



# Superkondensatoren

## Die Energie aus der Helmholtz-Doppelschicht



Bilder: Maxwell Technologies/ELV/Bicker Elektronik

In unserer Reihe zur Akkumulatortechnik dürfen diese besonderen Energiespeicher nicht fehlen, zumal sie vor allem im Automotive- und Industriumfeld eine zunehmende Bedeutung erlangen. Sie weisen gegenüber klassischen Energiespeichern eine ganze Reihe von Vorteilen auf, die vor allem in der erreichbaren Leistungsdichte, der kurzen Lade-/Entladezeit sowie der enormen Zyklenzahl liegen. Deshalb wollen wir hier die Technik und den Einsatz dieser interessanten Energiespeicher näher betrachten.

### Viel Energie auf einen Schlag

Wenn die Vettels und Verstappens auf den Formel-1-Kursen dieser Welt einen kurzzeitigen Leistungszuschlag von ihren Boliden abrufen, kommt die Energie dafür nicht aus dem Tank, auch aus keiner regulären Batterie, sondern von sogenannten Superkondensatoren. Diese wurden bis 2014 im KERS (Kinetic Energy Recovery System) allein durch Rückgewinnung von Bremsenergie (in ähnlicher Form heute in den meisten Fahrzeugen als Rekuperationssystem vorhanden) über ein Generatorsystem, später zusätzlich durch ein Energierückgewinnungssystem aus dem Abgasstrom (ERS) gespeist. Benötigt der Fahrer später mehr Motorleistung, etwa für einen Überholvorgang, kann er die in den Superkondensatoren gespeicherte Energie abrufen, die zwar mit großer Leistungsdichte, aber relativ geringer Energiedichte – also nur kurz – zur Verfügung steht.

Auch in unserem technischen Alltag haben wir es vielfach mit dieser Art der Energiespeicher zu tun. So dienen sie als Dauerspeicher für den Datenerhalt von Echtzeituhren oder dem BIOS in Computern ebenso wie als Überbrückungsspeicher für Stromausfälle in Geräten.

Im Zuge des effektiven Energiehaushalts finden die o. a. Rekuperationssysteme zunehmend Eingang in die Fahrzeugtechnik, so verfügen nicht nur Pkw über solche Systeme (wobei hier noch meist in den regulären Fahrzeugakku zurückgespeist wird), sondern diese sind z. B. in Bussen, Bahnen und Spe-

zialfahrzeugen echte Antriebsspeicher. Mit entsprechend umfangreichen Anordnungen sind hier enorme Energiemengen speicher- und abrufbar.

### Die Helmholtz-(Doppel-)Schicht

Dass Kondensatoren elektrische Energie, und zwar je nach Kapazität erhebliche Mengen davon, speichern können, weiß jeder Elektroniker. Wie hoch die Energiemenge sein kann, erfährt man spätestens, wenn man versehentlich die Anschlüsse eines aufgeladenen Elektrolytkondensators berührt bzw. kurzschließt.

Der Kondensator ist ein elektrostatischer Speicher, dessen Speichervolumen (Kapazität) durch das Verhältnis der Fläche der leitfähigen Kondensatorflächen (A), deren Abstand (d) zueinander und die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  des Isolationsmaterials zwischen den Kondensatorflächen bestimmt wird. Daraus und aus der elektrischen Feldkonstante  $\epsilon_0$  (gibt das Verhältnis der elektrischen Flussdichte zur elektrischen Feldstärke im Vakuum an, deshalb auch als „Dielektrizitätskonstante des Vakuums“ bekannt) ergibt sich die Berechnungsformel für die Kapazität:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad \text{Kapazität in Farad} \quad \left[ F = \frac{As}{V} \right]$$

Die gespeicherte Energiemenge in einem Kondensator wird wie folgt berechnet:

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

Praktisch nutzbar ist jedoch allein die Energiemenge, die man errechnet, wenn man statt des theoretischen Werts  $U^2$  die Spannungsdifferenz zwischen vollem und leerem Kondensator einsetzt, also  $U^2 = U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2$ .



