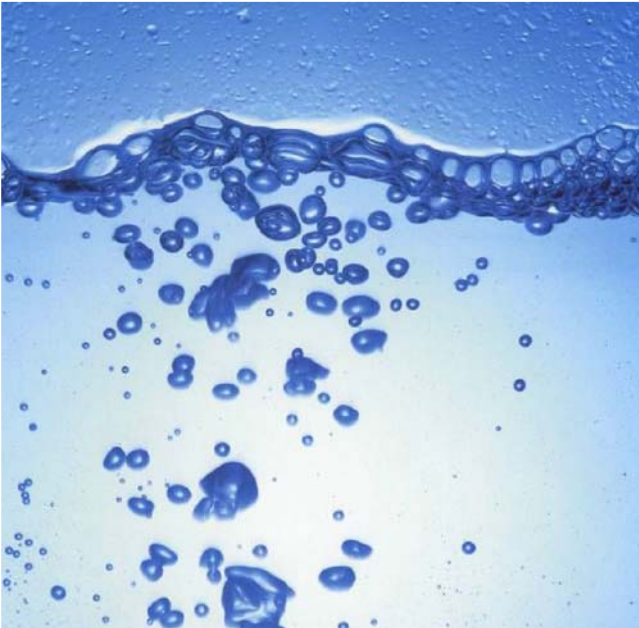




# Zukunftsmarkt

## Elektrische Energiespeicherung





# **Zukunftsmarkt**

## **Elektrische Energiespeicherung**

Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes

im Rahmen des Forschungsprojektes  
Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern  
(Förderkennzeichen 206 14 132/05)

durchgeführt

von

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Autor:

Peter Radgen

## Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt (UBA)  
Postfach 1406, 06844 Dessau-Roßlau  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Referat Öffentlichkeitsarbeit  
11055 Berlin  
E-Mail: [service@bmu.bund.de](mailto:service@bmu.bund.de)  
[www.bmu.de](http://www.bmu.de)

ISSN: 1865-0538

Projektbetreuung: Michael Golde  
Umweltbundesamt (UBA)

Peter Franz  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Autor: Dr. Peter Radgen  
(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe)

Titelfotos: Q-Cells AG, BMU / Rupert Oberhäuser, ccvision GmbH

Stand: Dezember 2007

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Potenziale der Energiespeicherung</b> .....	<b>6</b>
2.1    Einführung.....	6
2.2    Technologie der Elektrischen Energiespeicherung .....	9
2.2.1    Druckluftspeicher .....	9
2.2.2    Wasserstoff .....	10
2.2.3    REDOX-Flow-Batterien .....	12
2.2.4    Bleiakkumulator.....	14
2.2.5    Natrium-Schwefel-Batterie .....	15
2.2.6    Litium-Ionen-Akkumulatoren .....	16
2.2.7    Pumpspeicherkraftwerke.....	18
2.2.8    Super-Kondensatoren .....	19
2.3    Nutzen für Umwelt und Gesellschaft .....	20
2.4    Wirtschaftliche Potenziale und Märkte .....	21
<b>3 Internationaler Leistungsvergleich</b> .....	<b>23</b>
3.1    Politiken und Rahmenbedingungen .....	23
3.2    Akteure.....	23
3.3    Innovationsindikatoren .....	24
3.4    Außenhandelsindikatoren .....	28
<b>4 Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>29</b>
4.1    SWOT Analyse für Deutschland und Europa .....	29

4.2	Perspektiven bis 2020 .....	30
4.3	Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf.....	30
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>32</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Ragone Diagramm für die wichtigsten Energiespeicher [Quelle: LLNL; o.J.] .....	8
Abbildung 2-2:	Funktionsweise eines Druckluftspeicherkraftwerkes [Quelle: Crotagino; 2006] .....	9
Abbildung 2-3:	Druckluftspeicherkraftwerk Hundedorf (290 MW) [Quelle: Crotagino, 2006] .....	10
Abbildung 2-4:	Heutiger und zukünftiger Wirkungsgrad der Stromspeicherung über Wasserstoffsysteme [Eurosolar, 2006] .....	11
Abbildung 2-5:	Redox-flow-Batterie der Firma Regenesys [Regenesys, o.J.] .....	13
Abbildung 2-6:	Batteriesystem der BEWAG zur Frequenzsteuerung [Eurosolar: 2006] .....	15
Abbildung 2-7:	Funktionsweise einer Natrium-Schwefel-Batterie [Quelle: IERE, o.J.].....	15
Abbildung 2-8:	Natrium-Schwefel-Batterie [Eurosolar, 2006].....	16
Abbildung 2-9:	Prinzipieller Aufbau eines Li-Ionen-Akkus [Tübke, 2007] .....	17
Abbildung 2-10:	Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal (Speicherbecken) [Quelle: Vattenfall].....	18
Abbildung 2-11:	Typischer Tagesgang eines Pumpspeicherkraftwerkes [Wikipedia, o.J.] .....	19
Abbildung 2-12:	Umweltauswirkungen von Speichertechnologien [Frost, 2004] .....	21
Abbildung 2-13:	Einsatzbereiche für Energiespeichersysteme [VRB Power] .....	22
Abbildung 3-1:	Entwicklung der weltweiten Patentanmeldungen im Bereich Elektrizitätsspeicher .....	25
Abbildung 3-2:	Relativer Anteil von Patentanmeldungen für den Bereich Elektrizitätsspeicher .....	26

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Technische Daten verschiedener REDOX-Flow-Systeme [Quelle: Jossen, 2006] .....	12
Tabelle 2-2:	Platzbedarf für ein REDOX-flow-Speichersystem in Abhängigkeit von Leistung und Speichervermögen [Quelle: VRB Power, o.J.] .....	13
Tabelle 3-1:	Patentanmeldungen für "Elektrizitätsspeicher allgemein" (EP+WO). .....	26
Tabelle 3-2:	Patentanmeldungen für "CAES, H <sub>2</sub> und REDOX" (EP+WO) .....	27
Tabelle 3-3:	Patentanmeldungen für "Andere Elektrizitätsspeicher" (EP+WO) .....	27
Tabelle 4-1:	SWOT Analyse Energiespeichertechnologien .....	30





## Zusammenfassung

Energiespeicher dienen zum Ausgleich zwischen dem schwankenden Energieangebot und der sich verändernden Energienachfrage. In Bezug auf die Stromversorgung muss zu jedem Zeitpunkt in den elektrischen Netzen Angebot und Nachfrage ausgeglichen sein. Dies kann durch die Steuerung der Stromerzeugung, der Stromnachfrage oder der Zwischenspeicherung erfolgen. Stromspeicher können sowohl Angebotsspitzen (Einspeicherung) als auch Nachfragenspitzen (Ausspeicherung) ausgleichen. Energiespeicher stellen in Zukunft für die Stromversorgung aus fluktuierenden und ggf. dezentralen Energiequellen eine unverzichtbare Komponente dar, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Dabei gibt es eine Vielzahl möglicher Speichertechnologien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsfeldern.

Im Rahmen der Fallstudie wurden sieben Speichertechnologien (Druckluftspeicher, Wasserstoff, REDOX-Flow Batterien, Blei Akkumulator, Natrium Schwefel Batterie, Pumpspeicherkraftwerke, Super Kondensatoren) berücksichtigt, wobei ein Schwerpunkt auf die ersten drei Technologien gelegt wurde, da sich diese derzeit am Beginn des Innovationszyklusses befinden und damit als möglicherweise aussichtsreiche Zukunftstechnologien angesehen werden. Als ausgereifte Technologien sind demgegenüber die Bleibatterien und die Pumpspeichertechnologie anzusehen, die bereits in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden.

Maßgeblich für die Umweltfreundlichkeit von Energiespeichersystemen sind der Speicherwirkungsgrad und aufgrund der häufig in chemischen Energiespeichern zum Einsatz kommenden giftigen Stoffe die Entsorgung am Ende der Lebensdauer. Zudem gilt es nicht nur die unterschiedlichen Stromspeichertechnologien gegenüberzustellen sondern die Speicher müssen stets mit Alternativen beim Erzeugungs- und/oder Nachfragemanagement verglichen werden.

Die Hauptmärkte und Entwicklungsaktivitäten lagen bisher vor allem in den USA und Japan. Derzeit beschränkt sich die Anwendung der neuen Speichersysteme noch auf Nischenanwendungen, bei denen die Frage der Kosten und des Wirkungsgrades nicht das wesentliche Entscheidungskriterium sind. Aufgrund der Vorreiterrolle der EU und hier insbesondere von Deutschland beim Ausbau der erneuerbaren Energien wird das Thema Energiespeicher inzwischen auch in Europa als Zukunftsthema erkannt, wobei Deutschland innerhalb der EU eine Vorreiterrolle einnimmt. Getrieben wird die Entwicklung von Stromspeichertechnologien auch von anderen Entwicklungen, wie z. B. dem Aufkommen von Hybridfahrzeugen, oder der Wasserstoffinfrastrukturen. Mittelfristig wird sich eine verstärkte Nachfrage nach Stromspeichertechnologien ergeben. Dabei wird in den Entwicklungs- und Flächenländern eher die Frage der Netzstabilisierung

bzw. der Inselversorgung, in den Industrieländern stärker der hohe Anteil erneuerbaren Energie an der Versorgung und die Versorgungssicherheit der wesentliche Treiber der Entwicklung sein. Insgesamt ist die Anzahl der Akteure derzeit noch begrenzt, und die Entwicklungen werden von Forschungseinrichtungen oder kleinen Spin Off's aus Forschungsprojekten vorangetrieben. Zunehmend zeigen aber auch die Energieversorgungsunternehmen Interesse an der Thematik.

Die Stromspeichertechnologien werden in den nächsten 15 Jahren weiter einen kontinuierlichen Aufschwung erfahren. Im Bereich der netzbasierten Speichersysteme erscheinen Speicher auf Basis von REDOX-flow Systemen, CAES und Wasserstoff als attraktive Optionen, insbesondere da sich bei diesen Systemen Leistung und Speichergehalt unabhängig voneinander skalieren lassen. Wesentlich ist für diese Technologien jedoch eine deutliche Verbesserung der Wirkungsgrade, andernfalls werden sich diese Technologien nicht in der Breite am Markt etablieren können.

Da die Entwicklung zudem häufig von kleineren Unternehmen getragen wird, die nur über beschränkte finanzielle Mittel verfügen, sollte neben der Grundlagen und anwendungsorientierten Forschung auch die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben finanziell unterstützt werden. Im Bereich der Forschung und Entwicklung sollten dabei die Kernfragen Systemwirkungsgrade, Standfestigkeit, Energiespeicherdichten Kosten und Systemintegration im Vordergrund stehen. Da sich derzeit noch keine Speichertechnologie als optimal herauskristallisiert hat, sollte der Förderansatz eine Vielzahl von Technologien berücksichtigen. Zudem sollte geprüft werden, ob durch die gezielte Förderung von Forschungsk Kooperationen mit den führenden Ländern USA und Japan ein weiterer Nutzen für Deutschland erzielt werden kann.

Sinnvoll könnte möglicherweise eine Weiterentwicklung des EEG oder KWKModG in der Form sein, dass Systeme die mit einem Stromspeicher ausgestattet sind, einen Zuschlag auf die Vergütungssätze erhalten. Diese Regelung könnte vergleichbar den Technologiezuschlägen im EEG (z. B. für zusätzliche Wärmenutzung) bzw. im KWKModG (z. B. für die Brennstoffzellen) erfolgen.

## Summary

Increased attention is currently being paid to electricity storage as a result of an energy policy which favours renewable energies. As the shares of fluctuating renewable energies (mainly wind and solar power) increase in the total electricity supply, it becomes more and more difficult to balance electricity demand and supply. This is linked to the facts that the share of controllable fossil electricity generation is decreasing (production) and, at the same time, the typically highly regionally concentrated renewable energy production is limited by the capacity of the electricity grid (distribution).

