doppelschichtkondensators – Aufbau und Produkt



- 1: Anschlüsse
- 2: Sicherheitsventil
- 3: Abdichtscheibe
- 4: Becher
- 5: Positive Elektrode
- 6: Separator
- 7-9: Doppelseitige Elektrode mit zentralem Kollektor
- 10: Negative Elektrode

Electric double-layer capacitor, Tosaka, CC-BY-SA 3.0 †
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_double-layer_capacitor_\(Activated_carbon_electrode_-_Tube_type\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_double-layer_capacitor_(Activated_carbon_electrode_-_Tube_type).PNG)

Radiale und axiale Bauformen von 3 F bis 3400 F, mit Schraub-, Löt- und Schweißanschlüssen



Radiale und axiale Bauformen von 3F bis 3400F, SECH SA, CC0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Axiale_Bauform.jpeg

1. Capacitors and Supercaps

1.9 Different types of capacitors

Pseudocapacity:

- The pseudocapacity is a reversible redox reaction
- The pseudocapacity occurs only in bilayers. Only on special electrodes, for example, from metal oxides of transition metals (doping / intercalation)
- The adsorbed ion does not chemically bind to the electrode. There is only one electron transfer
- It accounts for about 10% of the total capacity

- a) Cations solvated in the electrolyte
- b) Polarized layer of solvent molecules
- c) Intercalated adsorbed redox ions that have delivered their charge to the electrode

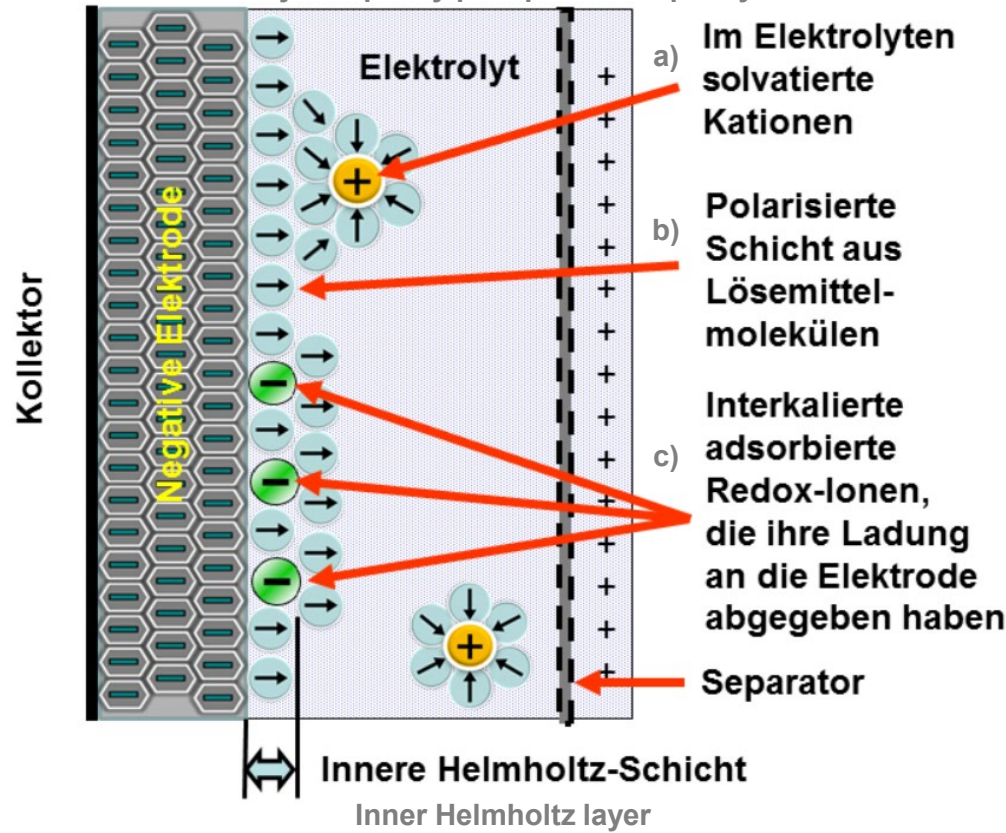
1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen - Pseudo-Kondensator

Pseudokapazität

Doppelschichtkapazität plus Pseudokapazität

Double layer capacity plus pseudo capacity



- Die Pseudokapazität ist eine reversible Redoxreaktion
- Die Pseudokapazität tritt nur bei Doppelschichten auf
- Nur an Spezialelektroden bspw. aus Metalloxiden aus Übergangsmetallen (Dotierung/ Interkalation)
- Das adsorbierte Ion geht keine chemische Bindung mit der Elektrode ein. Es findet nur ein Elektronentransfer statt
- Sie macht ca. 10% der Gesamtkapazität aus

Prinzipdarstellung des gemeinsamen Auftretens einer Doppelschichtkapazität und einer Pseudokapazität in einem elektrochemischen Kondensator, Elcap, CC0 † <https://de.wikipedia.org/wiki/Superkondensator#/media/Datei:Pseudokap-Prinzipdarstellung.png>

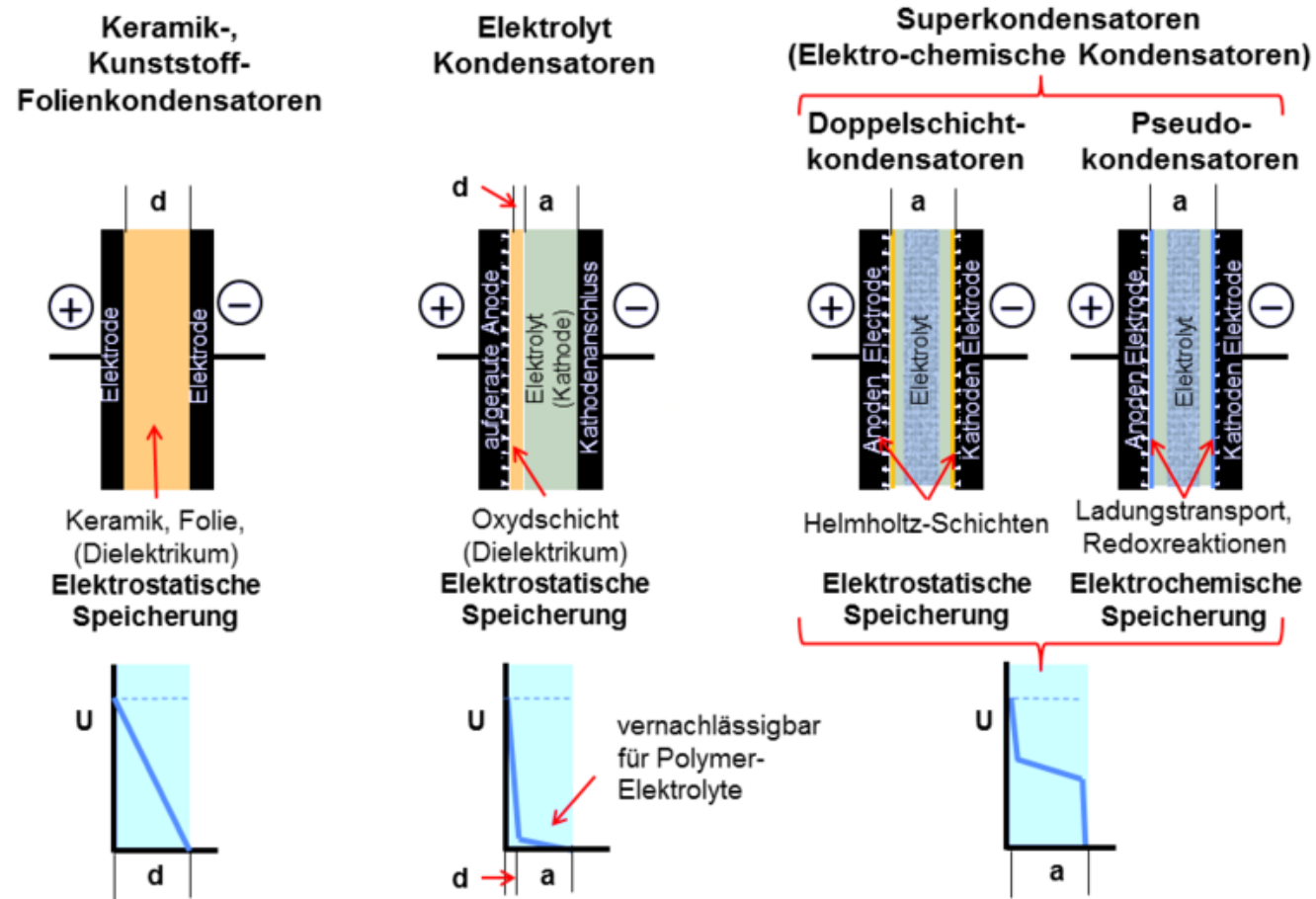
1. Capacitors and Supercaps
1.9 Different types of capacitors

Comparison of "normal" capacitors with electrolytic capacitors and supercaps

1. Kondensatoren und Supercaps

1.9 Weitere Kondensator-Typen – Vergleich von Aufbau

Vergleich von „normalen“ Kondensatoren mit Elektrolytkondensatoren und Supercaps



Elektrostatische und elektrochemische Speicherprinzipien dargestellt an diskreten Kondensatoren, Elcap, CC0 † https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Fixed_capacitors-charge_storage_principles-2-Deutsch.png

1. Capacitors and Supercaps

1.10 Capacitor aging

Rapid aging tests are based on increased voltage and/or increased operating temperature, as both increase the chemical processes in the electrolyte.

A doubling of the reaction rate (aging) occurs at about 10 °C higher temperature or 100 mV higher voltage.

$$t = t_0 \cdot e^{-\alpha(U-U_0)} \cdot e^{-\beta(\vartheta-\vartheta_0)}$$

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{100 \text{ mV}}, \quad \beta = \frac{\ln(2)}{10 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\vartheta_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_0 = 10 \text{ Jahre}$$

Aging only affects capacitors with electrolyte, i.e. e.g. double-layer capacitors.

No relevance for ceramic, plastic, film capacitors

1. Kondensatoren und Supercaps
1.10 Alterung von Kondensatoren

Schnellalterungstests basieren auf erhöhter Spannung und/oder erhöhter Betriebstemperatur, da beides die chemischen Prozesse im Elektrolyten beschleunigt.

Eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit (Alterung) tritt bei etwa 10 °C höherer Temperatur oder 100 mV höherer Spannung ein.

