

Superkondensatoren Webinar über Technologie und Anwendung



Frank Puhane
Leader Technical Engineering

08.05.2019

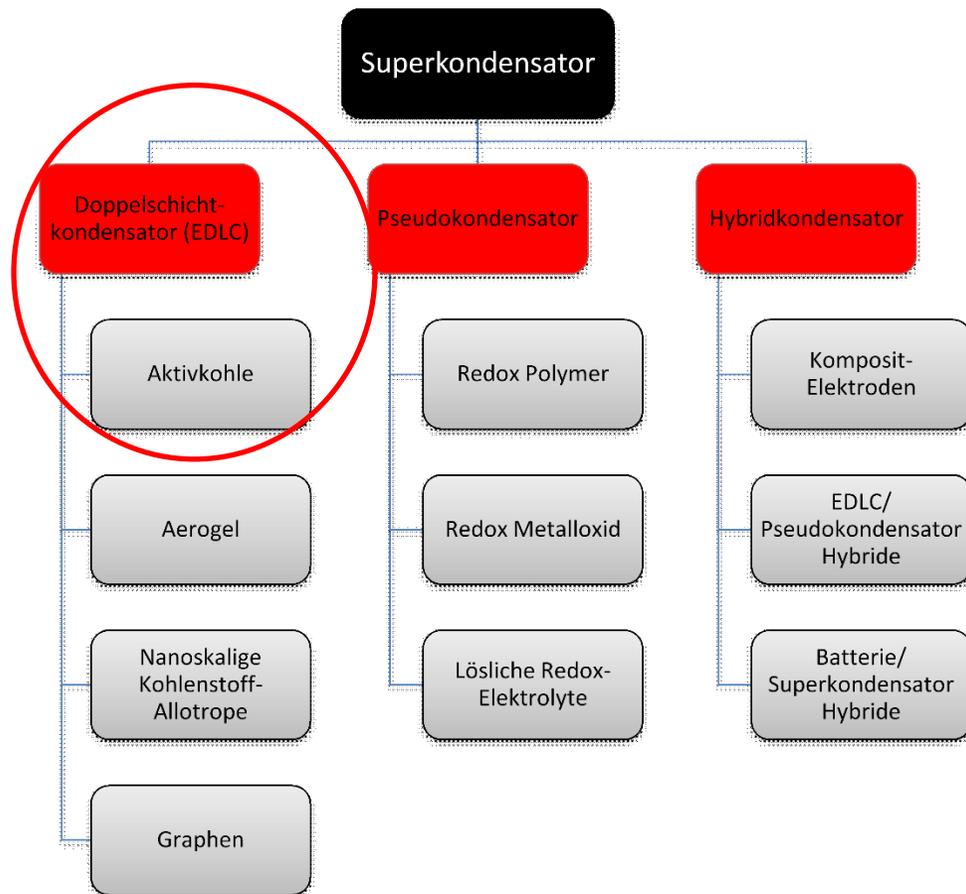
Agenda Technologie



- **Klassifizierung von Kondensatoren**
- **Physikalische Prozesse**
- **Modellparameter und Eigenschaften**
- **Lade- und Entladeverhalten**
- **Physische Einschränkungen der Kapazität**



Klassifizierung von Kondensatoren



Arten von Superkondensatoren, basierend auf dem Elektrodendesign:

- **Doppelschichtkondensatoren**
 - Elektroden: Kohlenstoff oder Kohlenstoffderivate
- **Pseudokondensatoren**
 - Elektroden: Oxide oder leitfähige Polymere (hohe faradaysche Pseudokapazität)
- **Hybridkondensatoren**
 - Elektroden: Spezialelektroden mit signifikanter Doppelschichtkapazität und Pseudokapazität wie Lithium-Ionen

Klassifizierung von Kondensatoren



■ Markennamen und Synonyme:

- PowerCap,
- BestCap,
- BoostCap,
- CAP-XX,
- EVerCAP,
- DynaCap,
- Goldcap,
- HY-CAP,
- SuperCap,
- PAS Capacitor,
- PowerStor,
- PseudoCap,
- Ultracapacitor,
- Ultracap,
- ENYCAP,
- ...



Klassifizierung von Kondensatoren



▪ Superkondensatoren vs. Batterien und Kondensatoren

Superkondensator



- schnelles Laden und Entladen (min - sec)
- hohe Lebensdauer (≈ 500.000 Zyklen)
- hohe Ausgangsleistung
- ≈ 10 mal höher als Lithium-Ionen-Akku

- geringe Energiekapazität
- ≈ 30 mal niedriger als Lithium-Ionen-Akku
- lineare Spannungsabhängigkeit

Kondensatoren



- schnelles Laden und Entladen (\ll sec)
- hohe Lebensdauer
- hohe Betriebsspannungen
- hohe Ausgangsleistung

- geringe Energiekapazität

Klassifizierung von Kondensatoren



▪ Superkondensatoren vs. Batterien und Kondensatoren

Superkondensator



- schnelles Laden und Entladen (min - sec)
- hohe Lebensdauer (≈ 500.000 Zyklen)
- hohe Ausgangsleistung
- ≈ 10 mal höher als Lithium-Ionen-Akku

- geringe Energiekapazität
- ≈ 30 mal niedriger als Lithium-Ionen-Akku
- lineare Spannungsabhängigkeit

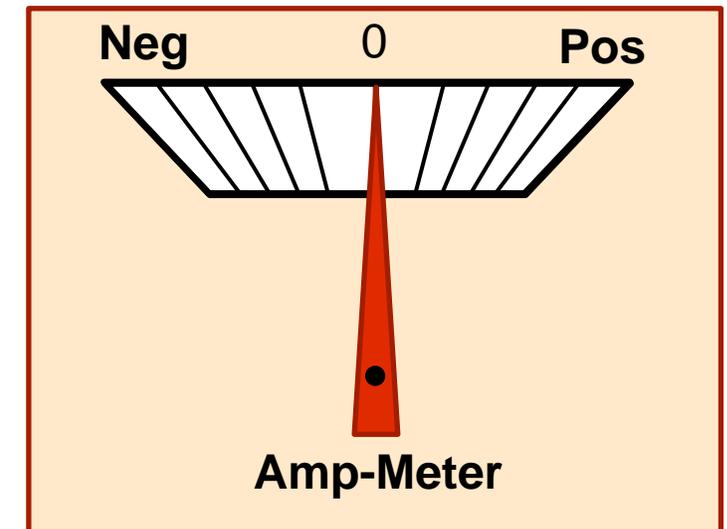
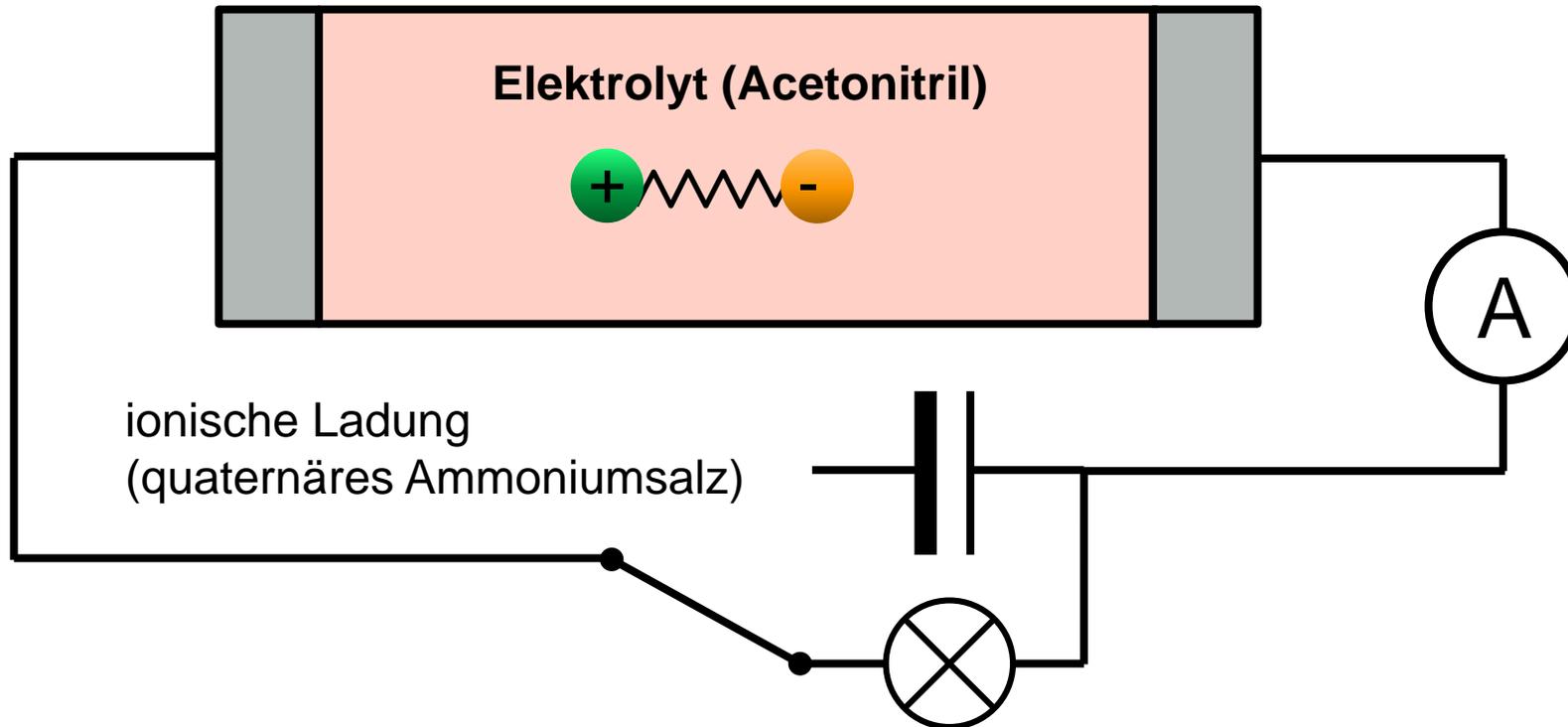
Batterie



- hohe Energiekapazität
- spannungsabhängig

- niedrige Ausgangsleistung
- geringe Lebenserwartung (≈ 1000 Zyklen)
- lange Ladezeit (Stunden)

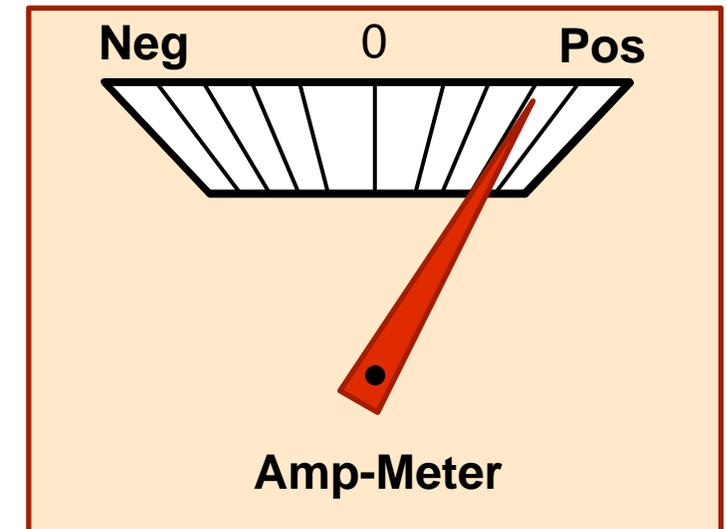
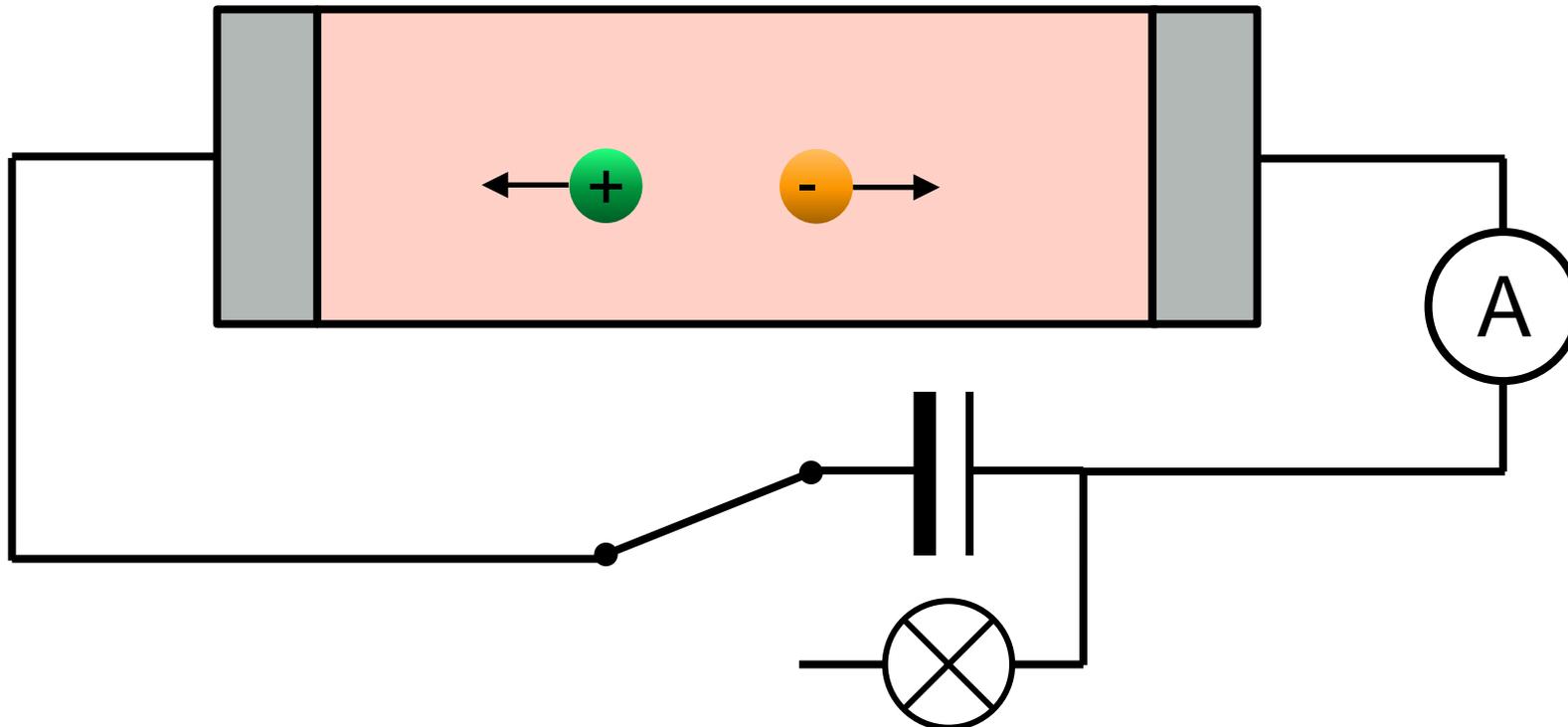
Energiespeicherung - Ladungstrennung



Entladener Zustand:

- 1) keine Spannung an die Elektroden angelegt wird
- 2) Anionen und Kationen sind in unmittelbarer Nähe zueinander angeordnet
- 3) Bewegung von Anionen und Kationen, die durch elektrostatische Wechselwirkungs- und Diffusionsprozesse gesteuert werden

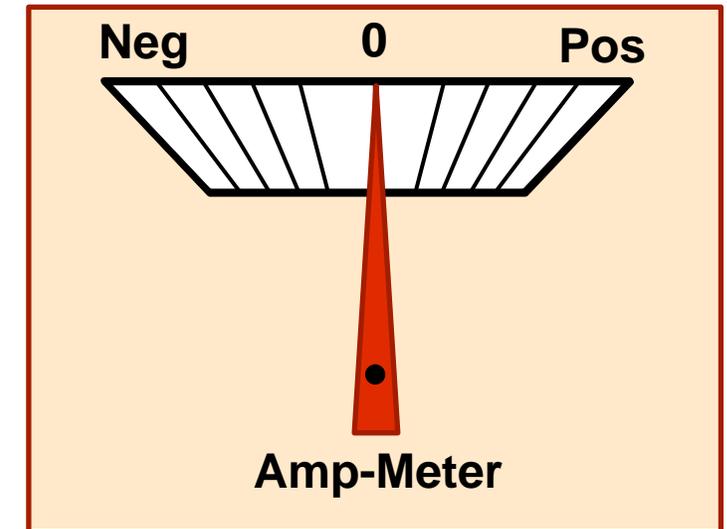
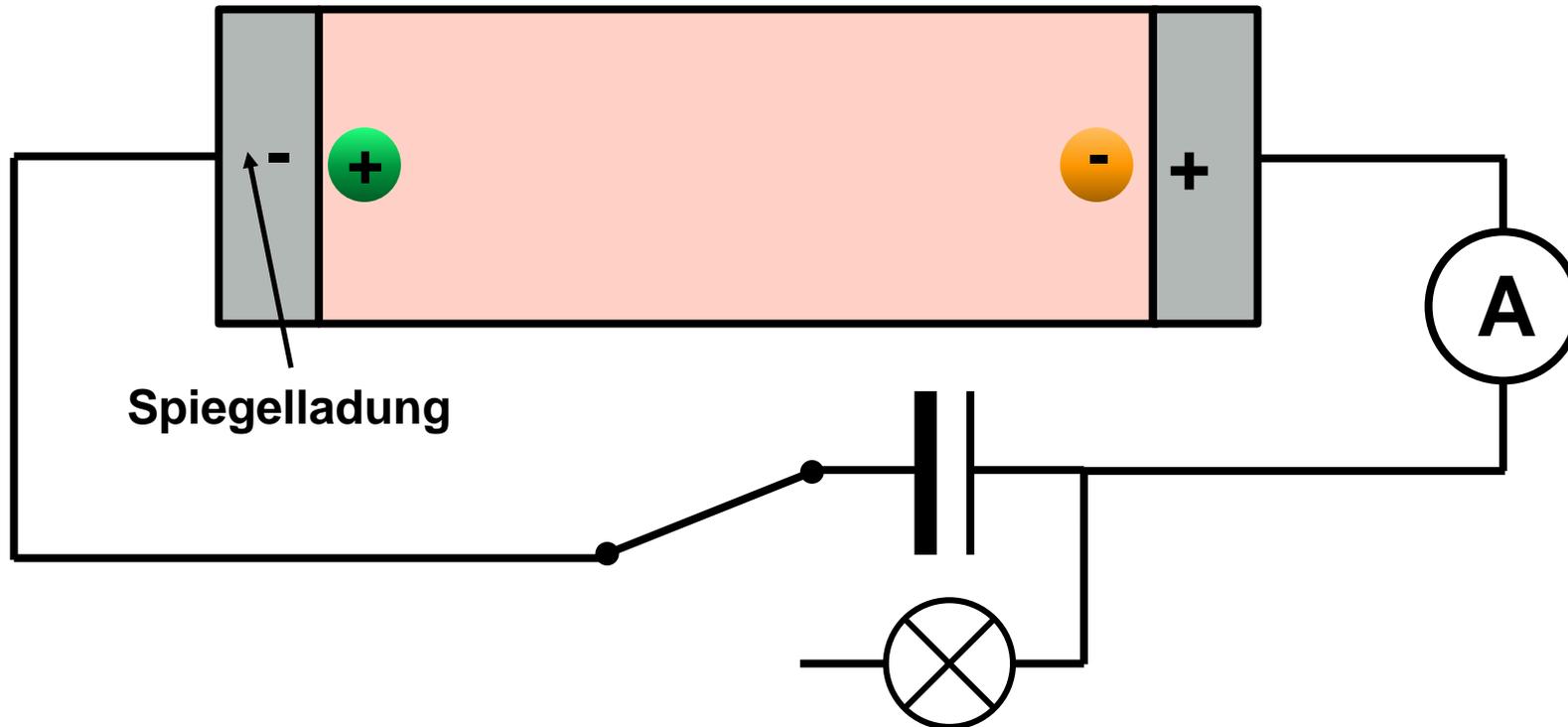
Energiespeicherung - Ladungstrennung



Laden:

- 1) Spannung zwischen den Platten (z.B. elektrisches Feld) wird angelegt
- 2) elektrisches Feld "reißt" Ladungen auseinander
- 3) die Bewegung der Ladungen verursacht einen Strom, der von der Spannungsquelle bereitgestellt wird

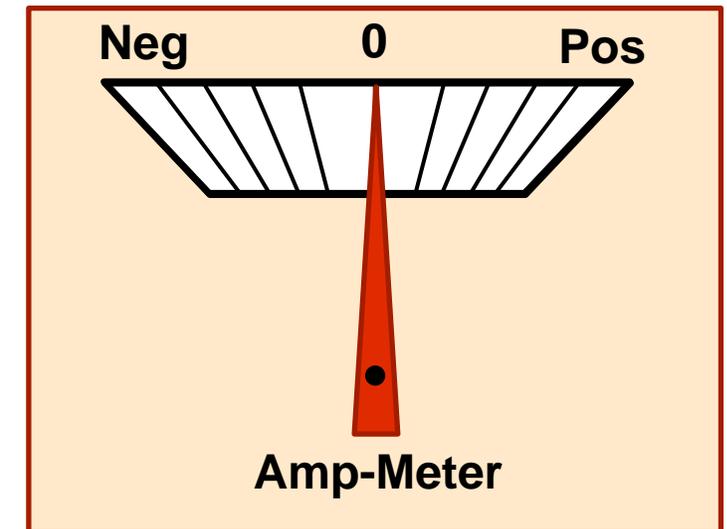
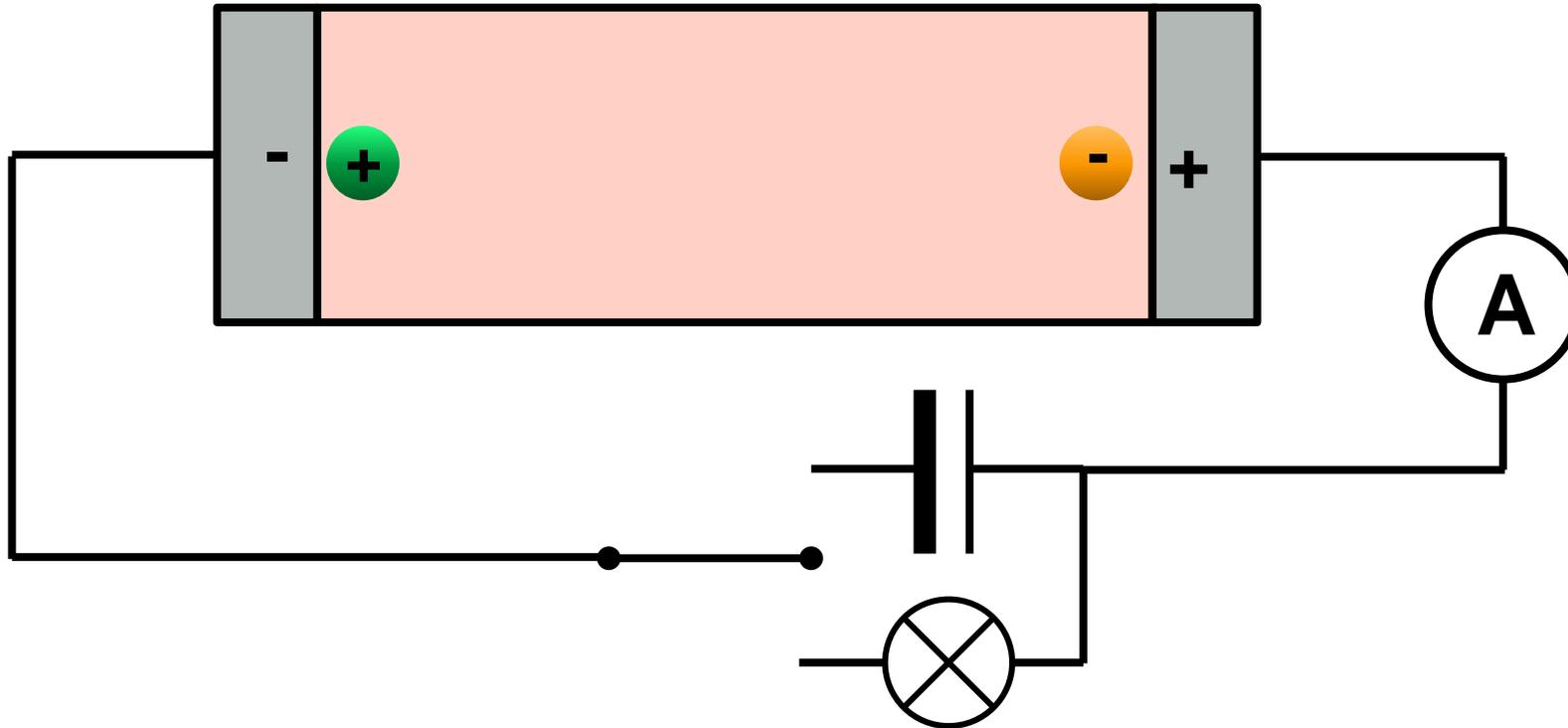
Energiespeicherung - Ladungstrennung



Vollständig aufgeladen:

- 1) Anionen und Kationen erreichen die Grenzfläche/Elektrode
- 2) Neuausrichtung kommt zum Tragen
- 3) jedes Anion/Kation wird durch eine entgegengesetzte positive/negative Ladung an der Elektrode gespiegelt

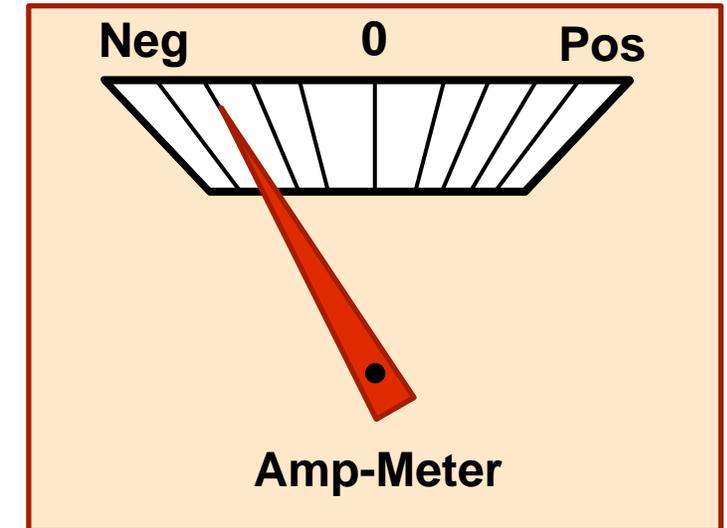
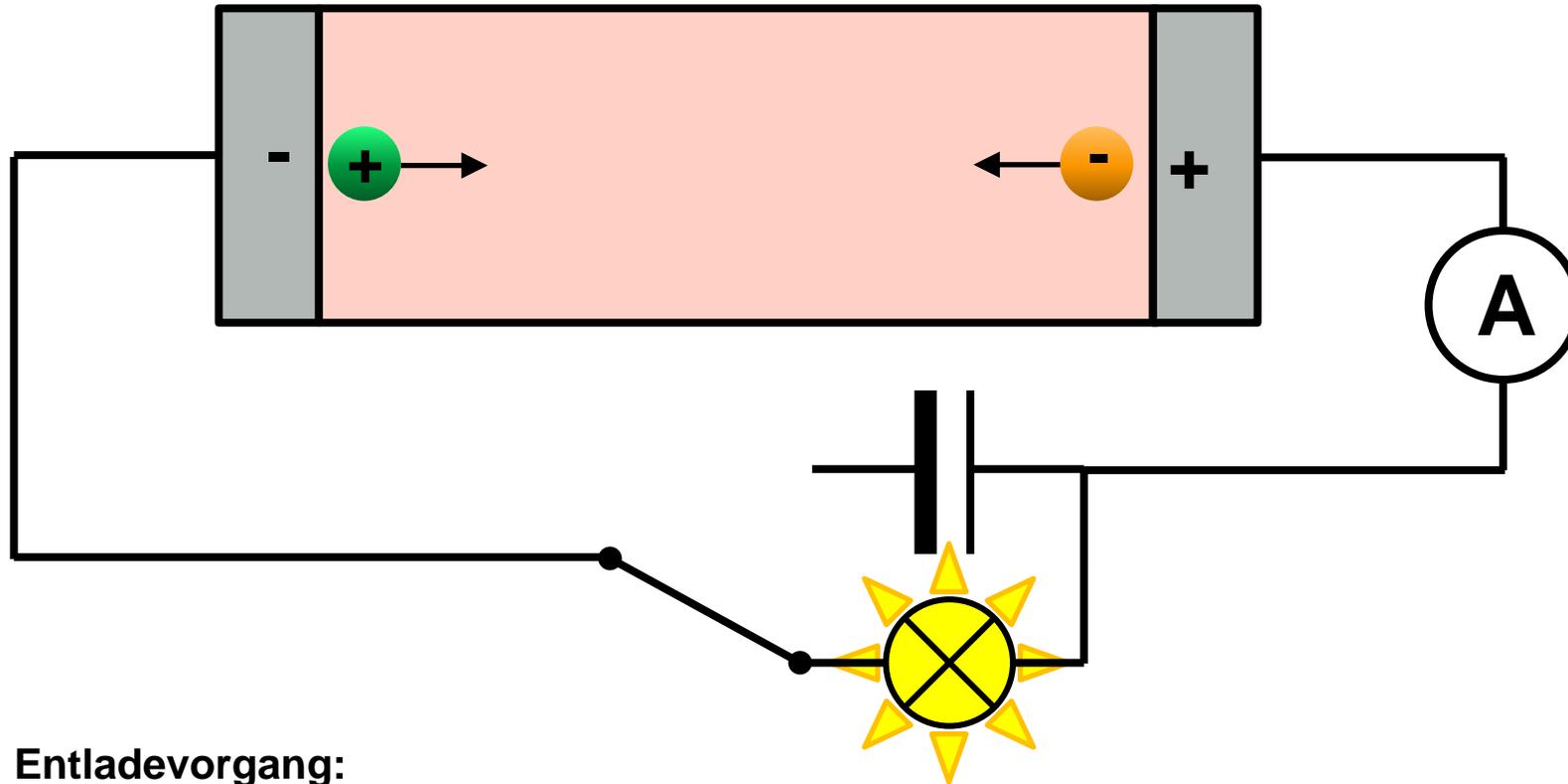
Energiespeicherung - Ladungstrennung