Therefore energy research has recently begun focusing on grid-connected electricity storage systems. As electricity itself cannot be stored in large amounts, it is typically converted into other energy forms such as chemical energy, kinetic energy or potential energy.

The most important technical data for electricity storage technologies are the specific energy [kWh/kg] and the peak power [kW/kg]. Other important features of electricity storage systems are life time, possible number of working cycles, efficiency and self discharging.

Besides the traditional electricity storage systems based on pumped hydropower (limitations due to geological constraints) and lead batteries (limitations due to cost and cycle constraints) there are other storage technologies based on hydrogen, compressed air or REDOX reactions. For these three technologies a more detailed analysis has been done of the political framework conditions, the actors, and innovation indicators. This shows a significant increase in the number of patent applications for these and other storage technologies since the beginning of the 90s. On a global scale, the US and Japan are the leading countries for storage technologies in general, followed by the UK and Germany. Looking only on the European market Germany seems to lead the innovation race in the emerging storage technologies such as hydrogen, compressed air or REDOX. These developments are often driven by small and medium-sized companies.

The position of Germany with regard to electricity storage technologies can best be described by a SWOT analysis. The worldwide market developments together with the skilled personnel and the technical capacity in Germany provide a sound basis for German industry.

## 1 Einleitung

Der Umwelt- und Ressourcenschutz gewinnt national und international eine zunehmende Bedeutung. Damit verbunden wird sich die Nachfrage nach Umwelttechniken weltweit dynamisch entwickeln. Inzwischen hat sich aus dem Umwelt- und Ressourcenschutz auch ein maßgeblicher Treiber für Innovationen entwickelt. Umwelt- und Innovationspolitik wachsen dadurch immer stärker zusammen, moderne Umweltpolitik muss auch Innovationspolitik sein.

Um Wachstums- und Beschäftigungspotenziale zu mobilisieren ist es wichtig, Synergieeffekte zwischen der Verbesserung der Umweltsituation, der Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit zu identifizieren und zu nutzen. Das Forschungsprojekt „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ analysiert die Innovationsdynamik in wichtigen Handlungsfeldern systematisch und auf zusammenfassender Ebene. Diese Handlungsfelder bildeten die Basis, um elf Produktgruppen/Technologien auszuwählen, die in Fallstudien vertieft untersucht werden.

Jede Fallstudie enthält eine kurze Vorstellung der Grundlagen der entsprechenden Technologie. Anschließend folgt eine nähere Analyse des Zukunftsmarktes und seiner Innovationsdynamik. Besonderes im Blickpunkt stehen dabei die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen im internationalen Vergleich, ihr Umfeld sowie Ansatzpunkte für eine Stärkung des deutschen und europäischen Innovationssystems.

Innerhalb der Reihe: „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind Fallstudien zu den folgenden Themen erschienen: Solarthermische Stromerzeugung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung, Elektrische Energiespeicherung, Solares Kühlen, Energieeffiziente Rechenzentren, Biokunststoffe, Synthetische Biokraftstoffe, Hybride Antriebstechnik, Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement, Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Stofferkennung und –trennung.

In dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse der Fallstudie zu elektrischen Energiespeichern beschrieben. Im Fokus der Ausarbeitung stehen die Speichersysteme für den Einsatz in Stromversorgungsnetzen. Stromspeicher für Geräte, meist als Batterien bezeichnet, haben gegenüber den Speichersystemen für die Netzintegration deutlich unterschiedliche Ausprägungen. Wichtig ist es zudem anzumerken, dass für einzelne Technologien, wie z. B. die Druckluftspeicherung, Fortschritte bei der thermischen Speicherung einen wichtigen Baustein bei der Weiterentwicklung der elektrischen Energiespeichersysteme darstellen. Gleiches gilt unter anderem auch für die KWK

(Dampf-/Warmwasserspeicher) und LNG Anlagen/Druckgasspeicher. Für diese Anwendungen wäre ggf. eine zusätzliche Fallstudie sinnvoll.

In den folgenden drei Kapiteln wird ein Überblick über die Stromspeichertechnologie gegeben. An die Beschreibung der verschiedenen Speichertechnologien schließt sich eine Analyse von ökologischen und ökonomischen Aspekten an. Im Kapitel drei erfolgt ein internationaler Leistungsvergleich, in dem die relevanten Akteure identifiziert, die unterschiedlichen Hintergründe bei der Förderung in einzelnen Ländern beleuchtet werden und eine Analyse anhand von Außenhandels- und Patentindikatoren durchgeführt wird. Im Kapitel vier werden die Ergebnisse der Stärken- und Schwächen-Analyse dargestellt. Die Analyse der mittelfristigen Entwicklung und Hinweise zum Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen schließen das Kapitel ab.

## 2 Potenziale der Energiespeicherung

Energiespeicher dienen zum Ausgleich zwischen dem schwankenden Energieangebot und der sich verändernden Energienachfrage. Die folgenden Ausführungen im Rahmen dieser Ausarbeitung beschränken sich dabei auf das Themenfeld elektrische Energiespeicherung. Die thermische Energiespeicherung ist hier nicht Gegenstand.

### 2.1 Einführung

In Bezug auf die Stromversorgung muss zu jedem Zeitpunkt in den elektrischen Netzen Angebot und Nachfrage ausgeglichen sein. Um diesen Ausgleich zu gewährleisten können prinzipiell die folgenden Möglichkeiten genutzt werden:

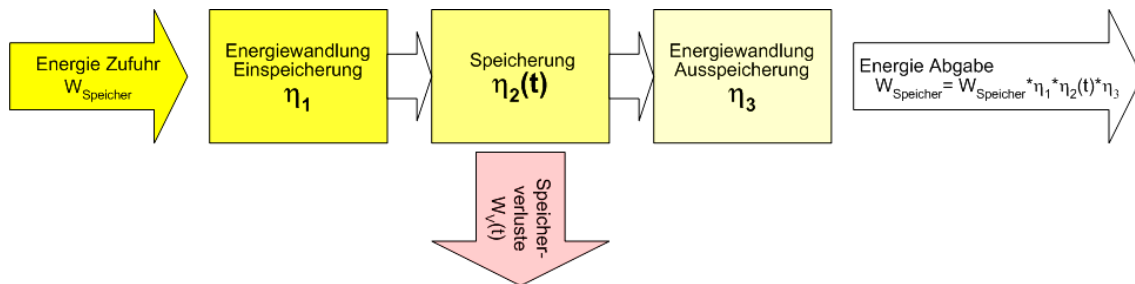
- Steuerung der Stromerzeugung,
- Steuerung der Stromnachfrage,
- Zwischenspeicherung von elektrischer Energie.

Die Möglichkeit der Steuerung der Stromerzeugung wird dabei zunehmend durch die ausgelasteten Stromnetze und die teilweise stark schwankende Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien beschränkt. Insbesondere letztere unterliegen aufgrund der Vorgaben des Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) keiner Steuerung der Stromeinspeisung. Vielmehr können diese stets die gesamte Erzeugung ohne Fahrplan in das Netz abgeben, unabhängig von der aktuellen Nachfragesituation. Die Anpassung der Stromerzeugung muss dann alleine durch das Regeln fossiler Kraftwerke erfolgen, wobei aufgrund der stark schwankenden Einspeisung (insbesondere durch die Windkraft) eine bestimmte Kurzfristkraftwerksreserve vorgehalten werden muss.

Neben der Steuerung auf der Erzeugungsseite kann auch die Stromnachfrage beeinflusst werden. So lässt sich durch Zu- bzw. Abschaltung einzelner großer Stromverbraucher die Stromnachfrage variieren. Geeignet sind hierzu insbesondere Verbraucher in der Industrie, die über eine ausreichende Trägheit verfügen und unproblematisch abgeschaltet oder heruntergeregelt werden können. Hierzu zählen u.a. Industrieöfen, Kälteanlagen, Elektrolyseprozesse oder größere Mahlanlagen.

Als Dritte Möglichkeit des Belastungsausgleichs in den elektrischen Netzen bietet sich der Einsatz von elektrischen Energiespeichern an [Abboud, 2002]. Diese können sowohl Angebotsspitzen (Einspeicherung) als auch Nachfragespitzen (Ausspeicherung) ausgleichen. Die Speicherung erfordert zusätzliche Komponenten im System, durch die die Speicherung erfolgt.

Da sich Elektrizität nur schwer als Elektrizität speichern lässt, muss sie zumeist für die Speicherung zunächst in eine andere Energieform umgewandelt werden, was mit Verlusten verbunden ist. Zudem geht je nach Speichertyp weitere Energie während der Energiespeicherung verloren. In einem letzten Schritt muss die gespeicherte Energie dann wieder in Elektrizität zurückgewandelt werden, wodurch erneut Umwandlungsverluste entstehen.



Energiespeicher werden dabei nach der gespeicherten Energieform klassifiziert:

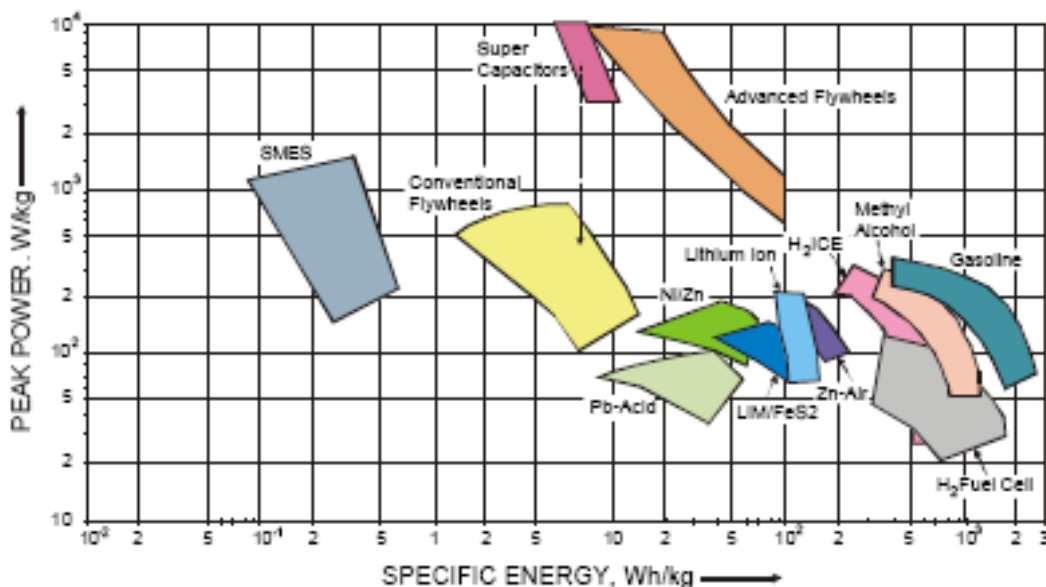
- Thermische Energie: Wärmespeicher
- Chemische Energie: Akkumulator, Batterie, Redox-Flow-Zelle, Wasserstoff
- Mechanische Energie:
  - Kinetische Energie: Schwungrad
  - Potenzielle Energie: Feder, Pumpspeicherkraftwerk, Druckluftspeicherkraftwerk, Gewicht (z. B. an einer Uhr)
- Elektrische Energie: Kondensator (Elektrotechnik), supraleitender magnetischer Energiespeicher

Energiespeicher sind in zukünftigen Netzen mit dezentralen Energiequellen eine unverzichtbare Komponente, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Dabei nimmt die Bedeutung von Energiespeichern mit zunehmendem Anteil an fluktuierender Einspeisung deutlich zu [DNA, 2005; Wietschel, 2006; Spahit, 2006]. Einrichtungen zur Speicherung elektrischer Energie in Netzen dienen dabei generell zur Lösung der folgenden Problemstellungen:

- Egalisierung der Tagesgangkennlinien (Ausgleich der zeitlichen Schwankungen von Energiebedarf und -erzeugung),
- Vergleichmäßigung des Energieangebotes aus Wind- und Sonnenkraft,
- Entlastung von Versorgungsnetzen durch Spitzenlastdeckung (Bahnen –speziell Nahverkehrsbetriebe-, Versuchsanlagen, Beschleuniger, Hüttenbetriebe usw.),
- Verringerung der Übertragungsverluste, Reduzierung der Investitionskosten für Energieübertragungsanlagen,
- Verbesserung der Netzqualität durch dezentrale Pufferung bei Fehlerfällen.