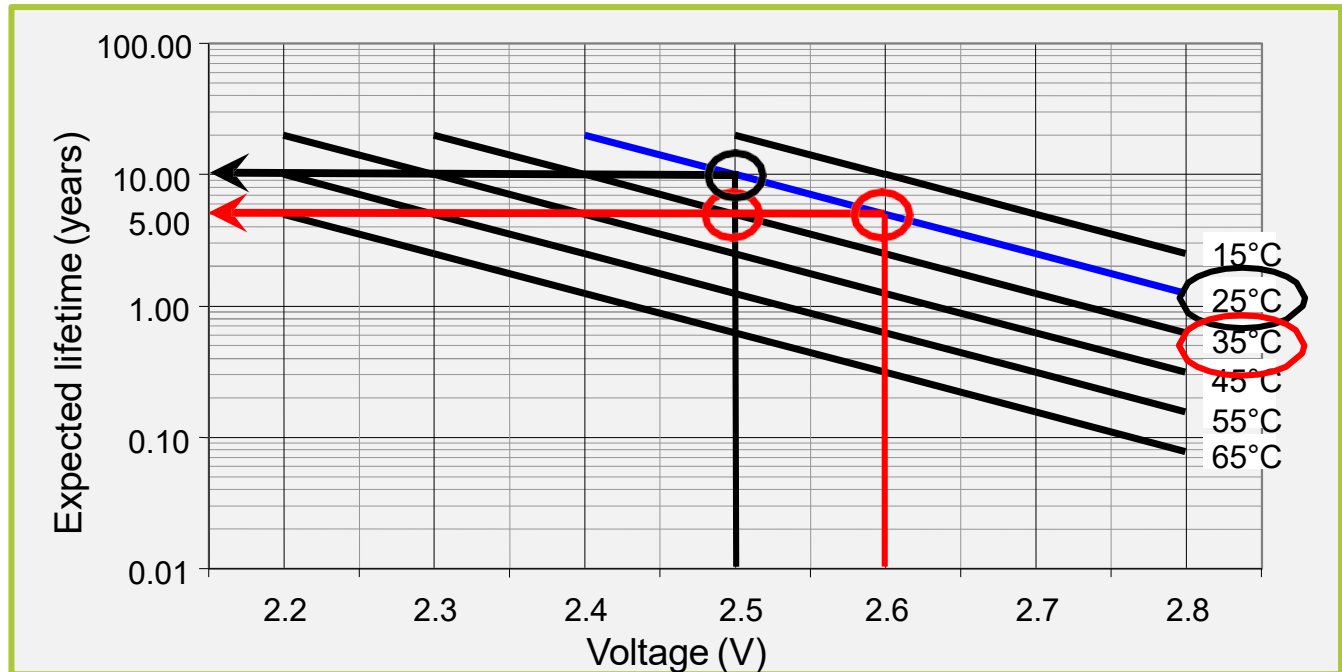
$$t = t_0 \cdot e^{-\alpha(U-U_0)} \cdot e^{-\beta(\vartheta-\vartheta_0)} \quad \alpha = \frac{\ln(2)}{100 \text{ mV}}, \quad \beta = \frac{\ln(2)}{10 \text{ }^\circ\text{C}} \quad \vartheta_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_0 = 10 \text{ Jahre}$$

Alterung betrifft nur Kondensatoren mit Elektrolyt, d.h. z.B. Doppelschicht-Kondensatoren

Keine Relevanz für Keramik-, Kunststoff-, Folien-Kondensatoren

Quelle: RWTHAachen, ISEA



1. Capacitors and Supercaps

1.10 Capacitor aging

Typical damage patterns after accelerated end-of-life aging tests

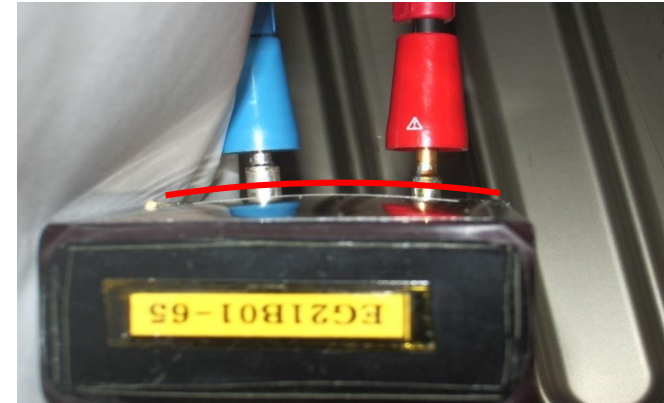
- Expansion/inflation of the housing
- Electrolyte/salt leakage due to excess pressure

1. Kondensatoren und Supercaps

1.10 Alterung von Kondensatoren

Typische Schadensbilder nach beschleunigten Alterungstests am Ende der Lebenszeit

Ausdehnen/Aufblähen des Gehäuses



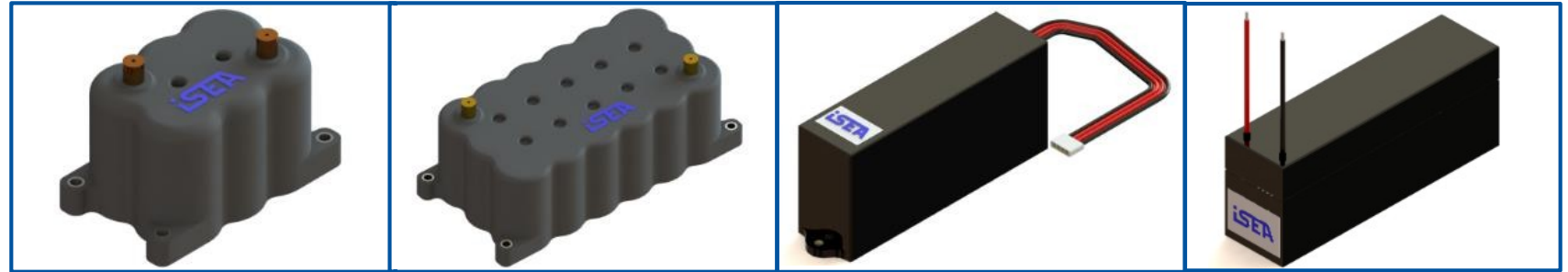
Elektrolyt/Salz-Austritt durch eine Leckage durch Überdruck



Quelle: RWTHAachen, ISEA

1. Kondensatoren und Supercaps

1.11 Von der Zelle zum Modul



Module 300 F/ 14 V Module 150 F/ 42 V

Module 9 F/ 28 V

Module 3.3 F/75 V

Source: ISEA/RWTH Aachen



An up-to-date selection of ultracapacitor products from Maxwell that includes cells and modules., Maxwell Technologies, CC-BY-SA 3.0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maxwell_Portfolio_Shot.jpg

1. Capacitors and Supercaps

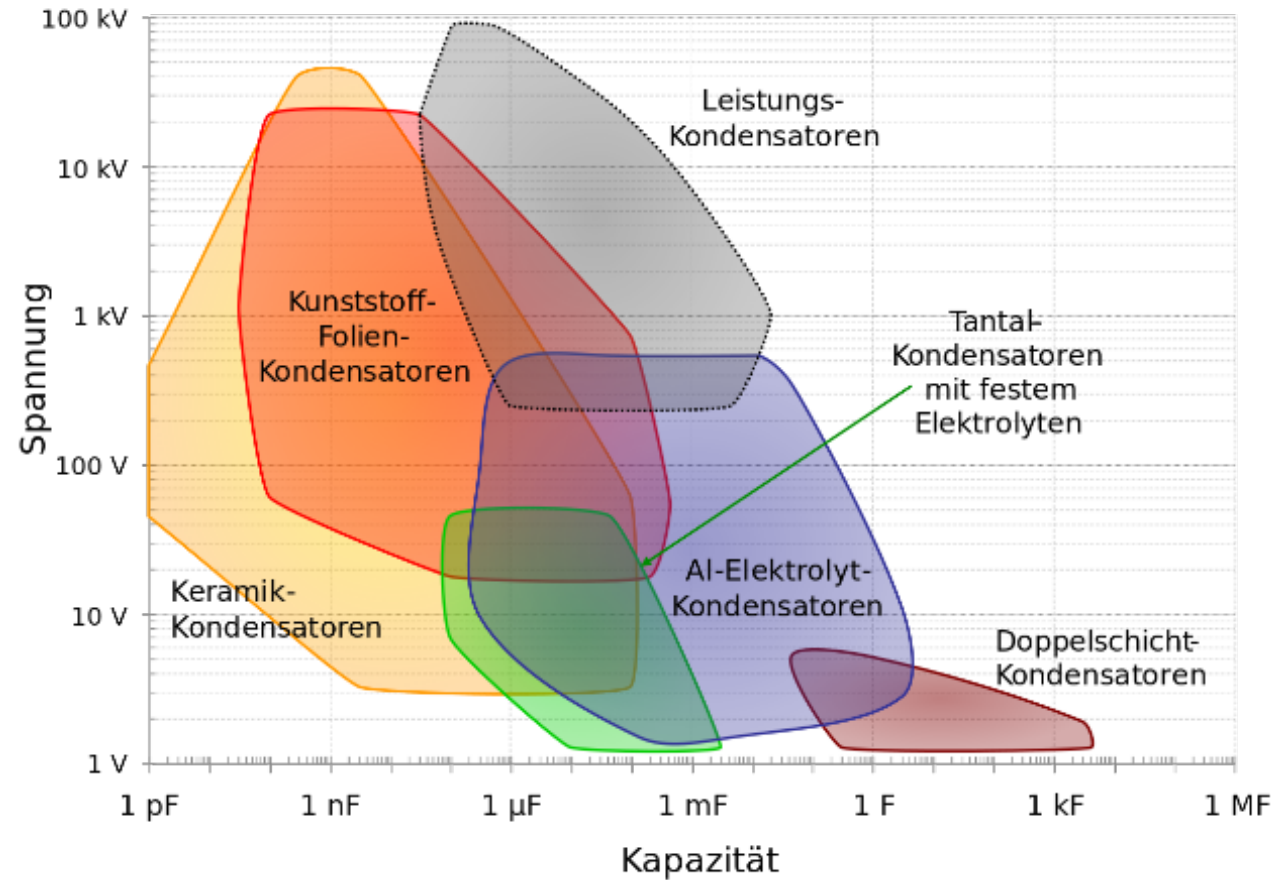
1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Overview of voltage and capacitance ranges of different capacitor types

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

Übersicht über Spannung und Kapazitätsbereiche verschiedener Kondensatortypen



Kapazitäts- und Spannungsbereiche verschiedener Kondensator-Technologien, Elcap, CC-BY-SA 3.0 †
[https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:Kondensatoren-Klassen_Kapazit%C3%A4t_vs_Spannungsfestigkeit.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_(Elektrotechnik)#/media/Datei:Kondensatoren-Klassen_Kapazit%C3%A4t_vs_Spannungsfestigkeit.svg)

1. Capacitors and Supercaps

1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Comparison of different capacitors with Li-Ion battery cells

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

Vergleich verschiedener Kondensatoren mit Li-Ionen Batteriezellen



Source: ISEA/RWTH Aachen

1. Capacitors and Supercaps

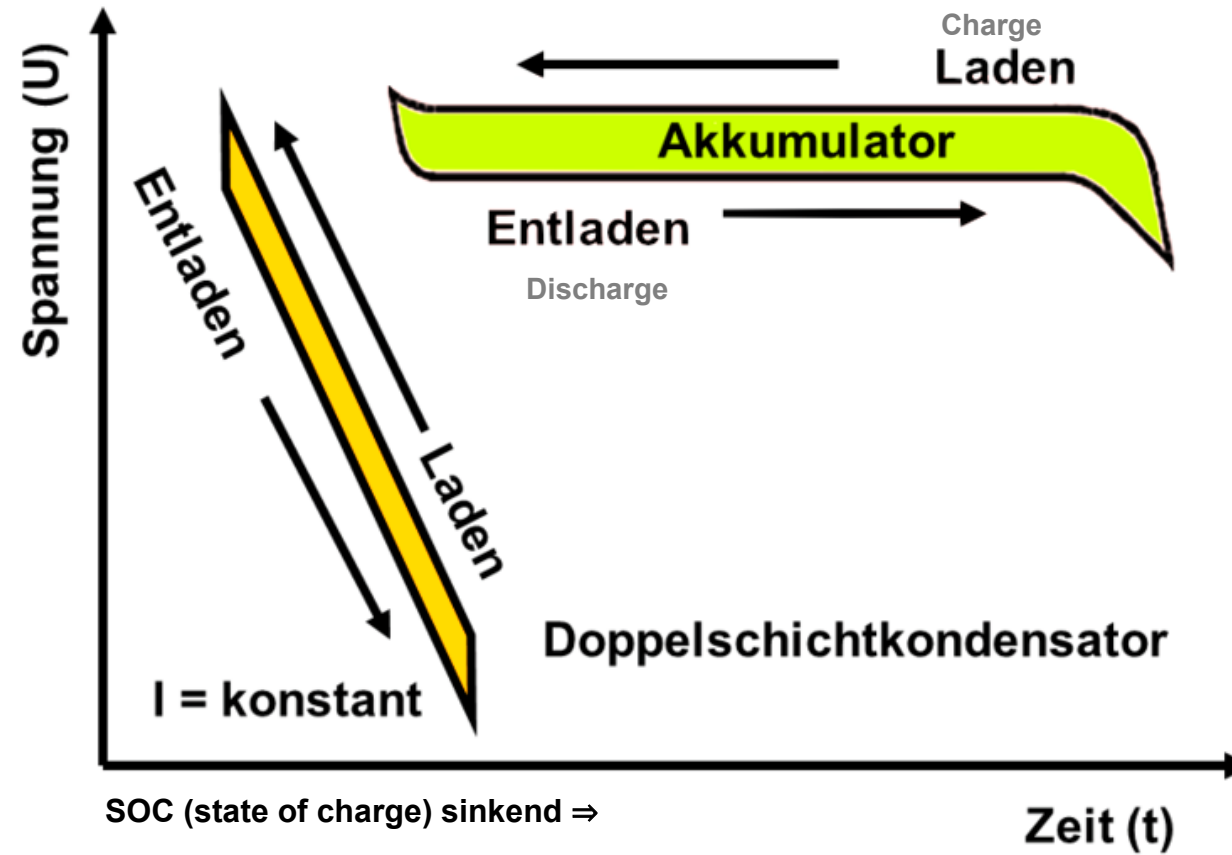
1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Comparison charge/discharge double layer capacitor vs. accumulator

