

ENERGIESPEICHERSYSTEM MIT SUPERKONDENSATOREN

A. Guetif

1 EINFÜHRUNG

Der Anwendungsbereich von Energiespeichern erstreckt sich von den unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) über "Power Quality" Anwendungen im Netz (SMES-, Supercap-, Schwungmassenspeicher) bis zu Systemen mit Entladezeiten von mehreren Stunden (z. B. Batterien und Druckluftspeicher) für den Ausgleich von wetterbedingten Lieferschwankungen bei regenerativen Erzeugern. Weitere aktuelle Anwendungen sind in der Verkehrstechnik, z. B. zur energetischen Pufferung von Nahverkehrs-Bahnfahrzeugen zu finden.

In zukünftigen Netzen mit hohem Anteil an dezentralen und regenerativen Erzeugern muss die klassische Energiekette um zusätzliche Energiespeichersysteme erweitert werden (**Bild 1**). Das Teilprojekt 2 des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (FEN) befasst sich mit der Untersuchung elektrischer, elektromechanischer und chemischer Systeme zur Speicherung elektrischer Energie. Die geplanten Arbeiten verfolgen das Ziel, die verschiedenen Speichertechnologien hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Einsatzgebiete und wirtschaftlicher Merkmale zu untersuchen und zu beschreiben.

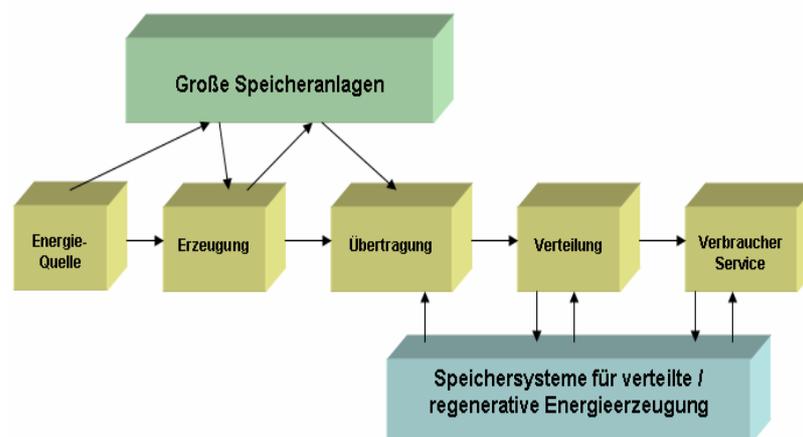


Bild 1: Erweiterte Energiekette

2 KOSTENVERGLEICH VON SPEICHERTECHNOLOGIEN

Die Electricity Storage Association (ESA) hat nach gründlicher Untersuchung die Daten von unterschiedlichen Speichern hinsichtlich der Kosten von Speichertechnologien zusammengefasst. Mit Hilfe eines Diagramms erstellte die ESA eine Übersicht der Investitionskosten pro Zyklus von Speichertechnologien. Das IMAB verfolgte nun die Aufgabe, die ESA-Ergebnisse näher zu untersuchen und zu überprüfen. Hierbei fiel beiderseits eine weitest-

gehende Übereinstimmung der Daten auf. Im Rahmen des Teilprojekts 2 wurden als nächstes zusätzlich Superkondensatoren in das Diagramm eingefügt (**Bild 2**). Im Unterschied zu den vorherigen Energiespeichern handelt es sich bei den Superkondensatoren um einen Leistungsspeicher.