Unterschiedliche Anwendungen von Energiespeichern erfordern dabei jeweils angepasste Speichertechnologien, d. h. nicht jeder Speichertyp ist für jeden Anwendungsfall geeignet [INVESTIRE, 2002]. Wichtige Speichereigenschaften sind zum Beispiel die Spitzenleistung und die Energiedichte der Speicherung. Die Darstellung der unterschiedlichen Speichertypen im Ragone Diagramm Abbildung 2-1 vermittelt dann schnell einen ersten Überblick über die Speichereignung. In dieser Art von Diagrammen lassen sich die Pumpspeicherkraftwerke und die CAES Speicher jedoch nicht sinnvoll darstellen. Für die Pumpspeicherkraftwerke ist die Leistung und Arbeit des Speichers von den geographischen Gegebenheiten abhängig. So ist der Energieinhalt nicht nur von der Wassermenge sondern von der zur Verfügung stehenden Fallhöhe abhängig. Im Falle der CAES Systeme werden Leistung und Arbeit zusätzlich durch die Leistungsdaten der integrierten Gasturbine beeinflusst. Diese beiden Systeme sind deshalb nicht im Diagramm dargestellt.

Abbildung 2-1: Ragone Diagramm für die wichtigsten Energiespeicher [Quelle: LLNL; o.J.]



Weitere zu berücksichtigende Eigenschaften von Speichern sind u. a. Lebensdauer; Zyklenfestigkeit; Wirkungsgrad; Selbstentladung; Schnell-Ladefähigkeit; Überladesicherheit; Innenwiderstandscharakteristik; Temperaturverhalten und Kurzschlussverhalten.

Vorteile ergeben sich dabei für die Speichertechnologien, für die eine Entkopplung von Leistung und Arbeit bei der Speicherung möglich ist. Je nach Anforderungen kann dann ein System sowohl für große Leistung und kleine Arbeit oder für kleine Leistung



und große Arbeit ausgelegt werden, was sich günstig auf die Investitionen des Speichersystems auswirkt [DTI, 2004, Nourai, 2004]. Dies gilt z. B. für die Redox-flow-Batterien, Druckluftspeichersysteme und für Wasserstoffsysteme.

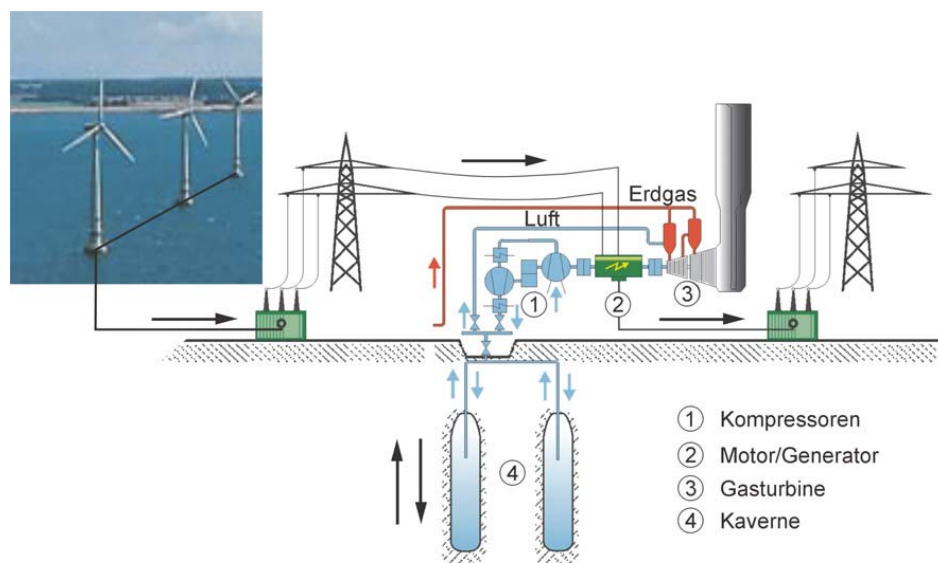
## 2.2 Technologie der Elektrischen Energiespeicherung

Im Folgenden werden sieben aussichtsreiche Speichertechnologien für elektrischen Strom detaillierter beschrieben. Die einzelnen Technologien haben jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen in den verschiedenen Anwendungsfällen, weshalb es den besten Energiespeicher per se nicht geben kann.

### 2.2.1 Druckluftspeicher

Ein Druckluftspeicherkraftwerk ist ein Gasturbinenkraftwerk, das die Energie komprimierter Luft als Speicher nutzt und Spitzenlaststrom bereitstellen kann. In Zeiten, in denen genügend Strom zur Verfügung steht, wird die Luft verdichtet und in einem Druckluftspeicher, typischerweise einer Kaverne, zwischengespeichert. Bei hohem Strombedarf (Spitzenlast) wird die benötigte Verbrennungsluft nicht mit dem Verdichter der Gasturbine bereitgestellt sondern aus dem Druckluftspeicher entnommen. Druckluftspeicherkraftwerke oder (korrekter) Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke werden häufig mit CAES abgekürzt, was sich aus der englischen Bezeichnung Compressed Air Energy Storage ableitet. Abbildung 2-2 zeigt die Funktionsweise eines Druckluftspeicherkraftwerkes, die auch in (BINE, 2007) näher erläutert wird.

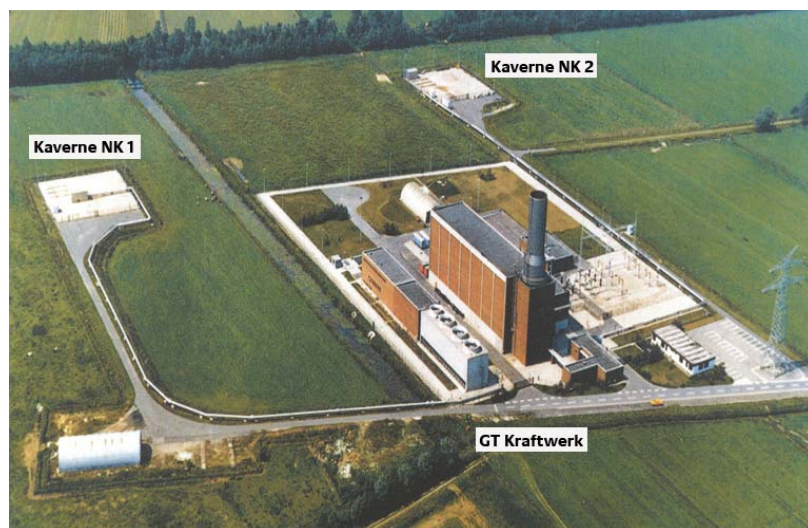
Abbildung 2-2: Funktionsweise eines Druckluftspeicherkraftwerkes [Quelle: Crotogino; 2006]



Da als Druckluftspeicher unterirdische Kavernen verwendet werden, ist der Flächenbedarf im Gegensatz zu Pumpspeicherkraftwerken nur gering. Aufgrund der erforderlichen geologischen Strukturen könnten solche Kraftwerke überwiegend in Küstennähe und damit in der Nähe zukünftiger Offshore-Windparks gebaut werden. Die Wirkungsgrade der wenigen, heute betriebenen Druckluftspeicherkraftwerke liegen unter 50 %. Bei gezielter Weiterentwicklung der Technologie, insbesondere durch Rückgewinnung der bei der Luftkompression anfallenden Wärme (adiabates Druckluftspeichersystem), könnten ggf. ähnliche Wirkungsgrade wie bei Pumpspeicherkraftwerken (70 – 75 %) erreicht werden. Weltweit werden bislang nur zwei Druckluftspeicherkraftwerke betrieben, eines in Deutschland und eines in den USA.

Seit 1978 besteht in Elsfleth-Huntorf im Landkreis Wesermarsch (Niedersachsen) ein von der damaligen PreussenElektra AG (Heute E.ON) gebautes 290 MW-Kraftwerk (Abbildung 2-3)

Abbildung 2-3: Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf (290 MW) [Quelle: Crotagino, 2006]



Das zweite Druckluftspeicherkraftwerk betreibt seit 1991 die Alabama Electric Corporation in McIntosh in Alabama mit einer elektrischen Leistung von 110 MW.

## 2.2.2 Wasserstoff

Die **Druckgasspeicherung** ist vergleichbar mit der Speicherung von Erdgas wobei der spezifische Energieinhalt jedoch nur ca. ein Drittel beträgt. Stand der Technik ist die Speicherung von Wasserstoff bei einem Druck von 200 bar und mit einem Volumen

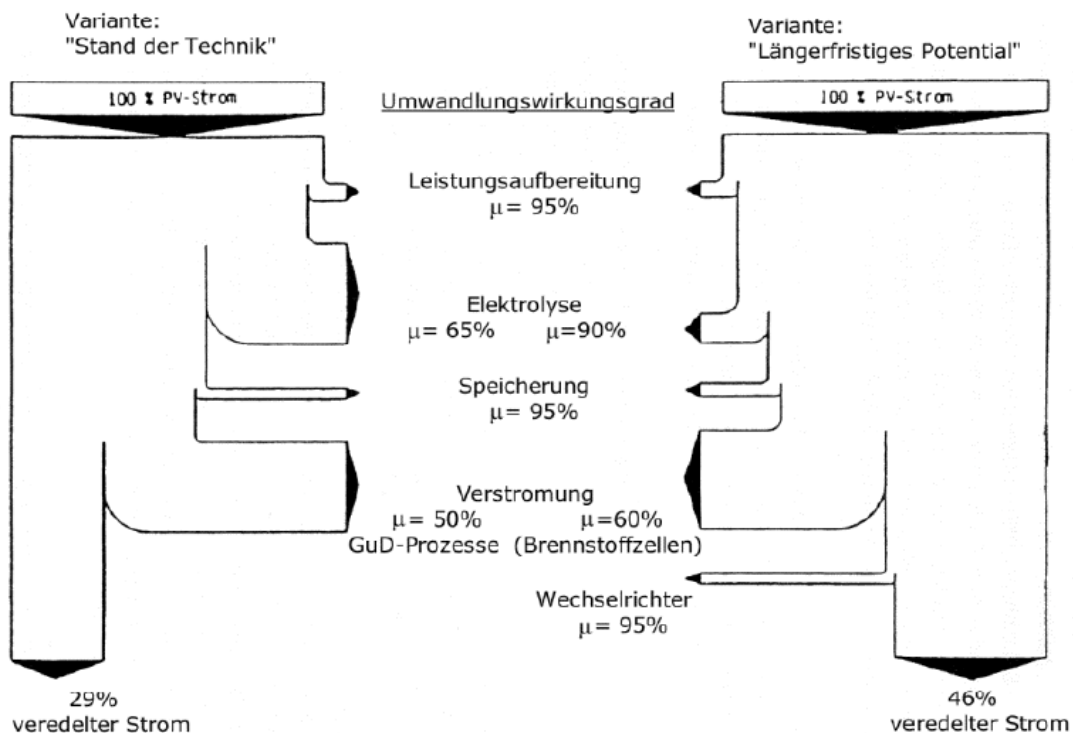
von 50 Litern bis zu 100.000 m<sup>3</sup>. Inzwischen gibt es auch erste Versuche mit Speicherdrücken von 700 bar.