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

Vergleich Ladung/Entladung Doppelschichtkondensator / Akkumulator



Vergleich der Lade- und Entladekurve eines Doppelschichtkondensators mit einem Akkumulator, Elcap, CC0 †
<https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Lade-Entladekurve-Vergleich-EDLC-Akku.png>

1. Capacitors and Supercaps

1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Parameters

Voltage

Min. operating temperature

Max. operating temperature

Charge and discharge cycles

Lifetime

Energy dense

Power density

Efficiency

Charge rate

Possible discharging time

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

| Parameter | Einheit | Supercap | Batterie/Akku |
|-------------------------|---------|--------------------|-------------------------|
| Spannung | V | 2,5 ... 3 | 1,2 ... 4,2 |
| Min. Betriebstemperatur | °C | -40 | -20 |
| Max. Betriebstemperatur | °C | +70(85) | +60 |
| Lade- und Entladezyklen | | > 500.000 | 300 ... 10.000 |
| Lebensdauer | Jahre | 5 ... 20 | 0,5 ... 5 |
| Energiedichte | Wh/l | 1 ... 10 | 100 ... 480 |
| Leistungsdichte | W/l | 1000 ... 10.000 | 100 ... 3.000 |
| Wirkungsgrad | % | > 98 | 70 ... 95 |
| Laderate | C | > 1500 | < 10 |
| Mögliche Entladezeit | | Sekunden - Minuten | Stunden - Tage - Wochen |

 Daten aus: <https://www.all-electronics.de/superkondensatoren-als-abnutzungsfreie-energiespeicher-statt-akkumulatoren/4/>

1. Capacitors and Supercaps

1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Comparison charge/discharge double layer capacitor vs. accumulator

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren- Kurzschluss-Versuche

VIDEO: „Fun with Ultracapacitors!“ [0:00 – 6:10]



<https://youtu.be/EoVMF3Vkl6U>

BITTE NICHT NACHMACHEN !!!
PLEASE DON'T TRY!!!

1. Capacitors and Supercaps

1.12 Comparison of characteristics of capacitors

Comparison stored energy amount

1. Kondensatoren und Supercaps

1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

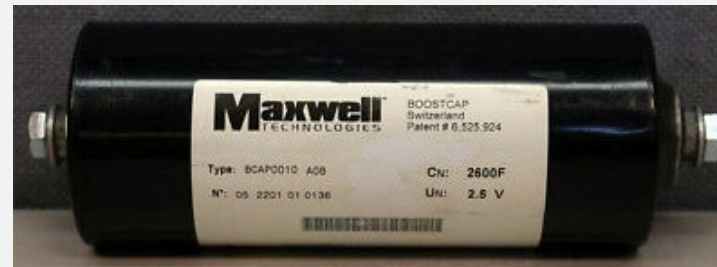
Vergleich gespeicherte Energiemenge



- AA-Primär-Batterie
 $2 \times 1,5 \text{ V} \times 2,5 \text{ Ah}$
 $= 27 \text{ kJ}$
 $= 7,5 \text{ Wh}$
 bei 3 V Spannung



- Elektrolytkondensator
 $0,5 \times 560 \cdot 10^{-6} \times (200 \text{ V})^2$
 $= 11,2 \text{ J}$
 $= 0,003 \text{ Wh}$
 bei 200 V Spannung



- Super-Cap (Doppelschichtkondensator)
 $0,5 \times 2600 \times (2,5 \text{ V})^2$
 $= 8,12 \text{ kJ}$
 $= 2,25 \text{ Wh}$
 bei 2,5 V Spannung

<https://youtu.be/EoWMF3Vki6U>

1. Capacitors and Supercaps

1.12 Comparison of characteristics of capacitors

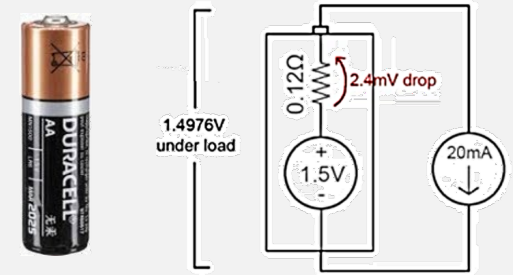
Comparison internal resistance

- Under low load (20mA) hardly any voltage drop despite high internal resistance (0.12 Ω)
- At high load (10 A) practically no voltage anymore, but strong self-heating (12 W)
- At high load (10 A) hardly any voltage drop due to low high internal resistance (0.0007 Ω)
- At very high load (100 A) only minimal voltage drop, but self-heating (7 W)

1. Kondensatoren und Supercaps

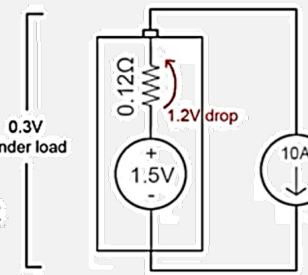
1.12 Eigenschaftsvergleich von Kondensatoren

Vergleich Innenwiderstand



20mA Load:

- Internal resistance: 0.12 Ω
- Voltage drop: 2.4mV
- Open-circuit voltage: 1.5V
- Under load voltage: 1.4976V
- Equation: $V = IR$, $V_{drop} = 0.02A \times 0.12\Omega = 2.4mV$, $V_{under\ load} = 1.5V - 2.4mV = 1.4976V$
- Power: $Power = I^2R$, $Power = 0.02A^2 \times 0.12\Omega = 48\mu W$ of heat


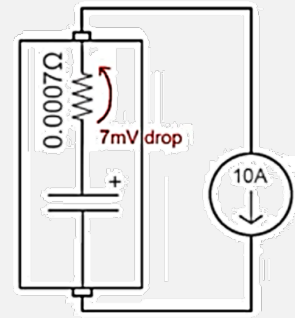


10A Load:

- Internal resistance: 0.12 Ω
- Voltage drop: 1.2V
- Open-circuit voltage: 1.5V
- Under load voltage: 0.3V
- Equation: $V = IR$, $V_{drop} = 10A \times 0.12\Omega = 1.2V$, $V_{under\ load} = 1.5V - 1.2V = 0.3V$
- Power: $Power = I^2R$, $Power = 10A^2 \times 0.12\Omega = 12W$ of heat

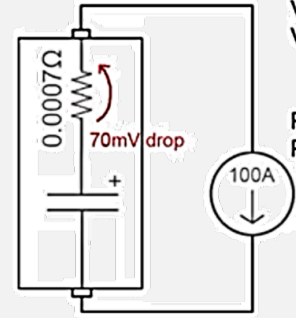
➤ Unter geringer Belastung (20mA) kaum Spannungsabfall trotz hohem Innenwiderstands (0,12 Ω)

➤ Bei hoher Belastung (10 A) praktisch keine Spannung mehr, dafür starke Selbsterwärmung (12 W)

10A Load:

- Internal resistance: 0.0007 Ω
- Voltage drop: 7mV
- Open-circuit voltage: 2.8V
- Equation: $V = IR$, $V_{drop} = 10A \times 0.7m\Omega = 7mV$
- Power: $Power = I^2R$, $Power = 10A^2 \times 0.7m\Omega = 70mW$ of heat



100A Load:

- Internal resistance: 0.0007 Ω
- Voltage drop: 70mV
- Open-circuit voltage: 2.8V
- Equation: $V = IR$, $V_{drop} = 100A \times 0.7m\Omega = 70mV$
- Power: $Power = I^2R$, $Power = 100A^2 \times 0.7m\Omega = 7W$ of heat

➤ Bei hoher Belastung (10 A) kaum Spannungsabfall wegen geringen hohem Innenwiderstands (0,0007 Ω)

➤ Bei sehr hoher Belastung (100 A) nur minimaler Spannungsabfall, aber Selbsterwärmung (7 W)

<https://youtu.be/EoWMF3Vkl6U>

1. Capacitors and Supercaps

1.13 Applications

- Wind turbines (emergency power for pitch control)
- PV systems for voltage stabilization (e.g. when clouds pass through)
- Mobility applications
 - Brake energy in railroads and tramways
 - Power supply in gondolas of cable cars
 - Starting aid of diesel engines (military)
 - Cranes in container terminals
 - Formula 1 motor sports as "booster"
- Short-term storage in the power grid in general (also emergency power starting)
- Electronic circuits (smart meters, end-user electronics, etc.)

1. Kondensatoren und Supercaps

1.13 Anwendungen

- Windkraftanlagen (Notstrom für Pitch-Regelung)
- PV-Anlagen zur Spannungsstabilisierung (bspw.. bei Wolkendurchgang)
- Mobilitätsanwendungen
 - Bremsenergie bei Bahn und Straßenbahn
 - Stromversorgung in Gondeln von Seilbahnen
 - Starthilfe von Dieselmotoren (Militär)
 - Krane in Containerterminals
 - Formel 1 Motorsport als „Booster“
- Kurzzeitspeicher im Stromnetz allgemein (auch Notstrom-Start)
- Elektronischen Schaltungen (Smart Meter, Endkunden-Elektronik etc.)

1. Capacitors and Supercaps

1.14 Short summary / "Take aways"

- There are classic plate capacitors, electrolytic capacitors and double-layer capacitors with/without pseudo-capacitance.
- Functional principle: electrical charge separation
- High capacitance with large electrode areas, small electrode gap and high dielectric constant of the medium in between
- Advantages: very high efficiency, high power density, long life and cycle stability, fast load change possible, low maintenance, hardly any temperature influence
- Disadvantages: low energy density, large capacitances require many capacitors (complex assembling, expensive), low cell voltage (with supercaps) require complex power electronics, voltage drops linearly with charge

1. Elektrische Energiespeicher – Kondensatoren, Supercaps & Co.

1.14 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Es gibt klassische Plattenkondensatoren, Elektrolytkondensatoren und Doppelschichtkondensatoren mit/ohne Pseudokapazität
2. Funktionsprinzip: elektrische Ladungstrennung
3. Hohe Kapazität bei großen Elektrodenflächen, geringen Elektrodenabstand und hoher Dielektrizitätszahl des Mediums dazwischen
4. Vorteile: sehr hoher Wirkungsgrad, hohe Leistungsdichte, lange Lebensdauer und Zyklfestigkeit, schneller Lastwechsel möglich, geringer Wartungsaufwand, kaum Temperatureinfluss
5. Nachteile: geringe Energiedichte, große Kapazitäten benötigen viele Kondensatoren (aufwändiges Assembling, teuer), niedrige Zellspannung (bei Supercaps) erfordern aufwändige Leistungselektronik, Spannung fällt linear mit Ladung ab

$$E = \frac{U}{d} \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 \quad Q = C \cdot U \quad W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad T_{\frac{1}{2}} = R \cdot C \cdot \ln 2 \approx R \cdot C \cdot 0,693$$

Entladen

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

$$I(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

$$U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

Laden

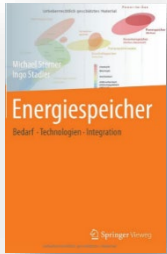
$$Q(t) = Q_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t})$$

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$$

$$U_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t})$$

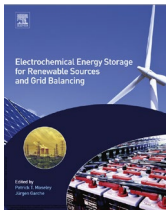
Weiterführende Literatur

Further Reading



Michael Sterner, Ingo Stadler (Hrsg.); „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration“

- Kapitel 6 „Elektrische Energiespeicher“
- Kapitel 6.1 „Kondensatoren – Supercaps“



