



STE Preprint

06/2011

Energiespeicher

W. Hennings, J. Linssen, P. Markewitz, S.Voegele

Institut für Energie- und Klimaforschung
Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

Energiespeicher

Wilfried Hennings, Jochen Linssen, Peter Markewitz, Stefan Vögele

1) Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Energy and Climate Research - Systems Analysis and Technology Evaluation (IEK-STE), D-52425 Jülich, Germany

Executive Summary

Die forcierte Systemintegration von erneuerbaren Energien und die Erhöhung der Energieeffizienz sind zwei wesentliche Säulen des Energiekonzepts der Bundesregierung. Der Ausbau von Energiespeichern wird hierbei als ein zentrales Schlüsselement gesehen, was auch durch aktuelle Szenarien bestätigt wird. Der aktuelle Fokus richtet sich vor allem auf die stationäre und mobile Speicherung von Elektrizität. Die Bedeutung der Energiespeicherung ist jedoch sehr viel weiter zu fassen. So ermöglichen insbesondere thermische Energiespeicher eine effizientere Energienutzung, was zu einer Reduktion des Energieverbrauchs führt.

Keywords

Energiespeicher, Thermische Speicher, Elektrische Speicher

Contribution to

Brennstoff-Wärme-Kraft Heft 5 (2011)

Inhaltsverzeichnis

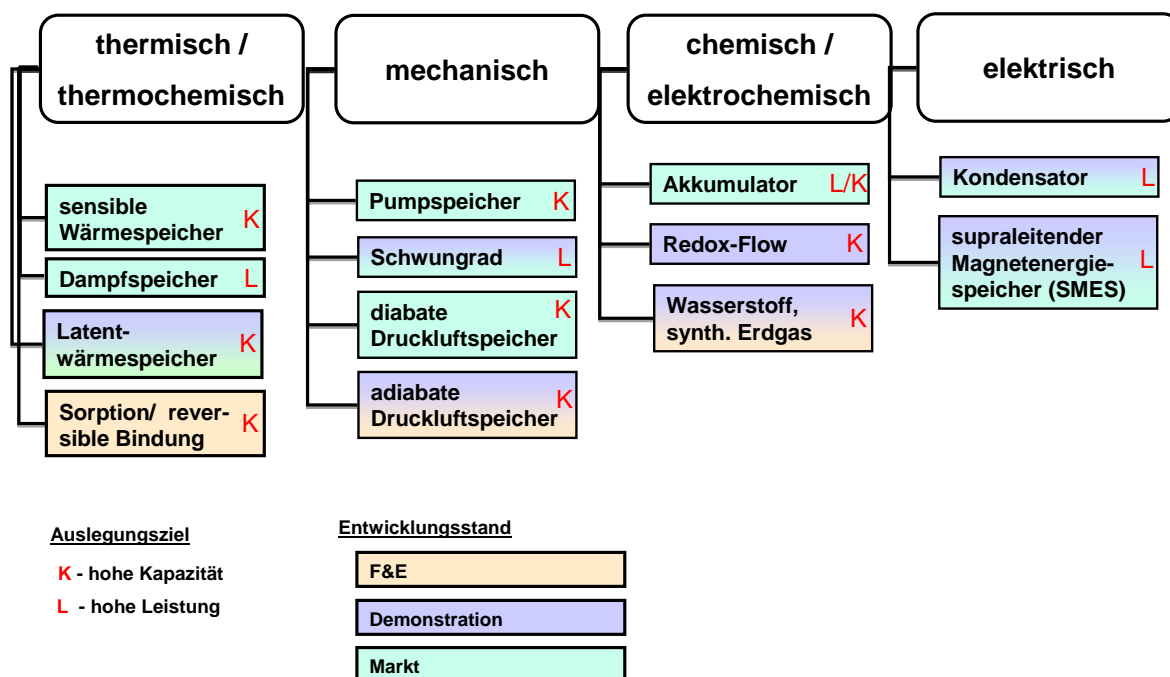
I.	Vorspann.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
II.	Einleitung	1
III.	Stromspeicher	3
IV.	Wärmespeicher	7
V.	Chemische Energiespeicher	9
VI.	Trend 2010.....	11
VII.	Quellen.....	11

I. Einleitung

Die Speicherung von Energie ist in vielen Bereichen der Energieversorgung Stand der Technik und findet im dezentralen als auch im großen zentralen Maßstab Anwendung. Dies gilt sowohl für portable, mobile als auch stationäre Anwendungen. Während beim portablen und mobilen Einsatz vorwiegend die netzunabhängige Bereitstellung von elektrischer Energie im Vordergrund steht, fokussiert die stationäre Anwendung auf die Zwischenspeicherung von Strom und Wärme. Derzeit sind intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der mobilen Anwendung bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterietechnik und im Bereich der stationären Stromspeicherung mit hohen Kapazitäten z. B. adiabate Druckluftspeicher oder Redox-Flow-Batterien zu beobachten. Die technischen und wirtschaftlichen Anforderungsprofile unterscheiden sich je nach Anwendung signifikant.