Die **Flüssigwasserstoffspeicherung** (kryogene Speicherung) weist eine um den Faktor 800 höhere Speicherdichte gegenüber gasförmigem Wasserstoff auf. Die Speicherung erfolgt bei Temperaturen um -253 °C wobei etwa 10 kWh/kg Wasserstoff für die Verflüssigung benötigt werden. Dies entspricht etwa einem Drittel des Energieinhaltes des Wasserstoffs. Zur Verflüssigung muss der Wasserstoff zudem sehr rein sein und die Behälter müssen gut isoliert sein. Die (Abdampf-)Verluste betragen typischerweise 1 % pro Tag.

Bei der **Metallhydridspeicherung** geht der Wasserstoff eine chemische Bindung mit den Metallatomen ein. Als Metalle kommen dabei TiFe oder NiMe bei einem Ladedruck von 10 bis 50 bar zum Einsatz. Aufgrund der metallischen Bindung handelt es sich um einen sehr sicheren Speicher mit geringen Speicherverlusten. Aufgrund der erforderlichen Metallmengen ergeben sich jedoch hohe Speichergewichte.

Insgesamt sind die Wirkungsgrade eines Wasserstoffspeichersystems derzeit jedoch bei etwa 29 % noch sehr niedrig. Langfristig hofft man, diesen Systemwirkungsgrad auf bis zu 46 % steigern zu können (Abbildung 2-4).

Abbildung 2-4: Heutiger und zukünftiger Wirkungsgrad der Stromspeicherung über Wasserstoffsysteme [Eurosolar, 2006]



### 2.2.3 REDOX-Flow-Batterien

Die Forschung an REDOX-Flow-Batterien begann in den 70er Jahren mit dem Elektrolytpaar Eisen-Titan, Eisen(III)-chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) als Oxidationsmittel und Titanchlorid ( $\text{TiCl}_2$ ) als Reduktionsmittel in einem alkalischen Elektrolyten. Später wurde Titan durch Chrom ersetzt, was zu einem besseren Wirkungsgrad führte.

In den 80er Jahren wurden insbesondere in den USA (für Raumfahrtanwendungen) Arbeiten mit dem System Eisen Chrom durchgeführt. Probleme mit dem System ergaben sich durch die Notwendigkeit einer teuren ionenselektiven Membran und der Notwendigkeit, die Verklebung der Membran zu vermeiden. Derzeit wird die REDOX-Flow-Batterie gerade neu entdeckt. Dabei sind insbesondere Zellen auf Basis Vanadium zu einer gewissen Praxistauglichkeit gereift (Tabelle 2-1).

Bei den Vanadium-Systemen laufen die folgenden Reaktionen an den Elektroden ab:

Reaktion an der positiven Elektrode:  $\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$

Reaktion an der negativen Elektrode:  $\text{V}^{2+} \rightarrow \text{V}^{3+} + e^-$

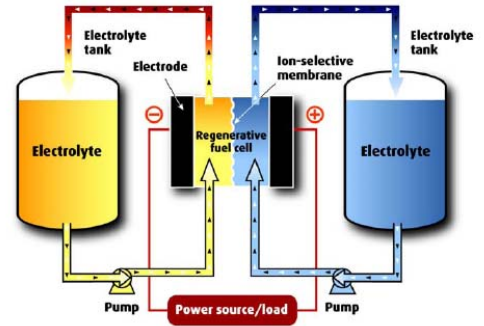
Tabelle 2-1: Technische Daten verschiedener REDOX-Flow-Systeme [Quelle: Jossen, 2006]

System	E Cell in V	Current densities in mA/cm <sup>2</sup>	Ah efficiency in %	Energy efficiency
Fe/Cr	1.03V	6.5	81	66
Bromine/ Polysulfide	1.53	60	90	67
Vanadium/ Vanadium	1.7	80	90	72

Aktiv in der Entwicklung sind hier insbesondere VRB Power Systems Inc. (Vancouver, Kanada), Sumitomo Electric Industries (Japan) und Cellennium Ltd. (Thailand). Die Lebensdauer soll nach Angaben dieser Firmen inzwischen bei ca. 10 000 Zyklen liegen (Arbeitsbereich 20 – 80 % der Kapazität).

Abbildung 2-5: Redox-flow-Batterie der Firma Regenesys [Regenesys, o.J.]

## Bromine/polysulfide flow battery - The Regenesys-system -



- Energy efficiency ~ 70 %
- Estimated costs: 175 €/kWh

Die Firma VRB hat dabei erst kürzlich die Firma Regenesys mit allen Patenten von RWE übernommen. Tabelle 2-2 zeigt das Speichervermögen von solchen Systemen und den dafür erforderlichen Platzbedarf.

Tabelle 2-2: Platzbedarf für ein REDOX-flow-Speichersystem in Abhängigkeit von Leistung und Speichervermögen [Quelle: VRB Power, o.J.]

	Speichervermögen in Stunden			
kW	4	6	8	10
<b>50</b>	15	20	25	35
<b>100</b>	30	40	45	70
<b>200</b>	55	80	110	140
<b>500</b>	140	200	270	340
<b>1,000</b>	270	400	540	660
<b>2,500</b>	1.200	1.200	1.500	1.600
<b>2,500*</b>	700	800	1.000	1.100
<b>10,000*</b>	1.200	1.200	1.800	2.000
<i>(Angaben in Quadratmetern)</i>				
<i>* 2 stöckiges Gebäude</i>				

Aktuelle Probleme bei dieser Technologie sind insbesondere die folgenden Punkte:

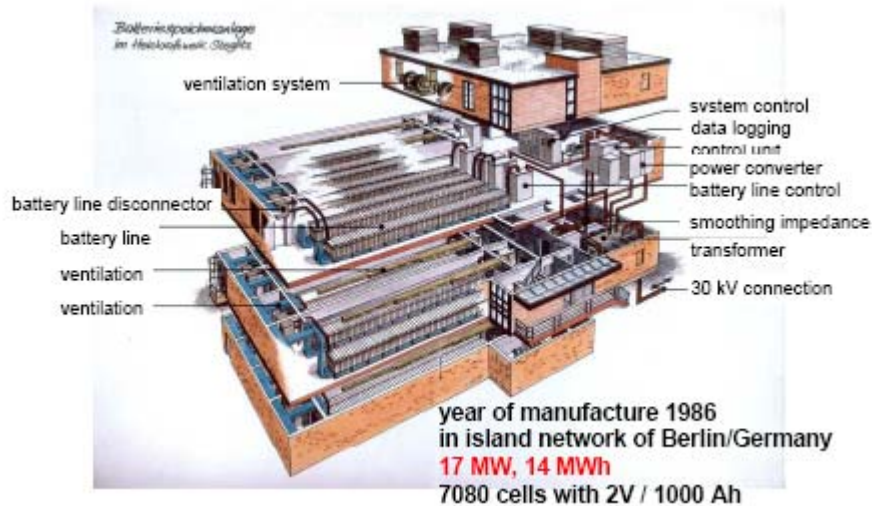
- Nebenströme die zur Verringerung des Wirkungsgrades führen.
- Gleichmäßige Strömungsverhältnisse in der Zelle, insbesondere für größere Systeme. Ungleichmäßigkeit kann Nebenprodukte erzeugen (Gase) die die Zelle und den Zellstapel zerstören können.
- Schwierigkeiten bei der Abdichtung von Zellen und Zellstapeln
- Verringerte Zellspannung aufgrund der Vermischung der Reaktanden während der Entladung.
- Ionentransport durch die Membran, der zu unerwünschten Elementen führt.
- Beibehaltung der Konzentration und Reinheit der Redoxpaare.

#### **2.2.4 Bleiakкумулятор**

Bleiakkumulatoren sind die am weitesten verbreitete Speichertechnologie. Die heutige Energiedichte beträgt ca. 40 kg/kWh bzw. 20 l/kWh. Der Speicherwirkungsgrad liegt typischerweise zwischen 80 und 90 % bei einer Lebensdauer von 3 bis 12 Jahren, je nach Betriebsbedingungen. Die Zyklenlebensdauer liegt meist zwischen 50 und 2000. Die Kosten dieser weitverbreiteten und etablierten Stromspeichertechnologie betragen ca. 25 bis 250 Euro/kWh. Aufgrund der großen Stückzahlen und gesetzlicher Vorgaben bezüglich der Rücknahme, wird ein großer Teil der Bleiakкумуляtoren am Ende ihrer Lebensdauer recycelt.

Neben dem bekannten und klassischen Anwendungsfeld als Starterbatterie in Kraftfahrzeugen wurden diese Batterien auch in größerem Maße zur Netzstabilisierung eingesetzt, z. B. zu Zeiten, als das Stromnetz von West-Berlin noch als Inselnetz betrieben werden musste.

Abbildung 2-6: Batteriesystem der BEWAG zur Frequenzsteuerung [Eurosolar: 2006]

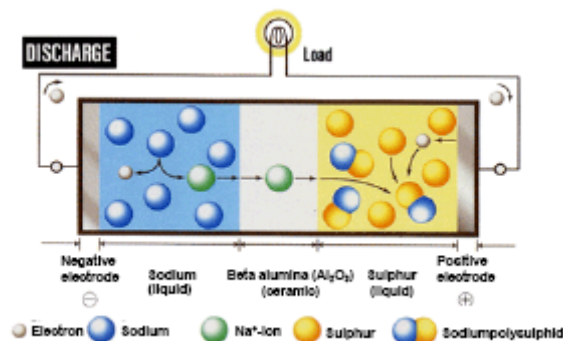


Diese Systeme sind erprobt und kostengünstig, weisen aber ein hohes Gewicht und eine nur begrenzte Zyklenfestigkeit auf.

### 2.2.5 Natrium-Schwefel-Batterie

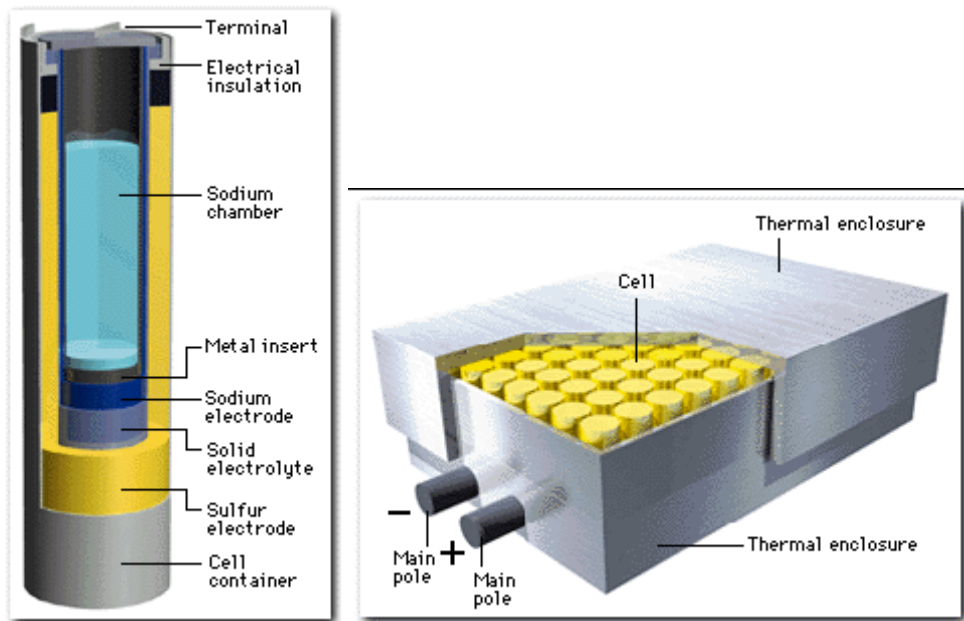
Natrium-Schwefel-Batterien arbeiten bei einer Temperatur zwischen 290 und 390 °C. In diesem Temperaturbereich sind Natrium (Anode) und Schwefel (Kathode) flüssig. Bei der Batterieentladung gibt das Natrium ein Elektron ab und wandert anschließend durch die Keramikmembran zur positiven Elektrode. Dort reagiert das Natrium-Ion mit Schwefel und einem Elektron zu Schwefelpolysulfid (Abbildung 2-7).

