

ULTRACAPS – EIGENSCHAFTEN UND EINSATZGEBIETE

G. Bühler

1 FUNKTIONSPRINZIP

Anders als bei herkömmlichen Al-Elektrolytkondensatoren, welche die Polarisierung des organischen oder anorganischen nichtleitenden Dielektrikums zur Energiespeicherung nutzen, besteht der Speichermechanismus hier in einer Ladungsverschiebung an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt - der sogenannten elektrischen Doppelschicht. H. von Helmholtz erkannte bereits 1853, daß erst ab einer gewissen Spannung zwischen zwei in einen leitfähigen Elektrolyten getauchten Elektroden ein Strom fließt. Blieb die angelegte Spannung unterhalb dieses Schwellwertes, so verhielt sich die Anordnung wie ein Kondensator, indem sich positiv und negativ geladene Ionen aus dem Elektrolyten an der jeweils entgegengesetzten Elektrode anlagern. Also keine Ausrichtung im elektrischen Feld sondern ein tatsächliches Wandern der Ladungsträger.

Nun hängt die gespeicherte Energie bekanntermaßen von der Spannung, dem Elektrodenabstand sowie der zur Verfügung stehenden Belagfläche ab. Letztere kann durch den Einsatz von Aktivkohlevliesen gegenüber einem Folienkondensator extrem vergrößert werden (2000-3000 m²/g bis zu 10.000 m²/g in Labormustern). In Verbindung mit einem Phasenabstand (entspr. dem Plattenabstand bei Al-Elkos) im Nanometerbereich ergeben sich vormals unerreichbare Kapazitätswerte von einigen Farad bis zu mehreren Kilofarad. Das derzeit leistungsfähigste käufliche Muster stellt der B49300 von EPCOS dar mit einer Kapazität von 2700F bei einer Nennspannung von 2.3V entspr. 7142J gespeicherter Energie. Bezogen auf eine Masse von 0.725kg und ein Volumen von 0.6l ergeben sich 10kJ/kg (Al-Elkos typ. 36J/kg) bzw. 12kJ/l.

Durch eine spezielle Stapeltechnik, bei welcher die Kohlenstoffvliese durch einen wenige hundertstel Millimeter dicken Separator voneinander getrennt sind sowie einer guten Kontaktierung jedes Einzelkondensators zur Elektrode mittels einer aufgespritzten Metallschicht wird einerseits ein extrem niedriger Innenwiderstand realisiert (wenige mΩ), welcher maßgeblich den Lade-/Entladestrom beeinflusst, andererseits gestattet dies einen sehr kompakten und vibrationsfesten Aufbau.