Die derzeit in der Anwendung und Entwicklung befindlichen Energiespeicheroptionen lassen sich nach den zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien der Energiespeicherung strukturieren (vgl. Abbildung 1). Die Speicherung der Energie erfolgt durch thermische, chemische, mechanische oder elektrische Effekte mit entsprechenden Umwandlungsschritten. Der Entwicklungsstand der angeführten Speichertechniken unterscheidend sich je nach Einsatzgebiet deutlich.

Abb. 1: Physikalische Einteilung von Energiespeicheroptionen



Quelle: [Wietschel et al., 2010], [Oertel, 2008] und eigene Darstellung IEK-STE 2011

Wichtige technische Auslegungskriterien der Speichersysteme für unterschiedliche Einsatzprofile sind die Energiedichte, die Speicherkapazität, die Lebensdauer (Zyklus- und kalendarische Lebensdauer), die ein-/ausspeisbare Leistung, die Leistungsdynamik, die Ruheverluste und der Speichernutzungsgrad. Die Wirtschaftlichkeit von Speichereinrichtungen wird wesentlich durch die Investitionen, die Betriebskosten inklusive Wartungsaufwand sowie durch die erwartete Lebensdauer bestimmt. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich verschiedener Speichersysteme mit einer Auswahl an technischen und wirtschaftlichen Kriterien.

Tab. 1: Vergleich von technischen und wirtschaftlichen Speicherkriterien

		spez. Kapazität [kWh/t]	Leistung [MW]	Speichernutzungsgrad	Speicherdauer	Investitionen [€/kWh]	Anmerkung
Mechanisch	Pumpspeicher	1	1–1.000	80%	Tag - Monate	50	hohe Nutzungsgrade und Kapazitäten, begrenztes Potenzial in D, hoher Flächenbedarf
	Druckluftspeicher	2 kWh/m ³	300	40–70%	Tag	400–800	Diabate Druckluftspeicher: Bedarf an fossilen Energien; diabate Speicherung: notwendige Wärmezwischenspeicherung
Elektro-chemisch	Bleisäure-Batterien	40	skalierbar	85%	Tag - Monat	200	geringe Zyklusfestigkeit und niedrige spez. Kapazität, niedrige Kosten im Vergleich zu anderen Batterie-Systemen
	Li-Ion-Batterien	130	skalierbar	90%	Tag - Monat	1000	Hohe spezifische Leistungen, hohe Kosten, Potenzial zur Kostenreduktion vorhanden
	NaS-Batterien	110	skalierbar	85%	Tag	300	Hohe Ruheverluste, hohe Gefährdungspotenziale
	Redox-Flow-Batterien	25	0,01–10	75%	Tag - Monat	500	Hohe Speicherkapazitäten, problematische Umweltverträglichkeit
Thermisch	sensible Wärmespeicher	10–50	0,001–10	50–90%	Tag - Jahr	0,1	Markt-etabliert, niedrige Kosten; niedrige spezifische Speicherkapazität
	Latent-Wärmespeicher	50–150	0,001–1	75–90%	Stunde - Woche	10–50	höhere Kosten im Vergleich zu sensiblen Wärmespeichern; höhere spezifische Speicherkapazitäten
	Thermochemische Speicher	120–250	0,01–1	100%	Stunde - Tag	8–40	
Chemisch	Wasserstoff	30.000	0,001–1	25–50%	Tag-Jahr	1000 €/kW	sehr hohe Speicherkapazitäten; niedriger elektrische Speichernutzungsgrade, hohe Kosten

