

KLASSIFIZIERUNG VON BATTERIEN UND SUPER-KONDENSATOREN ALS ENERGIESPEICHER

A. Guetif

1 EINLEITUNG

Das elektrische Versorgungssystem weist keine wesentlichen Speicherkapazitäten wie etwa Gas- oder Wärmenetze auf. Deshalb muss die Erzeugerleistung allen Änderungen der Verbraucherleistung unmittelbar nachgeführt und zu den entsprechenden Verbrauchern übermittelt werden. Voraussetzung hierfür ist eine nicht vollständige Ausnutzung der vorhandenen Kraftwerke und des Übertragungssystems sowie eine hohe Reservevorhaltung. Durch Speicher wäre es möglich, Angebot und Nachfrage zu entkoppeln und so eine bessere Auslastung vorhandener Anlagen zu erzielen. Damit könnten Netzausbaumaßnahmen sowie Kraftwerksneubauten vermieden oder zumindest verzögert werden, und die primärenergieintensive Reservevorhaltung ließe sich reduzieren.

Abhängig von dem steigenden Einsatz von regenerativen Energiequellen in der elektrischen Energieversorgung wird sich die Problematik der Entkoppelung zwischen Erzeugung und Verbrauch weiter verschärfen. Auffällig sind die stark schwankende Erzeugung von elektrischer Energie mittels Photovoltaik- und Windanlagen, sowie die nur sehr begrenzte Regelbarkeit dieser Kraftwerke. Diese Prämisse hat zur Folge, dass der Speicherbedarf in elektrischen Netzen weiter erhöht wird.

2 SPEICHERARTEN

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der elektrischen Energiespeicherung. Allerdings ist eine direkte Speicherung von elektrischer Energie heute und in der näheren Zukunft nur mit sehr begrenzten Energiedichten in Spulen und Kondensatoren realisierbar. Alle anderen elektrischen Energiespeicher sind mit Energieumwandlungen verbunden. Somit haben sie einen begrenzten Wirkungsgrad. Die gespeicherte Energie ist dort nicht mehr elektrische Energie, sondern diese wird transformiert in eine andere Energieform wie zum Beispiel:

- potentielle Energie (Pumpspeicherkraftwerke)
- Rotationsenergie einer Masse (Schwungmassenspeicher)
- elektrochemische Energie (Batterien)
- chemische Energie (Wasserstoff)
- thermische Energie (Dampfspeicher)

Es gibt neben dem Wirkungsgrad von Speichersystemen verschiedene andere Parameter, die einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, die technische Realisierbarkeit und die

Systemauslegung haben. Solche Parameter sind beispielsweise die Energiedichte, die Leistungsdichte, die Selbstentladung, die Lebensdauer, die Kosten und der Energiebedarf für möglicherweise notwendige Nebenaggregate sowie verschiedene Umweltaspekte.

Die Leistungs- und Energiedichte haben für stationäre Anwendungen neben den Kosten den größten Einfluss. In diesem Fall sind die erzielbaren Energiedichten von der Form der gespeicherten Energie abhängig. Maßgeblich ist hier nicht so sehr die massenbezogene Energiedichte (Wh/kg), sondern die volumetrische Energiedichte (Wh/l). Eine Übersicht hierüber liefert **Bild 1**.