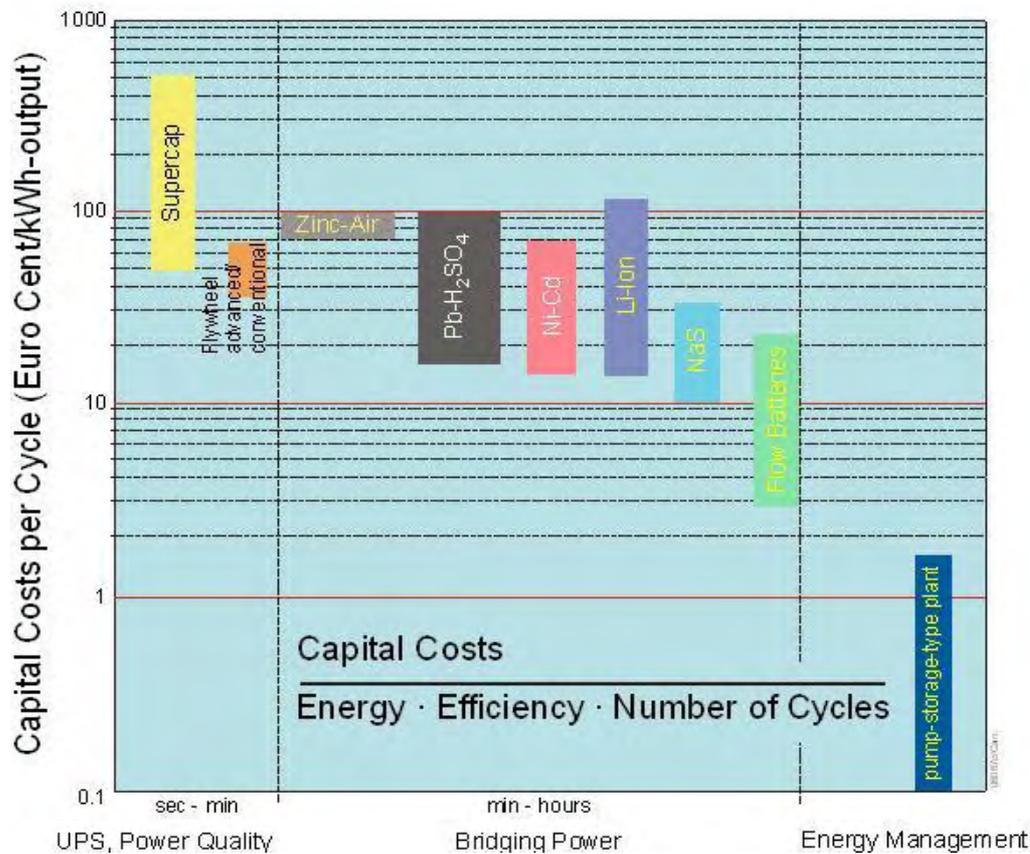


Bild 2: Investitionskosten pro Zyklus

3 SUPERKONDENSATOREN

3.1 Vor- und Nachteile von Superkondensatoren

Die Eigenschaften von Superkondensatoren (auch bekannt unter den Begriffen Ultracaps, Supercaps und Boostcaps) lassen sich entsprechend **Tabelle 1** zusammenfassen.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Superkondensatoren

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Leistungsdichte • Schnelles, einfaches Laden • Lebensdauer 10^5-10^6 Zyklen oder 10-12 Jahre • Effizienz bis über 95% • Exzellentes Tieftemperaturverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Energiedichte • Selbstentladung • Sehr teures Element • Zellenspannungsüberwachung/-symmetrierung erforderlich

3.2 Verschiedene Konzepte zur Spannungssymmetrierung von Superkondensatorzellen

Aufgrund der strukturellen Spannung des organischen Elektrolyts von ca. 2,7 Volt ist die maximale Zellenspannung von Superkondensatoren begrenzt. Damit eine höhere Spannung erreicht wird, ist eine Reihenschaltung von Superkondensatorzellen notwendig. Zur Gewährleistung einer symmetrischen Spannungsaufteilung sind die in **Bild 3** dargestellten unterschiedlichen Symmetriermaßnahmen möglich.

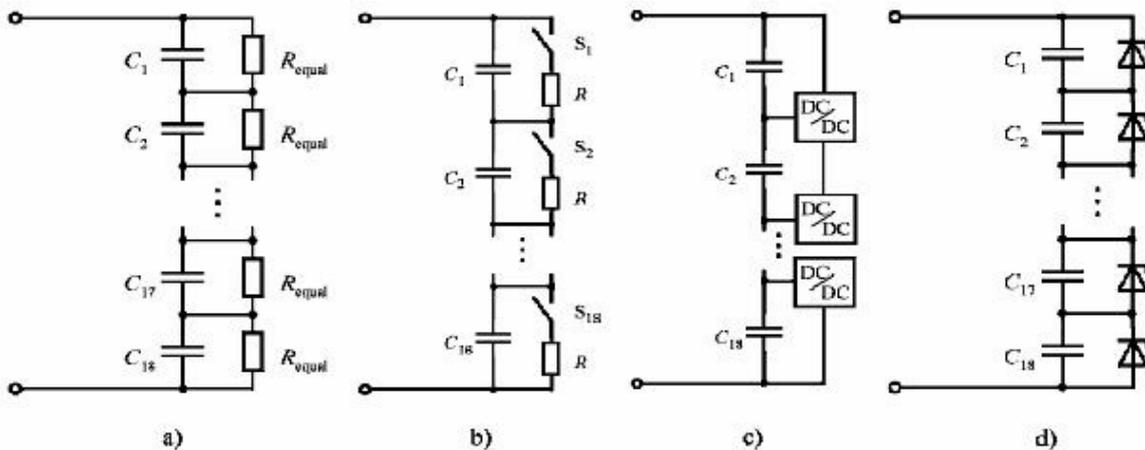


Bild 3: Spannungssymmetrierung von Superkondensatoren: (a) Widerstand, (b) Geschaltete Widerstände, (c) DC/DC Wandler, (d) Zenerdiode