Leerlauf:

- 1) Jedes Anion/Kation wird durch eine gleiche Menge an Spiegelladung an der Grenzfläche ausgeglichen
- 2) Anionen und Kationen befinden sich an der Grenzfläche
- 3) Ladungen können an der Schnittstelle über einen längeren Zeitraum gespeichert werden

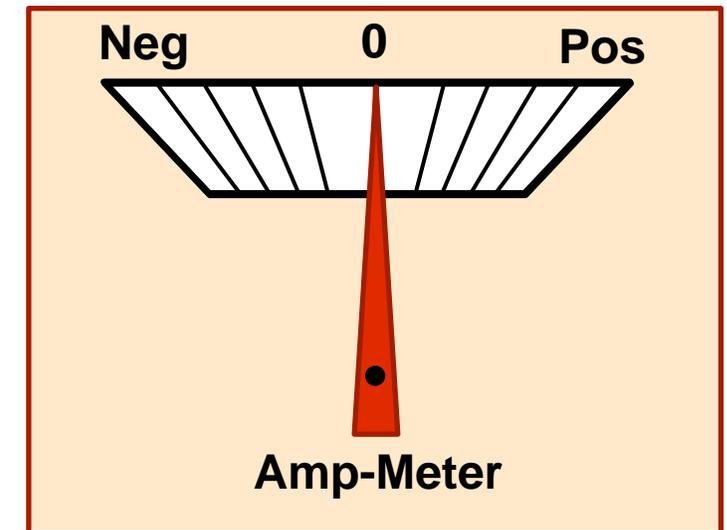
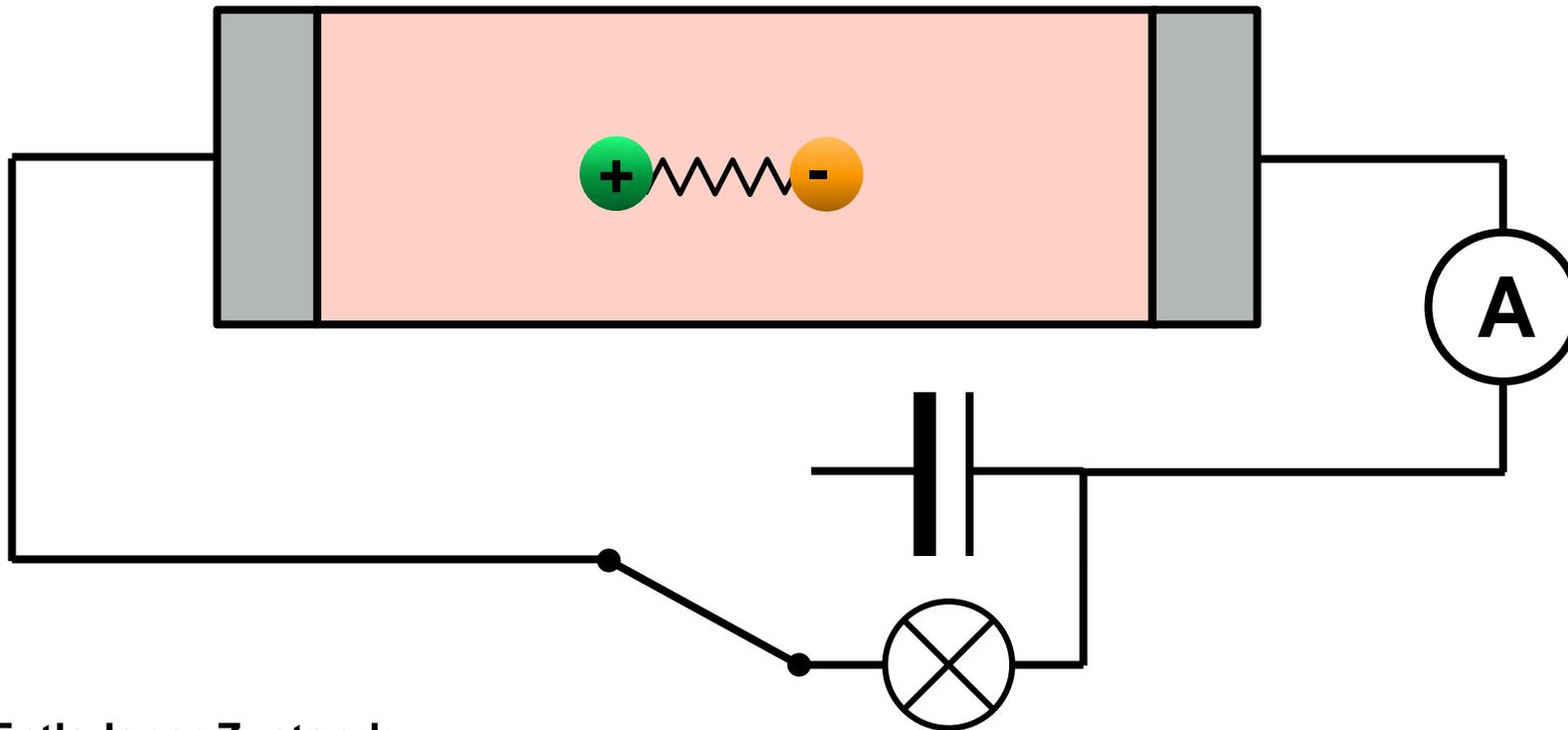
Energiespeicherung - Ladungstrennung



Entladevorgang:

- 1) Der Stromkreis ist geschlossen
- 2) Potentialdifferenz zwischen den Platten, verursacht elektrischen Strom bei einer bestimmten Spannung
- 3) Anion/Kationen "verlieren" ihre Spiegelladung, was zu Ladungsbewegungen führt
- 4) Je schneller die Anionen/Kationen freigesetzt werden können, desto größer ist der Strom

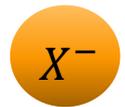
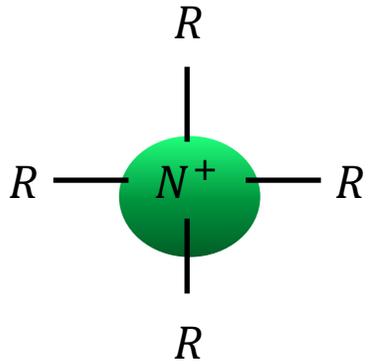
Energiespeicherung - Ladungstrennung



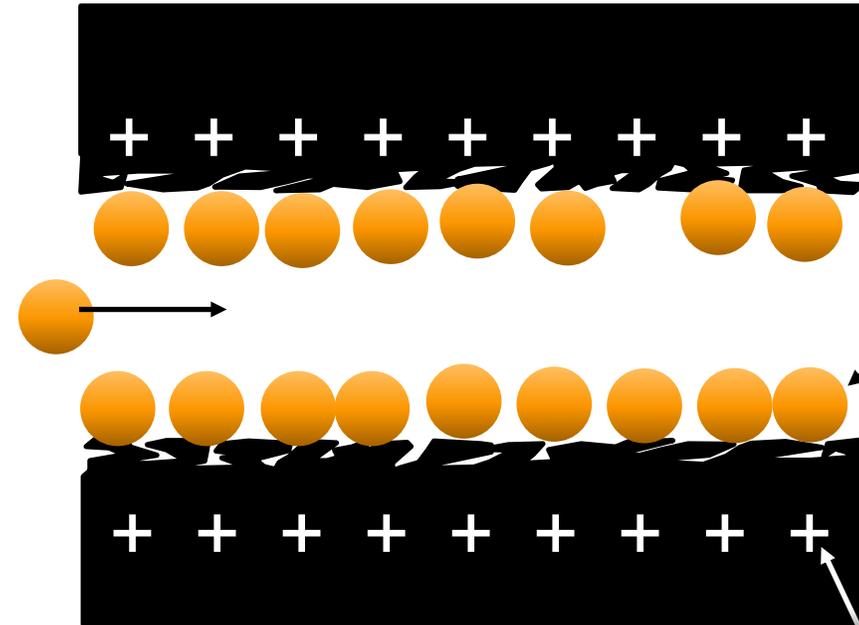
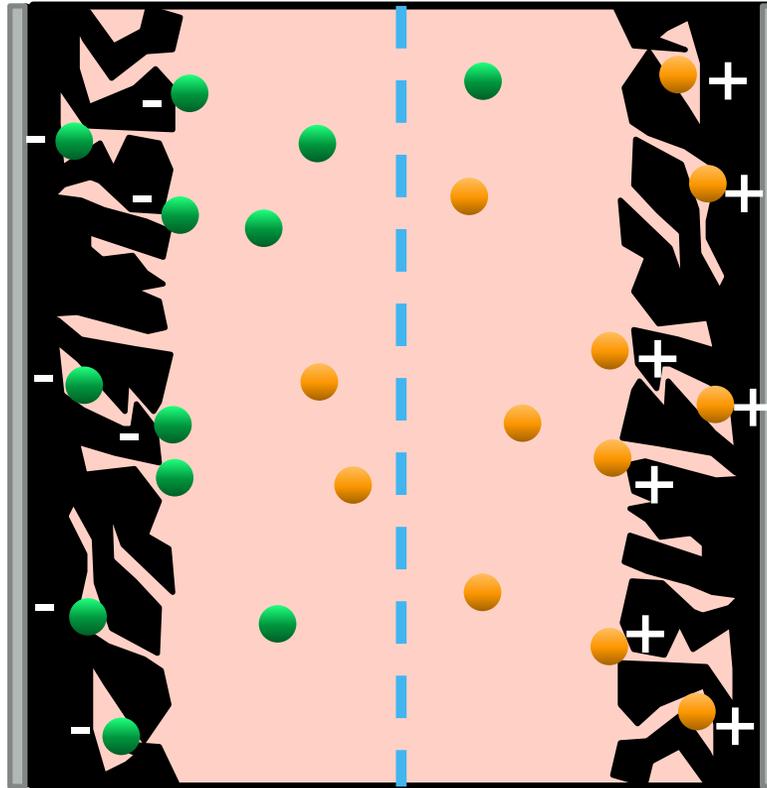
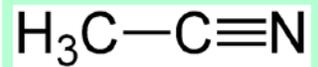
Entladener Zustand:

- 1) keine Spannung an die Elektroden angelegt wird
- 2) Anionen und Kationen sind wieder in unmittelbarer Nähe zueinander.
- 3) Bewegung von Anionen und Kationen, die durch elektrostatische Wechselwirkungs- und Diffusionsprozesse gesteuert werden.

Struktur von einem EDLC

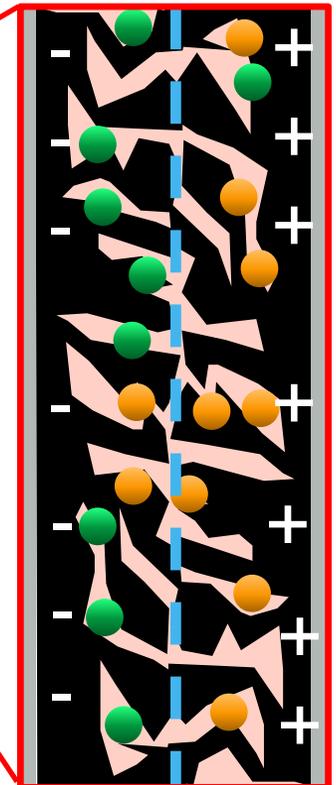
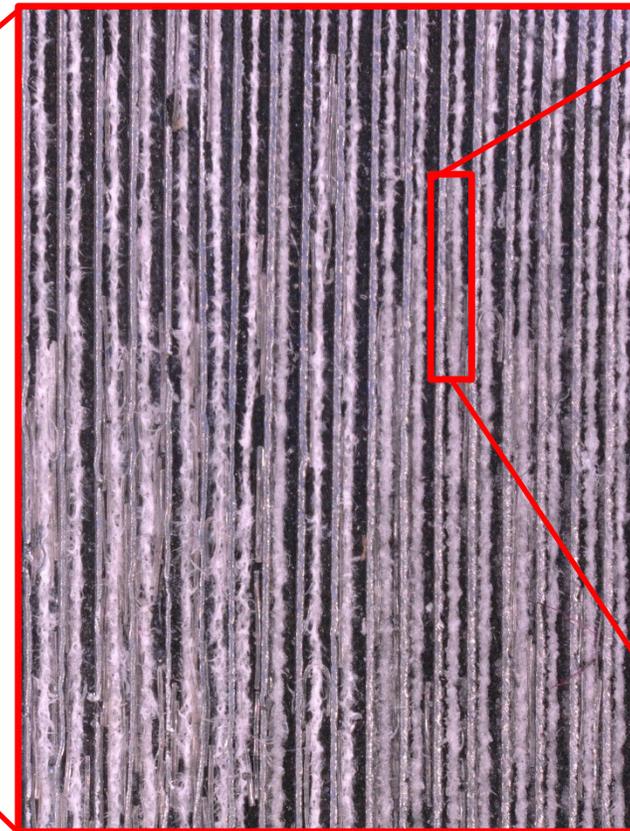
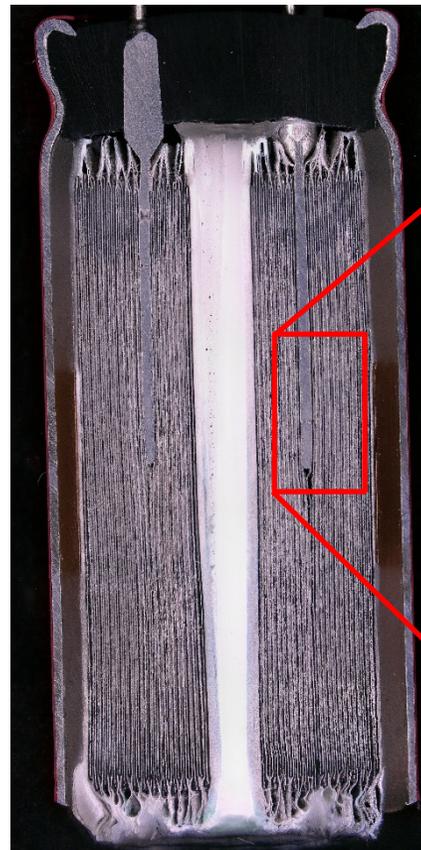


Acetonitril

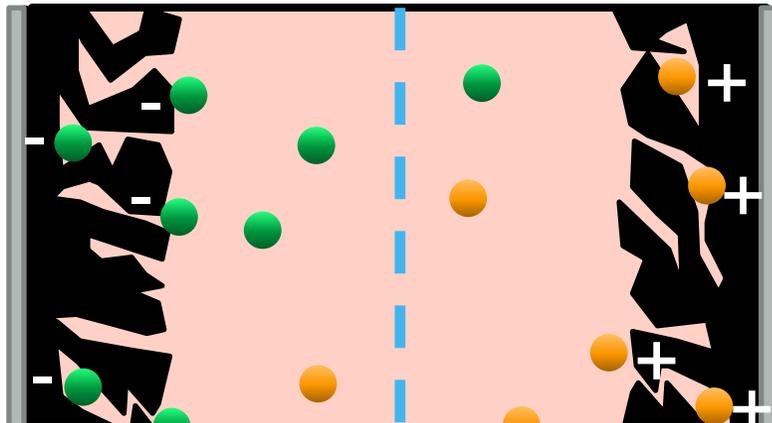


Helmholtz (Doppel-)Schicht:
 Die ionische Ladung wird durch Spiegelladung
 ausgeglichen.