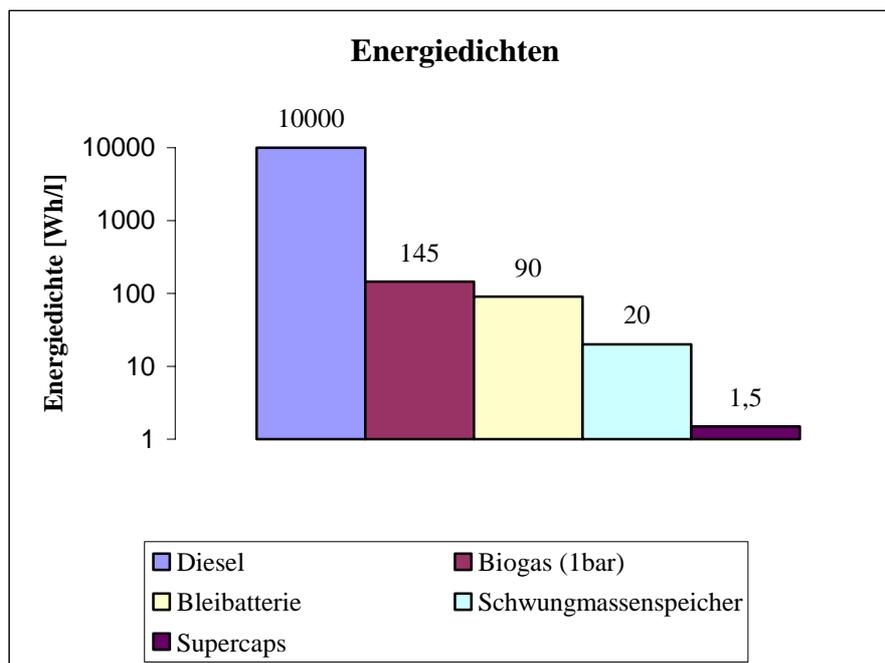


Bild 1: Energiedichten einiger Speichermedien

Die Grafik verdeutlicht, dass keiner der Energiespeicher an die Energiedichte von Diesellostoff heranreicht. Würde selbst der Wirkungsgrad eines Diesellaggregates mit $\eta \approx 0,3$ berücksichtigt, wäre die Energiedichte beispielsweise einer Bleibatterie immer noch ca. 30-mal kleiner. Verglichen mit den anderen Energiespeichern zeigt sich allerdings, dass die Energiedichte einer Bleibatterie deutlich höher ist als die der meisten anderen Energiespeicher (z. B. Schwungmassenspeicher oder Kondensatoren). Im Vergleich zu einem Pumpspeicherkraftwerk mit 300 m Höhendifferenz - nicht in der Grafik dargestellt - sogar um den Faktor 100.

Ein Resümee der Vor- und Nachteile der gängigsten Speichersysteme, die zurzeit diskutiert werden, liefert **Tabelle 1**.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Speichersysteme

Speichersysteme	Pumpspeicherkraftwerke	Elektrochemische Speicher: Blei-Säure-Akkumulator Nickel/Cadmium Nickel/Metallhydrid usw. [1]	Chemische Speicher: z. B. Wasserstoff [2]	Schwungmassenspeicher (SMS) [3]	Kondensatoren Supercaps [4]	Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) [5]
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> · technisch erprobte Lösung · lange Lebensdauer und Zyklusfestigkeit · bei geeigneten geographischen Voraussetzungen sehr kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> · sehr weite Einsatzbereiche · großtechnisch erprobt · kostengünstig · technisch jederzeit verfügbar · geringe Selbstentladung · relativ hohe Wirkungsgrade 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Energiedichten · kostengünstige Speicher · sehr geringe Selbstentladung · als Langzeitspeicher geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Leistungsdichte · mittlere bis hohe Energiedichten · hohe Zyklusfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Leistungsdichte · lange Lebensdauer und Zyklusfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Leistungsdichte · lange Lebensdauer und hohe Zyklusfestigkeit
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> · nicht überall einsetzbar (geographische Voraussetzungen) · verbraucherfern · Kosten sehr stark abhängig von den Gegebenheiten 	<ul style="list-style-type: none"> · kurze Lebensdauer, nur 500-7000 Zyklen abhängig von der Entladungstiefe 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Kosten für Wandlungstechniken · geringer Systemwirkungsgrad · aufwendige Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> · große Einheiten mit hohen Energiedichten (>20 Wh/l) nicht kommerziell verfügbar · mittlere bis hohe Selbstentladung · Sicherheit · genaue Kosten nur schwer zu quantifizieren 	<ul style="list-style-type: none"> · niedrige Energiedichte (1,5 Wh/l) · große Einheiten noch nicht erprobt · große Kondensatoren nicht verfügbar · genaue Kosten nur schwer zu quantifizieren 	<ul style="list-style-type: none"> · geringe Energiedichte · großtechnisch nicht verfügbar · genaue Kosten schwer zu quantifizieren · hohe Selbstentladung

3 BATTERIENARTEN

Es gibt viele Arten von Batterien, die derzeit verwendet oder z. B. für den Gebrauch in Hybridfahrzeugen konzipiert werden. Die folgende Auflistung beschreibt die wesentlichen Eigenschaften, die in **Tabelle 2** noch detailliert verglichen werden:

Alkali: Ist die heute allgemein empfehlenswerte Universalbatterie (wird auch mit "Alkaline" und "Alkali-Mangan" bezeichnet). Sie ist zwar nahe verwandt mit der Kohle-Zink Batterie, aber in allen Beziehungen (außer dem Preis) wesentlich besser. Auch "normale" und "wieder-aufladbare" Alkalibatterien unterscheiden sich nur in Details.

