

Anhang 4: **Dezember 2003**

# Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Verteilnetzen

## Grundlagen der Speicher

ausgearbeitet durch

Philipp Lüchinger  
Bernere Fachhochschule HTI Biel  
Quellgasse 21  
2501 Biel

mitfinanziert durch

Bundesamt für Berufsbildung und Technologie, KTI; KTI P-Nr: 5840.2;  
ABB Schweiz AG; Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL;  
AEK Energie AG; Elektrizitätswerk Davos AG; ewz Verteilnetz

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.**

**Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:**

[www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Hochleistungsbatterien .....</b>	<b>2</b>
2.1. Blei-Säure - Batterie .....	2
2.2. Nickel-Cadmium - Batterie .....	3
2.3. Natrium-Schwefel - Batterie .....	4
2.4. Super Caps .....	4
<b>3. Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Schwungmassenspeicher .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Vergleich der verschiedenen Energiespeicher .....</b>	<b>8</b>
<b>6. Quellen .....</b>	<b>8</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund ihrer spezifischen Entladecharakteristiken bzw. Innenwiderstände ist ein ausschliesslicher Einsatz von Batterien zur Kompensation von Spannungsschwankungen nicht sinnvoll. Zusammen mit einer geeigneten Netzanbindung ergeben sich jedoch Möglichkeiten für multifunktionale Einsätze derartiger Gesamtsysteme in unterschiedlichen Zeitbereichen.

Die spezifischen Eigenschaften zu den unterschiedlichen Arten von Speicher, wie Batterien, Super Caps, supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) und Schwungmassenspeicher sowie deren Vergleich untereinander ist detailliert im vorliegenden Bericht zu den Grundlagen der Speicher beschrieben.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass insbesondere aufgrund von wirtschaftlichen Betrachtungen Blei-Säure-Batterien auch in Zukunft den stationären Batterieeinsatz in der Energieversorgung dominieren werden. Mit der Weiterentwicklung von supraleitenden magnetischen Energiespeichern oder durch Schwungmassenspeicher könnten in Zukunft Alternativen zu den Batterien entstehen. Vor allem in punkto Lebensdauer und Wirkungsgrad sind die neuen Technologien den herkömmlichen überlegen. Die Super Caps werden vor allem in mobilen Anwendungen Fuss fassen, wegen ihrer sehr guten spezifischen Leistungsdichte. Die speicherbare Energie ist aber vergleichsweise gering, d.h. 5 bis 10 mal kleiner als bei Blei-Batterien.

Für eine Energiespeicherung im Bereich Stunden oder länger wären auch Systeme mit einer Brennstoffzelle, einem Elektrolyseur sowie einem Wasserstoffspeicher vorstellbar. Allerdings sind die Kosten für derartige Systeme heute noch schlecht abschätzbar. Da der elektrische Systemwirkungsgrad kaum über 50% liegen wird, sind derartige Anwendung eher in Verbindung mit einer Abwärmenutzung sinnvoll.

# 1. EINLEITUNG

Aufgrund ihrer spezifischen Entladecharakteristiken bzw. Innenwiderstände ist ein ausschliesslicher Einsatz von Batterien zur Kompensation von Spannungsschwankungen nicht sinnvoll. Zusammen mit einer geeigneten Netzanbindung ergeben sich jedoch Möglichkeiten für multifunktionale Einsätze derartiger Gesamtsysteme in unterschiedlichen Zeitbereichen. Im folgenden werden die Eigenschaften von verschiedenen Speichern erläutert.

## 2. HOCHLEISTUNGSBATTERIEN

### 2.1. BLEI-SÄURE - BATTERIE

Die Blei-Säure-Batterie (Pb-Batterie) dominiert heutzutage den Bereich stationäre Batterieanwendungen im Rahmen der elektrischen Energieversorgung. Es müssen zwei grundsätzlich verschiedene Anwendungen unterschieden werden: Zum einen sind dies Lastmanagement Systeme, die auf eine grosse Zyklenlebensdauer ausgelegt sind und zum anderen der USV-Bereich, wo zuverlässige Systeme benötigt werden.