3.2.1 Passive Widerstände

Der einfachste Zellenspannungsausgleich kann mit Hilfe von Widerständen realisiert werden. Ein Widerstand (R_{equal} in **Bild 3a**) wird parallel zu jeder in Serie geschalteten Zelle installiert. Da stärker geladene Zellen über den Widerstand schneller entladen werden, findet ein Spannungsausgleich statt. Damit dieser effizient ist, muss der Widerstand deutlich kleiner, z. B. Faktor 1/10, gewählt werden, als der innere Parallelwiderstand der einzelnen Zellen. Dies führt zu einer höheren effektiven Selbstentladungsrate. Wenn das Modul sich in der Ruhelage befindet, unterscheiden sich die individuellen Zellenspannungen nur minimal. Der gravierendste Nachteil dieser Lösung sind die hohen Verluste in den äußeren Widerständen. Diese Verluste reduzieren die Effizienz des Moduls, die vom Wert des äußeren Widerstandes und vom Belastungsprofil abhängt. Diese Art der Symmetrierung eignet sich vor allem für Anwendungen mit geringer Dynamik und bei denen eine größere Selbstentladung erlaubt ist.

3.2.2 Geschaltete Widerstände

Ein anderes Konzept verwendet aktiv geschaltete Widerstände parallel zu jeder Zelle. Der Schalter (S in **Bild 3b**) wird eingeschaltet, wenn die Zellenspannung höher ist als das vorher definierte Spannungsniveau, und ausgeschaltet, wenn die Spannung einen Mindestwert unterschreitet. Während der Schalter eingeschaltet ist, wirkt der Widerstand als Bypass für den Hauptstrom. Dieses Konzept verlangt, dass jede Zellenspannung gemessen wird. Dies bedeutet zusätzliche Kosten im Vergleich zu der Lösung mit passiven Widerständen.

3.2.3 DC/DC-Wandler

Ein drittes Konzept besteht aus mehreren DC/DC Wandlern, die jeweils mit zwei benachbarten Zellen verbunden sind (**Bild 3c**). Dieses Konzept wird als aktive Spannungsüberwachung bezeichnet. Diese Wandler gleichen aktiv die Zellenspannungen aus. Abgesehen von den Leistungsverlusten der Wandler, entstehen keine zusätzlichen Verluste. Verglichen mit den bereits oben genannten Konzepten, resultiert daraus eine höhere Effizienz.

Obwohl die Effizienz hoch ist, ist dieses Konzept nicht attraktiv, weil die Hardware-Implementierung und die Regelung aufwändig und sehr teuer sind.

3.2.4 Zenerdioden

Ein weiteres Konzept zur Symmetrierung ist der Einsatz von Zenerdioden parallel zu den Zellen (**Bild 3d**). Die Zellenspannung bleibt konstant, sobald die Zenerspannung erreicht wird. Die Diode wirkt wie ein Bypass für den Hauptstrom. Die gravierendsten Nachteile dieser Lösung sind die hohen Verluste in der Diode und eine starke Temperaturabhängigkeit der Zenerspannung, die für die meisten Anwendungen nicht toleriert werden können.

3.2.5 Spannungsverteilung mit Operationsverstärker (OP)

Dieses Spannungsverteilungskonzept mit OP (**Bild 4**) ist in Anwendungen mit hoher Einschaltdauer erforderlich. Im Gegensatz zu passiven Lösungen verhält sich diese Spannungsverteilung nichtlinear und funktioniert, indem die Zellenspannungen mit Hilfe von Operationsverstärkerschaltungen symmetriert werden. Vorteilhaft sind die schnelle, genaue Spannungssymmetrierung bei geringen parasitären Verlusten, die den effektivsten Gebrauch von Superkondensatoren ermöglichen. Nachteilig sind die hohen Kosten.