Was ergibt sich aus diesen Überlegungen? Um eine sehr hohe Energiemenge zu speichern, benötigen wir sehr große und sich in möglichst geringem Abstand gegenüberliegende Kondensatorflächen. Bei der „normalen“ Kondensatortechnik mit einem festen Dielektrikum und bei gepolten Kondensatoren mit einem Elektrolyten als Kathode zum Ladungsaustausch (bzw. -transport) stößt man schnell auch an mechanische Grenzen. Nicht so beim Doppelschichtkondensator (Bild 1). Dieser besteht aus zwei in einem Elektrolyt eingebetteten Elektroden. An der Grenzschicht zwischen fester Elektrode und flüssigem Elektrolyt (Phasengrenze) tritt eine Ladungstrennung mit Isolierwirkung auf, sodass hier im Gegensatz zum Kondensator mit festem Dielektrikum eine sehr geringe Schichtdicke im Nanometerbereich – man spricht hier von nur wenigen Molekülen – auftritt, da hier die erwähnte Grenzschicht die Funktion des Dielektrikums übernimmt. Lediglich ein durchlässiger Separator verhindert einen Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden-elementen. Der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz entdeckte diesen Effekt 1853 und beschrieb dessen Funktionsweise 1879 in einer Arbeit anschaulich: An „metallische[n] Electroden in einem Electrolyten“ bilden sich „electrische Doppelschichten an den Electrodenflächen aus, deren electricches Moment dem zur Zeit vorhandenen Potential-sprunge zwischen der betreffenden Electrode und der Flüssigkeit entspricht“ [1]. Nach diesem Effekt wird ein so ausgeführter Kondensator „Doppelschichtkondensator“ ((E)DLC) genannt. Umgangssprachlich wird er auch als Superkondensator, Ultra- oder Supercap bezeichnet, und hinter unzähligen Markenbezeichnungen wie etwa Goldcap verbirgt sich dieser Kondensator.

Ausschlaggebend für die Kapazität ist natürlich auch hier neben der Grenzschichtdicke von typisch 1 nm die Fläche der Elektroden. Durch geeignete Elektrodenmaterialien wie Aktivkohle erreicht man enorm große Oberflächen von bis zu 3000 m<sup>2</sup>/g! Ergänzt wird heute oft das beschriebene statische Speicherprinzip bei sogenannten Hybridkondensatoren mit dem elektrochemischen Speicherprinzip der Pseudokapazität, die nach dem Redox-Reaktionsprinzip verläuft. Hier werden zusätzlich die Elektronen zwischen verschiedenen Reaktionspartnern in Form von wechselweiser Oxidation und Reduktion ausgetauscht (faradayscher Ladungsaustausch). Ein rein nach diesem Prinzip arbeitender Kondensator wird Pseudokondensator genannt, er bildet quasi den Mittler zwischen dem Superkondensator und dem Akku. Denn hier werden die Vorteile der schnellen Lade- und Entladevorgänge mit hoher Speicherkapazität, also hoher Energiedichte, verbunden.

Das ist das ganze (nicht ganz unkomplizierte) elektrochemisch-mechanische Geheimnis des Doppelschichtkondensators.

## Energiespeicher mit fast unbegrenzter Lebensdauer

All die bisher genannten spezifischen Eigenschaften des Doppelschichtkondensators machen diesen für zahlreiche technische Anwendungen interessant. Er nimmt aufgrund des geringen Innenwiderstands gegenüber allen anderen Energiespeichersystemen quasi blitzartig seine Ladung auf, kann diese je nach Qualität der Werkstoffe auch sehr lange halten und bei Bedarf ebenso blitzartig, sprich mit hohen Strömen, abgeben. Allerdings spielt beim Kondensator – in gleicher Weise wie bei vielen Akkusystemen die Selbstentladung – dessen unvermeidlicher Leckstrom bei der Bewertung der Kapazitätsabgabe und Ladungs-Standzeit eine Rolle. Gängige Systeme sind hier mit bis zu 10 % Leckstrom behaftet, d. h. etwa, dass eine USV-Einheit statt theoretischer 2 Stunden Überbrückung lediglich 1 Stunde und 48 Minuten erreicht. Solche Werte werden von den Herstellern kalkuliert und angegeben bzw. durch eine Reservedimensionierung substituiert.