Kohle-Zink: Die älteste Batterietechnologie, 1866 vom Telegraphieingenieur Georges Lionel Leclanche erfunden (wird deshalb auch als "Leclanche – Element" bezeichnet). Es ist die billigste Batterie mit der leider geringsten Leistungsfähigkeit. Sie sollte nur noch verwendet werden, wenn der Kaufpreis entscheidend ist.

Zink-Luft: Wird vorwiegend in Hörgeräten eingesetzt, weist zur Zeit die größte Energiedichte auf. In Gebrauch (Dichtung entfernt) leider hohe Selbstentladung.

Lithium: Häufiger Einsatz in Uhren und Kameras, sehr lange Betriebsdauer (bis über 10 Jahre) bei sehr kleinen Strömen. Höhere Zellenspannung im Bereich von 3 V. Seit wenigen Jahren bietet ein einziger Hersteller (Energizer) eine Lithiumbatterie in der Standardgröße AA mit 1,5 V Spannung an. Dies ist eine fast ideale Batterie (leicht, lange Lebensdauer und Lagerfähigkeit, hoch belastbar), aber teuer (etwa das doppelte einer Alkali-Markenbatterie), kaum bekannt und wenig verbreitet. Achtung: Lithiumbatterien keinesfalls öffnen oder aufladen!

Nickel-Metallhydrid NiMH: Allgemein empfehlenswert, direkter Ersatz für NiCd mit höherer Energiedichte, jedoch teurer, empfindlicher und noch etwas raschere Selbstentladung. Für sehr hohe Ströme weniger geeignet. Enthält keine zur Zeit als problematisch eingestuften Stoffe, muss aber trotzdem vorschriftsmäßig entsorgt werden (teilweise recyclebar).

Nickel-Cadmium NiCd: Preiswert, robust, richtig angewendet sehr lange Lebensdauer, sehr hohe Ströme. Wegen des hochproblematischen Cadmiums (ein Umweltgift erster Ordnung) nicht mehr für allgemeine Anwendungen geeignet. Der Einsatz ist nur sinnvoll, wenn die hohe Lebensdauer tatsächlich ausgenützt und die richtige Entsorgung strengstens eingehalten wird. Haupteinsatz heute noch in Akku-Elektrowerkzeugen.

Lithium-Ionen Li-Ion: Sehr hohe Energiedichte, leicht, Standard bei höheren Ansprüchen. Nur in speziellen Akkupacks für Hightech-Geräte (Notebook, Digitalkamera, Camcorder ...) verfügbar. Höhere Zellenspannung um 3 bis 4 V.

Lithium-Polymer: Wie Li-Ion aber ohne flüssigen Elektrolyten, deshalb flexible Bauformen ohne starres Gehäuse (flach) möglich. Wird rasch zunehmend in kleinen Hightech-Geräten (Handy) eingesetzt.

Blei-Säure: In jedem Auto vorhanden, äußerst robust, aber für die Anwendung in Geräten unhandlich.

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Batterienarten, in Anlehnung an [6]

Typ	Energiedichte [Wh/kg]	Leistungsdichte [W/kg]	Lebensdauer (Lade-Entladezyklen)	Temperatur [°C]	Selbstentladung [%/Monat]	Reife	Gegenwärtige Kosten [\$/kWh]	Zukünftige Kosten [\$/kWh]	Haupthersteller	Einsatzprodukt	Entwicklungsziel
Blei-Säure	25 bis 35	75 bis 130	200 bis 400	-18 bis +70	2 bis 3	Produktion	100 bis 125	75	Trojan, Hawker, Exide, Interstate	CARTA bus, Solectria E10 (sealed)	
Blei-Gel	35 bis 42	240 bis 412	500 bis 800			Produktion			Delphi, Horizon, Electro-source	Audi Duo, GMEV1 (VLRA), Solectria Force	55 Wh/kg, 450 W/kg, 2000 Ld*
NiMH	50 bis 80	150 bis 250	600 bis 1500			Prototyp	525 bis 540	115 bis 300	Panasonic, Ovonic, SAFT	Toyota RAV4-EV, Toyota Prius, Chrysler Epic minivan, Honda EV, Chevy S-10	120 Wh/kg, 2200 Ld*
NiCd	35 bis 57	50 bis 200	1000 bis 2000	-40 bis +60	10 bis 20	reif	300 bis 600	110	SAFT	WWU Viking 23	2200 Ld*
Li-Ion	100 bis 150	300	400 bis 1200			Labor			SONY, SAFT	Nissan Altra EV	1000 Wh/kg
Zink-Bromid	56 bis 70	100	500				300				
Li-Polymer	56 bis 70	100 bis 315	400 bis 600	+60 bis +100		Labor		100			
NaNiCl	90	100		+270 bis +350	400	Prototyp			AEG Anglo		
Zink-Luft	110 bis 200	100	240 bis 450			Prototyp	300	100	Liquid Fuel Ltd		