Moseley, P.T.; Garch J. [Hrsg./Ed.]: „Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing“

- Chapter 7.2 “Electrical’ Storage Systems”
- Chapter 7.2.2 “Capacitors”








VIDEO: „Tic-Tac supercapacitor“ [0:30 – 3:18]

En. 



https://youtu.be/gTt_YBzJ_Dk

BITTE NICHT NACHMACHEN !!!
PLEASE DON'T TRY!!!

| †CC-Lizenzen | Bezeichnung | Version | Link zum Lizenz-/Vertragstext |
|---|--|--|--|
|  | CC0 Bedingungslose Lizenz | Vers. 1.0 | https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode |
|  | CC-BY Attribution (Namensnennung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode |

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA
Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



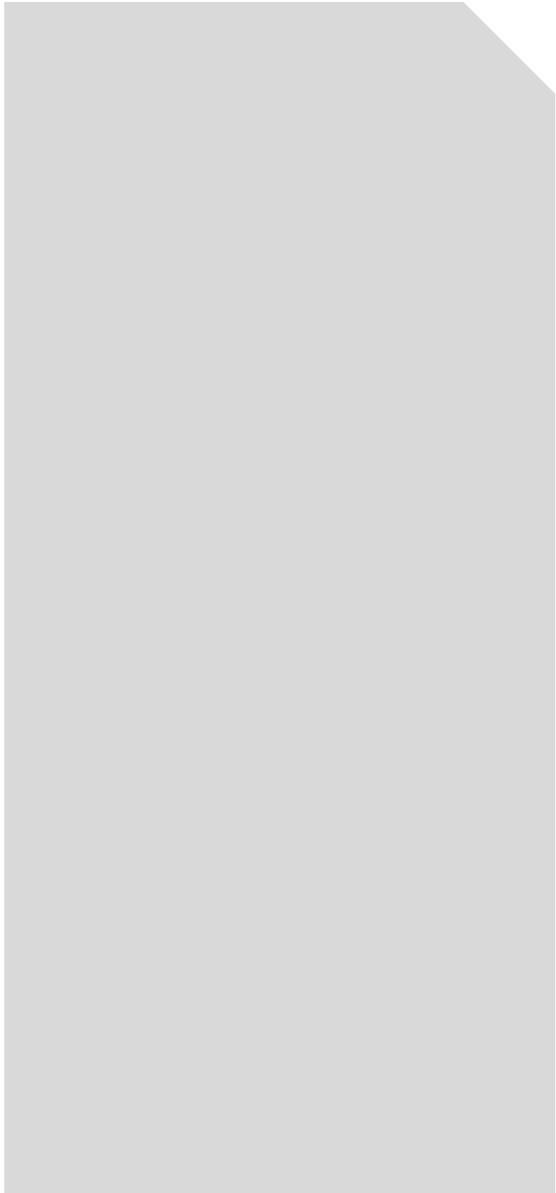
INNOVATION DURCH KOOPERATION

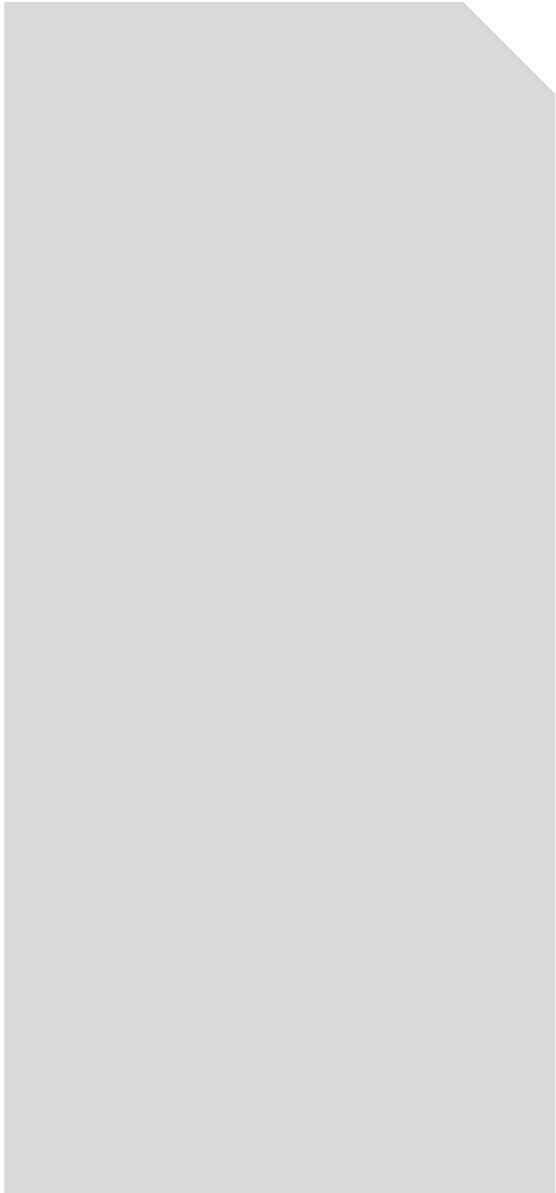
Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0





Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

#3 Elektrische Energiespeicher Teil d –
 „SMES Supraleitende Magnetische Energiespeicher“
#3 Electrical Energy Storage part d –
 „SMES Supraconducting Magnetic Energy Storage“

Vorlesung #3d | Lecture #3d



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

Content ⇒ Learning objectives

- Functional principle, classification
⇒ Introduction to the technology
- Physical principles, electromagnetic fields, superconductivity, low temperature cooling
⇒ Basic understanding of physical relationships
- Derivation of the mathematical-physical basic equations
⇒ Understanding of simple calculation equations
- Charge / discharge behavior and curves
⇒ Basic understanding of this characteristic
- Applications, advantages and disadvantages
⇒ Sorting the technology into the portfolio of various energy storage systems

Supraleitende Magnetische Energie Speicher - SMES

Inhalt ⇒ Lernziele

- Funktionsprinzip, Klassifizierung
⇒ Heranführung an die Technologie
- Physikalische Grundlagen, Elektromagnetische Felder, Supraleitung, Tieftemperaturkühlung
⇒ Grundverständnis für physikalische Zusammenhänge
- Herleitung der mathematisch-physikalischen Grundgleichungen
⇒ Verständnis für einfache Berechnungsgleichungen
- Laden-/Entlade-Verhalten und -kurven
⇒ Grundverständnis für diese Charakteristik
- Anwendungen, Vor- und Nachteile
⇒ Einsortierung der Technologie in das Portfolio verschiedener Energiespeicher

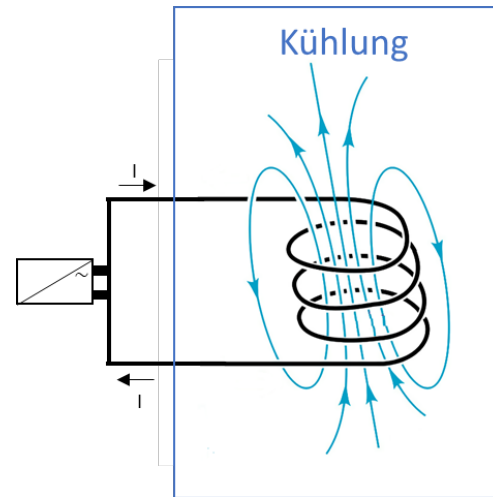
2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

Charge:
Feed DC into the superconducting coil

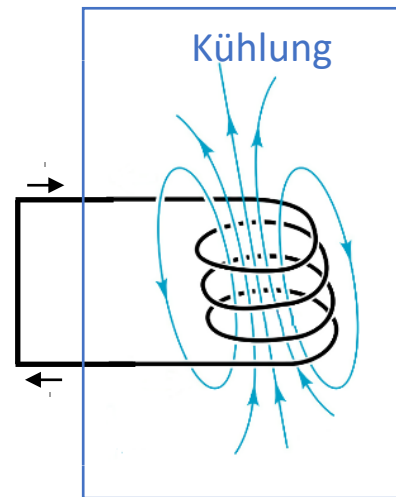
Storage
Lossless flowing electric current in a coil

Discharge
Discharge direct current from the superconducting coil

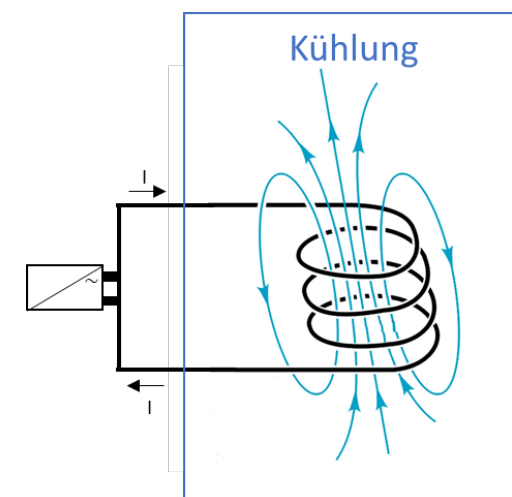
2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher - SMES



Einspeicherung
Gleichstrom in die supraleitende Spule einspeisen



Speicherung
Verlustfrei fließender elektrischer Strom in einer Spule



Ausspeicherung
Gleichstrom aus der supraleitenden Spule ausspeisen

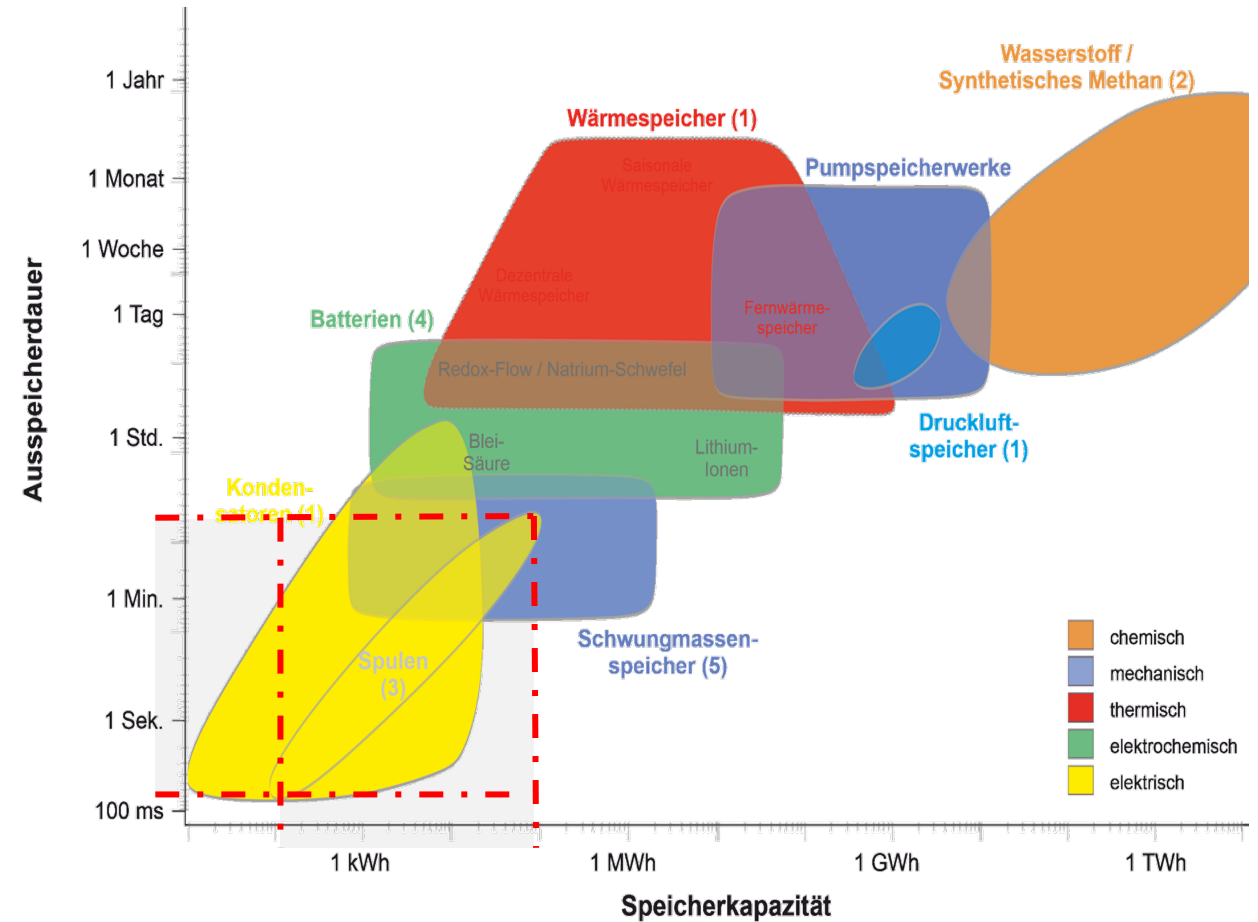
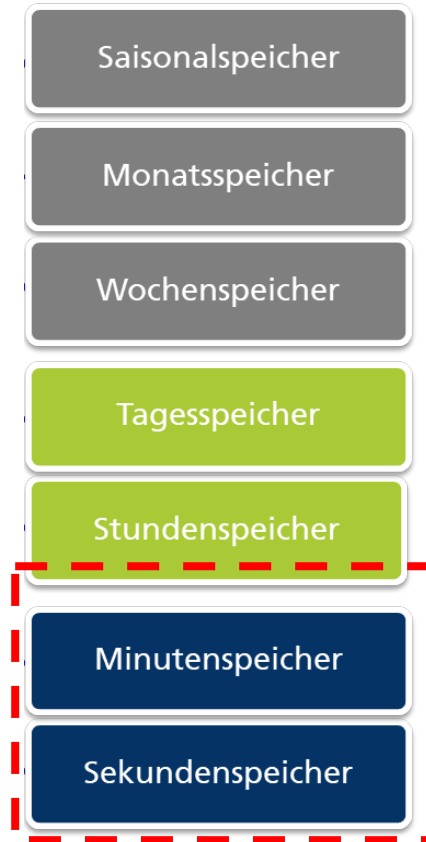
2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher - SMES