Die Zellenspannung einer Blei-Batterie beträgt 2V. Geladen wird ein Blei-Akku mit konstanter Spannung, die die sogenannte "Gasungsspannung" (die Spannung bei der Gasbläschen an den Elektroden entstehen) von 2.4V/Zelle nicht überschreiten sollte. Bei Erreichen dieser Schwelle wird der Ladevorgang beendet. Die Schnellladung einer Blei-Batterie ist nicht so einfach, da unter normalen Bedingungen auf der einen Seite der Ladestrom durch den Innenwiderstand der Batterie selber begrenzt wird und auf der anderen Seite die Gasungsspannung von 2.4V/Zelle nicht überschritten werden darf. Der maximal mögliche Ladestrom ergibt sich damit aus diesen Gegebenheiten. Charakteristisch für Blei-Batterien ist auch, dass während des Ladevorgangs mit einer Konstantspannungsquelle zuerst ein relativ geringer Strom fliesst, der im Laufe der Zeit immer mehr ansteigt. Kritisch ist die Temperatur der Blei-Batterie während des Ladens, da die Gasungsspannung je nach Temperatur stark schwankt. Beim Entladen sollte darauf geachtet werden, dass keine Tiefentladung vorkommt (kleiner 1,75 V/Zelle), da sonst die Lebensdauer stark verkürzt wird. Weiter sollten sie auch nicht längere Zeit ungeladen lagern, da das bei der Entladung entstandene Bleisulfat (Sulfatierung) kristallisiert und die Batterie austrocknet.

Vorteile	Nachteile
sehr gutes Preis-Leistungsverhältnis	sehr geringe Energiedichte
ausgereifte, robuste Technik	hohes Gewicht
einfache Ladetechnik	schwermetallhaltig
hochstromfähig	Lebensdauer
recyclingfähig	

Tabelle 1: Eigenschaften Bleibatterie

Für die Blei-Säure-Batterie ist in Abbildung 1 die prinzipielle Funktionsweise der elektrochemischen Energiespeicherung dargestellt.

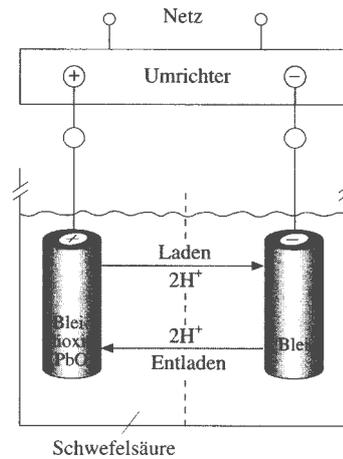


Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise der elektrochemischen Energiespeicherung der Blei-Säure-Batterie

## 2.2. NICKEL-CADMIUM - BATTERIE

Für den Bereich kürzerer Entladungszeiten und längerer Lebensdauer eignen sich insbesondere Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd-Batterie). Probleme gibt es insbesondere bei der Umweltverträglichkeit und den Kosten derartiger Systeme. Im Vergleich zur Blei-Säure-Batterie wird die höhere Zuverlässigkeit der einzelnen Zelle durch die grössere Zahl benötigter Zellen kompensiert.

Beim NiCd Akkumulator besteht der Elektrolyt aus einer wässrigen Lösung von Kaliumhydroxid (KOH), auch Kalilauge genannt. Er hat eine Ruhespannung von ca. 1.25V. Im Gegensatz zum Blei-Akku nimmt beim NiCd Akku der Elektrolyt nicht an der chemischen Umsetzung teil und hat ausschließlich die Aufgabe, den Ionenstrom zwischen den Elektroden zu leiten. Es kann auch keine Elektrodensubstanz in den Elektrolyten abwandern, wie es z.B. bei Blei-Akkus der Fall ist. Da der NiCd-Akku keine Änderungen im physikalischen Sinne erfährt, und sich auch seine Dichte nicht ändert, ist die Spannung während der Entladung relativ konstant, und seine Lebensdauer entsprechend hoch. NiCd-Akkus sind etwas leichter und die Baugröße ist in der Regel etwas kleiner als vergleichbare Blei-Akkus.

Wird ein NiCd-Akku mehrfach vor dem Wiederaufladen nicht vollkommen entladen, so kann es zu einem "Gedächtniseffekt" oder auch "Memory Effekt" kommen. Dieser Effekt kann durch mehrmaliges vollständiges Entladen und Laden des Akkus wieder behoben werden.

Vorteile	Nachteile
gutes Preis-Leistungsverhältnis	geringe Energiedichte
ausgereifte, robuste Technik	möglicher Memory-Effekt
hohe Zyklenzahl	schwermetallhaltig
Hochstrom-Entladefähig	
Ultraschnell-Ladefähig	
breites Kapazitätsspektrum	
recyclingfähig	

Tabelle 2: Eigenschaften NiCd Batterie

## 2.3. NATRIUM-SCHWEFEL - BATTERIE

Die Natrium-Schwefel-Batterie (NaS-Batterie) ist zunächst für mobile Anwendungen entwickelt worden und hat im Vergleich zur Blei-Säure-Batterie den Vorteil, dass die Masse und die äusseren Abmasse geringer sind. Der chemische Prozess innerhalb der Batterie findet ohne Abgabe von Verlustwärme statt, somit beträgt der theoretische Ladewirkungsgrad 100%. Die Prozesstemperatur liegt bei 340°C. Da die interne Erwärmung für grosse Entladeströme unakzeptabel gross ist, ergibt sich derzeit eine äusserst geringe Leistungsdichte für Kurzzeitspeicherung. Aufgrund der sehr hohen Kosten für die Realisierung von Natrium-Schwefel-Batterien werden diese Systeme im stationären Bereich in unmittelbarer Zukunft keine Bedeutung erlangen.