II. Stromspeicher

Die **Anforderungen** an Stromspeicher unterscheiden sich deutlich je nach Verwendungszweck. Bei *portablen* Anwendungen (z. B. Mobiltelefone, Elektrowerkzeuge) ist geringes Gewicht und Volumen gefragt. Hier werden typischerweise Akkumulatoren eingesetzt. Bei *mobilen* Anwendungen wie z. B. elektrisch angetriebene Fahrzeuge wird ebenfalls ein geringes Gewicht und Volumen des Speichers benötigt. Die Anforderungen bezüglich spezifischer Kapazitäten und Leistungen sind deutlich höher als bei portablen Anwendungen, so dass hier die Kosten als maßgeblich begrenzender Faktor zu nennen sind. Bei *stationären* Anwendungen sind Gewicht und Volumen der Speicher eher nachrangig und Investitionen, Verfügbarkeit und Lebensdauer entscheidend für die Technologieauswahl. Die Anwendungen reichen von der Notstromversorgung ausfallkritischer Systeme (z. B. Rechenzentren, Telekommunikation oder Kernkraftwerke) bis zum Ausgleich der Schwankungen von Stromverbrauch und Einspeisung in das Stromversorgungsnetz.

Während die derzeit verfügbaren Stromspeicher die Anforderungen portabler Anwendungen bereits in ausreichendem Maß erfüllen, besteht für mobile Anwendungen noch Entwicklungsbedarf. Dieses Einsatzgebiet erfordert eine hohe Leistung und Kapazität bei geringem Volumen und Gewicht. Derzeit erfüllen nur elektro-chemische Speicher diese Anforderungen, und sie finden daher im mobilen Bereich fast ausschließlich Anwendung. Für den Pkw-Bereich sind hohe Reichweiten und damit hohe spezifische Energiedichten entscheidend. Derzeit konzentrieren sich die Entwicklungen daher auf Lithium-Ionen-Akkumulatoren, die momentan noch mit hohen Kosten verbunden sind. Entwicklungsbedarf besteht in Richtung weiterer Erhöhung der Kapazität bei geringeren Volumen und Gewichten und Kosten.

Im Stromversorgungsnetz werden entsprechend der benötigten Reaktionszeit und Einsatzdauer der Speicherung unterschiedliche Speicherarten eingesetzt. Sofort ab Eintritt eines Leistungsungleichgewichts wirken die rotierenden Massen der ans Netz angeschlossenen Generatoren als Energiespeicher, bis die Leistungsregelung die Erzeugung entsprechend angepasst hat. Wird mehr thermische Kraftwerkskapazität durch Einspeisungen über Halbleiterumrichter ersetzt, müssen die dann fehlenden rotierenden Massen z. B. durch Schwungradspeicher oder durch aufwändigere Umrichter mit „virtueller Schwungmasse“ [Boxleitner & Brauner, 2009] ersetzt werden, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Zum Ausgleich der tageszeitlichen Schwankungen des Stromverbrauchs werden größere Kapazitäten benötigt. Hier werden in Deutschland vorwiegend Pumpspeicherkraftwerke und ein Druckluftspeicherkraftwerk eingesetzt. Auch der Einsatz von Redox-Flow-Batterien ist möglich, wie Pilotprojekte z. B. in Japan und Großbritannien zeigen.

Noch größere Kapazitäten erfordert der Ausgleich der jahreszeitlichen Schwankungen von Wind- und Sonnenenergie. Um jederzeit den erzeugten Windstrom speichern und entsprechend dem Strombedarf einspeisen zu können, würde eine Speicherkapazität von 20 % bis 27 % der jährlichen Windstromerzeugung benötigt [Popp, 2010]. Bei einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien würden für den jahreszeitlichen Ausgleich sehr große Speicherkapazitäten benötigt. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) kommt für sein Szenario mit einer Netto-Selbstversorgung bei einer zu 100 % erneuerbaren Stromversorgung auf einen Speicherbedarf von 22 TWh (4 % des Jahres-Stromverbrauchs in Deutschland). Ein solch großer Bedarf an Speichern übersteigt die in Deutschland und den Alpenländern nutzbaren Speicherseen und könnte nur unter Nutzung von norwegischen Speicherkraftwerken zur Verfügung gestellt werden. Hierzu müsste die Leitungskapazität zwischen Deutschland und Norwegen auf insgesamt 7 GW erhöht werden [SRU, 2010].