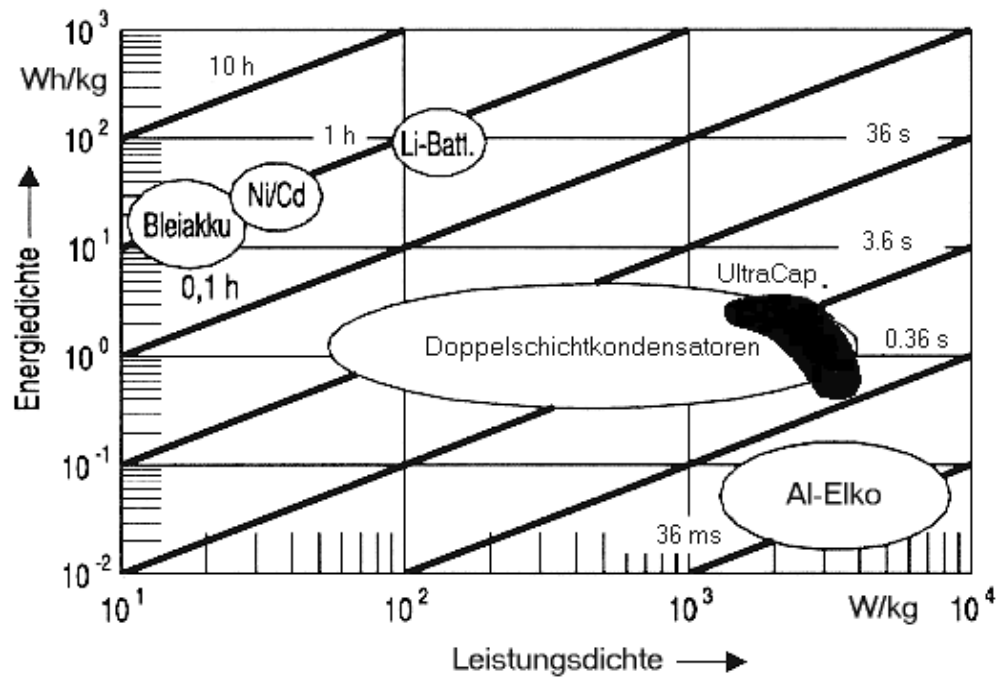


Abb. 1: Spezifische Energie-/Leistungsdichte handelsüblicher Energiespeicher

Aus dem in **Abb. 1** dargestellten Ragone-Diagramm (spez. Energiedichte gegen spez. Leistungsdichte) läßt sich erkennen, wie UltraCaps die Lücke zwischen Batterien und Al-Elektrolytkondensatoren schließen. Die diagonal verlaufenden Isochronen sind ein Maß für die mittleren Zugriffszeiten bei vollständiger Entladung. Für UltraCaps liegen diese im Bereich von 0.1s bis zu mehreren Minuten. Ein UltraCap darf auf jede beliebige Spannung innerhalb des zulässigen Betriebsbereiches aufgeladen werden und läßt sich im entladenen Zustand lagern. Der Ladezustand ist ausschließlich eine Funktion der Spannung und nicht wie bei Akkumulatoren abhängig von diversen dynamischen, chemischen und physikalischen Faktoren.

Der maximale Lade-/Entladestrom wird lediglich durch den Innenwiderstand bestimmt, so daß unbeabsichtigte Kurzschlüsse den Kondensator nicht zerstören. Die Zeitkonstanten von UltraCaps liegen typischerweise im Bereich von 1 bis 2 Sekunden und da es bis zur vollständigen Entladung einer Zeitdauer von ca. 5τ bedarf, wird dies theoretisch 5 bis 10 s dauern. Abhängig von der tatsächlichen Elektrodenstruktur vergehen allerdings mehrere Stunden, bis sämtliche Restladung abgeflossen ist. Bei hoher Lade-/Entladefrequenz ist als zweiter limitierender Faktor noch die Erwärmung zu berücksichtigen.

Nachteilig bei den derzeit verfügbaren UltraCaps ist die niedrige Zersetzungsspannung von 2.7V pro Zelle (Nennbetrieb 2.3V bei EPCOS, 2.5V bei Maxwell), was im Vergleich zu wäßrigen Elektrolyten, deren Grenze bereits bei

1.23V erreicht ist, schon eine deutliche Steigerung darstellt. Da eine derart niedrige Spannung in den meisten Anwendungen nicht ausreichen dürfte, führt dieser Umstand zwangsläufig zu der Forderung nach einer geeigneten Verschaltung mehrerer Kondensatoren untereinander in Reihe, parallel oder beides. Obwohl die Handhabung der UltraCaps im allgemeinen unproblematisch ist, sind für den sicheren bzw. schonenden Betrieb einige Besonderheiten zu berücksichtigen.

Abb. 2 zeigt das Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators mit dem Isolationswiderstand $R_{Isolation}$, dem Widerstand des Elektrolyten $R_{Elektrolyt}$, dem Kontaktwiderstand $R_{Kontakt}$ sowie den n Kondensator-Aktivkohlewiderständen mit n (hier $n=3$) Kondensatoren.