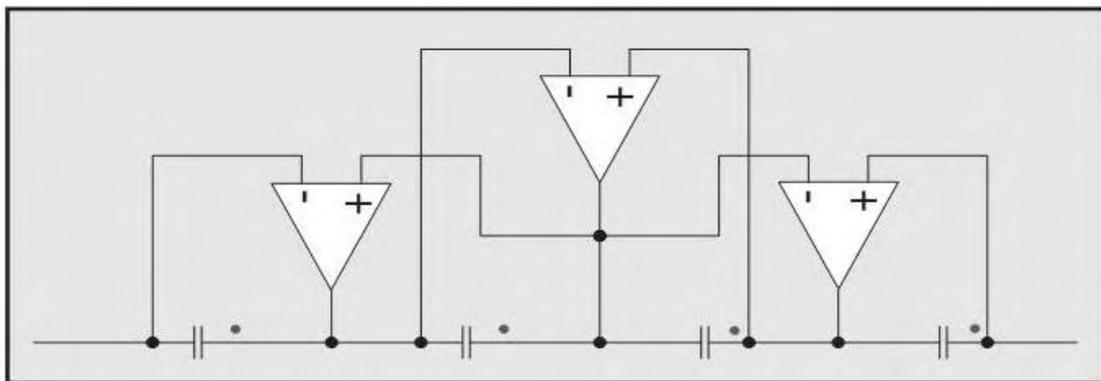


Bild 4: Spannungsverteilungskonzept mit Operationsverstärkern

3.3 Anwendung von Superkondensatoren

Die Anwendung von Superkondensatoren ist sehr vielfältig. An dieser Stelle sollen nur einige Beispiele genannt werden. Sie werden z. B. in Hybridautos als Kurzzeitspeicher eingesetzt (**Bild 5**) und ermöglichen so einen hohen Wirkungsgrad. Auch in Linienbussen werden sie als Speicher für den Antrieb (Laden bei jedem Stopp) verwendet. Darüber hinaus finden sie ebenfalls in Solarsystemen und Windkraftanlagen Anwendung.



Bild 5: 2 Superkondensatorblöcke mit 140 Einheiten in einem VW Bora liefern eine konstante Leistung von 50 kW über 15 s

3.4 Untersuchung von Speichersystemen mit Superkondensatoren

Momentan werden am IMAB Simulationsrechnungen für ein Speichersystem mit Superkondensatoren durchgeführt. Der Schaltplan für dieses Speichersystem ist in **Bild 6** dargestellt.