Im Folgenden wird eine Auswahl an Technologien zur Speicherung von elektrischem Strom sowie ihre Funktionsweise skizziert. Weltweit als auch in Deutschland sind **Pumpspeicherwerke** (PSW) die Speichertechnik mit den höchsten installierten Kapazitäten. Derzeit gibt es in Deutschland über 30 PSW mit einer Gesamtleistung von knapp 7 GW und einer nutzbaren Speicherkapazität von ca. 40 GWh [Deutsche Energie-Agentur et al., 2010]. Große Speicherleistungen und Kapazitäten sind in Europa ebenfalls in Österreich, der Schweiz und Norwegen installiert. Die weltweite Speicherleistung aller errichteten PSW beträgt ca. 90 GW. [ESA, 2011]. Die elektrische Energie wird in PSW durch Pumpen von Wasser in einem höher gelegenen Speicherbecken in potentielle Energie umgewandelt. Die potentielle Energie kann mit Hilfe einer Turbinen-/Generatoreinheit wieder in elektrische Energie zurück gewandelt werden. Typische Ausspeisezeiten bewegen sich hier im Bereich einiger Stunden. International werden auch Pumpspeicherwerke mit großen Kapazitäten betrieben, die einen saisonalen Ausgleich von Erzeugungsschwankungen erlauben. Das größte und jüngste PSW in Deutschland befindet sich derzeit am Standort Goldisthal mit einer Turbinenleistung von 1060 MW und einer nutzbaren Speicherkapazität von 8480 MWh. Die großtechnisch angewendeten Pumpspeicherwerke haben auf Grund des hohen Flächenbedarfs, der Anforderungen an geeignete Standorte in Bezug auf Höhenprofil und Bodenbeschaffenheit wesentlichen Auswirkungen auf Umwelt und Natur. Damit sind die Möglichkeiten des weiteren Ausbaus von Pumpspeicherkapazitäten in Deutschland begrenzt. Derzeit plant die Schluchseewerk AG in Atdorf, Schwarzwald den Neubau eines Pumpspeicherwerkes mit einer Leistung von 1.400 MW und Investitionen in Höhe von ca. 1 Mrd. Euro. Das Raumordnungsverfahren ist bereits eingeleitet und der Baubeginn für das Jahr 2013 geplant. Mit der Fertigstellung des PSW wird im Jahr 2019 gerechnet. [Schluchseewerk, 2011]

Weiterhin großtechnisch national als auch international angewendet wird die **Druckluftspeicherung**. Prinzipiell wird zwischen diabater und adiabater Druckluftspeicherung unterschieden. Die erst genannte Variante zeichnet sich durch eine Kombination eines Druckluftspeichers mit einer Gasturbinenanlage aus. Durch die Nutzung eines Druckluftspeichers, in der Regel eine unterirdische Kaverne, kann der Luftkompressionsprozess des Verdichters zeitlich vom Entspannungsprozess in der Turbine und somit von der Stromerzeugung entkoppelt werden. Die Kompression findet dabei zu Schwachlastzeiten statt. Dichtigkeitsprobleme der geologischen Formationen und eine Löslichkeit der komprimierten Luft im Wasser verursachen Druckverluste, welche sich negativ auf den Lade-/ Endladewirkungsgrad bemerkbar machen. Der Wirkungsgrad der diabaten Druckluftspeicherung kann nicht dem der Speichernutzung gleich gesetzt werden, da in der Brennkammer zusätzlich Brennstoff-Energie zugeführt werden muss. Der diabate Druckluftspeicher hat bis jetzt zwei großtechnische Anwendungen weltweit in Huntorf (1978), Deutschland und in McIntosh (1991), USA gefunden. Die Anlage in Huntorf war die erste großtechnische Druckluftspeicheranlage weltweit. Als Druckluftspeicher werden 2 Kavernen aus Salzgestein zur Speicherung der Druckluft benutzt. Die Anlage weist eine elektrische Entnahmeleistung von 320 MW über rund 2 h auf. [Zunft, 2007]

Als Weiterentwicklung des diabaten Druckluftspeichers ist die adiabate Speicherung zu sehen. Sie besteht aus einer Kompressions-/ Expansionseinheit, einem Wärmespeicher und einem Druckluftspeicher, der in der Regel ebenfalls aus einer luftdichten geologischen Speicherformation besteht. Es handelt sich hierbei im Gegensatz zur diabaten Druckluftspeicherung um eine reine Speichertechnik. Wichtiger Bestandteil einer solchen Speicheranlage ist das Wärmemanagement bzw. der Wärmespeicher eines solchen Systems, um die bei der Kompression entstehenden Wärme zu nutzen bzw. zu speichern. Im Gegensatz zur diabaten Speicherung wird die notwendige Wärmezufuhr beim Expansionsprozess der Luft durch den Wärmespeicher bereitgestellt. Auf eine externe Zufeuerung von Brennstoff kann somit verzichtet werden. Beide Speichertypen (diabat / adiabate) sind schwarzstartfähig. Die Aussolung von Kavernen und deren Nutzung ist ein wesentlicher Eingriff in die Umwelt. Diese Vorgänge müssen einer sorgfältigen Überprüfung unterzogen werden, sind jedoch als Stand der Technik anzusehen. Zu Beginn des Jahres 2010 wurde in Deutschland das Gemeinschaftsprojekt „ADELE“ mit Forschungs- und Industriepartner gestartet, dessen Ziel die Entwicklung eines adiabaten Druckluftspeicherkraftwerks bis zur Angebotsreife für eine erste Demonstrationsanlage ist. [RWE Power, 2010]