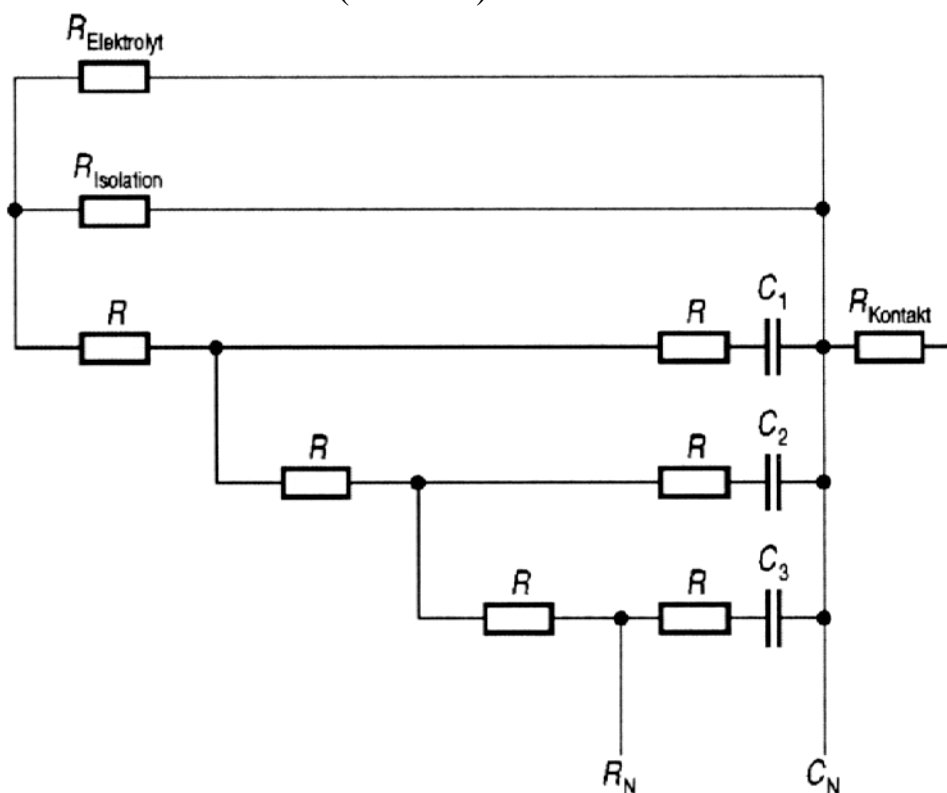


Abb. 2: Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators

Während des Ladevorganges wird nun C_1 über den Widerstand $R+R$ geladen, C_2 dagegen über $R+R+R$ usw., wobei sich die Zeitkonstanten mit wachsendem n ebenfalls verlängern. Wird der Kondensator allerdings nicht vollständig geladen oder entladen, so stellen sich die in **Abb. 3** dargestellten Spannungsverläufe ein. Markant ist der durch einen internen Ladungsausgleich verursachte Knick im Kurvenzug, welcher bei etwaigen kapazitätsbestimmenden Messungen zu berücksichtigen ist.

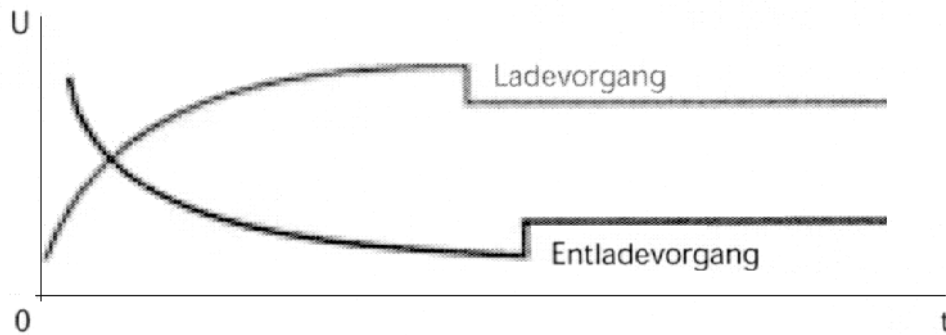


Abb. 3: Spannungsverlauf bei unvollständigem Laden/Entladen

2 REIHENSCHALTUNG

Die Spannungsaufteilung in einer Reihenschaltung von UltraCaps ist in erster Linie eine Funktion der Einzelkapazitäten. Bei länger wählender Ladung auf hohem Niveau in Backup-Applikationen führt jedoch der erfahrungsgemäß stark streuende Isolationswiderstand zu unterschiedlichen Leckströmen, welche ihrerseits die Einzelzellen unterschiedlich schnell entladen (ein hoher Leckstrom vermindert die Spannung schneller als ein niedriger). Eine Möglichkeit zur Kompensation besteht in einer Parallelschaltung eines zweckmäßigerweise kleinen externen Bypasswiderstandes. Nehmen wir beispielsweise einen Ultra-Cap mit einem mittleren Leckstrom von $10\mu\text{A} \pm 3\mu\text{A}$. Ein parallelgeschalteter 1%-Widerstand sei so bemessen, daß zusätzlich $100\mu\text{A}$ fließen. Dann betrüge der mittl. Leckstrom nun $110\mu\text{A} \pm 4\mu\text{A}$, wodurch die Streuung von vormals 30% auf 3.6% reduziert würde. Sind alle Widerstände gleich groß, so entladen sich jene Zellen mit hoher Spannung schneller als solche mit niedriger.