Abbildung 2-7: Funktionsweise einer Natrium-Schwefel-Batterie [Quelle: IERE, o.J.]



Das Batteriegehäuse besteht aus beschichtetem Stahl. Aufgrund der erforderlichen hohen Betriebstemperaturen muss die Batterie entsprechend isoliert werden (Abbildung 2-8).

Abbildung 2-8: Natrium-Schwefel-Batterie [Eurosolar, 2006]



## 2.2.6 Litium-Ionen-Akkumulatoren

Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind elektrochemische Spannungsquellen auf der Basis von Lithium. Eine Weiterentwicklung des Li-Ionen-Akkus ist der Lithium-Polymer-Akku. Der Li-Ionen-Akku zeichnet sich durch seine hohe Energiedichte aus. Seine nutzbare Lebensdauer beträgt mehrere Jahre; allerdings ist dies stark von der Nutzung und den Lagerungsbedingungen abhängig. Li-Ionen-Akkus werden typischerweise zur Versorgung tragbarer Geräte mit hohem Energiebedarf eingesetzt, z. B. Camcorder oder Laptops. In letzter Zeit sind zudem Anwendungen von Zellen mit 40 Ah im Bereich der Elektrofahrzeuge in die Diskussion gekommen. Li-Ionen-Akkus sind in vielfältigen Bauformen verfügbar. Der Preis für Li-Ion-Akkus betrug anfänglich ca. das Doppelte von NiMH-Batterien, ist aber in den letzten Jahren (1998) auf 0,8 bis 1,2 US\$/Wh gesunken. Im Jahre 2000 wurden weltweit ca. 540 Mio. Zellen ausgeliefert.

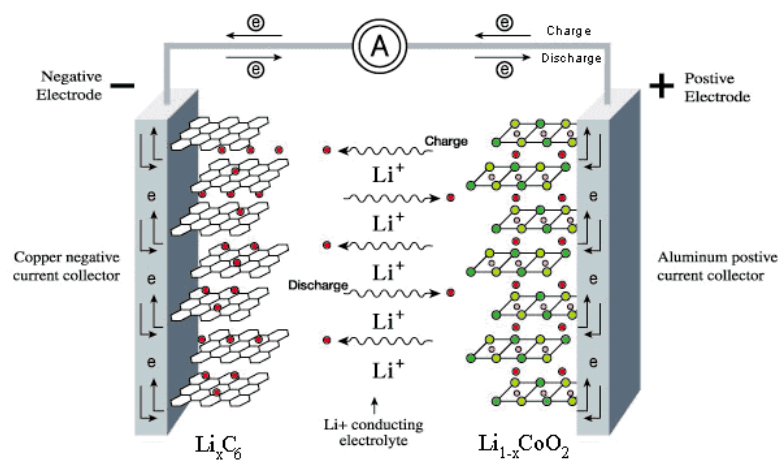
Der Aufbau von Li-Ionen-Akkus besteht aus der negativen Grafitelektrode als aktivem Material. Die positive Elektrode enthält meist Lithium-Metalloxide in Schichtstruktur, sie besteht aus einem Metalloxid (MOx), in denen eine bestimmte Anzahl Li-Ionen zwischen den Ebenen des Kristallgitters reversibel eingelagert werden kann (LiMOx). In der Praxis wird vorwiegend  $\text{LiCoO}_2$  verwendet. Der Li-Ionen-Akku muss komplett was-



serfrei sein (Gehalt an  $\text{H}_2\text{O}$   $< 20\text{ppm}$ ), da sonst das Wasser mit dem Leitsalz  $\text{LiPF}_6$  zu  $\text{HF}$  (Flusssäure) reagiert.

Beim Laden, d. h. beim Anlegen eines äußeren Potentials, wandern Lithium-Ionen zwischen die Graphitebenen. Beim Entladen wandern die Lithium-Ionen zurück in das Metalloxid und die Elektronen können über den äußeren Stromkreis zur positiven Elektrode fließen. Der nichtwässrige Elektrolyt besteht aus organischen Lösemitteln, in dem Leitsalze gelöst sind. Abbildung 2-9 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Abbildung 2-9: Prinzipieller Aufbau eines Li-Ionen-Akkus [Tübke, 2007]



Die Elektrolytlösungen bestehen aus hochreinen, wasserfreien, organischen Lösemitteln wie z. B. Propylencarbonat (PC), in denen Leitsalze wie z. B.  $\text{LiClO}_4$  gelöst sind. Zusätze von niedrigviskosen Lösungsmitteln erhöhen die Ionenbeweglichkeit und entsprechend die Leitfähigkeit.

Die Zellspannung beträgt ca. 3,6 V, wobei die Betriebstemperatur im Bereich um  $20\text{ }^\circ\text{C}$  liegen sollte. Praktisch werden derzeit spezifische Energiedichten von 90 – 160 Wh/kg (200-300 Wh/l) erreicht. Die Selbstentladung beträgt ca. 5-10 % pro Monat. Die Anzahl der möglichen Zyklen ist derzeit noch begrenzt und beträgt ca. 500 bis 1200, ein relativ niedriger Wert für die Integration dieser Speicher in die Stromnetze. Der energetische Wirkungsgrad beträgt ca. 70-90 %. Wegen des hohen Energieinhaltes können innere und äußere Kurzschlüsse zu Bränden oder Explosionen führen. Aufgrund von Zwischenfällen werden heutige Zellen mehrfach abgesichert. Üblich sind Stromunterbrechung bei Überdruck, Sicherheits-Ausblasöffnung, Thermoschalter, elektronische Kontrolle (Überlast, Temperatur, Ladespannung, Unterspannung) und zusätzliche mechanische Strom-Sicherung.

Die Vorteile der Li-Ionen-Akkus sind ihre hohe spezifische Energie und gute Lagerfähigkeit. Der Li-Ionen-Akku kennt keinen "Memory-Effekt", er kann in 2 bis 4 Stunden wieder aufgeladen werden. Nachteilig sind die im Vergleich mit wässrigen Systemen geringe Lade-Entladeströme.

## 2.2.7 Pumpspeicherkraftwerke

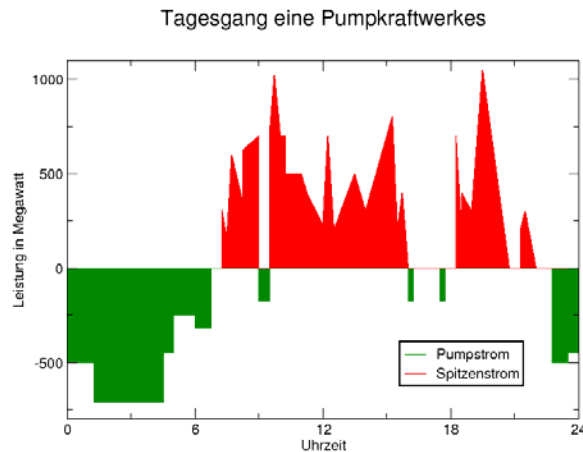
In Deutschland gibt es über 30 große und kleine Pumpspeicherkraftwerke. Das neueste und leistungsfähigste ist das Pumpspeicherwerk Goldisthal des Betreibers Vattenfall. Es ist nicht nur das größte Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland sondern auch das größte Wasserkraftwerk überhaupt. Das in den Jahren 2003/04 in Betrieb gegangene und in Ostdeutschland gelegene Kraftwerk hat eine Gesamtleistung von 1.060 MW. Die Planungen vom Beginn der Erkundungen bis zur Inbetriebnahme haben etwas mehr als 30 Jahre benötigt. Das Speicherbecken des Kraftwerkes verfügt über ein Speichervolumen von 12 Millionen Kubikmeter Wasser. Das Speichervolumen wird durch einen 3.370 m langen und bis zu 40 m hohen Ringdamm umschlossen (Abbildung 2-10). Das Unterbecken der Anlage mit Abmessungen von 2.400 Metern Länge und 900 Metern Breite ist mit dem Oberbecken über zwei Fallrohre verbunden, an die vier Maschinensätze angeschlossen sind. Die vier Maschinensätze bestehen jeweils aus Pumpturbine und Synchron-Motor-Generator, zwei Stränge verfügen zusätzlich über eine Drehzahlregelung für den Antrieb [siehe auch: Vattenfall 2006]. Die Nennleistung im Turbinenbetrieb beträgt 265 MW (Entspeicherung), im Pumpenbetrieb zwischen 190 und 290 MW (Speicherung). Vom Stillstand kann die Anlage in 98 Sekunden auf Turbinenbetrieb und in 256 Sekunden auf Pumpbetrieb gehen. Bei voller Füllung des Speicherbeckens wird ein Arbeitsvermögen von 8480 MWh gespeichert. Der Speicher könnte dann über einen Zeitraum von 8,33 Stunden seine Höchstleistung bereitstellen, bevor der Speicher entleert wäre.

Abbildung 2-10: Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal (Speicherbecken) [Quelle: Vattenfall]



Abbildung 2-11 zeigt den typischen Lastgang eines Pumpspeicherkraftwerkes. In den Schwachlastzeiten, insbesondere während der Nachtstunden, wird Strom aus dem Netz entnommen um Wasser auf ein höheres Niveau zu pumpen.

Abbildung 2-11: Typischer Tagesgang eines Pumpspeicherkraftwerkes [Wikipedia, o.J.]



Zu den Spitzenzeiten, u. a. um die Mittagszeit, wird der Speicher wieder entleert. Pumpspeicherkraftwerke können große Energiemengen in sehr kurzer Zeit bereitstellen, das eigentliche Speichern des Wassers ist dabei nahezu verlustfrei. Allerdings lassen sich solche Speicher nur kostengünstig errichten, wenn entsprechende geographische Verhältnisse vorliegen. Das erschließbare Speicherpotenzial ist deshalb entsprechend beschränkt.

### 2.2.8 Super-Kondensatoren

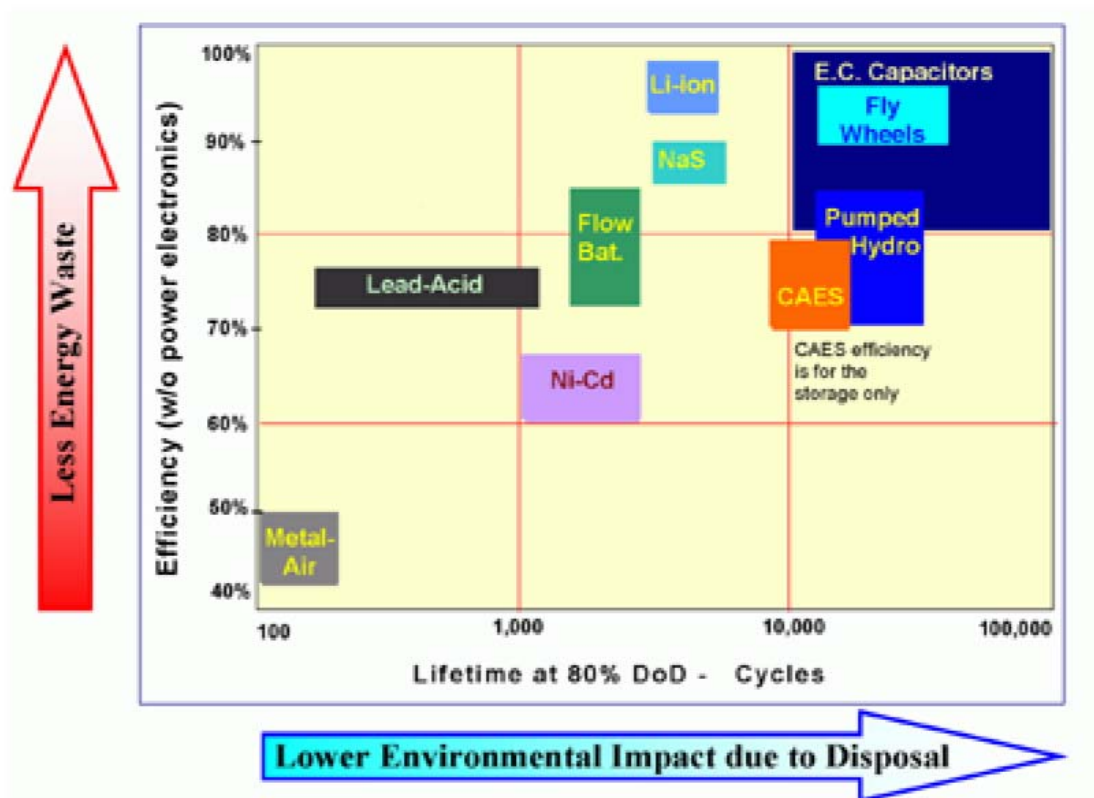
Super-Kondensatoren arbeiten mit Gleichstrom und sind relativ schnelle Energiespeicher. Super-Kondensatoren (Ultra Caps) weisen eine hohe Leistungsdichte aber eine geringe Energiedichte auf. Die Lebensdauer kann bis zu 80.000 Zyklen betragen, wobei dies stark von der Temperatur und Spannungsbeanspruchung abhängt. Nachteilig wirken sich auch die niedrigen Zellspannungen der Superkondensatoren aus, die die Reihenschaltung einer großen Anzahl von Elementen erfordert, um die gewünschten Spannungen zu erzielen.