* Ld = Lade-Entladezyklen

4 KONDENSATOREN

4.1 Eigenschaften

Supercaps, auch Ultracaps, Boostcaps oder Powercaps genannt, sind elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (DSK), bei denen die Energie im Feld der elektrochemischen Doppelschicht gespeichert wird. DSK zeichnen sich durch eine im Vergleich zu Batterien hohe Leistungsdichte und durch extrem große Zyklenstabilität aus. Mehr als 500.000 Lade-/Entladezyklen mit voller Entladungstiefe werden für DSK spezifiziert. Die Energiedichte der Doppelschichtkondensatoren ist allerdings deutlich geringer als die der Batterien. DSK sind somit typische Leistungskomponenten für die kurzzeitige Energiezwischenlagerung. **Bild 2** zeigt die typischen Energie- und Leistungsbereiche verschiedener elektrochemischer Speicher und Wandler und von konventionellen Kondensatoren.

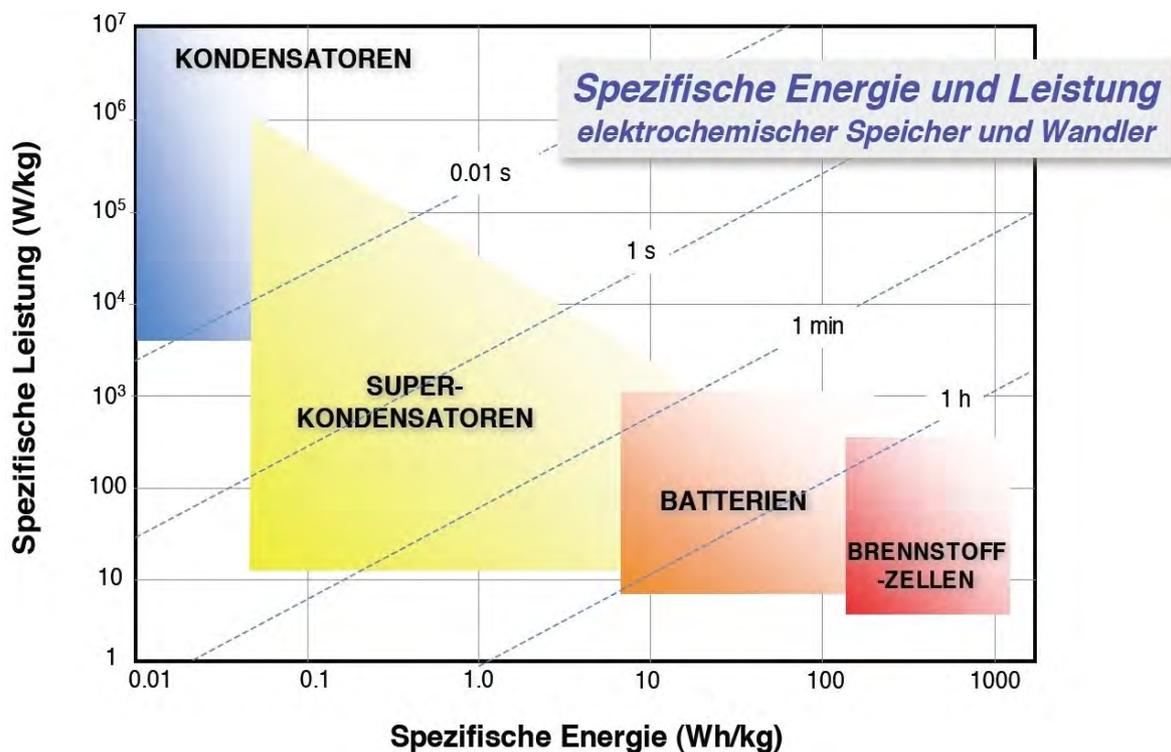


Bild 2: Spezifische Leistung als Funktion der spezifischen Energie verschiedener elektrochemischer Speicher und Wandler