3 LEBENSDAUERBEGRENZENDE FAKTOREN

Stellvertretend für alle großen UltraCaps mit Kapazitäten $>8\text{F}$ ist in **Abb. 4** die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Betriebsspannung sowie der Temperatur für einen 2500F/2.5V-Typen von Maxwell Technologies dargestellt. Man erkennt den signifikanten Einfluß von Temperatur und Spannung auf die mittlere Lebenserwartung, so daß unter realistischen Bedingungen kaum mehr als 4 Jahre erreicht werden dürften.

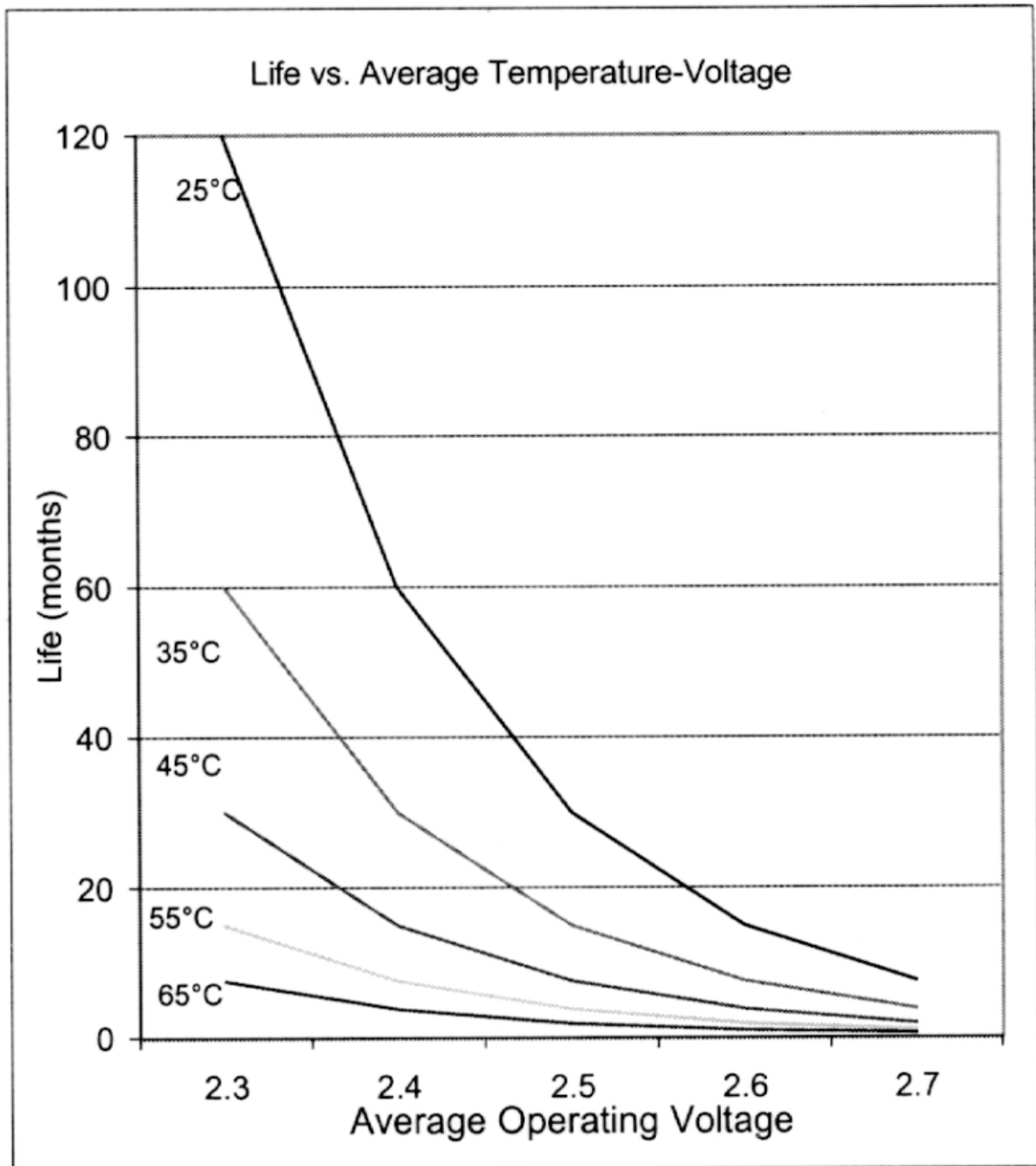


Abb. 4: Lebensdauer in Abh. von der Betriebstemperatur und der Ladespannung

Aus **Abb. 5** ist ersichtlich, daß die Temperatur nahezu keinen Einfluß auf die Kapazität hat. Ähnlich verhält es sich auch mit der Hochstromfähigkeit. Obwohl der Innenwiderstand unterhalb 0°C relativ schnell zunimmt, so beeinflusst das lediglich den Spitzenwert am Beginn einer Hochstromentladung. Da der max. zulässige Strom von in