## 2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

Die nachhaltige Energieversorgung erfordert ein verstärktes Umsteuern hin zu erneuerbaren Energien. Bedingt durch die Zielsetzung, die CO<sub>2</sub> Emissionen deutlich zu reduzieren und den großen Anteil der Energieversorgung an diesen Emissionen, erfordert eine nachhaltige Energieversorgung einen hohen Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung. Der große Nachteil erneuerbarer Energien ist jedoch ihre naturbedingt unsichere Leistungsabgabe. Dabei ist zudem noch zu unterscheiden zwischen der planbaren Nichtverfügbarkeit, z. B. der Solarkraftwerke während der Nacht und der kaum planbaren Verfügbarkeit der Windenergie. Da die Versorgung mit elektrischer Energie jedoch stets gewährleistet sein muss, sind die Schwankungen in der Erzeugung durch regelbare Kraftwerke oder durch Stromspeicher auszugleichen. Je größer jedoch der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung wird, umso größer wird die Bedeutung der Speichertechnologie. Ohne die Weiterentwicklung der Stromspeichertechnologien wird somit der mögliche Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung begrenzt bleiben. Zudem kann der Ausgleich von Lastschwankungen durch Stromspeicher billiger werden als die Steuerung durch Regelkraftwerke. Neben der Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen tritt zudem meist auch eine Reduktion der übrigen Schadstoffe auf, wenn durch den Einsatz von Speichersystemen die Kraftwerke stets in ihrem optimalen Betriebspunkt gefahren werden können.

Maßgeblich für die Umweltfreundlichkeit von Energiespeichersystemen sind zudem der Wirkungsgrad und die Entsorgung am Ende der Lebensdauer (Abbildung 2-12). Gerade aufgrund der häufig in chemischen Energiespeichern zum Einsatz kommenden giftigen Stoffe, ist der Entsorgung der Systeme besonderes Augenmerk zu widmen, wie dies derzeit zum Beispiel schon für Auto- und sonstige Batterien (Consumer-Produkte) gesetzlich vorgeschrieben ist.

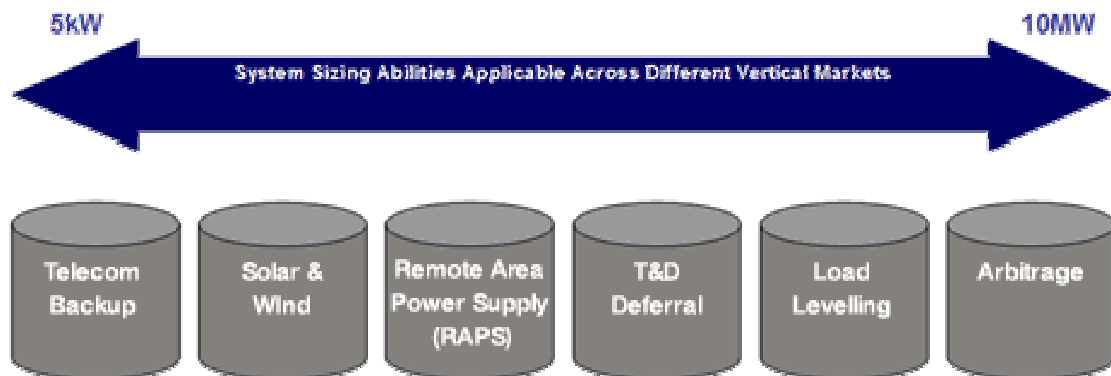
Abbildung 2-12: Umweltauswirkungen von Speichertechnologien [Frost, 2004]



## 2.4 Wirtschaftliche Potenziale und Märkte

Die Hauptmärkte und Entwicklungsaktivitäten lagen bisher vor allem in den USA und Japan. In den USA wurden mit Unterstützung des Department of Energy (DOE) Speichersysteme weiterentwickelt, zum einen zur Netzstabilisierung aber auch für militärische Anwendungen. In Japan stand dagegen meist die Stabilisierung von Inselnetzen oder die Begrenzung der Übertragungsnetze, insbesondere in den Ballungsräumen im Vordergrund. Die Menge der verfügbaren und belastbaren Informationen zu den Investitions- und Betriebskosten von Speichersystemen zeigt jedoch, dass die Anwendung von Speichersystemen derzeit noch stark auf Nischenanwendungen beschränkt ist, bei denen die Kostenfrage nicht das wesentliche Entscheidungskriterium ist. Abbildung 2-13 zeigt die typischen Einsatzbereiche von Energiespeichersystemen, wobei die Anzahl der installierten Anlagen aller Systeme relativ gering ist.

Abbildung 2-13: Einsatzbereiche für Energiespeichersysteme [VRB Power]



Allerdings wurde aufgrund der Vorreiterrolle der EU beim Ausbau der erneuerbaren Energien das Thema Energiespeicher auch in Europa als wichtiges Zukunftsthema erkannt [EC 2005; ETP-SG 2007], wobei Deutschland innerhalb der EU wiederum eine Vorreiterrolle übernimmt. Ein Zusammenhang besteht dabei auch mit dem Aufkommen von Hybridfahrzeugen (siehe Fallstudie Hybride Antriebstechnik), die einen Stromspeicher erforderlich machen, auch wenn die Anforderungen nicht mit denen des Einsatzes von Stromspeichern im Netz vergleichbar sind. Mittelfristig müsste sich demnach in allen Ländern eine verstärkte Nachfrage nach Stromspeichertechnologien ergeben. In den Entwicklungs- und Flächenländern wird sich dabei eher die Frage der Netzstabilisierung bzw. der Inselversorgung stellen. In den Industrieländern wird der wesentliche Treiber der Entwicklung stärker der hohe Anteil erneuerbarer Energien an der Versorgung und die Versorgungssicherheit sein.

### 3 Internationaler Leistungsvergleich

Im internationalen Rahmen treten derzeit insbesondere japanische und amerikanische Unternehmen und Forschungseinrichtungen hervor.

#### 3.1 Politiken und Rahmenbedingungen

Sowohl in Japan (National Economic Development Office -NEDO) als auch in den USA (DOE) werden seit längerer Zeit Forschungsarbeiten zu Energiespeichersystemen gefördert. Spezielle Gesetzgebungen in Hinsicht auf Speichertechnologien sind aus keinem Land bekannt, allerdings haben Gesetzgebungen in anderen Bereichen Rückwirkungen auf die Speichertechnologien. So hat das von Kalifornien geforderte emissionsfreie Auto einen entsprechenden Entwicklungsdruck auf die Speichertechnologien ausgelöst. Die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Brennstoffzellen haben zudem die Wasserstoffspeichertechnologie stärker in den Mittelpunkt rücken lassen. In Deutschland sorgt das EEG für einen Boom bei der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, was wiederum Weiterentwicklungen im Bereich der Speichertechnologien erforderlich macht. Auch die Liberalisierung der Energiemärkte, die zu neuen Handelsstrategien geführt hat, löste eine Nachfrage nach Speichertechnologien aus. Entsprechend schwierig ist es, die Rahmenbedingungen und Politiken einzuordnen, da es derzeit weltweit keine eindeutig auf Speicher gerichtete Politiken oder Rahmenbedingungen gibt. Vielmehr ergibt sich der Einfluss stets indirekt als Ergebnis von Maßnahmen in anderen Bereichen.

#### 3.2 Akteure

Während im Bereich der etablierten Energiespeichertechnologien (u. a. Pumpspeicherkraftwerke) es sich meist um größere Unternehmen aus den Bereichen Hoch/Tiefbau oder Elektrotechnik/Maschinenbau handelt, die über ausreichendes Kapital und Erfahrung verfügen, werden neue Speichertechnologien (Supercaps, REDOX-flow, Schwungrad) eher von kleinen neu gegründeten Unternehmen, teilweise entstanden als Ausgründungen nach erfolgreichen Forschungsprojekten, vorangetrieben. Allerdings fehlen diesen kleinen Unternehmen häufig die erforderlichen Mittel, die Technologien bis zur Serienreife fortzuentwickeln. Entsprechend wird der Bereich der Entwicklung von Speichertechnologien derzeit noch weitgehend von Forschungseinrichtungen im In- und Ausland (u. a. Universitäten, Fraunhofer Institute, Max-Planck Gesellschaft) getragen, die dazu meist auf Fördermittel der öffentlichen Hand angewiesen sind. Dies gilt dabei sowohl in Europa als auch in den USA und Japan.

Eine entscheidende Bedeutung kommt auch den Energieversorgungsunternehmen zu. Sobald diese einen Bedarf an Stromspeichern in der Energieversorgung sehen und der Bereich als mittelfristig ertragreich gesehen wird, engagieren sich diese Unternehmen auch an der Umsetzung von Forschungsprojekten und der Erprobung. Entscheidender Akteur ist nicht zuletzt aber auch die Politik, die durch die Rahmenbedingungen für die fluktuierende Einspeisung von erneuerbarer Energie in die Stromnetze die Bedeutung von Stromspeichern beeinflusst.