Ein nicht unerheblicher Aspekt ist auch der Einsatz von vergleichsweise umweltfreundlichen und preiswerten Materialien. Die wesentlichen Bestandteile sind Kohlenstoff, Aluminium und organische Elektrolyte – gegenüber dem seltenen und teuren Lithium oder den toxischen Materialien wie Blei oder Cadmium eine billige und umweltfreundliche

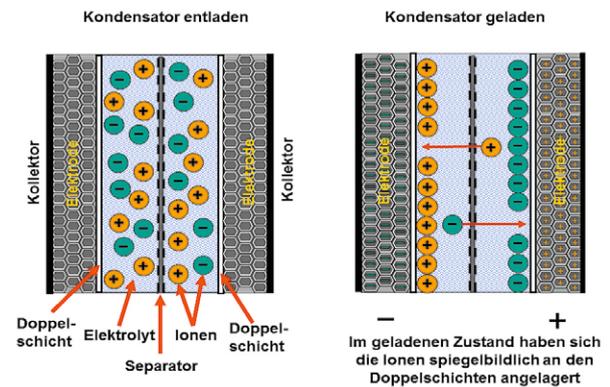


Bild 1: Der Aufbau und die Abläufe in einem Doppelschichtkondensator im entladenen und geladenen Zustand  
Grafik: Elcap – Eigenes Werk, CCO, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13247472>

Alternative. Natürlich sind die Einsatzgebiete sehr verschieden, kreuzen sich aber dennoch auf vielen Gebieten mit denen von Sekundär- und Primärelementen. So kann der Goldcap in der Sensoranwendung (Bild 2) heute ohne Probleme die Lithiumbatterie ersetzen, ebenso sind Superkondensatoren bereits vielfach als Bleiakku-Ersatz in der USV-Technik eingesetzt (Bild 3).

Der Haupteinsatzzweck von Superkondensatoren (DLCs) liegt heute neben den bereits am Anfang erwähnten Rekuperationsanwendungen in der Backup-Technik. Die weitaus meisten DLCs dienen der relativ wenig stromintensiven Überbrückung von Spannungsausfällen bzw. dem Datenerhalt (Bild 4).



Bild 2: So kennen wir den Superkondensator seit vielen Jahren: als Goldcap zur Überbrückung von Stromausfällen bzw. zum Datenerhalt.



Bild 3: Superkondensatoren findet man heute bereits in vielen Backup- bzw. USV-Anwendungen wie in dieser USV von Riello.  
Bild: Riello UPS GmbH



*Bild 4: Supercap mit hoher Kapazität für Backup- und Spitzenstrom-Anwendungen  
Bild: NESSCAP/Maxwell Technologies*

Dabei können sie auch zahlreiche Einsatzgebiete abdecken, für die bisher Batterien oder herkömmliche Akkus eingesetzt werden mussten. Hier spielen die Kondensatoren zahlreiche Vorteile etwa gegenüber Blei- oder Lithium-Akkumulatoren aus.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Lebensdauer bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Superkondensatoren weisen z. B. einen sehr weiten Betriebstemperaturbereich, der regelmäßig zwischen  $-25$  und  $+85$  °C liegt, auf. Die engeren Temperaturgrenzen der Akkusysteme haben wir ja in den vergangenen Folgen hinreichend beleuchtet. Das bedeutet auch eine deutlich erhöhte Lebensdauer. Superkondensatoren können bis eine Million Zyklen und mehr bewältigen, während andere Systeme allenfalls einigen tausend Zyklen standhalten.

*Bild 5: Superkondensator-USV-Modul für den Einsatz in DC-USV-Anlagen  
Bild: Bicker Elektronik*



Ein künftiger Einsatzbereich kann auch bei der Stromversorgung von Brennstoffzellen liegen, denn diese benötigen eine vergleichsweise wenig stromintensive Versorgung, hier ergibt sich ein umweltfreundliches Gesamtpaket, das zudem fast beliebig langlebig ist.