Struktur von EDLCs



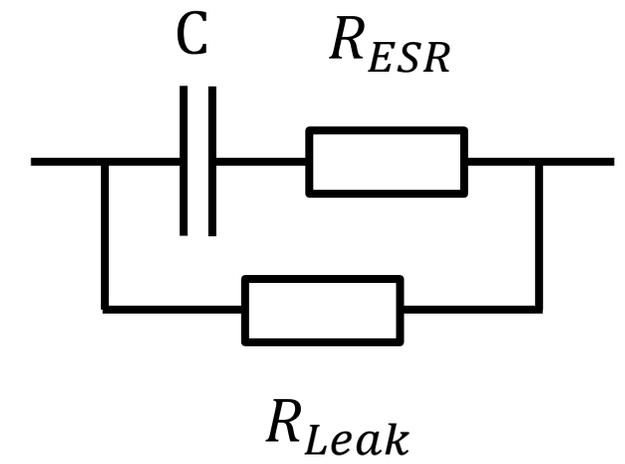
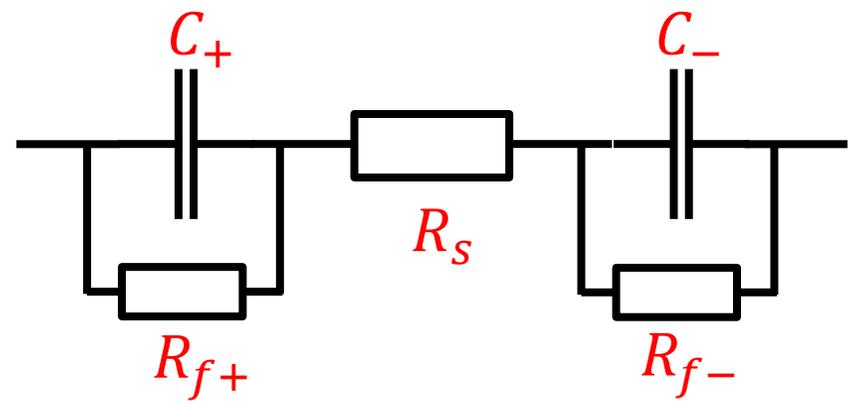
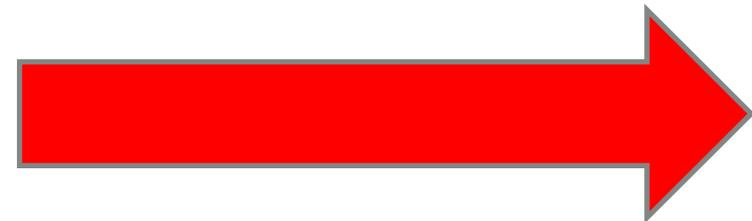
Physikalische Prozesse und Parameter



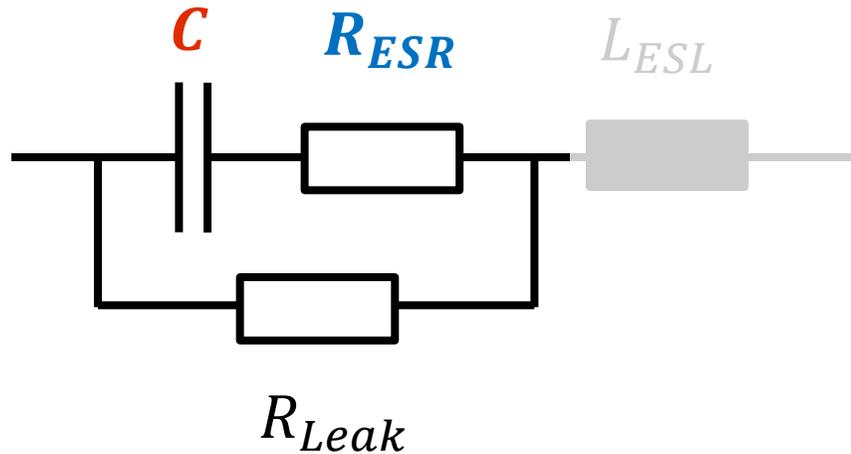
$$\frac{1}{C_+} + \frac{1}{C_-} = \frac{1}{C}$$

$$R_S \sim R_{ESR}$$

$$R_S + R_{f+} + R_{f-} \sim R_{Leak}$$



Parameter und Eigenschaften



$$E = \frac{1}{2} \times C \times U_r^2$$

$$P_{max} = \frac{U_r^2}{4 R_{ESR}}$$

$$\tau = R_{ESR} \times C$$

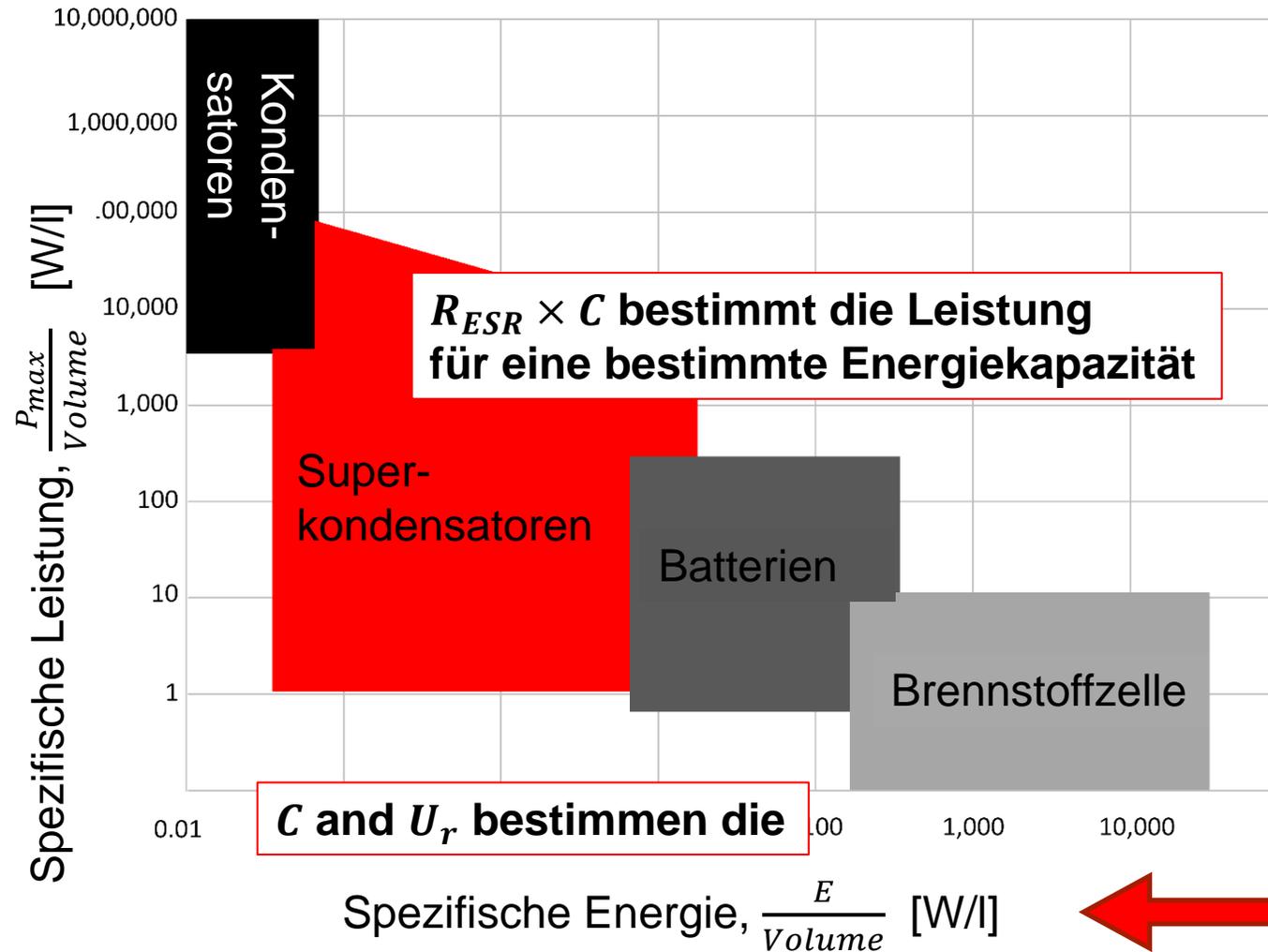
$$P(E) = \frac{2}{R_{ESR} \times C} E$$

- Nennspannung: U_r
 - Beeinflusst stark die Leistungsabgabe und die Energiespeicherkapazität
- Kapazität: C
 - Einfluss auf die Energiespeicherkapazität
- ESR: R_{ESR}
 - Einfluss auf die Ausgangsleistung
- Leckage: R_{Leak}
 - Einfluss auf die Ladungsspeichermöglichkeiten ($R_{Leak} \approx 10 \text{ k}\Omega \dots 1 \text{ M}\Omega$)

U_r wird nicht durch die Ersatzschaltung, sondern durch die Elektrochemie (Zersetzungsspannung) bestimmt.

- Nichtwässriger Elektrolyt (typ.): $\approx 2 \text{ V} \dots 3 \text{ V}$
- Wässriger Elektrolyt (typ.): $\approx 1.5 \text{ V}$

Parameter und Eigenschaften

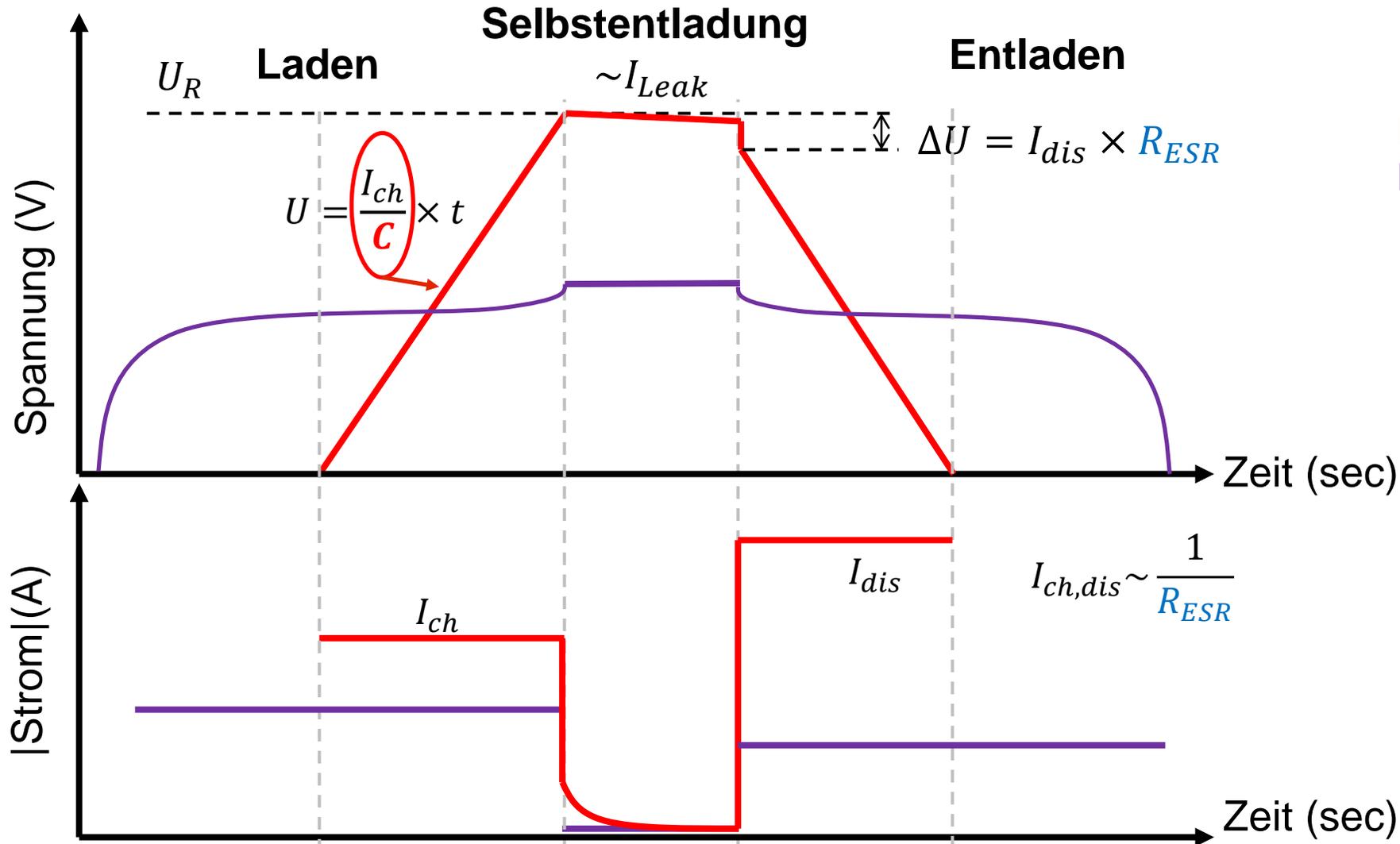


$$P(E) = \frac{2}{R_{ESR} \times C} E$$

$$E = \frac{1}{2} \times C \times U_r^2$$



Lade- und Entladeverhalten



Kondensator
Batterie

Impedanzspektrum

- Das elektrische Modell ist identisch für MLCC, ELKOs, ...
- Induktive Reaktanz (vernachlässigbar)