Super-Kondensatoren eignen sich als vergleichsweise schnelle Energiespeicher mit Zugriffszeiten im Sekundenbereich. Sie schließen damit die Lücke zwischen Batterien und Elektrolytkondensatoren. Die Kombination von Batterien und Ultracaps hängt jedoch wesentlich von der Spannungs- und von der Temperaturbeanspruchung ab, sie wird mit 100.000 Zyklen angegeben. Die Kombination von Batterien und Ultracaps könnte einen aus energetischer Sicht sinnvollen Lösungsansatz zur direkten Speicherung elektrischer Energie bilden. Dieser Ansatz würde die Vorteile der hohen Energiedichte von Batterien und der

hohen Leistungsdichte der Ultracaps vereinen. Die Anpassung beider Technologien hinsichtlich unterschiedlicher Entladekennlinien an den Anwendungsfall ist durch den Einsatz leistungselektronischer Stellglieder möglich.

Ein besonderes Problem von Super-Kondensatoren bildet die niedrige Zellenspannung. Hohe Spannungen von einigen 100 V erfordern die Reihenschaltung vieler Einzelzellen und damit verbunden einen erhöhten Leistungselektronikaufwand zur Symmetrierung der Spannungsbeanspruchung. Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Erhöhung der Zellenspannung, die Erhöhung der Lebensdauer (Zykluszahl) sowie die Reduzierung der Kosten.

Burke [7] hat verschiedene Kondensatoren untersucht und deren maximale Energie und Leistung zusammengefasst. Aus **Tabelle 3** ist ersichtlich, dass die bei einem Wirkungsgrad von 95 % zur Verfügung stehende spezifische Leistung deutlich vom Maximalwert abweicht. Die maximale spezifische Energie aktueller DSK beträgt 5,6 Wh/kg mit einer maximalen spezifischen Leistung von > 10 kW/kg. Das typische Gewicht großer DSK liegt bei ca. 0,3 g/F. Die RC-Zeitkonstante ist ca. 1 sec.

Tabelle 3: Eigenschaften fortschrittlicher Doppelschichtkondensatoren (DSK) mit Kohleelektroden und organischem Elektrolyten [7]

Typ	U (V)	C (F)	R (mΩ)	RC (sec)	Wh/kg**	W/kg (max.)	W/kg (95 %)	Gew. (g)	Vol. (cm ³)	Kosten
Skeleton* Techn. R4	3	47	5,2	0,24	10,0	> 80000	9735	5	3,8	15 €/kW
Maxwell	3	2700	0,6	1,6	4,2	4688	527	800	623	
Ness	3	2500	0,3	0,75	5,2	11539	1302	650	534	
Panasonic	3	1200	1,0	1,2	4,2	6618	744	340	245	
Montena	3	1800	1,0	1,8	5,6	5625	632	400	300	
EPCOS	3	2700	1,0	1,7	4,1	4630	512	725	590	

* unverpackter Prototyp, ** Energiedichte nach $E = 1/2 CU^2$ mit $U = 3 V$

Im Gegensatz zu Batterien ist für die DSK eine sehr hohe Zyklenstabilität charakterisierend. Mehr als 500.000 Zyklen mit tiefer Entladung und hohen Strömen können problemlos erzielt werden. Die Elektrodenmaterialien werden nicht durch chemische Prozesse wie Oxidation und Reduktion oder Interkalation strapaziert, weil die Ladungsspeicherung durch die Umladung der Ionen in der Doppelschicht erfolgt.

Ein wichtiger Aspekt beim Einsatz von DSK ist die relativ kleine Nennspannung der Einzelzellen. Bei industriellen Anwendungen werden Spannungen bis zu einigen 100 V verlangt, so dass viele DSK in Serie geschaltet werden müssen, ohne dass die Nennspannung an den einzelnen Zellen überschritten wird. DSK vertragen kurzzeitige Überspannungen von ca. 10 %; bei längerer Überspannung altert der DSK allerdings deutlich. Die Ursache einer ungleichen Spannungsverteilung auf die einzelnen Zellen sind unterschiedliche Innenwiderstände und/oder unterschiedliche Kapazitäten der Einzelzellen.