## 2.4. SUPER CAPS

Bei Super Caps handelt es sich um Kondensatoren mit sehr grossen Kapazitäten. Infolge der kompakten Bauart liegen die einzelnen Kondensatorlagen sehr nahe beieinander. Aus diesem Grund verfügen solche Kapazitäten über eine sehr kleine Spannungsfestigkeit (einige Volt meistens jedoch 2,5V). Sie sind hervorragend geeignet um Spitzenströme zu liefern, weisen im Vergleich zu den Batterien einen besseren Wirkungsgrad auf und sind sehr wartungsarm. Die speicherbare Energie ist jedoch im Vergleich zu Blei-Batterien 5-10 mal kleiner.

Vorteile	Nachteile
sehr hohe Leistungsdichte	sehr teuer
einfache Ladetechnik	geringe Energiedichte
sehr hohe Spitzenströme	hohes Gewicht
kurze Ladezeiten	kleine Kapazität im Vergleich zu Batterien
hohe Lebensdauer	grosse Abmessungen
hoher Wirkungsgrad	

Tabelle 3: Eigenschaften Super Caps

## 3. SUPRALEITENDE MAGNETISCHE ENERGIE-SPEICHER (SMES)

Da eine Batterie aufgrund ihrer Bemessung und ihres Innenwiderstands für schnelle Leitungspulse oftmals nicht optimal ist, bietet sich für Anwendungen, bei denen hohe Leitungen für kurze Zeiten erforderlich sind, ein supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES) an. In einem SMES wird die Energie im Magnetfeld einer supraleitenden Spule gespeichert. Metallische Supraleiter erfordern Temperaturen von 4 K, während keramische Supraleiter bis zu 77 K benötigen, um den supraleitenden Zustand ( $R=0$ ) und damit die eigentliche Speichereigenschaft des Systems zu gewährleisten. Gekühlt wird mit flüssigem Helium (4K) bzw. mit gasförmigem Helium oder flüssigem Stickstoff (4 K bis 77 K). Die Supraleitung hängt ausserdem vom externen magnetischen Feld und vom aktuellen Strom im Leiter ab. Auch hierfür gibt es sogenannte kritische Werte, die nicht überschritten werden dürfen, damit der supraleitende Zustand nicht verlassen wird.

Da keramische Supraleiter zwar einerseits interessante Werte bezüglich der kritischen Temperatur aufweisen, andererseits aber in diesem Temperaturbereich nur sehr geringe kritische Ströme realisierbar sind, lassen sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen zur Zeit nur metallische Supraleiter darstellen. Den grundsätzlichen Aufbau eines solchen SMES zeigt Abbildung 2.

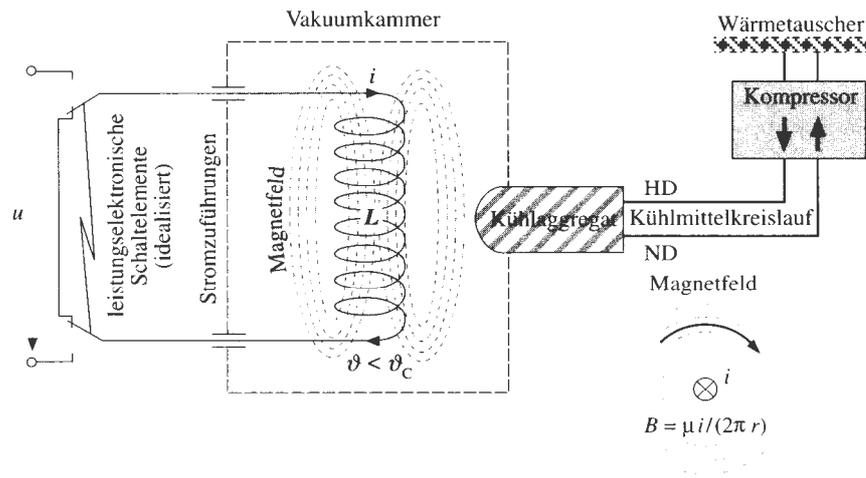


Abbildung 2: Grundsätzlicher Aufbau eines SMES

In Abbildung 3 ist das Bindeglied zwischen einem SMES und einem Netzstromumrichter dargestellt.