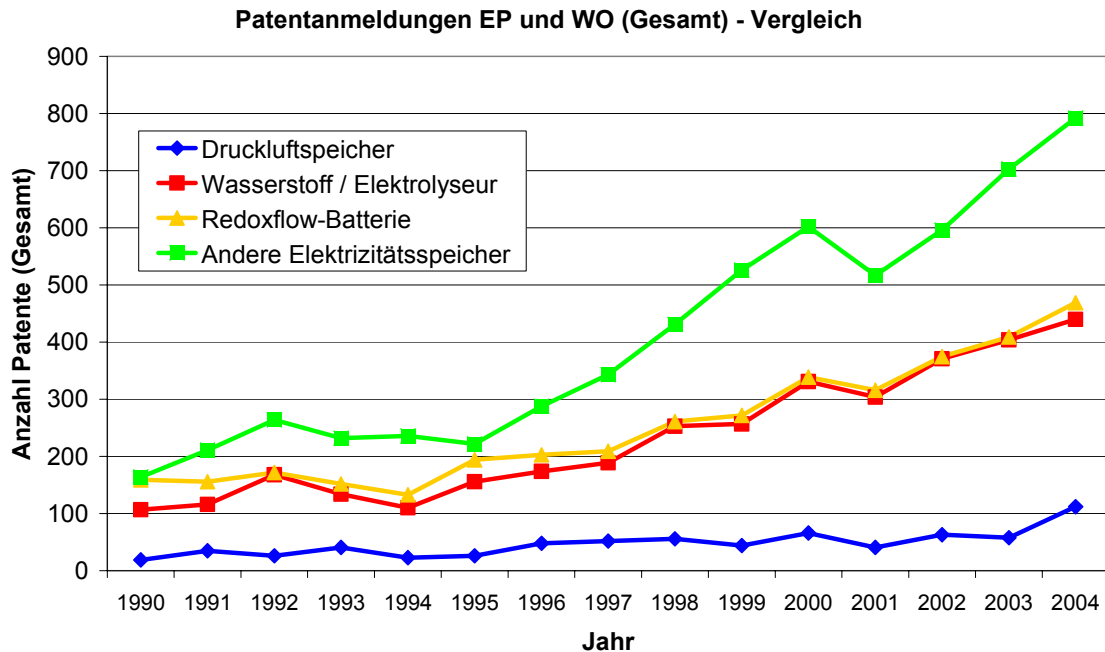
### **3.3 Innovationsindikatoren**

Als wesentlicher Innovationsindikator werden in dieser Untersuchung die Patentanmeldungen im Bereich der Elektrizitätsspeicher analysiert. Diese werden sowohl in Bezug auf einzelne Speichertechnologien als auch in Bezug auf regionale Aspekte hin untersucht. Zudem wird mit Hilfe der relativen Patentanteile der Speichertechnologien untersucht, ob dieses Themenfeld im Verhältnis zu den übrigen Patentanmeldungen ein dynamischeres Verhalten zeigt.

Abbildung 3-1 zeigt die Entwicklung der weltweiten Patentanmeldungen für die Stromspeichertechnologien CAES, H<sub>2</sub> und REDOX-flow sowie sonstige Speichertechnologien im Zeitverlauf. Insgesamt lässt sich ein relativ stetiger Anstieg der Patentanmeldedezahlen feststellen, wobei sich lediglich für die CAES-Systeme eine relativ konstante Anmeldezahl ergibt, die erst seit 2004 deutlich angestiegen ist. Dies ist möglicherweise auf entsprechende Forschungsprojekte und die Ankündigungen zum Bau einiger solcher Anlagen auf EU Ebene und in den USA zurückzuführen. Demgegenüber gab es seit Beginn der 90er Jahre erhebliche Forschungsaufwendungen im Bereich des Wasserstoffs und der Brennstoffzelle, von denen auch die REDOX-flow-Technologie profitieren konnte.



Abbildung 3-1: Entwicklung der weltweiten Patentanmeldungen im Bereich Elektrizitätsspeicher

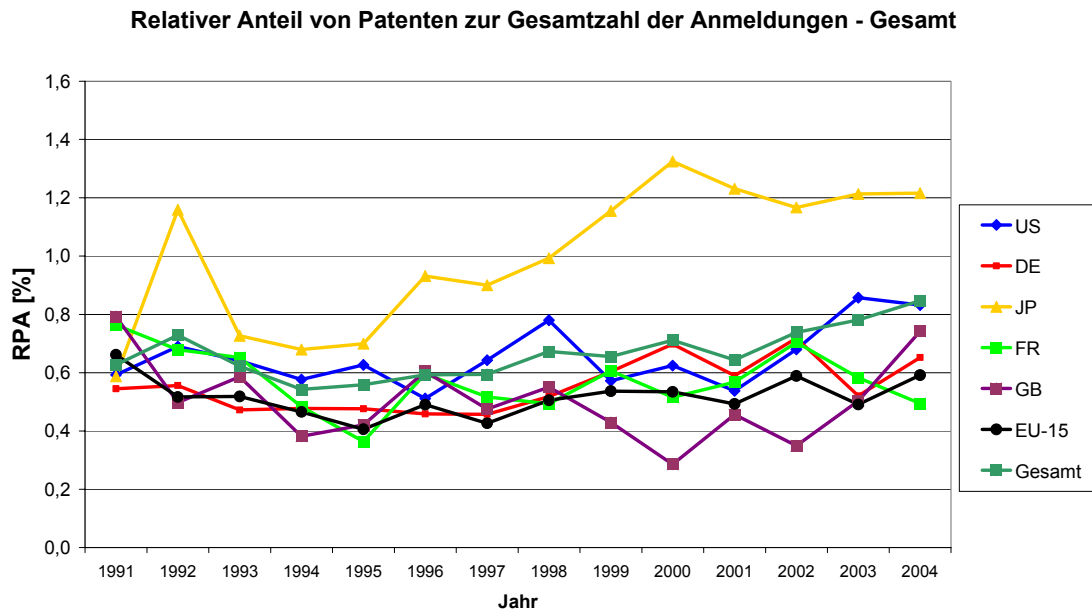


Betrachtet man die relativen Patentanteile<sup>1</sup> in den einzelnen Ländern, so fällt insbesondere auf, dass in Japan und den USA insbesondere Ende der 90er Jahre ein Anstieg des Anteils relevanter Patente zu verzeichnen ist. Seit Anfang 2000 steigt zudem der relative Patentanteil der Speichertechnologien weltweit, wobei man berücksichtigen muss, dass es sich um sehr geringe Anmeldezahlen handelt. Damit unterliegen die sich ergebenden Änderungen und Interpretationen großen Unsicherheiten. Auffällig ist zudem, dass insbesondere in Japan der relative Patentanteil der Speichertechnologien etwa doppelt so hoch ist als in den Ländern der EU und den USA ist. Dies dürfte vermutlich auf die Besonderheiten der japanischen Stromversorgung zurückzuführen sein (Insellage; 2 Netzfrequenzen), die den Einsatz von Stromspeichertechnologien schon früher erforderlich machten als im Rest der Welt.

<sup>1</sup> Der RPA (Relativer Patent-Anteil oder Revealed Patent Advantage) gibt die Spezialisierung eines bestimmten Landes im spezifischen Kompetenzfeld in Relation zu den Patentanteilen des Landes bei allen Patenten wieder. Ist der Patentanteil für das Kompetenzfeld überdurchschnittlich hoch, dann nimmt der RPA einen positiven Wert an. Dies bedeutet, dass innerhalb des betreffenden Landes überproportional viel im Kompetenzfeld patentiert wird und daher überdurchschnittliche nationale Kenntnisse bestehen. Für jedes Land  $i$  und jedes Kompetenzfeld  $j$  wird der RPA nach folgender Formel berechnet:

$$RPA_{ij} = 100 \cdot \tanh \ln \left[ \left( \frac{p_{ij}}{\sum_i p_{ij}} \right) / \left( \frac{\sum_j p_{ij}}{\sum_{ij} p_{ij}} \right) \right]$$

Abbildung 3-2: Relativer Anteil von Patentanmeldungen für den Bereich Elektrizitätsspeicher



In den folgenden Tabellen werden die Ergebnisse der Anmeldezahlen für die Zeiträume 1995-1999 und 2000-2004 zusammengefasst. Durch die Zusammenfassung der Anmeldezahlen mehrerer Jahre werden einzelne, möglicherweise zufällige Sprünge bei den Anmeldezahlen weitgehend kompensiert. Tabelle 3-1 zeigt die Anmeldezahlen für das Themenfeld "Elektrizitätsspeicher allgemein", das mit 10 bis 20 Anmeldungen pro Jahr nur geringe Fallzahlen aufweist. In diesem Teilbereich ergeben sich vergleichbare Werte für die USA, Japan und Deutschland, wobei lediglich für Japan eine deutliche Zunahme der Anmeldezahlen zu erkennen ist.

Tabelle 3-1: Patentanmeldungen für "Elektrizitätsspeicher allgemein" (EP+WO)<sup>2</sup>.

Jahre		DE	FR	GB	EU-15	US	JP	Gesamt
1995-1999	Anzahl	14	3	1	22	14	9	53
2000-2004	Anzahl	23	1	2	38	21	43	130
1995-1999	Anteil [%]	26,4	5,7	1,9	41,5	26,4	17,0	
2000-2004	Anteil [%]	17,7	0,8	1,5	29,2	16,2	33,1	

<sup>2</sup> Für die Analyse wurden die Anmeldungen bei der World Intellectual Property Organization (WIPO) und des Europäischen Patentamtes (EPA) gemeinsam ausgewertet.

Betrachtet man einmal die drei Speichertechnologien "CAES, H<sub>2</sub> und REDOX", so ergibt sich ein vergleichbares Bild, allerdings mit deutlich größeren Anmeldezahlen (Tabelle 3-2). Innerhalb der EU stammen wiederum mehr als die Hälfte der Anmeldungen aus Deutschland. Ein Zeichen dafür ist, dass Deutschland innerhalb der EU im Bereich der Energiespeicherforschung führend ist. Mit den Entwicklungen in den USA und Japan tut sich Deutschland derzeit jedoch anscheinend schwer, denn hier haben sich die Anmeldezahlen wesentlich stärker erhöht als in Deutschland.

Tabelle 3-2: Patentanmeldungen für "CAES, H<sub>2</sub> und REDOX" (EP+WO)

Jahre		DE	FR	GB	EU-15	US	JP	Gesamt
1995-1999	Anzahl	263	87	98	583	542	319	1573
2000-2004	Anzahl	389	133	115	799	875	732	2701
1995-1999	Anteil [%]	16,7	5,5	6,2	37,1	34,5	20,3	
2000-2004	Anteil [%]	14,4	4,9	4,3	29,6	32,4	27,1	

Ein vergleichbares Ergebnis ergibt sich auch für den Bereich "Andere Energiespeicher" (Tabelle 3-3). Dominiert von den USA und Japan, mit dem Verfolger Deutschland in gebührendem Abstand.

Tabelle 3-3: Patentanmeldungen für "Andere Elektrizitätsspeicher" (EP+WO)

Jahre		DE	FR	GB	EU-15	US	JP	Gesamt
1995-1999	Anzahl	242	105	62	543	630	513	1810
2000-2004	Anzahl	454	147	78	898	939	906	3210
1995-1999	Anteil [%]	13,4	5,8	3,4	30,0	34,8	28,3	
2000-2004	Anteil [%]	14,1	4,6	2,4	28,0	29,3	28,2	

Entsprechend lässt sich ableiten, dass Entwicklungen einzelner Speichertechnologien auch ihre Ausstrahlung auf andere Speichertechnologien haben bzw. dass, wenn es einen Markt für Speichertechnologien gibt, dies Forschung und Entwicklung fördert und zwar aufgrund der Vielzahl der Anwendungsfälle in der ganzen Breite der Speichertechnologien.

### **3.4 Außenhandelsindikatoren**

Aufgrund des breiten Technologiespektrums der Speichertechnologien bei gleichzeitig noch geringen Umsätzen mit Speichertechnologien, lassen sich Außenhandelsindikatoren für diesen Bereich nicht sinnvoll definieren. Relevante Sektoren sind sicher der Bereich der Chemischen Industrie (u.a. REDOX, H<sub>2</sub>), des Maschinenbaus (u. a. CAES, Schwungrad) und der Elektrotechnik (u.a. Generatoren, Steuerung). Aufgrund der derzeitigen geringen Nachfrage nach Energiespeichertechnologien für die Anwendungen im Stromnetz, dürften diese Technologien jedoch sowohl innerhalb der Produktionsstatistik als auch innerhalb der Außenhandelsstatistik keine Rolle spielen. Festzuhalten bleibt jedoch, dass Energiespeicher vergleichbar den Stromerzeugungstechnologien ein hohes Exportpotenzial aufweisen, da es sich bei den Speichersystemen um hochkomplexe und individuell auf den Anwendungsfall zu parametrisierende Lösungen handelt, bei denen der Planungs- und Entwicklungsanteil ein wesentlicher Kostenblock sein dürfte.