Aufgrund der heute erreichbaren enorm hohen Kapazitäten, die zudem von den Designern recht großzügig ausgelegt werden, findet man sie aber auch schon in leistungsintensiveren Anwendungen wie



*Bild 6: Leistungsfähiges 48-V-Traktionsmodul für den Antrieb von Fahrzeugen. Hier ist die gesamte Elektronik für das Lade-/Entlade-/Monitoring-Management bereits integriert.  
Bild: NESSCAP/Maxwell Technologies*

in der USV-Technik oder in Energiespeichern für erneuerbare Energien. Bild 5 zeigt eine DLC-Anordnung für USV-Anwendungen, die Spannungsschwankungen, Flicker, Spannungseinbrüche oder Versorgungsspannungsausfälle eliminieren soll.

Aber auch Großenergiespeicher mit Superkondensatoren fangen heute schon Spitzen ab. Hier kommen natürlich die schnellen Ladezeiten und die enorme Zyklenfestigkeit besonders zum Tragen. Gerade auf diesem Gebiet haben die Superkondensatoren eine große Zukunft vor sich, denn alle wirtschaftlichen und umweltpolitischen Vorteile sprechen für sie.

In Fahrzeugen puffern sie das Bordnetz sowohl im laufenden Betrieb als auch zur längeren Überbrückung bei Ausfällen, z. B. in der Bahntechnik zur Stabilisierung der zuginternen Stromversorgung. Aber es gibt auch bereits Angebote für komplette Traktionseinheiten für Busse, Transportmaschinen, Bergbaumaschinen usw. So können Hybridbusse mit Supercap-Einheiten an Bord (Bild 6) sich z. B. im Stadtverkehr von Haltestelle zu Haltestelle bewegen und dort blitzschnell induktiv geladen werden.

Auf der anderen Seite werden Superkondensatoren aber auch zur schnellen Abgabe von sehr hohen Leistungen eingesetzt, etwa bei Starthilfegeräten oder zur Pufferung von Stromversorgungen bei kurzen Spannungseinbrüchen, z. B. im Kfz-Bordnetz.

Die nominelle Arbeitsspannung eines Superkondensators liegt je nach technischer Ausführung bei 2,3 bis 3,0 V (meist bei 2,7 V), wobei 3 V bereits die derzeit erreichbare Spitzenspannung darstellen. Für höhere Spannungen müssen also entsprechende Reihenschaltungen gebildet werden. Die Industrie stellt dazu speziell designte Module bzw. Kondensatorpacks bereit, die gleichzeitig das gesamte Management des definierten Ladens, der Spannungsverteilung und der Schutzschaltungen enthalten. So bietet die Industrie anwenderspezifisch Zellen und Module mit bis zu einigen zehntausend Farad und in Spannungsbereichen bis zu einigen hundert Volt an.

Wie erwähnt, finden Superkondensatoren auch zunehmend ihren Einsatz in der Automobilindustrie. So wird Volvo in der ab dem Jahr 2020 angebotenen Pkw-Flotte Maxwell-Superkondensatoren für Start-Stopp-Applikationen einsetzen, um die Fahrzeugakkus während der Stopp-Phase zu unterstützen, denn in der Regel laufen ja dort alle Systeme außer dem Motor weiter. Hierfür werden spezielle Kondensatormodule eingesetzt, die erhöhten Anforderungen an die Vibrationsfestigkeit und sonstigen mechanischen Belastungen genügen (Bild 7).



*Bild 7: Mechanisch besonders robust ausgeführte DLS kommen z. B. in der Automobilindustrie zum Einsatz.  
Bild: Maxwell Technologies*

Auch in Hybridfahrzeugen werden die Kondensatoren eingesetzt, und zwar als Power-Assist zur zusätzlichen Leistungsentfaltung. Und schon heute dienen Superkondensatoren als zusätzliches Backup für die vielen Assistenz- und Elektronikfunktionen, die ja teilweise auch dann viel Leistung beanspruchen, wenn der Motor längst abgeschaltet ist. So unterstützen sie auch den Fahrzeugakku bei niedrigen Temperaturen.

Insgesamt haben diese Energiespeicher also eine große Zukunft als langlebige, robuste und leistungsfähige Speichereinheiten vor sich. **ELV**



## Weitere Infos:

[1] <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15251t/f345.image>