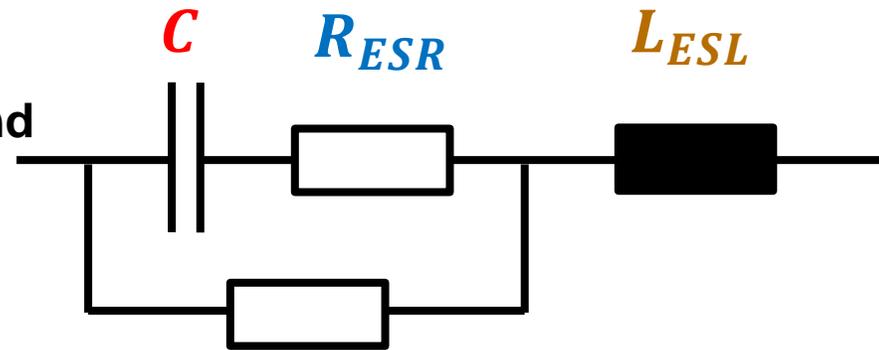
$$X_L = \omega \times L_{ESL}$$

- Kapazitiver Blindwiderstand

$$X_C = -\frac{1}{\omega \times C}$$

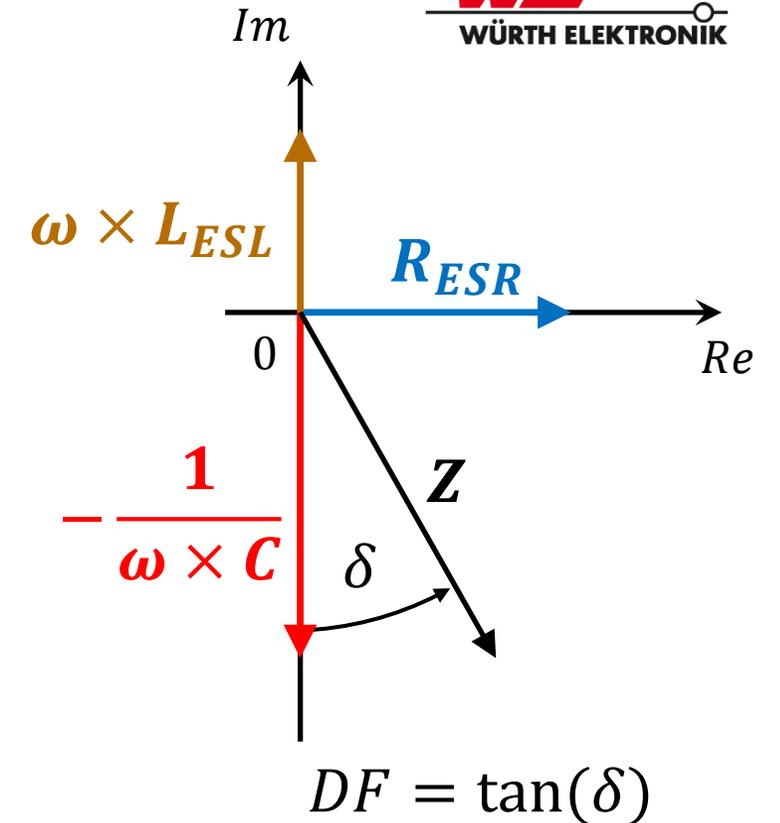
- Impedanz

$$Z = R_{ESR} + jX_L + jX_C$$



R_{Leak}

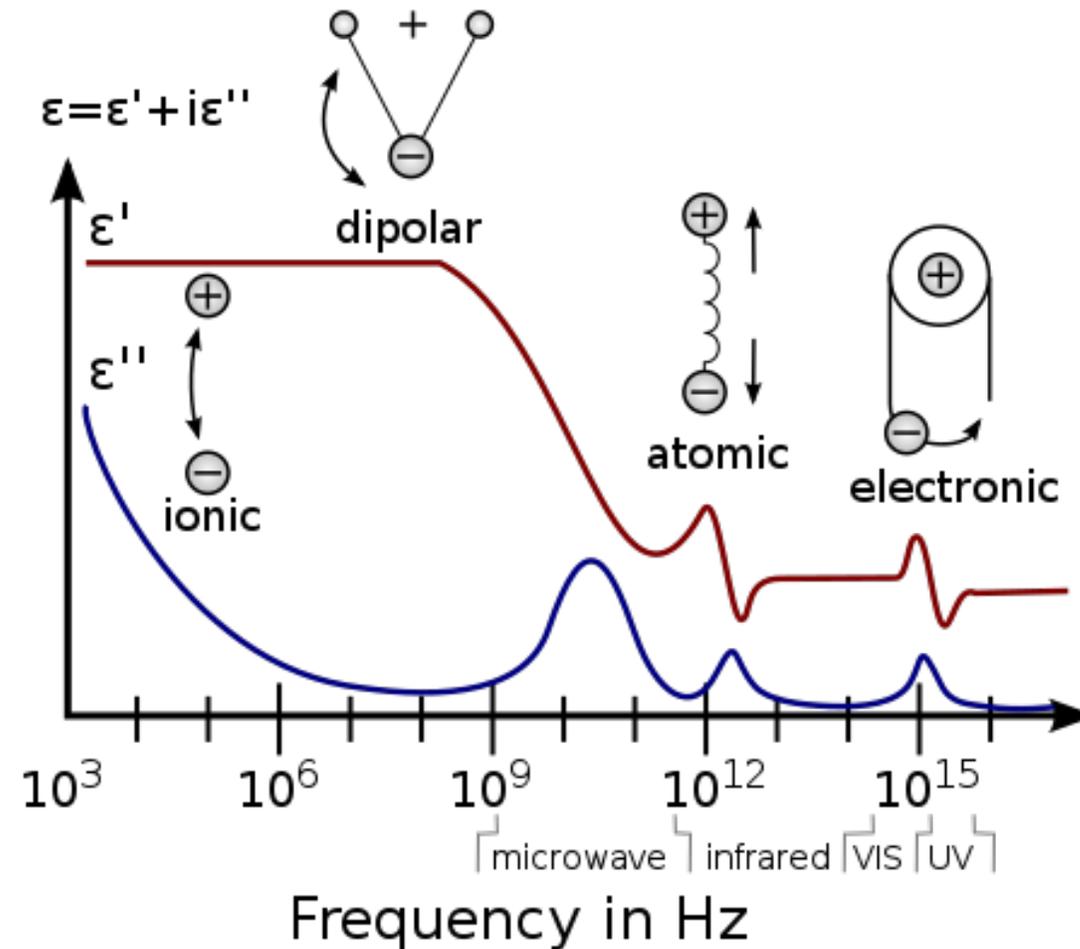
kein Einfluss auf
Frequenzabhängigkeit



Impedanzspektrum

Dielektrische (Impedanz-)Spektroskopie:

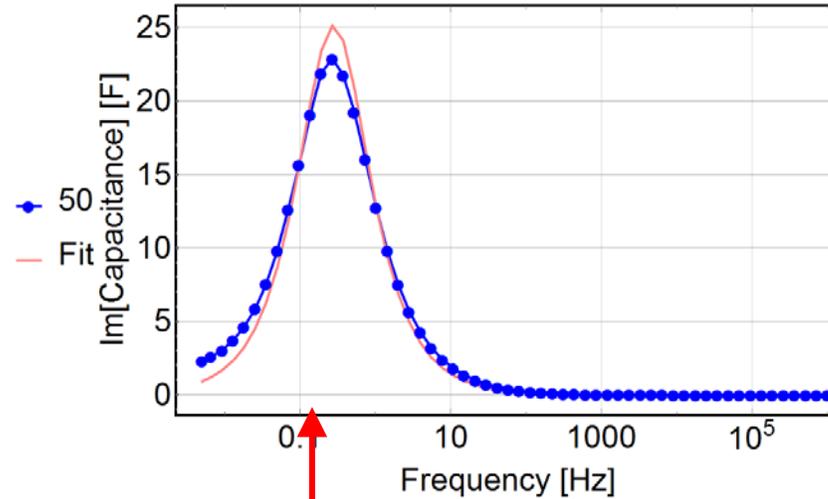
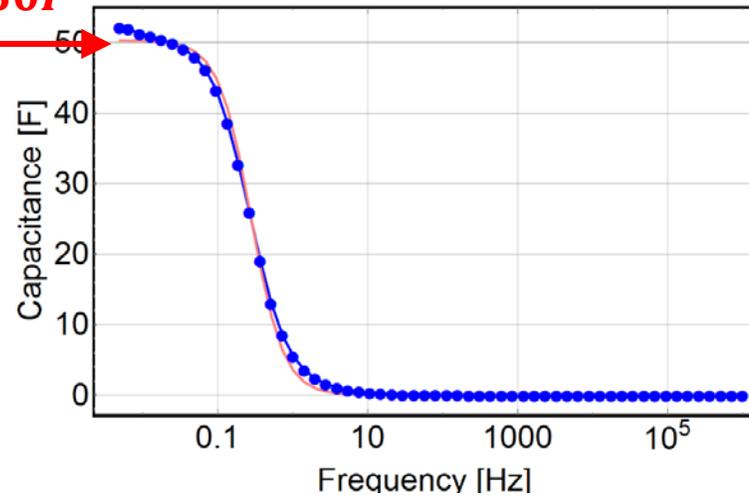
- "misst" die Polarisierbarkeit eines Mediums in Abhängigkeit von der Frequenz



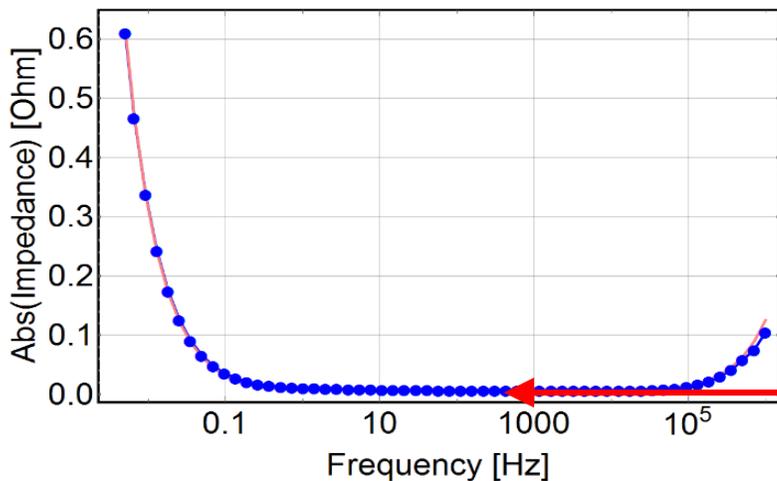
Source: Wikipedia: "https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_spectroscopy"

Impedanzspektrum

$C \approx 50F$



50 F, EDLC
Fit



$R_{ESR} \approx 0.01 \Omega$

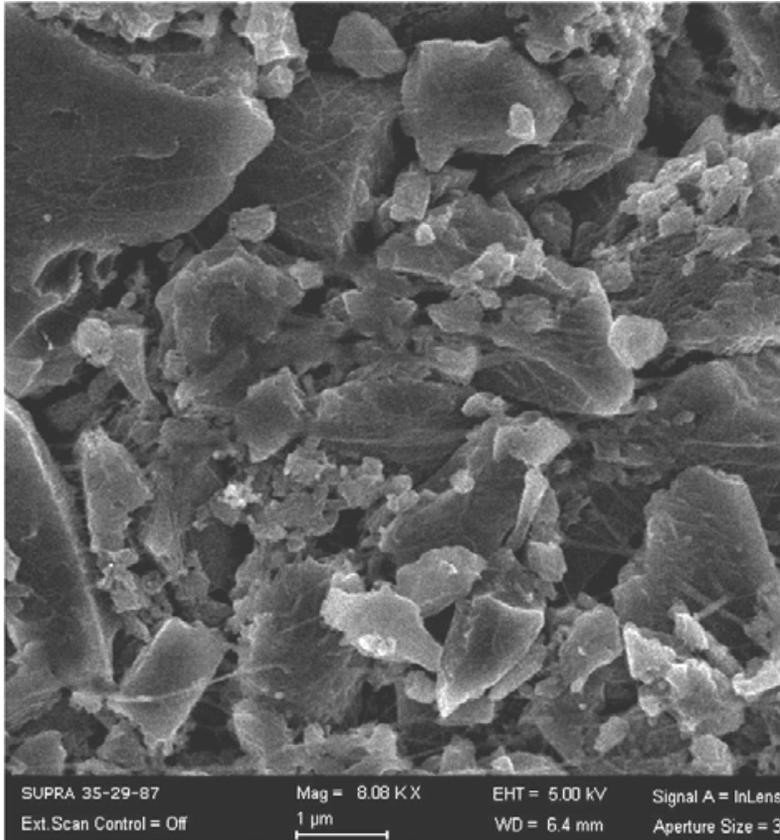
$$\frac{1}{2\pi R_{ESR} C} \approx 0.29Hz$$

Fitresults:

$R_{ESR} = 0.011 \Omega,$

$C = 50.3 F$

Physikalische Kapazitätsgrenzen



Spezifische Oberfläche von a. c.:

$$A^* = \frac{A}{m} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{g}} \right]$$

Spezifische Kapazität von a. c.:

$$C^* = \frac{C}{m} \left[\frac{\text{F}}{\text{g}} \right]$$

Berechnungsbeispiel : 50F EDLC enthalten $\approx 2.2 \text{ g a. c.}$

	$m \text{ [g]}$	$A^* \left[\frac{\text{m}^2}{\text{g}} \right]$	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$C^* \left[\frac{\text{F}}{\text{g}} \right]$	$C \text{ [F]}$
Comm.	2.2	500	1120	24	54
Micro.		935	2095	142	318
Micro.		2312	5179	113	253