Zur Vermeidung von Überspannungen können elektronische Schaltungen eingesetzt werden, die von einfachen Ausgleichswiderständen bis zu komplexen aktiven Schaltkreisen reichen.

4.2 Kosten und Markt

Um das Marktpotential für große Doppelschichtkondensatoren (~2500 F) abschätzen zu können, ist die Annahme eines Preises für den DSK notwendig. Dabei wird ein Preis für einen solchen DSK in Höhe von ca. 15 €/kW angestrebt. Beide Werte sind äquivalent, wenn man berücksichtigt, dass ein großer DSK mit ~2500 F eine typische Leistungsdichte von ca. 4 kW/kg besitzt sowie ungefähr 500 g wiegt. Momentan kann dieser Preis noch nicht realisiert werden, weil die entsprechenden Stückzahlen noch nicht erreicht werden. Die Senkung der Materialkosten stellt außerdem eine weitere Voraussetzung dar. Damit die genannten Preise erzielt werden können, ist die Reduzierung des Preises der Aktivkohle auf ca. 15 US\$/kg notwendig. Die aktuellen Kosten liegen 2 bis 3-mal höher. Hierbei sind für die Elektrode Kosten von 20 US\$/m² anzustreben. Auch der heutige Preis des Elektrolyten von ca. 50 US\$ pro Liter ist zu halbieren.

4.3 Märkte und Anwendungen (Ultracaps)

DSK [8] sind, wie in Abschnitt 4.1 bereits näher erläutert, Leistungskomponenten. In der Regel werden diese zusammen mit einer Energiekomponente, wie Batterie oder Brennstoffzelle, eingesetzt.

Hierbei deckt der Kondensator in diesen elektrochemischen Hybridsystemen Leistungsspitzen ab. Im Gegensatz dazu hat die Energiekomponente die Aufgabe, Nennleistungsanforderungen für längere Zeiten abzudecken. **Bild 3** veranschaulicht diese Aufteilung der Leistung.

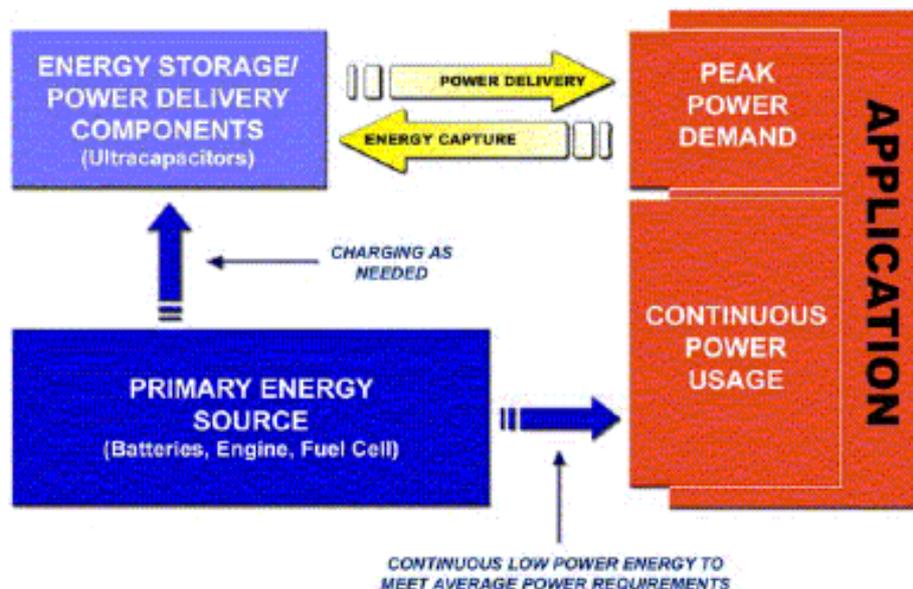


Bild 3: Skizze der Leistungsaufteilung zwischen dem Energieelement und dem Leistungselement [9]

In Kombination mit einer Batterie hat dies beispielsweise zur Folge, dass die Lebensdauer der Batterie stark zunimmt oder dass die Batterie verkleinert werden kann, falls die Spitzenleistung dimensionsbestimmend war. Ob die Verwendung der zusätzlichen Leistungskomponente lohnenswert ist, hängt stets von der Optimierung hinsichtlich Kosten, Gewicht, Volumen, Kundenanforderungen sowie anderen Randbedingungen ab. In jedem Fall sind die hohe Zyklenstabilität, der hohe Lade-/Entladewirkungsgrad und der kleine Innenwiderstand, d.h. die hohe Leistungsdichte, die wichtigsten Merkmale des DSK.