diesem Falle 400A als 15%-30% des Spitzenanfangswertes definiert ist, stellt eine Widerstandserhöhung wie im dargestellten Fall keine Einschränkung dar.

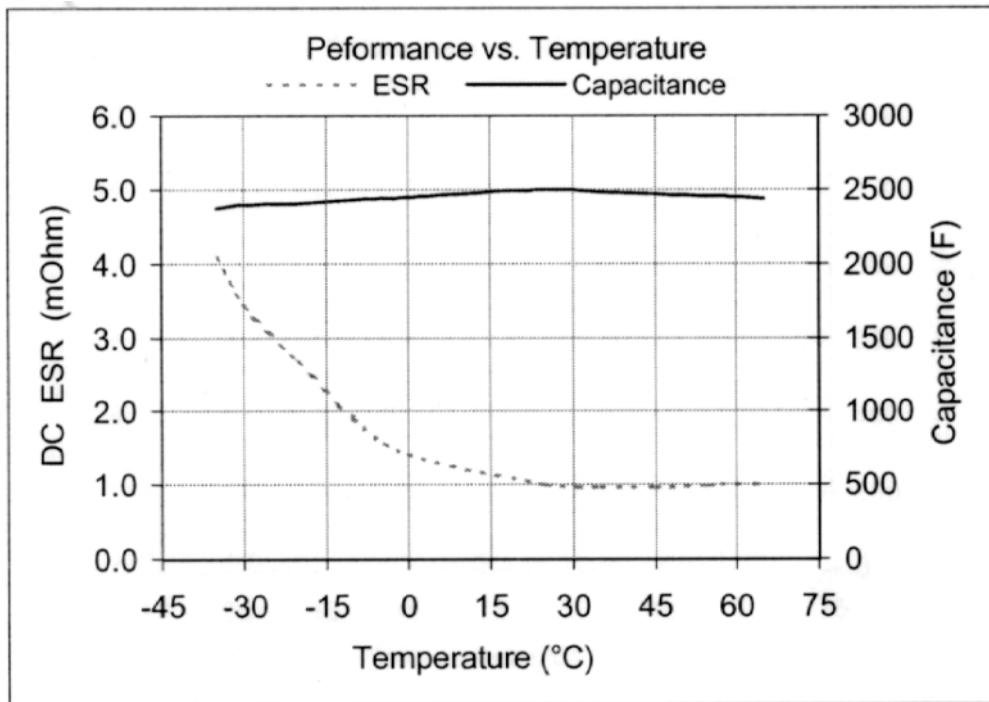


Abb. 5: Kapazität und Innenwiderstand in Abh. von der Temperatur

4 ZUSAMMENFASSUNG

UltraCaps lassen sich überall dort vorteilhaft einsetzen, wo es darauf ankommt, große Energiemengen schnell zu speichern bzw. bereitzustellen, so z.B. im Fahrzeugbereich die Speicherung von Bremsenergie, um diese in der folgenden Beschleunigungsphase wieder zur Verfügung zu stellen. Das führt insbesondere im Stadtverkehr zu signifikanten Kraftstoffeinsparungen oder in anderen Fällen, wo Akkumulatoren ggfs. kleiner ausgelegt werden können, zur Gewichtsverminderung.

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (Energie-/Leistungsdichte) ist eine Kombination mit Akkumulatoren oder Elektrolytkondensatoren in vielen Fällen sinnvoll.