$$\frac{C}{m} \sim \frac{A}{m}$$

C : Kapazität

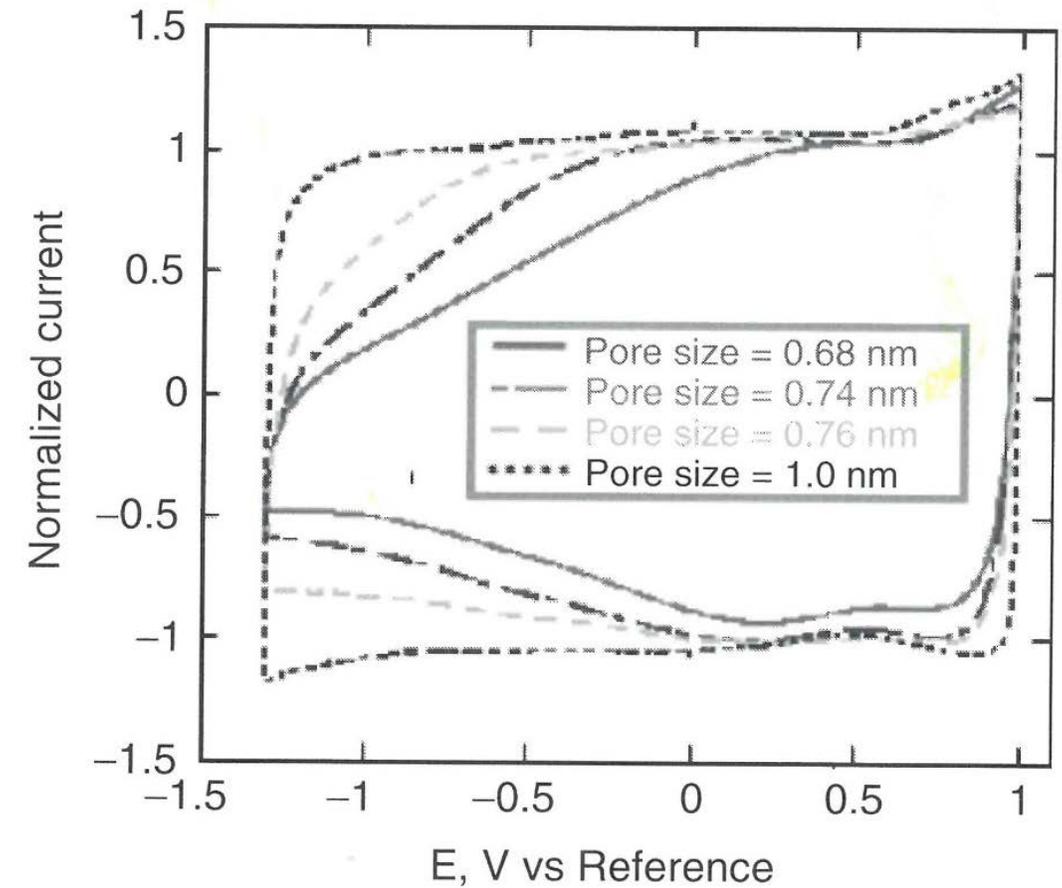
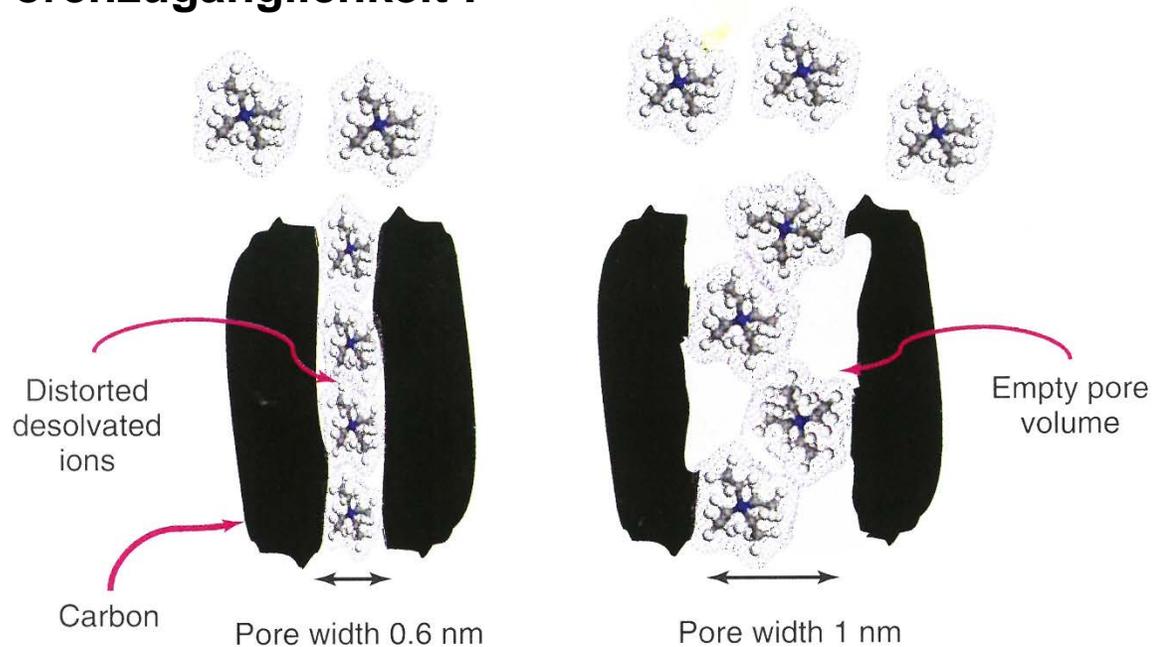
m : Masse a.c.

A : Spezifische Fläche von a.c.

Source: Activated carbon based electrodes in commercial supercapacitors and their performance, V. Obreja et al., International Review of Electrical Engineering (2010)

Physikalische Kapazitätsgrenzen

Porenzugänglichkeit :



Source: *Supercapacitors Materials, Systems and Applications*, ed. F. Beguin et al., WILEY-VCH (2013)

Parameter – Eigenschaften



$$\tau = R_{ESR} \times C$$

nur physikalische Prozesse beteiligt

kleiner R_{ESR}

↔ schnelles Laden und Entladen (min - sec)

↔ hohe Lebensdauer (≈ 500.000 Zyklen)

↔ hohe Ausgangsleistung

≈ 10 mal höher als Lithium-Ionen-Akku

Ladungen werden nur an
der Schnittstelle gespeichert

↔ geringe Energiekapazität

≈ 30 mal niedriger als Lithium-Ionen-Akku

ELDC sind Kondensatoren
 $U_r < \text{Zersetzungsspannung}$

↔ lineare Spannungsabhängigkeit

↔ niedrige Betriebsspannung

Agenda Anwendung



- Einsatz bei verschiedenen Anforderungen und Leistungen
- Warum Symmetrierung wichtig ist?
- Weitere Anwendungen – Die Sie nicht im Sinn hatten?!

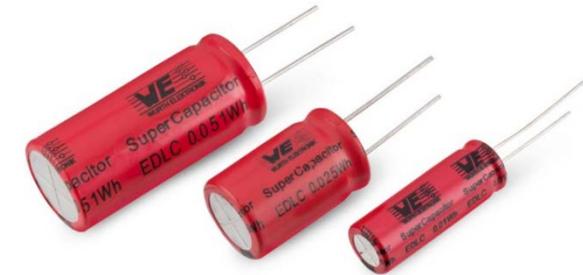


Superkondensator - Unterschiede?



▪ EDLC's

- haben keine isolierende dielektrische Schicht
- Energie wird durch Ladungstrennung gespeichert
- haben eine hohe effektive Oberfläche
- sind nicht für Filteranwendungen, sondern für Energiespeicherung



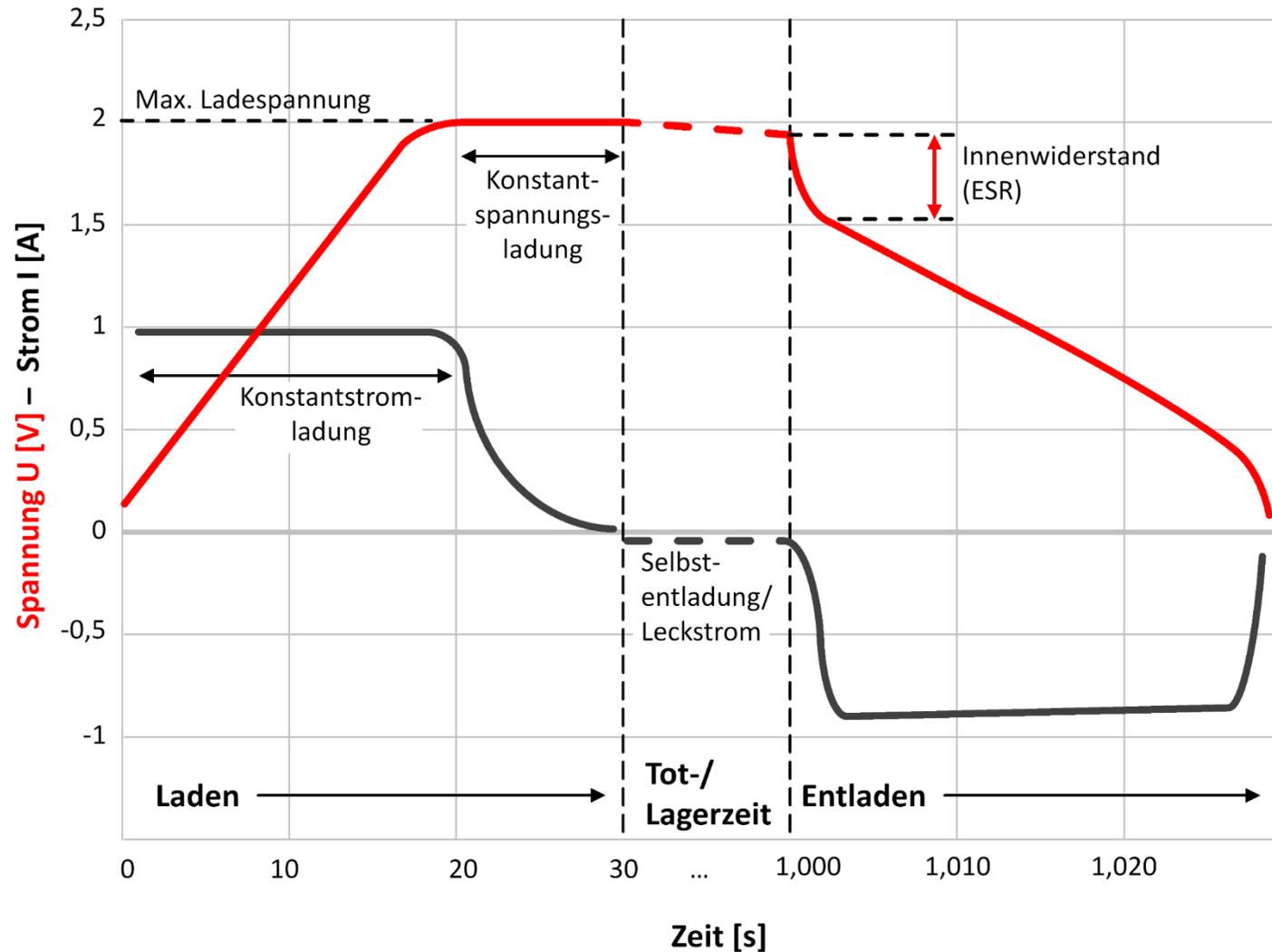
Supercaps

- schnelles Laden und Entladen (min - sec)
- hohe Lebensdauer (≈ 500.000 Zyklen)
- hohe Ausgangsleistung
- ≈ 10 mal höher als Lithium-Ionen-Akku
- geringe Energiekapazität
- ≈ 30 mal niedriger als Lithium-Ionen-Akku
- lineare Spannungsabhängigkeit

Batterien

- hohe Energiekapazität
- konstante Spannungsabhängigkeit
- geringe Leistungsabgabe
- geringe Lebenserwartung (≈ 1000 Zyklen)
- lange Ladezeit (Stunden)

Superkondensator - Unterschiede?



Superkondensator - Typische Anwendungen



- Backup-Batterie für RAM-Speicher
- Ersatz für kurzfristigen Energiebedarf
- Smart Meter
- USV
- Kinetisches Energierückgewinnungssystem (KERS)
- Defibrillatoren
- RFID-Schließsysteme



Von EVB Energie AG (keine Nennung des Fotografen erforderlich) -
Übertragen aus de.wikipedia nach Commons.: de:Image:Zaehler.jpg;
transfer made by User:JMesserly, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5308859>