Bei den **supraleitenden magnetischen Energiespeichern** (SMES) wird im magnetischen Feld einer supraleitenden Spule Energie gespeichert. Durch die Supraleitung lassen sich sehr hohe Entnahmeleistungen realisieren, da diese hohe Stromdichten und damit hohe Induktionen ermöglichen. Diese Art der Speicherung kann elektrische Energie direkt ohne Umwandlung in eine andere Energieform speichern. Die

Supraleitung erfordert die Bereitstellung sehr tiefer Temperaturen und damit auch zusätzliche Energieaufwendungen für die Kühlung der Spule. Bisher technisch realisierte Anlagen sind in der Mehrheit sogenannte „Mikro-SMES“ Anlagen. Dieser Speichertyp zeichnet sich durch Leistungen im MW-Bereich und Entladezeiten im Sekundenbereich aus. SMES-Anlagen werden hauptsächlich eingesetzt, um die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Die Vorteile der supraleitenden magnetischen Energiespeicher sind der hohe Leistungsgradient (bis 10 MW/s) und der gute Be-/Entladewirkungsgrad. Die Speichertechnik wird heute bereits eingesetzt, eignet sich aber nicht zur Zwischenspeicherung größerer Energiemengen sondern ermöglicht die kurzzeitige Bereitstellung hoher Leistungen. [Oertel, 2008]

Bei **Schwungradspeichern** wird die elektrische Energie über eine elektrische Elektromotor/ Generatorinheit in Rotationsenergie eines Schwungradkörpers umgewandelt und wieder rückgewandelt. Die Menge der eingespeicherten Energie hängt vom rotatorischen Massenträgheitsmoment und der Drehzahl des Schwungrades ab. Die zuführbare bzw. entnehmbare Energie eines Schwungrades ist durch seine möglichen maximalen und minimalen Betriebsdrehzahlen begrenzt. Moderne Schwungradspeicher setzen auf hohe Umfangsgeschwindigkeiten. Vorteile dieser Technik sind eine hohe Lebensdauer, ein geringer Wartungsaufwand und kurze Reaktionszeiten (Millisekunden Bereich). Nachteilig wirkt sich die mechanisch hoch beanspruchte Kreisellagerung aus. Haupteinsatzgebiet ist die kurzzeitige Bereitstellung hoher Leistungen. Die erzielbaren Speicherkapazitäten sind eher als niedrig einzustufen. [Oertel, 2008] Die rotierenden Massen der Turbinen/ Generatoren in thermischen Kraftwerken stellen momentan einen großen Teil der Kurzzeitspeicherung mit hohen Leistungen im Netz dar. Wie bereits, erwähnt gilt es diese Schwungradspeicher bei einem verstärkten Einsatz von Erzeugern mit Leistungselektronik zu ersetzen.

Akkumulatoren speichern elektrische Energie in Form von elektro-chemisch gebundener Energie. Die Möglichkeiten der elektro-chemischen Speicherung in Akkumulatoren sind sehr vielfältig und dementsprechend groß ist die Anzahl der entwickelten Systeme. Derzeit ist diese Art der Speichertechnik Fokus zahlreicher F&E-Aktivitäten im Bereich Elektromobilität und wird als Schlüsselement für zukünftige Märkte gesehen. Allen Akku-Systemen ist gemein, dass reversible Reaktionen an den Anoden/ Kathoden ablaufen, die einen Lade-/ Entladevorgang möglich machen. Die Umwandlung der elektrischen Energie erfolgt in den galvanischen Zellen. Diese Zellen bestehen aus zwei Elektroden, einem Separator und einen leitenden flüssigen oder festen Elektrolyt zur Übertragung der Protonen. Der Blei-Säure-Akkumulator ist die derzeit weitest verbreitete Akku-Technik im mobilen als auch stationären Bereich. In der stationären Anwendung wurde diese Technik zur Stabilisierung von Netzen, Frequenz-Regelung, Sicherung der Spannungsqualität sowie Zwischenspeicherung eingesetzt. In mobilen Anwendungen werden Blei-Säure-Akkus z. B. als Traktionsbatterie in Ga-

belstaplern oder als Starterbatterie bei Kraftfahrzeugen eingesetzt [Buchmann, 2007].