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Stromspeichertechnologien sind aufgrund von Speicherverlusten während der Speicherung der Energie häufig nur zweite Wahl, denn in vielen Fällen ist es weit effizienter, den Ausgleich zwischen Stromangebot und Stromnachfrage über Erzeugungs- oder Lastmanagement zu realisieren und auf Speichertechnologien zu verzichten. Allerdings steigt durch den Einstieg in eine nachhaltigere Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien der Bedarf nach weiteren Ausgleichsmöglichkeiten, da gleichzeitig ein nennenswerter Anteil der regelbaren Erzeugung vom Netz geht.

Da Deutschland im Bereich der erneuerbaren Energien innerhalb der EU eine Vorreiterrolle einnimmt, wurde der Bedarf an Speichertechnologien in Deutschland am frühesten spürbar. Entsprechend ist Deutschland derzeit in diesem Bereich recht gut positioniert. Nicht übersehen werden sollte dabei jedoch die Tatsache, dass insbesondere die USA und Japan noch einen kleinen Schritt voraus zu sein scheinen, was insbesondere in Hinblick auf die Exportpotenziale für diese Technologien wichtig ist. Deutschland muss sich demnach vor allem an diesen außereuropäischen Wettbewerbern orientieren, wenn es nicht den Anschluss bzw. die Technologieführerschaft in einzelnen Bereichen verlieren will.

### 4.1 SWOT Analyse für Deutschland und Europa

Die Stärken Deutschlands liegen derzeit insbesondere in der Qualifikation des Personals und der großen bearbeiteten Technologiebreite. Zudem gibt es ein günstiges politisches Umfeld für diese Technologien, die im Windschatten der erneuerbaren Energien von den Entwicklungen profitieren. Außerdem wächst neben der Funktion des reinen Belastungsausgleichs auch das Bewusstsein für die weiteren Vorteile durch den Einsatz von Speichertechnologien, z. B. durch erhöhte Versorgungssicherheit und dem Ersatz des Netzausbaus. Tabelle 4-1 fasst die Ergebnisse der Stärken-Schwächen-Analyse zusammen. Größter Hemmschuh bei der breiten Einführung von Speichertechnologien ohne Nutzung natürlicher Gegebenheiten (u. a. Pumpspeicher) ist der schlechte Speicherwirkungsgrad. Bei allen neuartigen verfügbaren Technologien werden typischerweise nur Systemwirkungsgrade um die 50 % erzielt. Zudem stellt die komplexe Einbindung der Stromspeicher in die Netzinfrastruktur und die Steuerung der Beladungs- und Entladungszyklen eine große technische Herausforderung dar, die derzeit noch nicht optimal gelöst ist. Ähnliches gilt für die erforderliche Qualifikation des Personals, das neben elektrotechnischen und maschinenbautechnischen Kenntnissen, verstärkt auch Kenntnisse chemischer Prozesse und Verfahren mitbringen muss. Mit dem gleichen Problem ist dabei auch die Kraftwerksindustrie konfrontiert, da auch im normalen Kraftwerk der chemische Anteil (Speisewasseraufbereitung, Rauchgasreinigung, CO<sub>2</sub>-Abscheidung) immer stärkere Bedeutung erhält.

Tabelle 4-1: SWOT Analyse Energiespeichertechnologien

Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derzeit gute Positionierung im internationalen Entwicklungswettbewerb</li> <li>• Gut ausgebildete Ingenieure</li> <li>• Vielfältige Anwendungsfelder für Speichertechnologien</li> <li>• Breites Technologieportfolio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weltweit steigender Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung</li> <li>• Weltweit wachsende Städte in Verbindung mit Netzengpässen</li> <li>• Wert der Versorgungssicherheit</li> </ul>
Schwächen	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlechter Gesamtwirkungsgrad</li> <li>• Hohe Investitionskosten bei begrenzter Anzahl von Speicherzyklen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Komplexe Gesamtsysteme</li> <li>• Mangel an Fachkräften mit Bereichsübergreifenden Kenntnissen</li> <li>• Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur Steuerung von Angebot und Nachfrage</li> </ul>

## 4.2 Perspektiven bis 2020

Die Stromspeichertechnologien werden in den nächsten 15 Jahren weiter einen kontinuierlichen Aufschwung erfahren. Im Bereich der netzbasierten Speichersysteme erscheinen Speicher auf Basis von REDOX-flow-Systemen, CAES und Wasserstoff als attraktive Optionen, insbesondere da sich bei diesen Systemen Leistung und Speichergehalt unabhängig voneinander skalieren lassen. Wesentlich ist für diese Technologien jedoch eine deutliche Verbesserung der Wirkungsgrade, andernfalls werden sich diese Technologien nicht in der Breite am Markt etablieren können. Der Erfolg von Wasserstoffsystemen wird dabei zudem von den Fortschritten bei der Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft abhängen. Gemessen an der Ausgangssituation ist Deutschland gut positioniert, um im Bereich der Stromspeichertechnologien eine wesentliche Rolle als Technologielieferant einnehmen zu können. Allerdings bedarf es bis 2020 erheblicher zusätzlicher Anstrengungen im Bereich Forschung und Entwicklung, um bis 2020 zu wirtschaftlichen und technologisch zuverlässigen Systemen zu kommen. Hier gilt es insbesondere den noch bestehenden Vorsprung von Japan und den USA zu verkleinern.

## 4.3 Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

Deutschland sollte aufgrund der zu erwartenden Potenziale im Bereich der Stromspeichertechniken seine Forschungsanstrengungen intensivieren. Da die Entwicklung zudem häufig von kleineren Unternehmen getragen wird, die nur über beschränkte finanzielle Reserven verfügen, sollte neben der Grundlagen- und anwendungsorientierten

Forschung auch die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben finanziell unterstützt werden, da nur mit solchen Systemen die zuverlässige Funktion der Systeme überprüft werden kann. Sinnvoll wäre dabei zudem die Beteiligung von Energieversorgungsunternehmen als die künftigen Abnehmer solcher Systeme.

Sinnvoll könnte möglicherweise eine Weiterentwicklung des EEG oder des Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKModG) in der Form sein, dass Systeme, die mit einem Stromspeicher ausgestattet sind, einen Zuschlag auf die Vergütungssätze erhalten. Diese Regelung könnte vergleichbar den Technologiezuschlägen im EEG (z. B. für zusätzliche Wärmenutzung) bzw. im KWKModG (z. B. für die Brennstoffzellen) erfolgen.

Im Bereich der Forschung und Entwicklung sollten dabei die folgenden Kernfragen im Bereich der Stromspeichertechnologien im Vordergrund stehen:

- Erhöhung der Systemwirkungsgrade.
- Erhöhung der Standfestigkeit (Zyklenzahl).
- Steigerung der Energiespeicherdichten.
- Reduktion der Systemkosten.
- Zusammenwirken von Kurzzeit- und Langfristspeichern.

Da sich derzeit noch keine Speichertechnologie als eindeutig günstigste Technologie herauskristallisiert hat, sollte der Förderansatz möglichst breit sein und eine Vielzahl unterschiedlicher Speichertechnologien berücksichtigen. Zudem sollte geprüft werden, in welchen Bereichen durch die Förderung von Forschungsk Kooperationen mit den USA und Japan weiterer Nutzen für Deutschland erzielt werden können. Ob diese Länder gleichfalls Interesse an einer Kooperation haben ist dabei jedoch offen. Diese Bi- bzw. Trinationale Förderung ist insbesondere auch deshalb wichtig, da einer der großen Fördermittelgeber, die Europäische Union, gerade diese Kooperationen nicht beinhaltet, von denen deutsche Forschungseinrichtungen und Unternehmen am stärksten profitieren könnten.

## 5 Literatur

Abboud; Makansi 2002: Energy Storage. The Missing Link in the Electricity Value Chain. Published by the Energy Storage Council

BINE; 2007: Druckluftspeicher-Kraftwerke. BINE Projektinfo Energie Nr. 05/07. BINE Informationsdienst, Karlsruhe.

Crotogino, F.; 2006: Druckluftspeicher-Kraftwerke zum Ausgleich fluktuierender Windenergie / Stand der Technik und neue Entwicklungen. KBB Underground Technologies, Hannover.

DENA; 2005: DENA-Netzstudie Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und offshore bis zum Jahr 2020; im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (DENA), Köln.

DTI; 2004: Review of Electrical Energy Storage Technologies and Systems and of their Potential for the UK, U.K.

EC; 2005: Towards Smart Power Networks. Lessons learned from European research FP5 projects. European Commission RTD, Publication EUR 21970.

ETP-SG (European Technology Platform Smart Grids); 2007: Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission RTD, Publication, EUR 22580.

Eurosolar; 2006: First International Renewable Energy Storage Conference (IRES I). „The case of energy autonomy: Storing Renewable Energies“, 30./31. Oktober, Gelsenkirchen.

Frost, 2004: Advanced energy storage technologies. Frost and Sullivan Technical Insights.

INVESTIRE; 2002: Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and recommended R&D strategy. INVESTIRE-NETWORK; Project funded by the European Community under the 5th Framework Programme (1998 -2002).

IERE o.J.: International Electric Research Exchange, <http://www-iere.dcc.co.jp>



Jossen, A.; Sauer, D.U.; 2006: Advances in Redox-Flow Batteries. First International Renewable Energy Storage Conference, 30./31. October 2006 Gelsenkirchen/Germany

LLNL; o.J: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), California., USA, o.J. [www.llnl.gov](http://www.llnl.gov).

Nourai; 2004: Comparison of the Costs of Energy Storage Technologies for T&D Applications. Presentation based on EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for T&D Applications American Electric Power.

Regenesys: [www.regenesys.com](http://www.regenesys.com) (Hinweis: Die Webseite wurde nach der Übernahme durch VRB Power im September 2004 vom Netz genommen).

Spahit; Balzer; Münch; Hellmich; 2006: Speichermöglichkeiten der Windenergie, EW, Vol. 109, Nr. 25, S.46-50.

Tübke, Jens, 2007: Lithium-Ion-System.  
[www.ict.fraunhofer.de/deutsch/scope/ae/ion.html](http://www.ict.fraunhofer.de/deutsch/scope/ae/ion.html).

Vattenfall; 2006\_ Energie aus Wasserkraft – Strom erzeugen nach Bedarf  
[http://www.vattenfall.de/www/vf/vf\\_de/Gemeinsame\\_Inhalte/DOCUMENT/154192\\_vatt/Bergbau\\_und\\_Kraftwerke/P0275299.pdf](http://www.vattenfall.de/www/vf/vf_de/Gemeinsame_Inhalte/DOCUMENT/154192_vatt/Bergbau_und_Kraftwerke/P0275299.pdf)

VRB Power Systems: Vancouver, Kanada. [www.vrbpower.com](http://www.vrbpower.com)

Wietschel; Hasenauer; Vicens; Klobasa; Seydel; 2006: Ein Vergleich unterschiedlicher Speichermedien für überschüssigen Windstrom. ZfE . Zeitschrift für Energiewirtschaft Vol.30, Nr. 2, S.103-114

Wikipedia, o.J.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>

In der Reihe „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind bisher die folgenden Bände erschienen:

- |       |  |
|-------|--|
| 01/07 | Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation |
| 02/07 | Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen        |
| 03/07 | Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung                                       |
| 04/07 | Zukunftsmarkt CO <sub>2</sub> -Abscheidung und –Speicherung                        |
| 05/07 | Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung                                       |
| 06/07 | Zukunftsmarkt Solares Kühlen   |
| 07/07 | Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren                                      |
| 08/07 | Zukunftsmarkt Biokunststoffe   |
| 09/07 | Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe  |
| 10/07 | Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik  |
| 11/07 | Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement              |
| 12/07 | Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie                     |
| 13/07 | Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung   |

Alle Veröffentlichungen können kostenlos auf [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de) heruntergeladen werden.