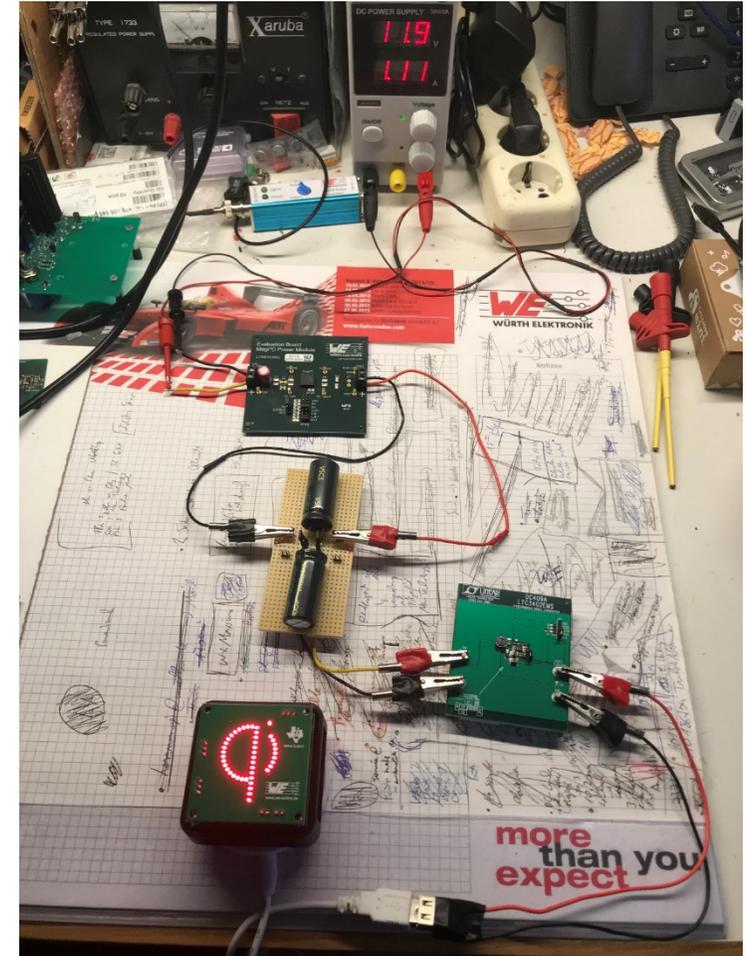
Created by Fanjianhua - Freepik.com

Verschiedenen Anforderungen und Leistungen



Superkondensator bei geringem Energiebedarf

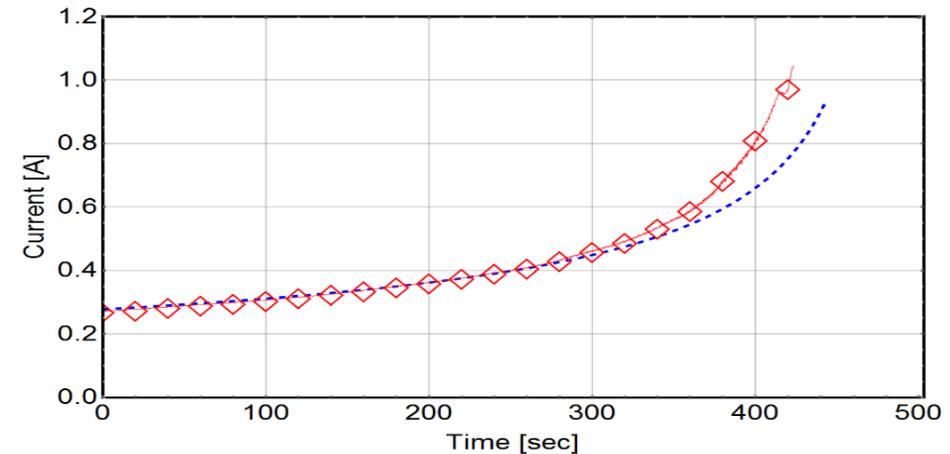
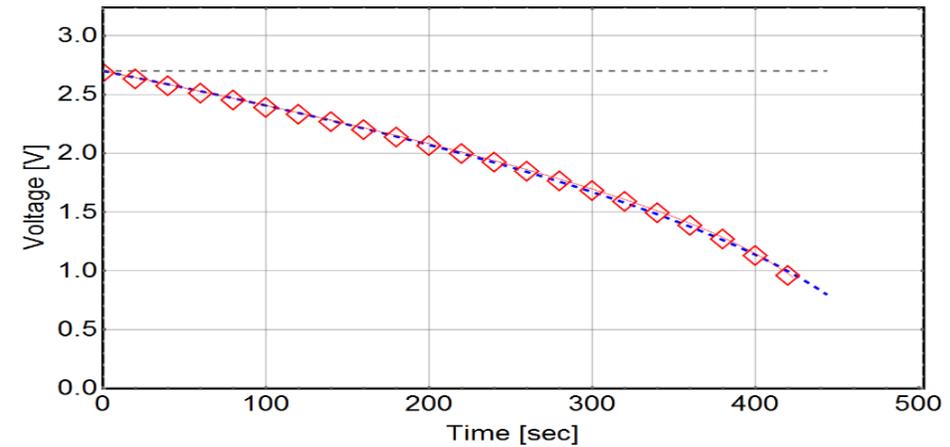
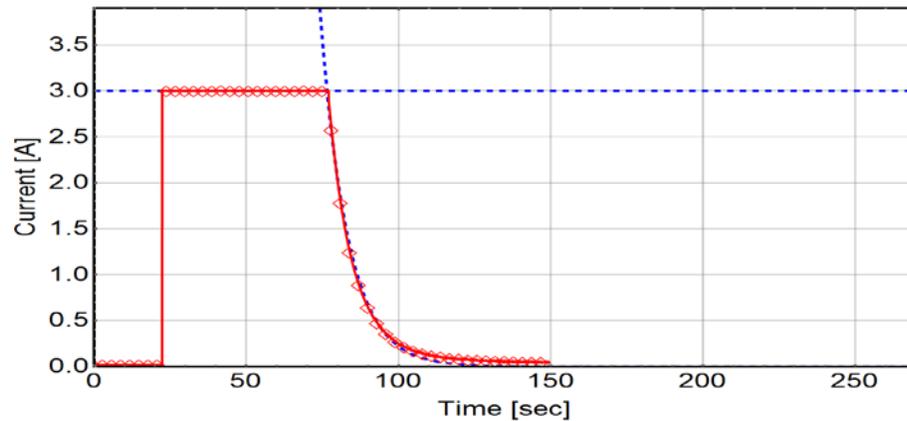
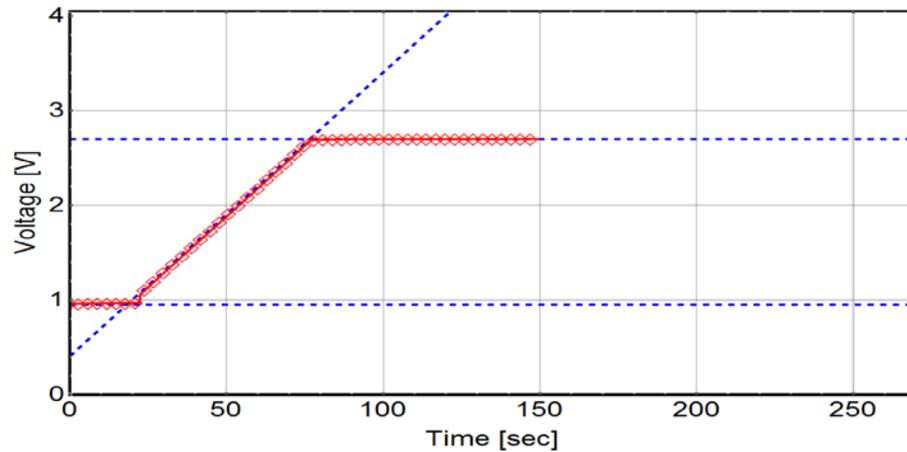
- **Eingangsspannung: 12 V**
- **Eingangsstrom: 3 A**
 - Konstantstromquelle
 - Ladeschlussspannung: 2,7V
- **Zwei 50F / 2.7V Superkondensatoren in Parallelschaltung**
- **Ausgangsspannung: 5V@1A => durch einen Boost Converter**
- **Gespeicherte Energie: 135J**
- **Ladezeit: 60sec**
- **Entladezeit bei konstanter Leistung: 400sec**
 - Abschaltspannung: 1V



Verschiedenen Anforderungen und Leistungen



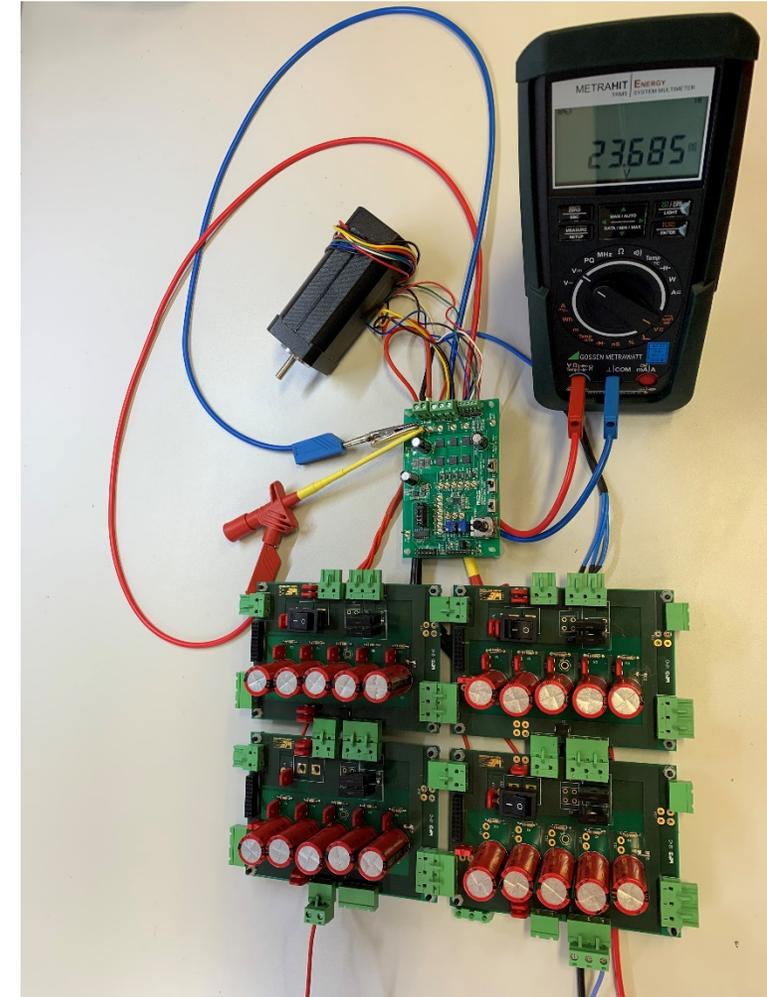
Superkondensator bei geringem Energiebedarf



Verschiedenen Anforderungen und Leistungen

Superkondensator in mittleren Leistungsklasse

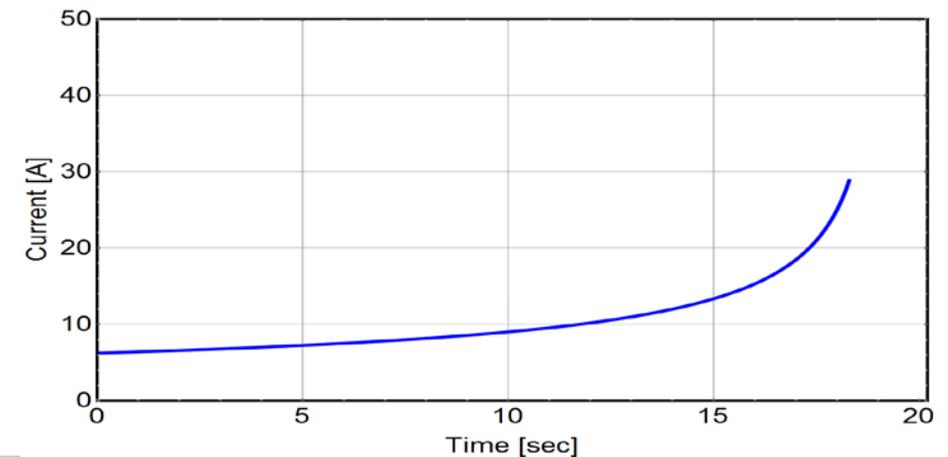
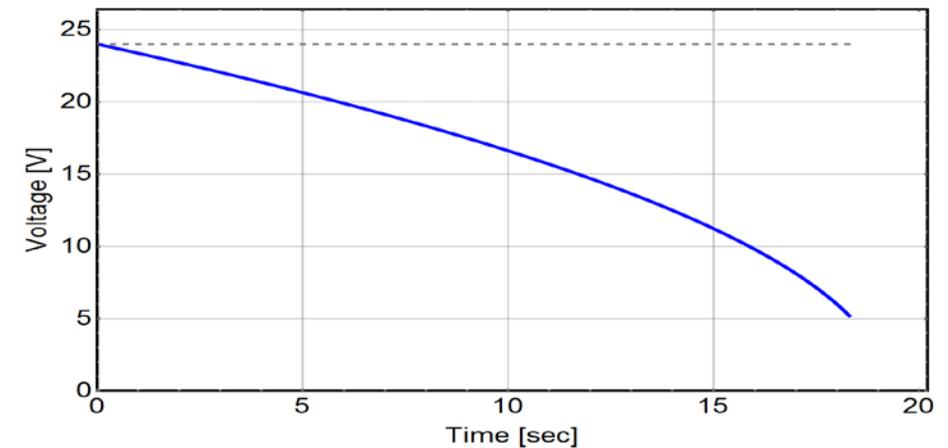
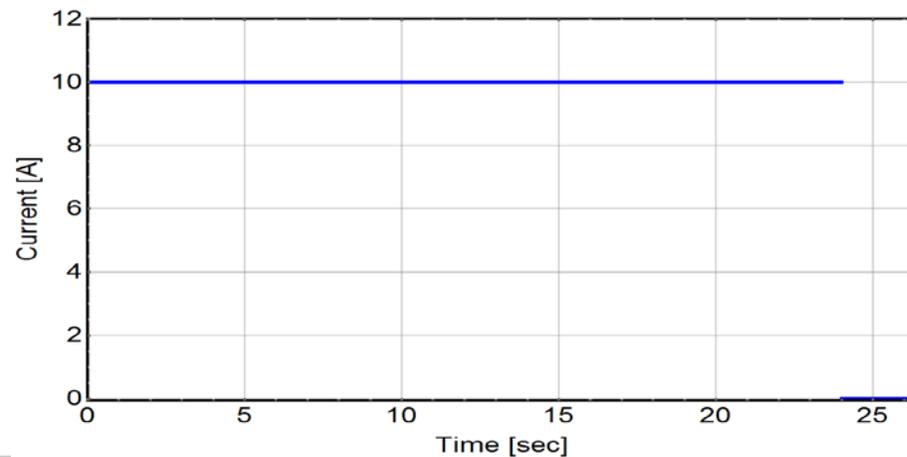
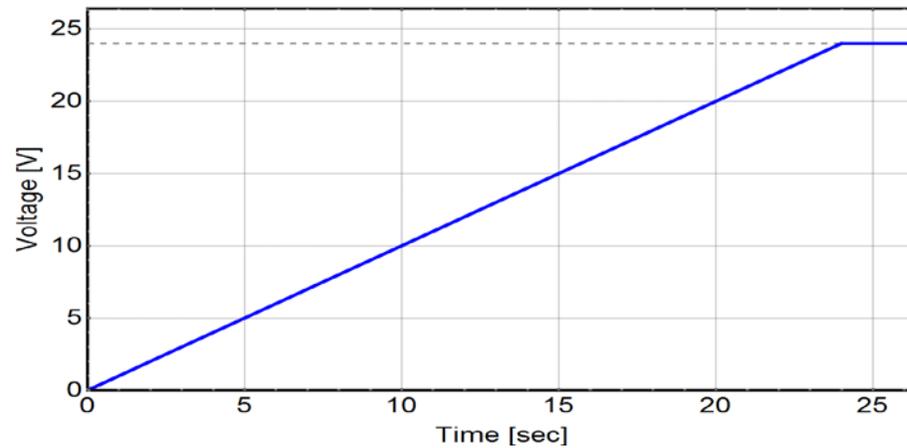
- **Eingangsspannung: 24 V**
- **Eingangsstrom: 10 A**
- **Insgesamt 20 Superkondensatoren 50 F / 2,7 V / 2,7 V**
 - 10 parallel / 10 in Serie
 - Passives Balancing
- **Die Motorsteuerung liefert 24 V bei 6 A => 150 W.**
- **Gespeicherte Energie: 2880 J**
- **Ladezeit: 25 Sek.**
- **Entladezeit bei konstanter Leistung: 18 Sekunden.**
 - Motorleistung 150 W
 - Abschaltspannung: 5 V



Verschiedenen Anforderungen und Leistungen



Superkondensator in mittleren Leistungsklasse



Verschiedenen Anforderungen und Leistungen

Superkondensator bei hohem Energiebedarf

- USV @ 1 kW
- Eingangsspannung: 230 Vac
- Ladestrom: 10 A
- Ausgang: 24 Vdc bei 40 A
- Versorgungszeit @ 1 kW für 60 sec.
- Benötigte Kapazität: 9 x 3000 F
 - Parallele / Serienkombination
 - Aktives / passives Balancing
- Gespeicherte Energie = 27 Wh
- Ladezeit bei 10 A: 800 Sek.
- Entladezeit @ 1 kW: 60 sec.
 - Spannungsabfall: 12 V