Der Lithium-Ionen-Akku ist derzeit die marktbeherrschende Speichertechnik für portable Anwendungen wie Laptops oder Mobiltelefone, da hohe Energiedichten erreicht werden. Die derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Elektrofahrzeuge sind ebenfalls sehr stark auf diese Technik konzentriert. Li-Ionen-Batterien haben bis jetzt in der stationären Speicherung aufgrund hoher kapazitätsbezogener Kosten keine nennenswerte Anwendung erfahren. In wie weit Batteriesysteme im Fahrzeug zur stationären Zwischenspeicherung von Strom eingesetzt werden können, ist derzeit Gegenstand von Forschungsprojekten [Hennings & Linssen, 2010]. Vorteile der Lithium-Technik sind die geringe Selbstentladungsrate, hohe Energie- und Leistungsdichten sowie das Fehlen des Memory-Effekts. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass keine umweltgefährdenden Chemikalien genutzt werden. Nachteilig sind bei dieser Speichertechnik die Beherrschbarkeit der Sicherheit und die starke Abhängigkeit der nutzbaren Kapazität von der Betriebstemperatur. Weiterhin sind nach dem jetzigen Stand der Forschung die Alterungseffekte der Li-Ionen-Batterien nur schwer vorhersagbar. [Oertel, 2008]

Redox-Flow-Batterien speichern die elektrische Energie in zwei separaten Behältern, den so genannten „Halb-Zellen“. Beim Ladeprozess werden die Elektrolytflüssigkeiten zu den Elektroden gepumpt, nehmen dort Elektronen auf und werden in den Behältern zurückgeführt. Der Ionenaustausch erfolgt an der Schnittstelle zwischen beiden Halb-Zellen. Beim Entladen laufen beide Reaktionen umgekehrt ab. Die Verschaltung der Einzelzellen erfolgt über Stacks zur Skalierung der Leistung. Bei der Redox-Flow-Batterie hängen Leistung und gespeicherte Energie nicht voneinander ab und können je nach Anwendung gezielt angepasst werden. Die Größe des Stacks und des Wechselrichters bestimmen die Leistung und die Tankgröße der Elektrolytbehälter für die speicherbare Energie. Um die Energie- und Leistungspotenziale der Redox-Flow-Batterie weiterhin zu erhöhen, müssen bei der Skalierung der Zellen und Stacks weitere Fortschritte gemacht werden. Problematisch sind die hohen Systemkosten sowie die Umweltverträglichkeit der momentan verwendeten Elektrolytflüssigkeiten, die z.B. auf Vanadium oder Zink/ Brom basieren. [Wietschel et al., 2010]

III. Wärmespeicher

Über 50% des deutschen Endenergiebedarfs wird für die Erzeugung von Raum- und Prozesswärme eingesetzt [Arbeitsgemeinschaft-Energiebilanzen, 2010]. Durch den zunehmenden Einsatz von Erneuerbaren Energien und deren diskontinuierliches Erzeugungsangebot rückt auch die Bedeutung thermischer Speicher zunehmend in den Blickpunkt. Darüber hinaus bestehen große Potenziale bei der Abwärmenutzung (insbesondere bei Hochtemperaturprozessen), die mit geeigneten Speichertechnologien erschlossen werden könnten. Die Entwicklung und Realisierung neuer Techni-

ken, wie z.B. adiabatische Druckluftspeicher oder solarthermische Kraftwerke erfordern ebenfalls verbesserte thermische Speicherkonzepte. Auch die Kopplung von Kälte- und Wärmespeichersystemen eröffnet vielfältige Effizienzpotenziale. Entsprechend ihrem Funktionsprinzip werden thermische Speicher in die Kategorien sensible Wärmespeicher, Latentwärmespeicher sowie thermochemische Speicher unterteilt. [Tamme, 2009, Oertel, 2008, Hauer et al., 2010, Kübler & Fisch, 1998, Schossig et al., 2005, Tamme et al., 2005]