Die folgende Tabelle zeigt die vorhandenen Marktdomänen und Anwendungen für Super-Kondensatoren auf.

Tabelle 4: Marktdomänen und Anwendungen für Super-Kondensatoren

Marktdomänen	Anwendungen
Automotive	Hybride Antriebe, Bordnetzstabilisierung, Verteilte Versorgung Fuel-Cells / 42V Power Steering Pack (Burst Power)
Elektrische Züge (Electric Rail Pack)	Wiedergewinnung von Bremsenergie sowie Anfängliche Beschleunigung Spannungsstabilisierung
Busse, Lastwagen	(150 kW Packs) Wiedergewinnung von Bremsenergie sowie anfängliche Beschleunigung
Luft- und Raumfahrt	Elektrische Aktuatoren
Pitch Systems (Rotorblattverstellung)	Notfallsystem für Windgeneratoren-Rotorblattverstellung
Robotertechnik	Spitzenleistung und Energiepuffer
Telekommunikation	Energiepuffer
Materialhandling	Spitzenleistung für Gabelstapler und Kräne
Aufzüge	Spitzenleistung und Notfallleistung
Systeme, die eine ununterbrochene Stromversorgung (UPS) benötigen	Energiepuffer und Sicherungsenergie
AMR (Automated Meter Reading)	Energieversorgung
Consumer electronics	Energieversorgung, Kurzzeit-/Spitzen-Leistung und Energiepuffer

5 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Studie war eine umfangreiche Literaturrecherche zu den unterschiedlichen Speichertechnologien, insbesondere Batterien und Super-Kondensatoren, um Energiespeichersysteme klassifizieren zu können.

In diesem Rahmen wurden die spezifischen Merkmale hinsichtlich Einsatz, Technologie, Entwicklungsstand, Kosten und Wirtschaftlichkeit ermittelt.

Die technischen und physikalischen Eigenschaften hinsichtlich spezifischer Energie, Leistung, Güte/Verluste und Dynamik sind in zwei Klassifizierungstabellen dargestellt.

Der nächste Schritt wird eine Aktualisierung der Klassifizierungsmatrix sowie eine Studie über die Spannungsüberwachung der einzelnen Zellen sowohl von Super-Kondensatoren als auch von Batterien sein.

LITERATUR

- [1] Interessengemeinschaft für Großbatterien in elektrischen Netzen (IBN): *Batterie-Energiespeicher in der Elektrizitätsversorgung*, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen, 1996
- [2] B. Willer, O. Führer, R. Knorr, S. Rieke, C. Schmitz, M. Wollny: *Entwicklung und Erprobung von alkalischen Brennstoffzellen-Aggregaten kleiner Leistung*, ISET, Kassel, 1992
- [3] H. J. Bornemann et al.: *Technisch-wirtschaftliche Realisierbarkeit von neuartigen Schwungmassenspeicher-Systemen (SMSS) in elektrischen Netzen*, VDI-Bericht 1321, 1997
- [4] R. Knorr, B. Willer: *Neue Kondensatoren für die Energiespeicherung*, VDI-Bericht 1169, 1994
- [5] T. Fleischer, K.-P. Jüngst, V. Brandl, W. Maurer, E. Nieke: *Technikfolgenabschätzung zur Energiespeicherung in Supraleitenden Spulen (SMES) - Vorläufige Ergebnisse*, VDI-Bericht 1168, 1994
- [6] Thermoanalytics Inc. 2006: www.thermoanalytics.com, abgerufen am 17.07.2006
- [7] A. Burke, M. Miller, F. Chevallier: *Experimental studies of cells and modules of advanced ultracapacitors*, 11th international seminar on double-layer capacitors and similar energy storage devices, Deerfield beach, Florida, Dec. 3-5, 2001
- [8] R. Kötz, Ph. Dietrich, M. Hahn, F. Büchi: *Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen*, VDI-Bericht 1874, 2005
- [9] A. Schneuwly: *Designing auto power systems with ultracapacitors*, Maxwell Technologies SA, Embedded Systems Conference, Silicon Valley, 2006