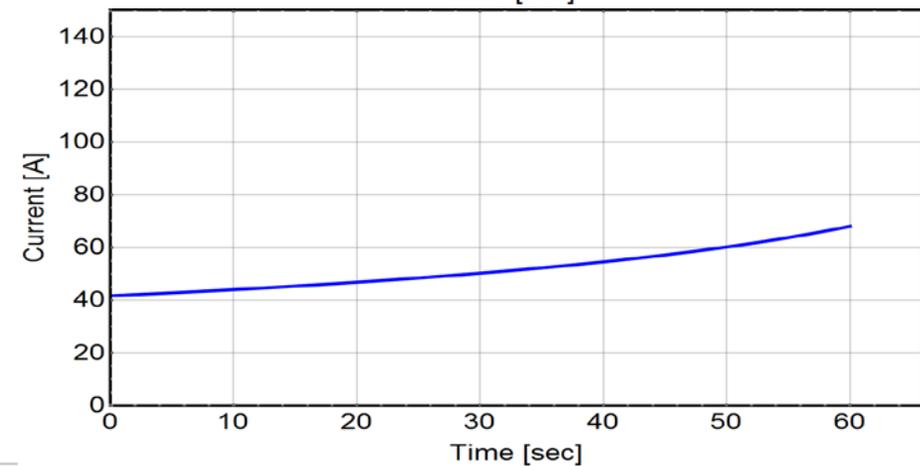
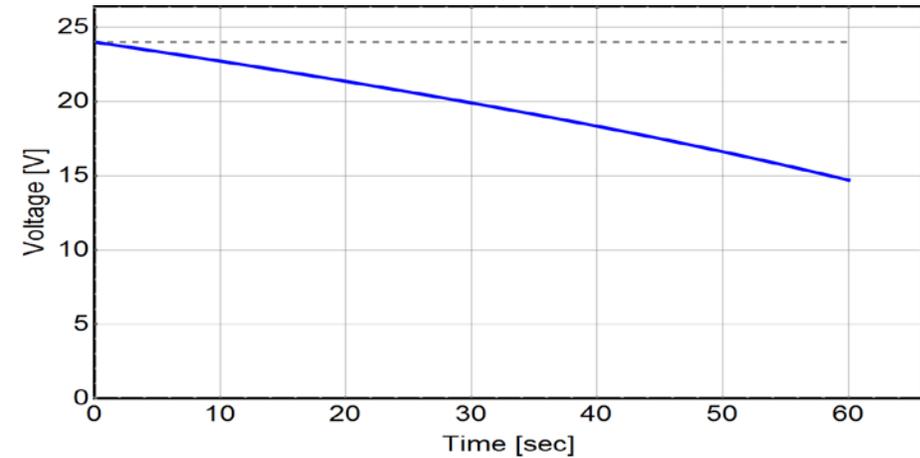
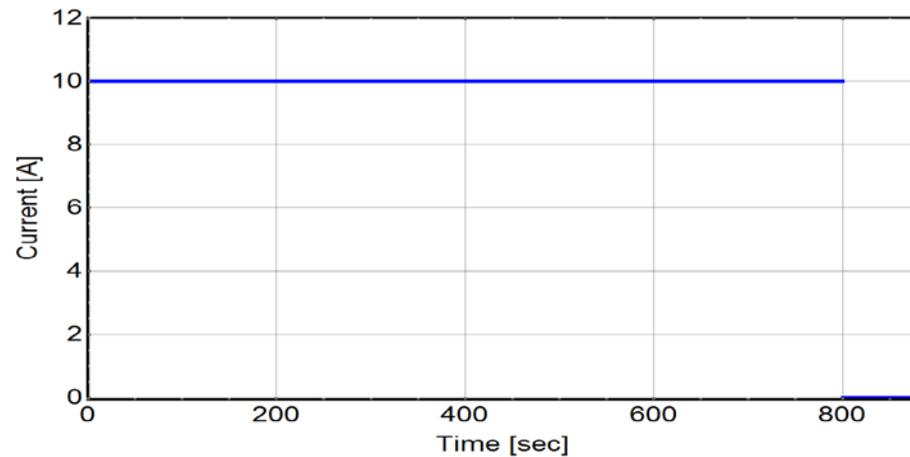
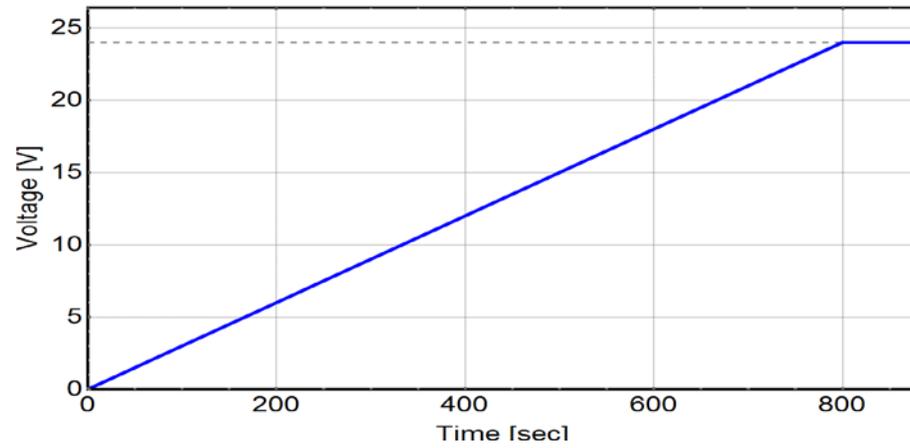
- Windkraftanlage liefert 690 V @ 150 kW
- Elektronische Neigungsänderung
 - 2 Grad pro Sekunde
- Annahme von 1 kVA für 10 min.
- Motor 230 Vac bei 1 kVA
 - Motorstrom ~4 A
- Energiebedarf = 22 Wh
- Benötigte Kapazität: 9 x 2500 F



Verschiedenen Anforderungen und Leistungen



Superkondensator in Hochleistungsanwendungen

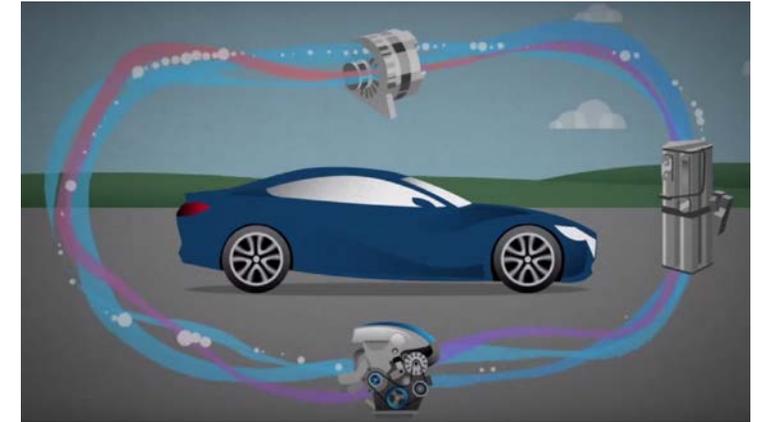


Verschiedenen Anforderungen und Leistungen



■ Mazda I-ELOOP (Intelligent Energy Loop)

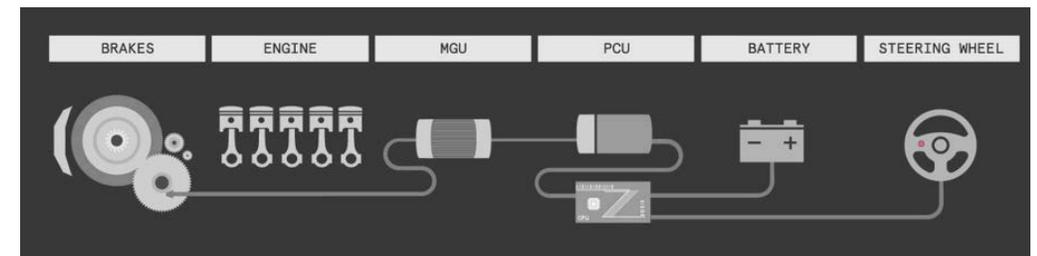
- Rekuperation beim Bremsen
- In einem Superkondensator (EDLC) gespeicherte Energie
- Generator -> Superkondensator -> DC/DC-Wandler -> DC/DC-Wandler
- 7 Sekunden bis zur vollen Ladung bei Stoppbeschleunigung aus 60km/h



I-ELOOP Mazda Video Screenshot => <https://www.youtube.com/watch?v=BJHAr4wA2fc>

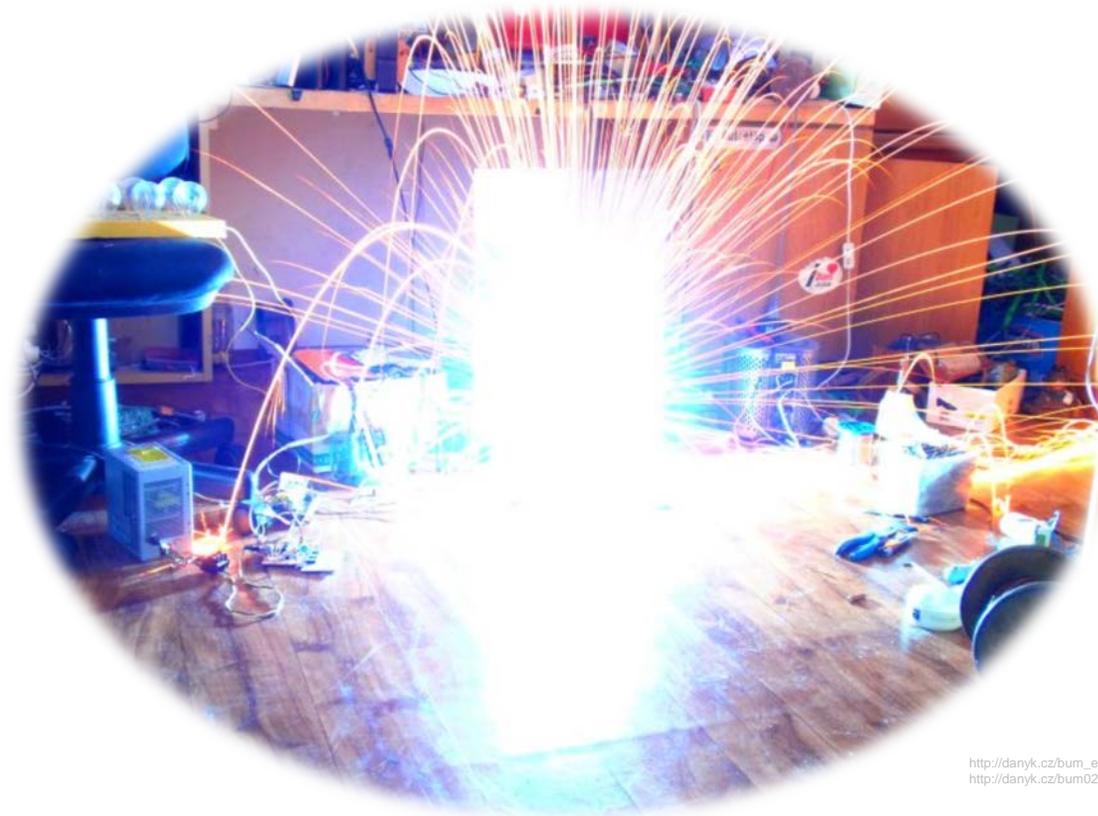
■ KERS (Kinetic Energy Recovery System)

- Rekuperation beim Bremsen
- Freischalten der Stromversorgung auf Knopfdruck
- Schwungrad oder Hochspannungsbatterie



By This image has been created during "DensityDesign Integrated Course Final Synthesis Studio" at Polytechnic University of Milan, organized by DensityDesign Research Lab in 2015. Image is released under CC-BY-SA licence. Attribution goes to "Rodolfo Riva, DensityDesign Research Lab". - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37081367>

Warum ist Symmetrierung / Balancing wichtig?



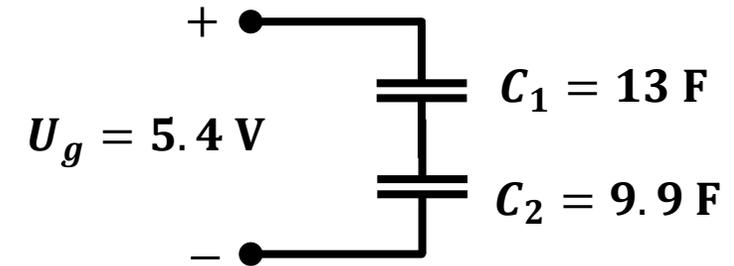
http://danyk.cz/bum_en.html
<http://danyk.cz/bum02.jpg>

Balancing



- **Zwei in Serie geschaltete Kondensatoren:**

- $U_r = 2.7 \text{ V}$
- $C_{\text{total}} = 10 \text{ F}$ (tol.: -10%, +30%)
- Geladen auf 5.4 V



- **Ungünstigster Fall: $C_2 = 9.9 (-10\%)\text{F}$, $C_1 = 13 \text{ F}$ (+30%)**
- **Folgende Gleichung sind für die Berechnungen erforderlich:**

- $U_g = U_1 + U_2$
- $U_2 = \frac{q}{C_2}$ und $U_1 = \frac{q}{C_1}$

$$\rightarrow U_1 = \frac{5.4 \text{ V}}{(0.762+1)} = 3.07 \text{ V} \text{ (Achtung, Überspannung!)}$$

$$\rightarrow U_2 = \frac{5.4 \text{ V}}{\left(\frac{1}{0.762}+1\right)} = 2.34 \text{ V}$$



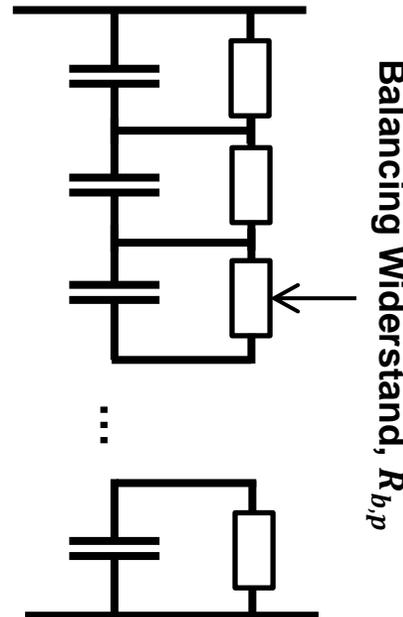
Balancing



Passives Balancing:

- Wird hauptsächlich unter DC betrieben
- Kostengünstig
- Langsamer Ausgleich
- Hohe Verluste
- Balance Widerstand:

$$R_{b,p} \approx \frac{1}{10} \times \frac{U_r}{I_{Leak}}$$
- Typische Werte $R_{b,a} \approx 1k\Omega \dots 100k\Omega$

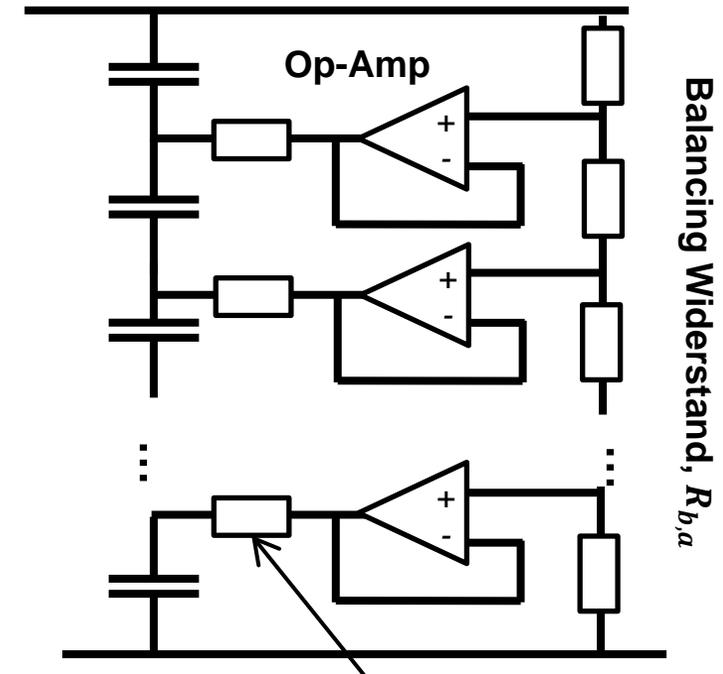


Aktives Balancing:

- Oft aufgeladen und entladen
- Hohe Kosten
- Schneller Ausgleich
- Geringe Verluste
- Balance Widerstand:

$$R_{b,a} > R_{b,p}$$
- Typische Werte

$$R_{b,a} \approx 1M\Omega \dots 10M\Omega$$



Dämpfungswiderstände
(verhindert Schwingungen, niedriger Ω)