2.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

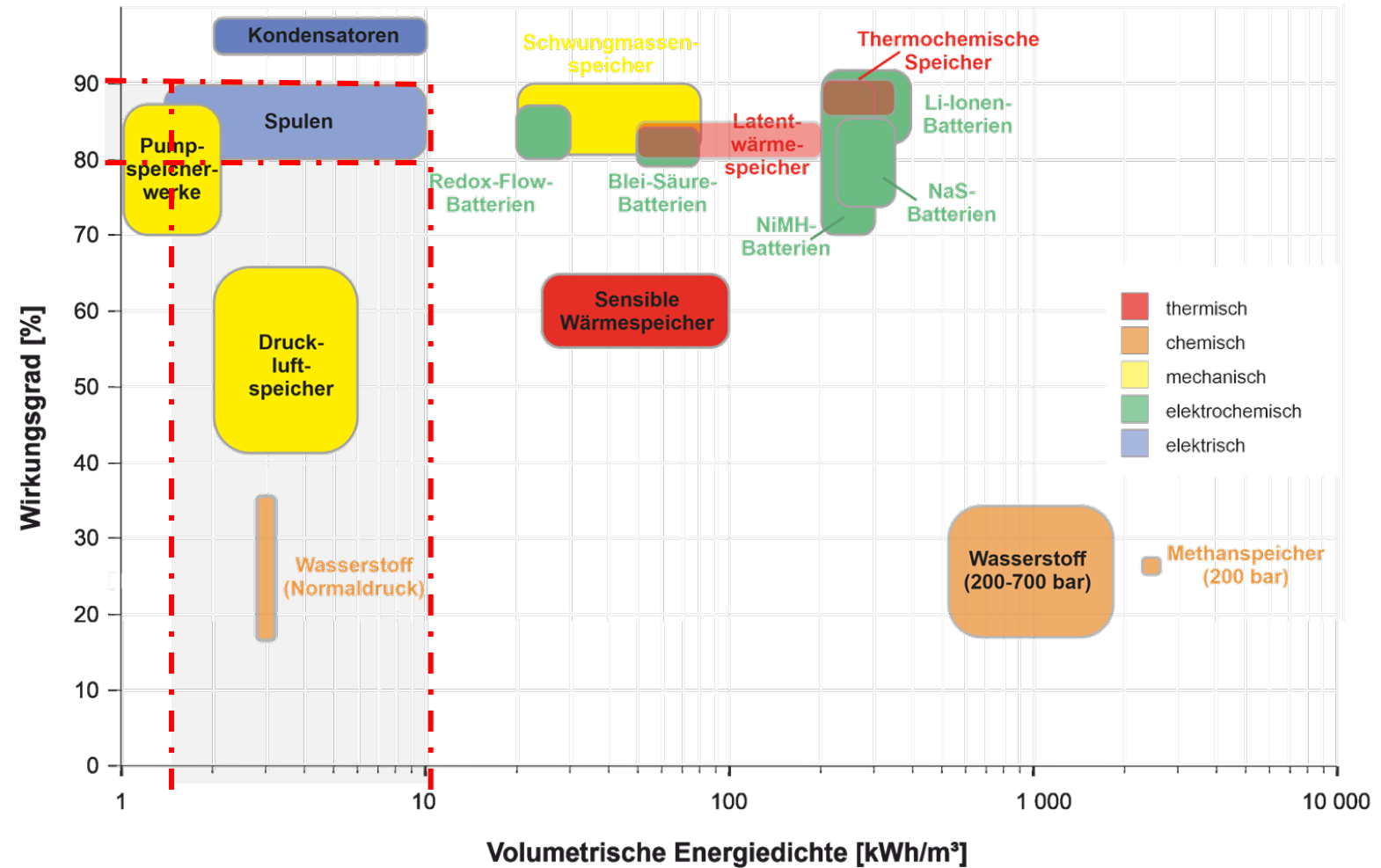


2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.1 Classification according to efficiency and volumetric energy density

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher - SMES

2.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



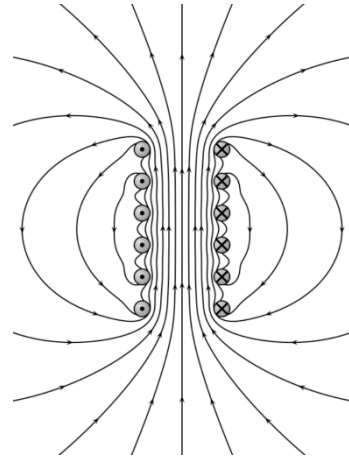
2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.2 Introduction

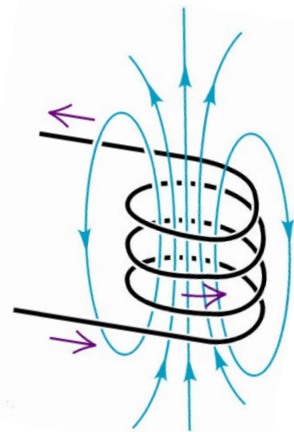
- Superconducting magnetic energy storage devices (SMES) store energy in a magnetic field generated by direct current in a superconducting coil.
- Niobium titanium (NbTi) or niobium tin (Nb₃Sn) are mostly used as material for the production of the superconducting magnetic energy storage devices.
- Although the power can be stored for almost any length. However, a critical temperature or critical temperature of well below -200 °C or 73 K is required.
- This requires sufficient cooling (liquid helium), which reduces the otherwise very good efficiency of about 90 to 95%.
- The research therefore concentrates above all on the development of new superconducting materials whose critical temperature or transition temperature is higher than that of the known superconductors.
- However, current HT superconductors are still far too expensive, despite the advantages of the high transition temperature

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.2 Einleitung



Magnetfeld einer Spule, Geek3, CC-BY-SA 3.0 †
[https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_(Elektrotechnik)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg)



Inductor, Tnse ambika diet tut, CC-BY-SA 4.0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductor.png>

- Supraleitende Magnetische Energiespeicher (SMES) speichern Energie in einem durch Gleichstrom in einer supraleitenden Spule erzeugten Magnetfeld.
- Als Material für die Herstellung der supraleitenden magnetischen Energiespeicher dienen zumeist Niob-Titan (NbTi) oder Niob-Zinn (Nb₃Sn).
- Zwar kann der Strom nahezu beliebig lange gespeichert werden. Jedoch bedarf einer kritischen Temperatur oder Sprungtemperatur von weit unter -200 °C oder 73 K.
- Dazu ist eine ausreichenden Kühlung notwendig, (flüssiges Helium), was den sonst sehr guten Wirkungsgrad von ca. 90 bis 95 % schmälert.
- Die Forschung konzentriert sich deshalb vor allem auf die Entwicklung neuer supraleitender Materialien, deren kritische Temperatur oder Sprungtemperatur über der der bekannten Supraleiter liegt.
- Aktuelle HT-Supraleiter sind jedoch noch deutlich zu teuer, trotz der Vorteile bei der hohen Sprungtemperatur

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

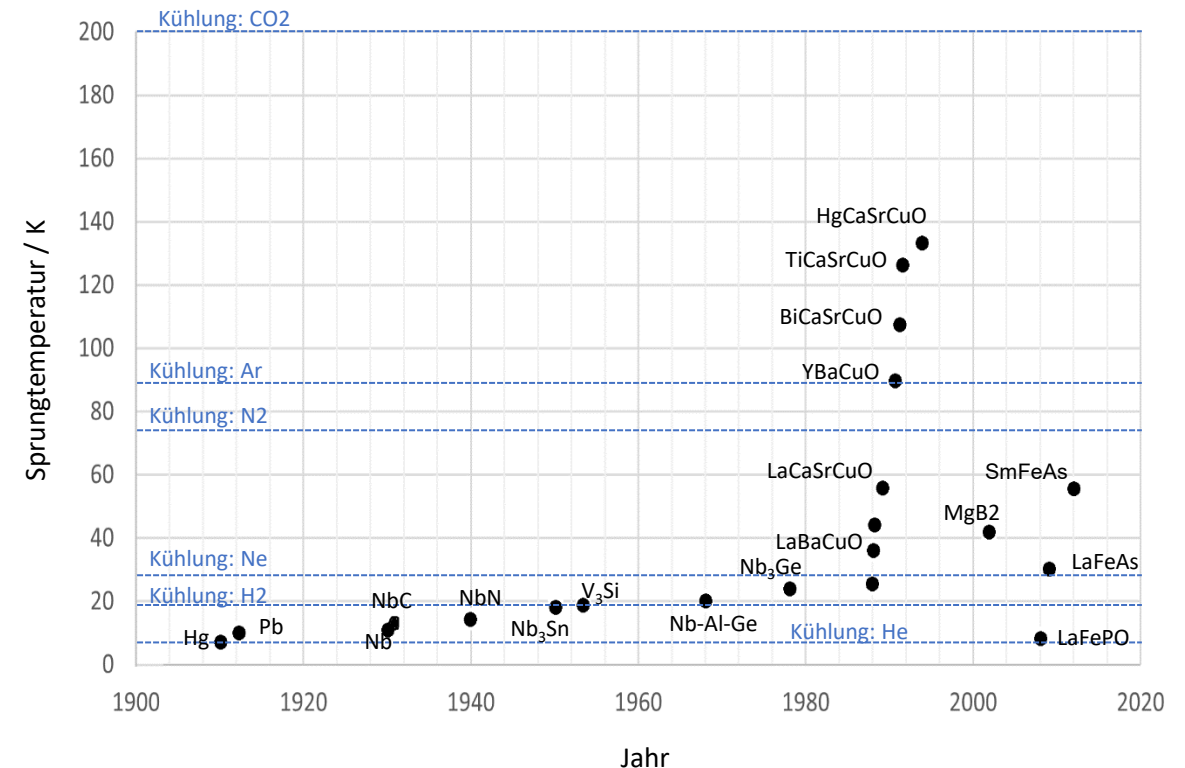
2.3 History of super conducting

- 1911 Discovery of Superconductivity (Lossless Power Line) in Mercury by Heike Kamelingh Omnes at 4.2 K (Nobel Prize 1913)
- 1986 Discovery of Bednorz and Müller of ceramic high-temperature superconductors (cuprates) barium lanthanum cuprate ($\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$) with 35 K, previous record was germanium-niobium alloy with 23 K (Nobel Prize 1987)
- Current record at ambient pressure 138 K / -135°C $\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.3 Historie der Supraleitung