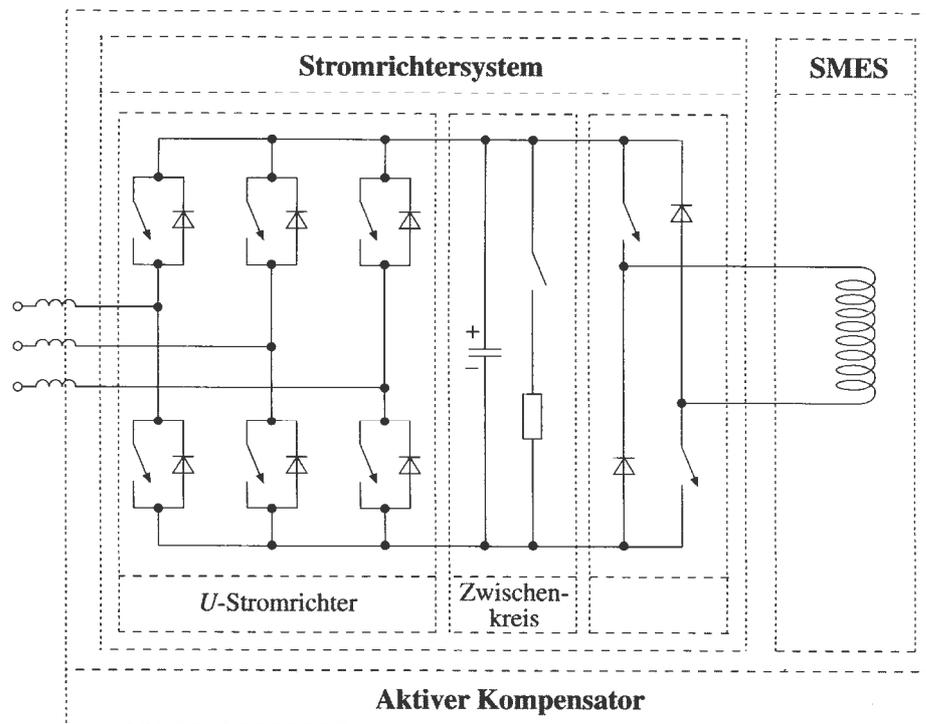


Abbildung 3: Umrichter als Bindeglied zwischen Netz und SMES

## 4. SCHWUNGMASSENSPEICHER

In einem Schwungmassenspeicher wird Energie in Form von kinetischer Energie in einer rotierenden Schwungmasse gespeichert.

Im Betrieb wird die Schwungmasse von einer elektrischen Maschine angetrieben, die über eine Wechselrichtersteuerung mit variabler Frequenz gesteuert wird. Dabei wird elektrische Energie in kinetische Energie (Rotationsenergie) umgewandelt, in der Schwungmasse gespeichert und bei Bedarf wieder in elektrische Energie zurückgewandelt.

Um grosse Energien zu speichern, muss entweder eine hohe Drehzahl oder ein entsprechendes Trägheitsmoment aufgebracht werden. Über eine Motor-Generator-Einheit wird diese Energie in elektrischen Strom umgewandelt und dem Verbraucher zugeführt. So wird heute zwischen niedrigtourigen Speichern mit Drehzahlen von etwa 3'000 U/min einerseits und hochtourigen Speichern mit Drehzahlen bis zu 20'000 U/min andererseits unterschieden. Die hochtourigen Systeme stellen sich aufgrund der geringeren Anforderungen an die Trägheitsmomente vergleichsweise kompakter dar. Jedoch sind gerade die drehzahlabhängigen Reibungsverluste hochtouriger Systeme eine grosse Herausforderung an die Entwicklung. Mit Einführen von magnetischen Lagern kann die Leistungsfähigkeit von Schwungmassenspeichern dabei erheblich gesteigert werden. Da in einem Magnetlager (auch Einsatz supraleitender Magnete) keine Berührung zwischen sich bewegenden Teilen besteht, wird ein Grossteil der mit konventionellen Lagern (Kugel- und Rollenlager, Gleitlager und Gaslager) verbunde-

nen entwicklungs-technischen und betriebstechnischen Probleme vermieden. Darüber hinaus sind im Bereich hochtouriger Systeme jedoch noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich, so dass zur Zeit auf dem Markt zu wirtschaftlich attraktiven Konditionen nur niedrigtourige Systeme zur Verfügung stehen.