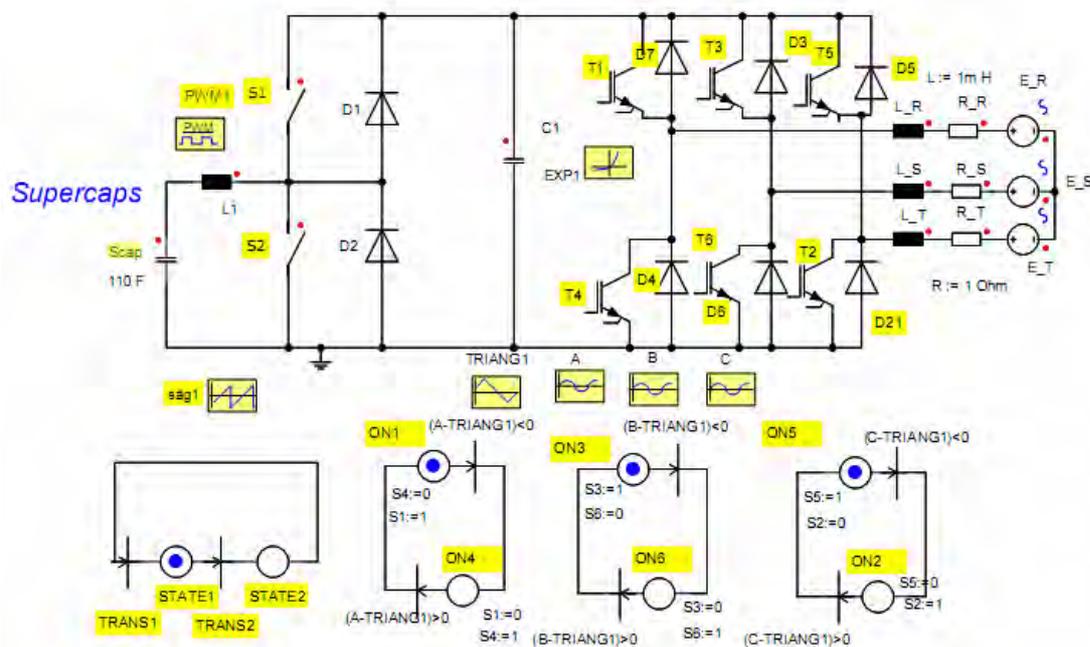


Bild 6: Energiespeichersystem mit Superkondensatoren

Parallel zur den oben genannten simulationstechnischen Untersuchungen werden die Zyklus- und Temperaturbeanspruchungen von Superkondensatoren mit Hilfe eines Prüfaufbaus untersucht. Der dazugehörige Schaltplan sowie die Simulationsergebnisse sind aus **Bild 7** ersichtlich.

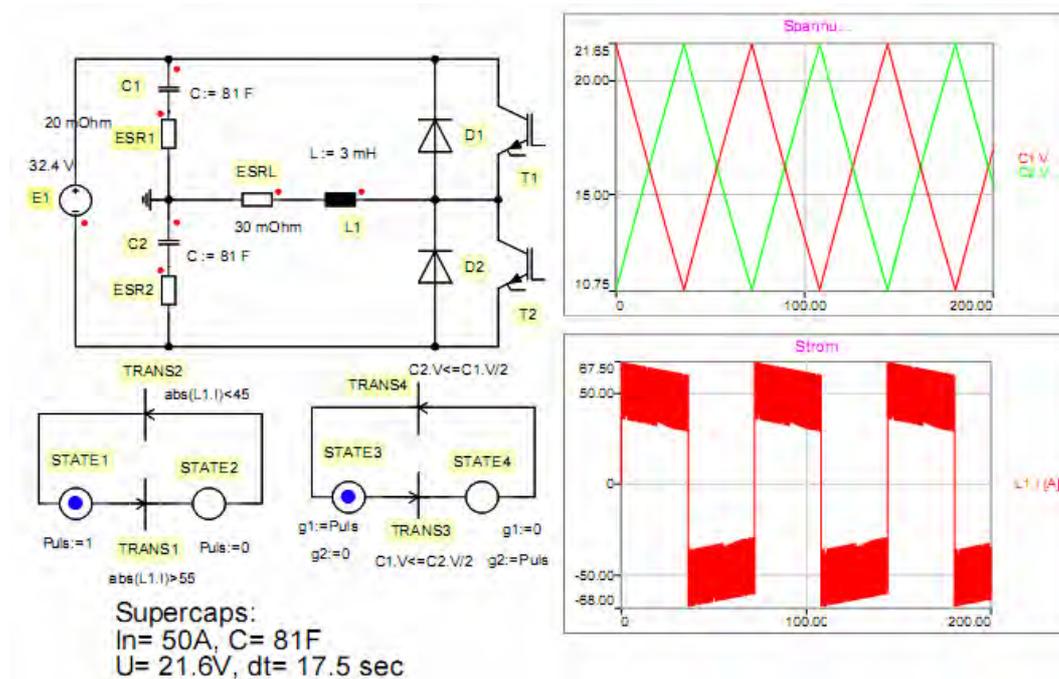


Bild 7: Simulationsmodell des Prüfaufbaus für Zyklusuntersuchungen

4 ZUSAMMENFASSUNG

Bis jetzt konnten bereits die meisten bekannten Speicher hinsichtlich ihrer elektrischen, volumetrischen und gravimetrischen Eigenschaften sowie ihrer Kosten einschließlich der peripheren Installationen (ohne Gebäude) charakterisiert werden, wobei gerade die Netzanbindung die Daten der Speicher in erheblichem Umfang beeinflusst.

Experimentelle Untersuchungen an neuartigen Superkondensatoren und hochtourigen Schwungmassenspeichern sind bereits in Arbeit. Dazu gehören auch die Forschungsarbeiten zum Testen der Zyklus- und Temperaturbeanspruchung von Superkondensatoren mittels eines Prüfaufbaus.

LITERATUR

- [1] R. Kötz: *Hybrid vehicle with fuel cell / supercapacitor drive train*, Project Description, PSI, Schweiz, 2002
- [2] R. W. De Doncker, S. Buller: *Analysis and Evaluation of Charge-Balancing Circuit on Performance, Reliability and Lifetime of Supercapacitor Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No 5, September/ Oktober 2005
- [3] B. Maher: *A Backup Power System Using Ultracapacitors*, Power Electronics Technology, September, 2004