- 1911 Entdeckung der Supraleitung (Verlustfreie Stromleitung) bei Quecksilber durch Heike Kamelingh Omnes bei 4,2 K (Nobelpreis 1913)
- 1986 Entdeckung von Bednorz und Müller von keramischen Hochtemperatursupraleitern (Cuprate)
- Barium-Lanthan-Cuprat ($\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$) mit 35 K, bisheriger Rekord war Germanium-Niob-Legierung mit 23 K (Nobelpreis 1987)
- Aktueller Rekord (Normaldruck) bei 138 K / -135°C $\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$
- Weitere Rekorde bei Hochdruck:
250 K / -23°C LaH_{10} bei 170 GPa
288 K / $+15^\circ\text{C}$ SH_3 mit CH_4 bei 267 GPa (=2,6 Mio. atm)



2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.4 Physical basis – short introduction

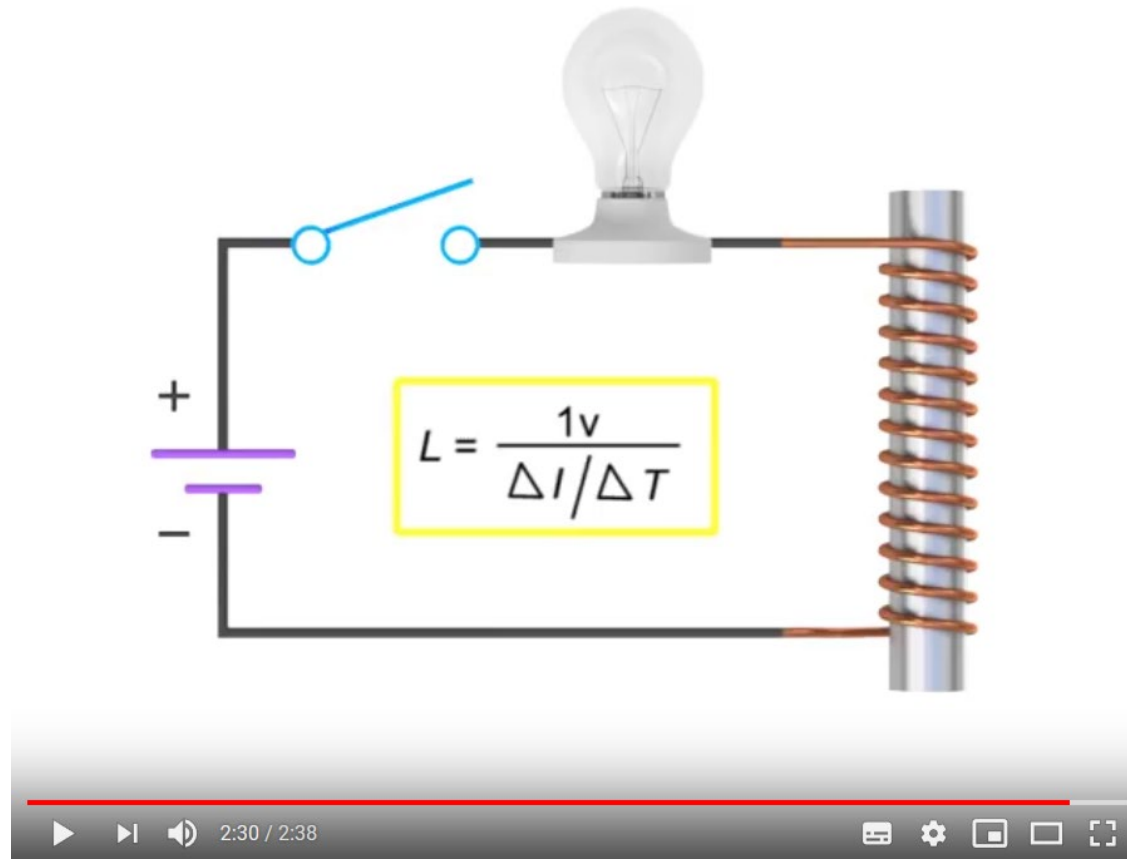
Video: „How Inductors Work within a Circuit“

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.4 Physikalische Grundlagen - Kurzeinführung

VIDEO: „How Inductors Work within a Circuit“ [0:00 – 2:38]

Engl.



<https://youtu.be/VFPwgjGHqFQ>

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.4 Physical basis – short introduction

Inside a coil of length l and diameter D with N turns, the magnetic field with the field strength H [A / m] (or for a slim coil) is created at a current strength I

$$H = I \cdot \frac{N}{\sqrt{l^2 + d^2}} \approx I \cdot \frac{N}{l}$$

The flux density B [T for Tesla or $V \cdot s \cdot m^{-2}$] depends on the coil core (material constant μ_r) and the magnetic field constant μ_0 ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$) [H for Henry or $V \cdot s \cdot A^{-1}$]

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{N}{l}$$

The energy stored in a coil is

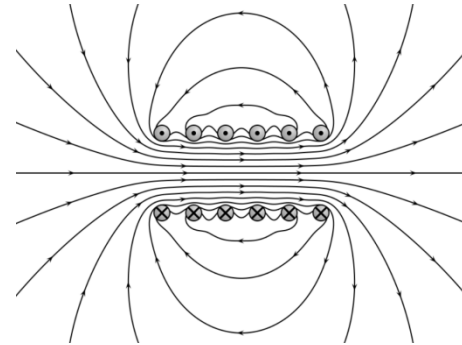
$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

The inductance L [H for Henry or $V \cdot s \cdot A^{-1}$] is calculated for cylindrical, slim coils with the cross-sectional area A , length l and number of turns N :

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.4 Physikalische Grundlagen (kurzgefasst)



Magnetfeld einer Spule, Geek3, CC-BY-SA 3.0 † [https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_(Elektrotechnik)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg)

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
 $[\mu_r] = [-]$
 $[A] = \text{m}^2$
 $[l], [d] = \text{m}$
 $[N] = [-]$
 $[H] = \text{A/m}$

Im Inneren einer Spule der Länge l und Durchmesser d mit N Windungen entsteht bei einer Stromstärke I das Magnetfeld mit der Feldstärke H [A/m] (bzw. vereinfacht für eine schlanke Spule $l \gg d$)

$$H = I \cdot \frac{N}{\sqrt{l^2 + d^2}} \approx I \cdot \frac{N}{l}$$

Die Flussdichte B [T für Tesla bzw. $V \cdot s \cdot m^{-2}$] ist abhängig vom Spulenkern (Materialkonstante μ_r) und der magnetischen Feldkonstanten μ_0 ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$) [H für Henry bzw. $V \cdot s \cdot A^{-1}$]

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{N}{l}$$

Die gespeicherte Energie in einer Spule ist

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Die Induktivität L [H für Henry bzw. $V \cdot s \cdot A^{-1}$], berechnet sich für zylindrische, schlanke Spulen mit der Querschnittsfläche A , Länge l und Windungszahl N :

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.4 Physical basis – short introduction

Video: “Magnetic field of an elongated coil”

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.4 Physikalische Grundlagen (kurzgefasst)

VIDEO: „Magnetfeld einer langgestreckten Spule“ [0:00 – 5:28]  Dt.

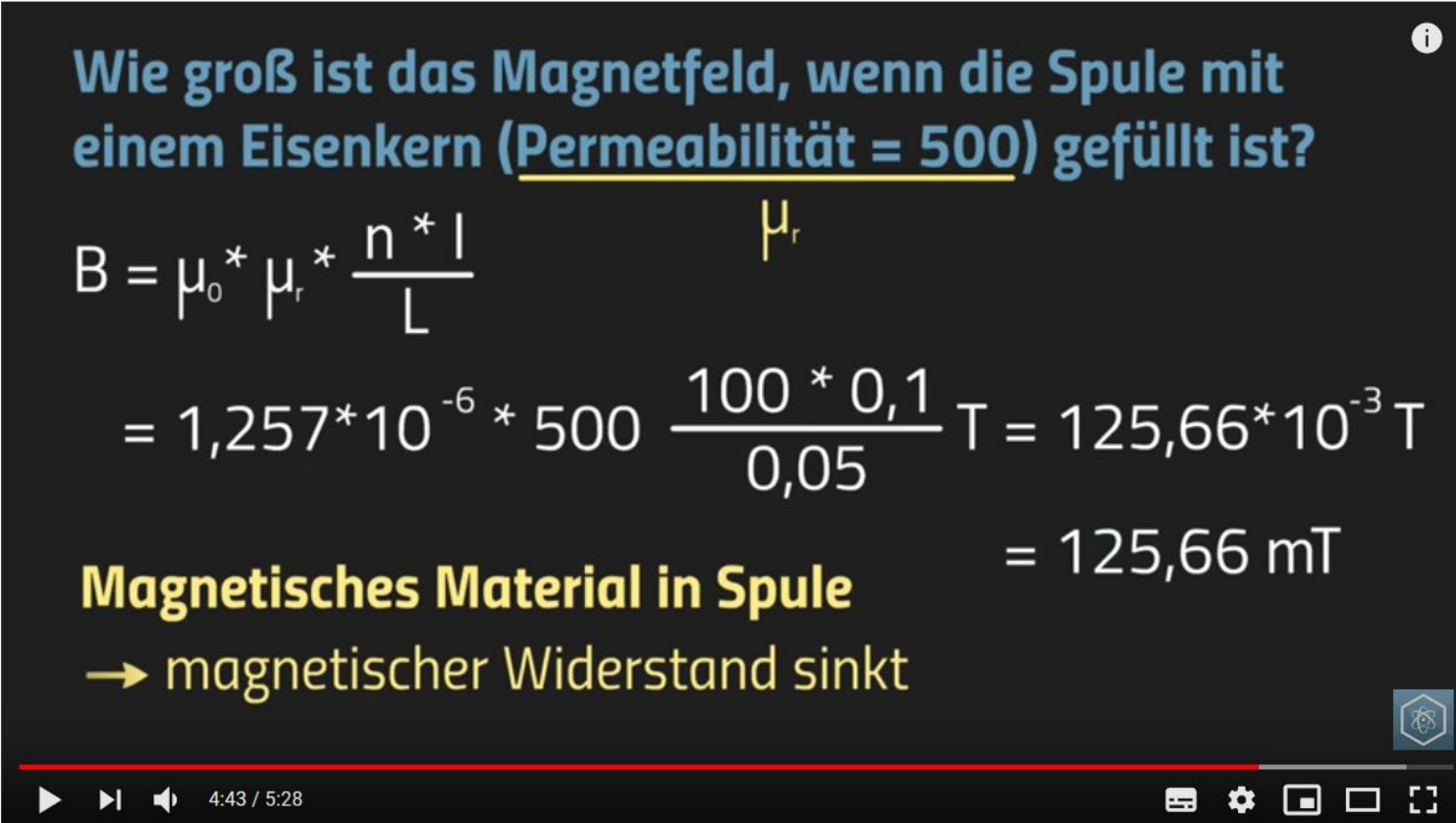
Wie groß ist das Magnetfeld, wenn die Spule mit einem Eisenkern (Permeabilität = 500) gefüllt ist?

$$B = \mu_0 * \mu_r * \frac{n * I}{L}$$

$$= 1,257 * 10^{-6} * 500 * \frac{100 * 0,1}{0,05} \text{ T} = 125,66 * 10^{-3} \text{ T}$$

$$= 125,66 \text{ mT}$$

Magnetisches Material in Spule
→ magnetischer Widerstand sinkt



<https://youtu.be/PJVgzNzQQfU>

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.4 Physical basis – short introduction

When switching on, the current I increases until the entire magnetic field is built up, the voltage drop U_L across the coil drops from U_0 to 0.

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_R(t) = U_0 - U_L(t)$$

When switching off, the magnetic field is reduced, the voltage is then $-U_0$ and thus opposite to the previous one, the current drops to 0.