Die Vorteile von modernen Schwungmassenspeichern gegenüber konventionellen Akkumulatoren sind eine mindestens um den Faktor 1000 längere Lebensdauer, geringe Verluste beim Langzeitspeichern, höhere Abgabeleistung beim Kurzzeitspeichern und eine sehr gute Umweltverträglichkeit. Somit eignet sich der Schwungmassenspeicher im Prinzip gleichermassen für Langzeitspeicherung als auch für Kurzzeitspeicherung (schneller Leistungsspeicher). Dadurch ergeben sich eine Reihe von vielversprechenden Anwendungen, die wirtschaftlich nicht durch den SMES oder die Hochleistungsbatterie abgedeckt werden können. Die Topologie eines für USV und Netzurückwirkungskompensation geeigneten System ist in Abbildung 4 dargestellt.

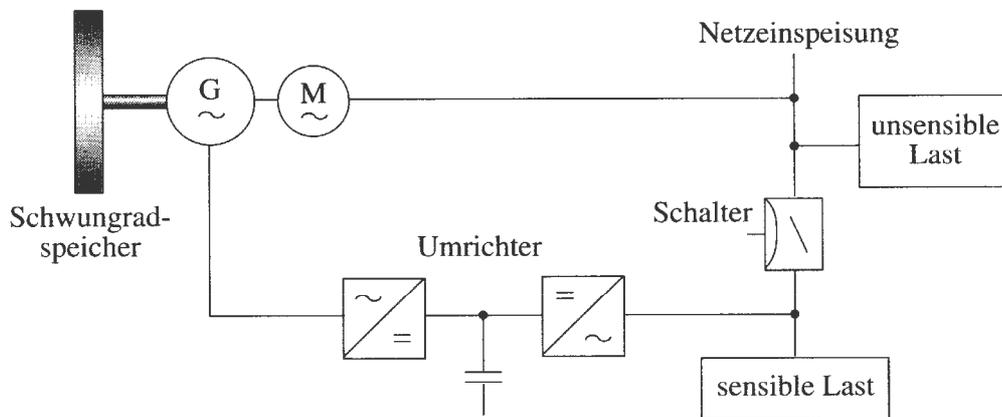


Abbildung 4: Topologie eines für USV und Netzurückwirkungskompensation geeigneten System

## 5. VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN ENERGIE-SPEICHER

In der Tabelle 4 ist eine Übersicht über die verschiedenen Energiespeicher dargestellt.

	<b>Pb-Batterie</b>	<b>NiCd-Batterie</b>	<b>NaS-Batterie</b>	<b>LTS-SMES</b>	<b>HTS-SMES</b>	<b>SMS, hoctourig</b>	<b>SMS, niedertourig</b>
Marktreife	hoch	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	mittel	hoch
typische Einsatzzeit	2 min	2 min	30 min	15 s	15 s	15 s	15 s
Wirkungsgrad	85 %	75 %	98 %	98 %	98 %	90 %	90 %
Verluste durch	Selbstentladung	Selbstentladung	Reaktionswärme	Wärme-Eintrag	Wärme-Eintrag	Reibung	Reibung
Risiken	Säure	alkalische Stoffe	Hitze	Quench, Feld	Quench, Feld	Masse	Lager
erwartete Zyklen	1 500	1 000	1 000	100 000	100 000	1 000 000	1 000 000
Preis in DM für: • 1 MW • Einsatzzeit (s. o.)	100 000	400 000	–	2 000 000	3 000 000	300 000	100 000

Tabelle 4: Kenngrößen verschiedener Energiespeicher

Um die Tabelle der Energiespeicher mit den Super Caps zu vervollständigen sind hier noch einige Kenndaten aufgeführt:

Marktreife:	mittel-hoch
Typische Einsatzzeit:	ca. 5s
Wirkungsgrad:	90%-98%
Erwartete Zyklen:	1 000 000
Preis in € für 1 MW:	50 000

Für eine Energiespeicherung im Bereich Stunden oder länger wären auch Systeme mit einer Brennstoffzelle, einem Elektrolyseur sowie einem Wasserstoffspeicher vorstellbar. Allerdings sind die Kosten für derartige Systeme heute noch schlecht abschätzbar. Da der elektrische Systemwirkungsgrad kaum über 50% liegen wird, sind derartige Anwendung eher in Verbindung mit einer Abwärmenutzung sinnvoll.

## 6. QUELLEN

Internetseite: <http://www.akkufit.de/knowhow/akkutypen.htm>

Buch: Spannungsqualität in elektrischen Netzen  
ISBN 3-8007-2265-8