Von allen **sensiblen thermischen Speicherkonzepten** ist die Warmwasserspeicherung von Niedertemperaturwärme am meisten ausgereift. Sie findet als Stunden- oder Tagesspeicher (Kurzzeitspeicherung) zur Wärmeversorgung von Gebäuden (Brauch- und Heizwasserwärmespeicher, Pufferspeicher) am häufigsten Anwendung. Für die saisonale Wärmespeicherung (Langzeitspeicherung) eignen sich Heißwasserspeicher (Speicherbehälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff oder Stahlbeton), Kies-Wasser-Speicher, Erdsondenspeicher sowie Aquiferspeicher, die in aller Regel ein großes Speichervolumen benötigen. Alle genannten Speicherkonzepte wurden bereits erprobt. Der in 300 m Tiefe liegende Aquiferspeicher zur Wärme- und Kälteversorgung des Deutschen Reichstages ist an dieser Stelle als prominentes Beispiel zu nennen. [Oertel, 2008]

Hochtemperaturspeicher finden bereits heute schon als Regeneratoren vielfach Anwendung (z.B. Hochofen). Weitere Speicheroptionen sind Dampf-, Fluid- sowie Feststoffspeicher. Das Konzept der Dampfspeicherung ist seit langem bekannt. Durch die zunehmenden Flexibilisierungsanforderungen der Energieversorgung gewinnen Dampfspeicher zunehmend an Bedeutung, da sie die Deckung von Nachfragespitzen oder auch höhere Laständerungsgeschwindigkeiten des Dampfturbinenteils von GuD-Kraftwerken ermöglichen. Der Einsatz von Fluidspeichern (Speichermedien: Thermoöl, Druckwasser, Flüssigsalz) sowie Feststoffspeichern (Speichermedien: Beton, Keramik, Naturstein) wird nicht nur für den Einsatz diskontinuierlich anfallender hochtemperaturiger Abwärme sondern auch für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken diskutiert. Im vergangenen Jahr wurde vom Deutschen Luft und Raumfahrtzentrum (DLR) der Feststoffspeicher HOTREG (Speichermedium: Keramik, Naturstein) in Betrieb genommen, der sowohl drucklos als auch druckaufgeladen betrieben werden kann und zu Forschungszwecken dient [DLR, 2010]. Ein weiteres Beispiel ist der Feststoffspeicher des solarthermischen Versuchskraftwerks Jülich, der aus einer keramischen Schüttung besteht, von etwa 700°C solarthermisch aufgeheizter heißer Luft durchströmt wird und eine Wärmeentnahme von einer bis mehreren Stunden ermöglichen soll. [Stadtwerke & Jülich, 2008]

Latente Wärmespeicher nutzen zusätzlich zur sensiblen Temperaturänderung den Phasenwechsel eines Speichermediums. Im Gegensatz zur sensiblen Wärmespeicherung besteht ihr Vorteil darin, bei Einsatz eines geeigneten Speichermediums bereits geringe Temperaturunterschiede nutzen zu können. Je nach Temperaturni-

veau können unterschiedlichste Materialklassen (z.B. Paraffine, Salzhydrate, Nitrate etc.) eingesetzt werden, die auch häufig als Phase Change Materials (PCM) bezeichnet werden. [BINE, 2009] Gegenüber sensiblen Wärmespeichern können mit latenten Speichern deutlich höhere Energiedichten bei konstanter Betriebstemperatur erreicht werden. Nach [Tamme, 2009] stellen die niedrige Wärmeleitfähigkeit der organischen bzw. anorganischen Materialien sowie die Wärmeübergangswiderstände der erstarrten Schmelze momentan die Hauptprobleme dar. Laufende F&E Aktivitäten fokussieren sich daher insbesondere auf die Entwicklung von Verbundmaterialien sowie die Makro- und Mikroverkapselung von PCM Materialien. [BINE, 2009] Als Einsatzmöglichkeit von Latentwärmespeichern wird derzeit insbesondere die Beheizung bzw. Kühlung von Gebäuden gesehen, indem Gipsputz oder auch Gipsplatten mit PCM angereichert werden. Eine weitere Anwendung könnte das Einbringen von Mikrokapseln in Wärmeträgerfluide sein, was die Fluidspeicherfähigkeit deutlich erhöhen würde [Schossig et al., 2005].

Thermochemische Wärmespeicher nutzen reversible chemische Prozesse und lassen sich in Sorptionsspeicher sowie in Speicher mit reversiblen chemischen Bindungen unterteilen. Der Vorteil thermochemischer Wärmespeicher besteht in einer nahezu verlustfreien Speicherung mit einer fast unbegrenzten Speicherdauer und einer nahezu unbegrenzten Zyklenzahl. Allerdings ist die geringe Wärmeleitfähigkeit der bislang untersuchten Speichermaterialien (z.B. Zeolithe, Silikatgel) insbesondere bei Schüttungen ein entscheidender Nachteil. [Oertel, 2008] Am häufigsten untersucht sind bislang Adsorptions- und Absorptionsspeicher, bei denen die Desorption der Beladungsvorgang ist. Beispiele für die Anwendungen von Adsorptionsspeichern sind das Zeolithheizgerät der Fa. Vaillant, das als Zusatzgerät für die Raumwärmeerzeugung eines Einfamilienhauses konzipiert ist, sowie der Einsatz als Pufferspeicher. Speicherkonzepte auf der Basis reversibler chemischer Bindungen (z.B. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) werden derzeit diskutiert und weisen nach [Wietschel et al., 2010, Oertel, 2008] noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf.