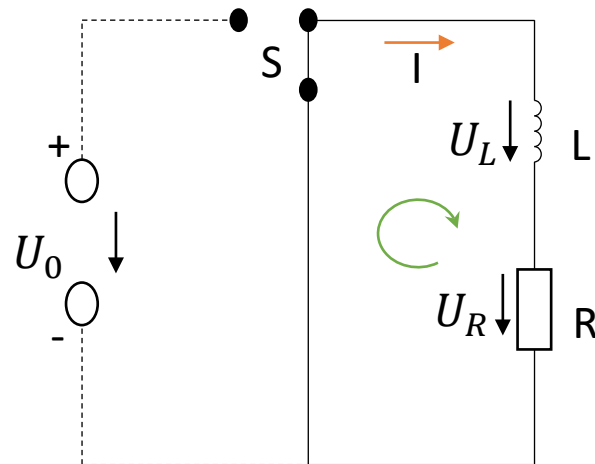
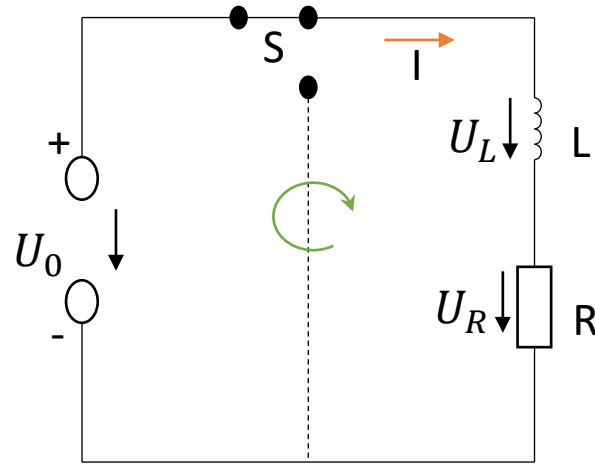
$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_L(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_R(t) = -U_L(t)$$

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.4 Physikalische Grundlagen (kurzgefasst)

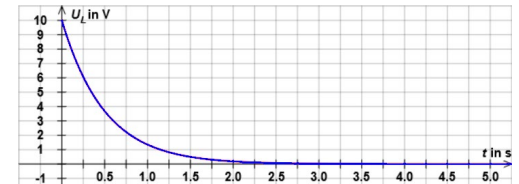
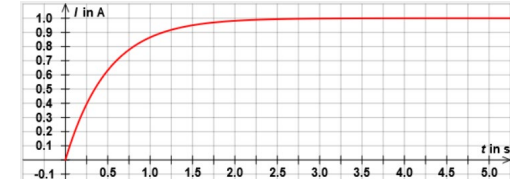


Beim Einschalten steigt der Strom I an, bis das gesamte magnetische Feld aufgebaut ist, der Spannungsabfall U_L an der Spule fällt von U_0 bis auf 0 ab.

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_R(t) = U_0 - U_L(t)$$

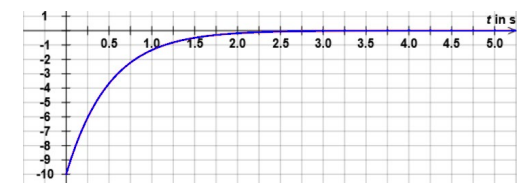
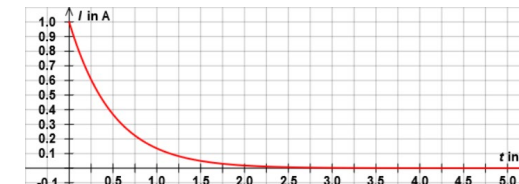


Beim Ausschalten wird das Magnetfeld abgebaut, die Spannung ist dann $-U_0$ und damit der vorherigen entgegengesetzt, der Strom fällt ab bis auf 0.

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_L(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$U_R(t) = -U_L(t)$$



2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

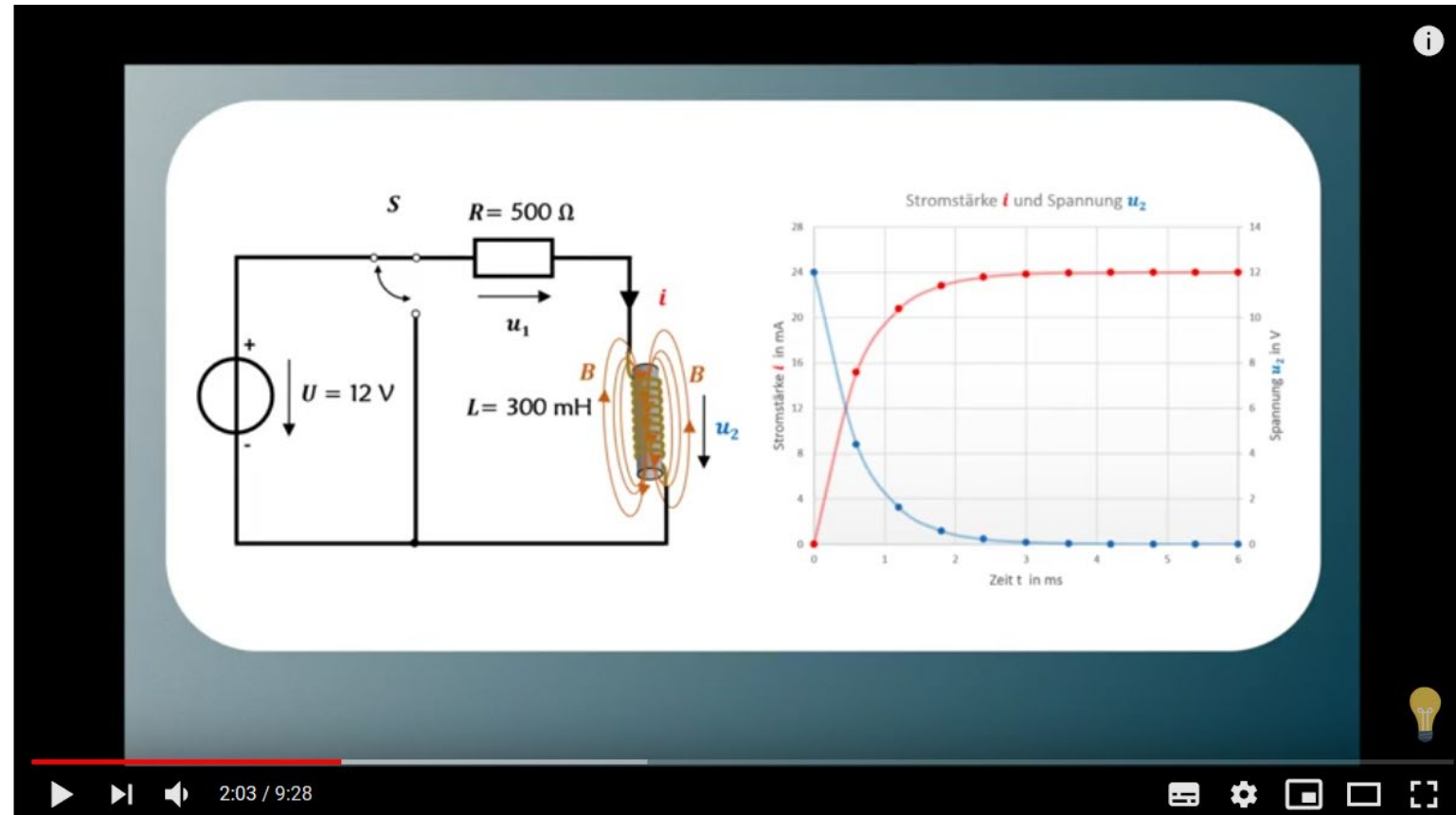
2.4 Physical basis – short introduction

Video: “Understanding Inductance”

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.4 Physikalische Grundlagen (kurzgefasst)

VIDEO: „Entladevorgang einer Spule, ...“ [0:00 – 9:28]  Dt.



<https://youtu.be/FGjoEKe85w4>

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.5 Super Conducting Coils as Energy Storage

Step 1

- Cooling the coil below the transition temperature
- DC is applied to the coil, the current increases steadily to maximum
- Formation of a magnetic field with the strength $H = I \cdot n / l$

Step 2

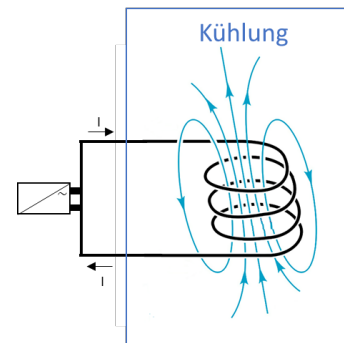
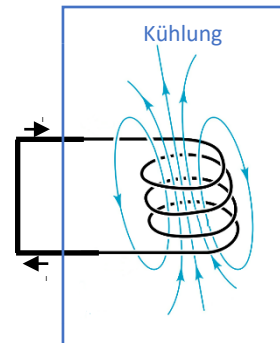
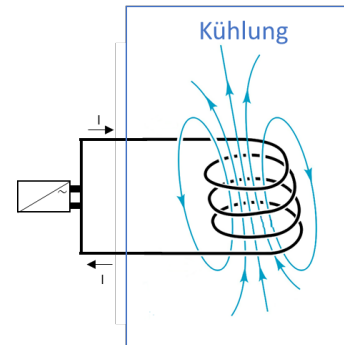
- Short circuit causes the current to be "lossless" circulated (i.e., "only" cooling energy is "loss")
- Energy is stored in the magnetic field $E = 1 / 2 \cdot L \cdot I^2$

Step 3

- Current consumption by inverter and feeding as alternating current into the grid

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.5 Supraleitende Spule als Energiespeicher



Schritt 1

- Kühlung der Spule unter Sprungtemperatur
- Gleichstrom liegt an der Spule an, der Strom steigt stetig an bis Maximum
- Bildung des vollständigen Magnetfelds

Schritt 2

- Durch Kurzschluss wird der Strom „verlustfrei“ im Kreis geleitet (d.h. „nur“ Kühlenergie ist „Verlust“)
- Energie ist im Magnetfeld gespeichert

Schritt 3

- Stromentnahme des Gleichstroms und Einspeisung durch einen Wechselrichter als Wechselstrom in das Netz

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.5 Super Conducting Coils as Energy Storage

Cooling risks

Danger: Cooling failure / problems

- Exceeding the transition temperature
- Rapid heating / overheating of the coil due to ohmic resistances

Solution 1

- Composite conductor: Superconductor is surrounded by metal layer, which then conducts the current well-conducting
- No single solution, as too large conductor cross sections lead to lower current density in the conductor (higher costs)

Solution 2

- External resistor where most of the power is dissipated.

Total solution

- Often combination of both solutions as cost optimum

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.5 Supraleitende Spule als Energiespeicher

Kühlungsproblematik

Gefahr: Kühlausfall/-probleme

- Überschreitung der Sprungtemperatur
- Schlagartige Erwärmung/Überhitzung der Spule durch Ohm'sche Widerstände

Lösung 1

- Kompositleiter: Supraleiter wird mit Metallschicht umgeben, die dann gut leitend den Strom leitet
- Keine alleinige Lösung, da zu große Leiterquerschnitte zu weniger Wicklungen pro Volumen führen (geringere Speicherkapazität)

Lösung 2

- Externer Widerstand an dem ein Großteil der Leistung im Havariefall abgeführt wird.

Gesamtlösung

- Häufig Kombination aus beiden Lösungen als Kostenoptimum

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.6 Characteristics

Energy Losses

Losses due to cooling

- Often in the order of the withdrawal rate
- It accumulates permanently during storage
- Therefore only SHORT-TIME storage

Losses due to inverters

- about 3%
- Only applies when charging or discharging but not during storage

Specifications

- Round-trip efficiency: 80-90%
- Energy density: 0,5-10 Wh/L
- Power density: 1-4 kW/L
- Lifetime: 20 years, any number of cycles
- self-discharge: ca. 10-15% / day

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.6 Eigenschaften

Energieverluste

Verluste durch Kühlung

- Häufig in der Größenordnung der Ausspeicherleistung, sinkt jedoch bei großer Speicherkapazität
- Fällt permanent während der Speicherung an
- Daher werden SMES nur als **große Kurzzeitspeicher** eingesetzt

Verluste durch Wechselrichter

- ca. 3%, fällt nur beim Einspeichern oder Ausspeichern an aber nicht während der Speicherung

Charakteristika

- Round-trip efficiency: 80-90%
- Energiedichte: 0,5-10 Wh/L
- Leistungsdichte: 1-4 kW/L
- Lebensdauer: 20 Jahre, beliebig viele Zyklen
- Selbstentladung: ca. 10-15% / Tag

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.7 Typical applications and data

Applications

- Uninterruptible power supply (UPS)
- Short-term storage in the network (network stability, frequency maintenance)

Technical specifications

- 1 to 1000 MWs in the ms range for UPS discharge time at 10 MWs and 10 MW: 1.008 s
- Material: NbTi filaments in copper matrix

Examples

- In the Austrian town of Gleisdorf, for example, an electromagnetic coil delivers an output of 1.4 MW for a period of 0.8 seconds.
- In Schwerte-Geisecke (Waterworks Westphalia) in North Rhine-Westphalia, a coil works that can deliver 0.8 MW of power for one second. Data: Requirement: 200 kW for 3 seconds when changing the transformer.

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.7 Typische Anwendungen und technische Daten

Anwendungen

- Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
- Kurzzeitspeicher im Netz (Netzstabilität, Frequenzhaltung)

Technische Daten

- 1 bis 1000 MWs im ms-Bereich für USV
Entladezeit bei 10 MWs und 10 MW: 1,008 s
- Material: NbTi Filamente in Kupfermatrix

Beispiele

- So liefert im österreichischen Gleisdorf eine elektromagnetische Spule für eine Dauer von 0,8 Sekunden eine Leistung von 1,4 MW.
- Im nordrhein-westfälischen Schwerte-Geisecke (Wasserwerke Westfalen) arbeitet eine Spule, die für eine Sekunde 0,8 MW Leistung liefern kann.
Daten: Bedarf: 200 kW für 3s bei Trafowechsel.

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.7 Typical applications - example

ACCEL Instruments GmbH – 2 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES

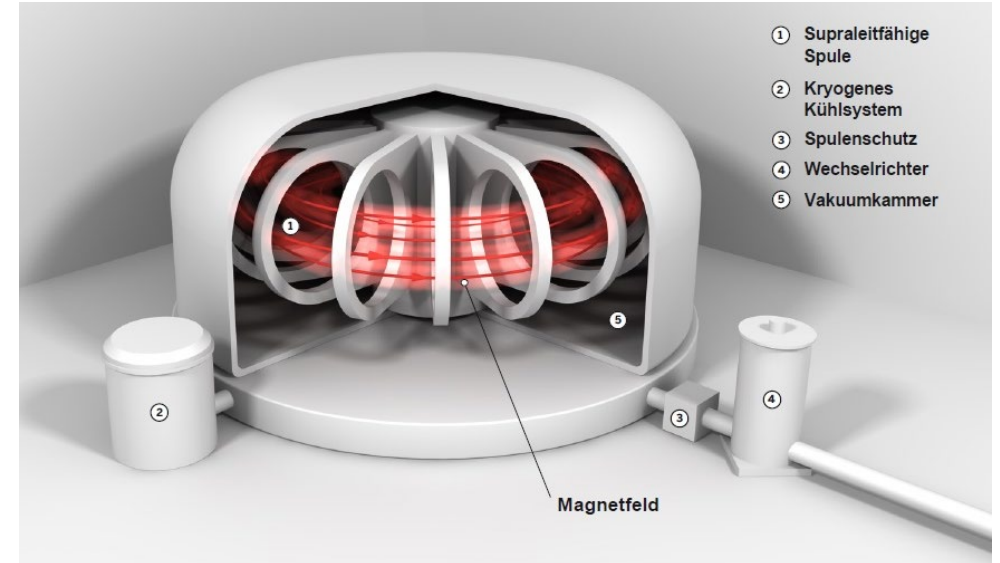
- SMES current 1000 A
- Stored Energy 2.1 MJ = 583 Wh
- Mean power 200 kW
- Peak power 800 kW
- Bridging period 8 seconds
- DC coupling voltage 800 V
- Magnetic field 4.5 Tesla
- Inductance 4.1 Henry
- Magnet diameter 760 mm
- Magnet height 600 mm
- 2-stage Helium based cooler
- NbTi-Matrixstruktur

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.7 Typische Anwendungen - Beispiel

ACCEL Instruments GmbH – 2 MJ Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES

- SMES Strom 1000 A
- Gespeicherte Energiemenge 2,1 MJ = 583 Wh
- Mittlere Leistung 200 kW
- Spitzenleistung 800 kW
- Überbrückungsdauer 8 Sekunden
- DC Spannung 800 V
- Magnetisches Feld 4,5 Tesla
- Induktivität 4,1 Henry
- Magnet Durchmesser 760 mm
- Magnet Höhe 600 mm
- 2-stufige Helium basierte Kühlung
- NbTi-Matrixstruktur



https://www.energieagentur.nrw/mediathek/Grafik/funktionsweise_eines_supraleitenden_energiespeichers_smes_magnetische_stromspeicherung

2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.8 Comparison of capacitor vs. coil

- The electrical field energy of a capacitor is determined by its capacitance C and by the square of the voltage U across the capacitor.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

- The magnetic field energy of a coil is determined by its inductance L and by the square of the current I flowing through the coil.

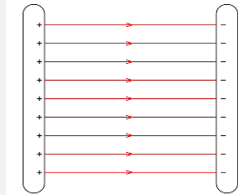
$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.8 Gegenüberstellung Kondensator vs. Spule

Die elektrische Feldenergie eines Kondensators ist durch dessen Kapazität C und durch das Quadrat der am Kondensator anliegenden Spannung U bestimmt.

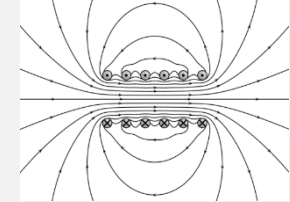
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$



Elektrisches Feld in einem Plattenkondensator, wdwd, CC-BY-SA 3.0 †
https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Feld#/media/Datei:PlattenkondensatorFeld.svg

Die magnetische Feldenergie einer Spule ist durch deren Induktivität L und durch das Quadrat des durch die Spule fließenden Strom I bestimmt.

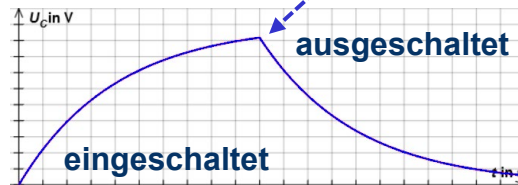
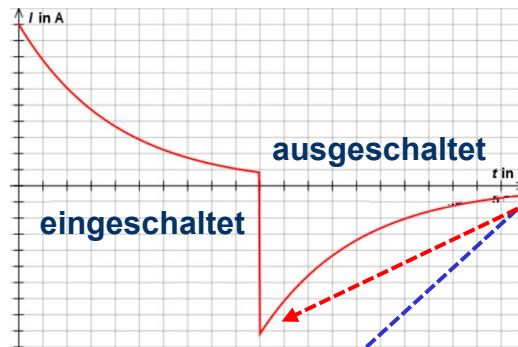
$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$



Magnetfeld einer Spule, Geek3, CC-BY-SA 3.0 †
[https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_\(Elektrotechnik\)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_(Elektrotechnik)#/media/Datei:VFPT_cylindrical_coil_real.svg)

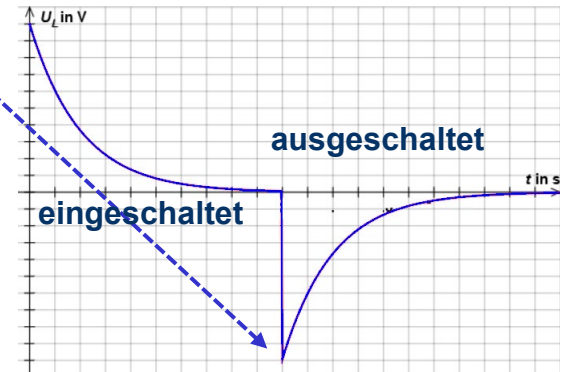
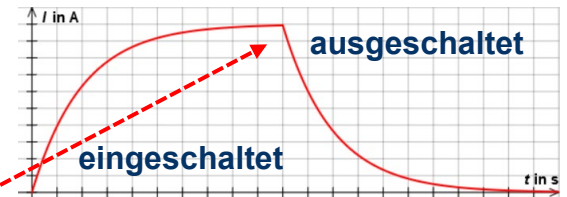
When turning off after charging is

- in the case of the capacitor, the voltage U is "steady" and the current changes sign,
- in the case of the coil, the current I is "constant" and the voltage changes sign.
- "Steady" means it remains the same when it is switched off
- the corresponding current or voltage results from Ohm's law.



Beim Ausschalten nach dem Laden ist

- beim Kondensator ist die Spannung U „stetig“ und der Strom wechselt das Vorzeichen,
- bei der Spule ist der Strom I „stetig“ und die Spannung wechselt das Vorzeichen.
- „stetig“ bedeutet er bleibt im Moment des Ausschaltens gleich
- der entsprechende Strom bzw. Spannung ergibt sich aus dem Ohm'schen Gesetz.



2. Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES

2.9 Short summary / "Take aways"

1. SMES store the energy in the form of electrical current in a (cooled) superconducting coil
2. The critical point is the transition temperature of the superconductivity and the cooling to this temperature
3. Advantages: high efficiency (but cooling required!), Long service life and cycle stability, very fast response time with extremely fast load changes possible
4. Disadvantages: low energy density, indirect self-discharge due to high cooling costs, low energy density, only suitable for very short storage periods, complex power electronics, voltage drops when discharging
5. Hence more niche applications

2. Supraleitende Magnetische Energie Speicher

2.9 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. SMES speichern die Energie in Form des elektrischen Stroms in einer (gekühlten) supraleitenden Spule
2. Kritischer Punkt ist die Sprungtemperatur der Supraleitung und die Kühlung auf diese Temperatur
3. Vorteile: hoher Wirkungsgrad (aber Kühlungsbedarf!), lange Lebensdauer und Zyklfestigkeit, sehr schnelle Reaktionszeit mit extrem schnellen Lastwechsel möglich
4. Nachteile: geringe Energiedichte, indirekte Selbstentladung durch hohen Kühlaufwand, geringe Energiedichte, nur für sehr kurze Speicherdauern geeignet, aufwändige Leistungselektronik, Spannung fällt beim Entladen ab
5. Daher eher Nischenanwendungen

$$H = I \cdot \frac{N}{\sqrt{l^2 + d^2}} \approx I \cdot \frac{N}{l}$$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{N}{l}$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t})$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

$$U_L(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

$$U_R(t) = U_0 - U_L(t)$$

$$U_R(t) = -U_L(t)$$

Weiterführende Videos

Further videos

VIDEO: „Capacitor and Inductors – The mirror twins“ [0:00 – 8:45]

Engl.



<https://youtu.be/-GLidgxMr4s>

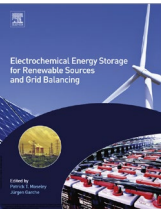
Weiterführende Literatur

Further Reading










Michael Sterner, Ingo Stadler (Hrsg.); „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration“

- Kapitel 6 „Elektrische Energiespeicher“
- Kapitel 6.2 „Supraleitfähige elektromagnetische Energiespeicher“



Moseley, P.T.; Garch J. [Hrsg./Ed.]: „Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing“

- Chapter 7.2 “Electrical’ Storage Systems”
- Chapter 7.2.1 Superconductive Magnetic Energy Storage

| †CC-Lizenzen | Bezeichnung | Version | Link zum Lizenz-/Vertragstext |
|---|--|--|--|
|  | CC0 Bedingungslose Lizenz | Vers. 1.0 | https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode |
|  | CC-BY Attribution (Namensnennung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode |
|  | CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung) | Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0 | http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode |

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0