IV. Chemische Energiespeicher

Die **Wasserstoffherzeugung** aus elektrischem Strom durch Elektrolyse wird derzeit im Kontext von Speichern mit hohen Kapazitäten diskutiert. Das Konzept sieht vor, den erzeugten Wasserstoff komprimiert in geologische, dichte Speicherformationen einzubringen. Eine Rückverstromung erfolgt durch Brennstoffzellen oder Gasturbinen. Alternativ oder additiv könnte der erzeugte Wasserstoff auch für weitere Anwendung im Verkehrsbereich eingesetzt werden. Für die Produktion von Wasserstoff aus Windenergie und anderen fluktuierenden regenerativen Energiequellen ist die Verfügbarkeit leistungsstarker und kostengünstiger Elektrolyseure von zentraler Bedeutung. Für die Rückverstromung sind ebenfalls effiziente und kostengünstige Wandlungstechniken notwendig. Das Konzept ist bereits in zahlreichen Pilotanlagen

demonstriert worden. Ein Upscaling der Wasserstoffspeicher in den hohen GWh-Bereich steht derzeit noch aus. Insbesondere die niedrigen elektrischen Speichernutzungsgrade bedingt durch die lange Wandlungskette sowie die sehr hohen Kosten stehen einer derzeitigen großtechnischen Umsetzung entgegen. [VDE, 2009] Derzeit sind Demonstrationsvorhaben wie zum Beispiel das Hybrid-Kraftwerk (regenerative Stromerzeugung und Wasserstoff-Erzeugung/-Speicherung) des Konsortiums rund um ENERTRAG in Berlin, Prenzlau [Enertrag, 2010] geplant.

Neben der Speicherung von reinem Wasserstoff wird auch eine Speicherung von **synthetischem Erdgas** diskutiert. Die Erzeugung von synthetischem Erdgas erfolgt ebenfalls über Elektrolyse von Wasser. Der erzeugte Wasserstoff wird zusammen mit CO₂ über mehrere chemische Zwischenschritte in Methan umgewandelt. Dieses kann analog zum fossilen Erdgas in Kavernenspeichern oder anderen geologischen Formation gespeichert und mit Gasturbinen oder GuD-Prozessen rückverstromt werden. [BINE, 2010]

Zu den sehr langfristigen Energiespeichern lassen sich grundsätzlich auch die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle zählen. Die Energie, die bei der Erzeugung von Biomasse, durch hohen Druck und hohen Temperatur diese Energieträgern zugeführt wurde, steht grundsätzlich für extrem lange Zeiträume zur Verfügung. Auch nach der Extraktion aus ihren ursprünglichen Lagerstätten werden die fossilen Energieträger (und damit auch mit der in ihnen gespeicherten Energie) aus unterschiedlichen Gründen weiter gelagert. Zu erwähnen ist hierbei insbesondere die Lagerung zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage bzw. zum Ausgleich von Preisschwankungen sowie die Bevorratung zur geostrategischen Versorgungssicherheit. Erdgas wird in der Bundesrepublik Deutschland in größeren Mengen fast ausschließlich in Poren- und Kavernenspeicher gespeichert. Das tatsächlich zur Verfügung stehende Arbeitsgasvolumen der insgesamt 47 Untertage-Speicher beträgt 20,8 Mrd. m³. [LBEG, 2010] Theoretisch reicht die Speicherung, um den inländischen Erdgasbedarf für ca. 96 Tage zu decken. Die Speicher werden vorwiegend zum Ausgleich saisonaler Nachfrageschwankungen genutzt. Vor dem Hintergrund des erwarteten Anstiegs des Erdgasbedarfs in Europa, einer möglichen Zunahme potenzieller Versorgungsengpässe und starken Schwankungen der Erdgaspreise werden in Deutschland vorhandenen Speicherkapazitäten derzeit ausgebaut. Falls alle geplanten Maßnahmen umgesetzt werden, wird das Arbeitsgasvolumen um ca. 75% auf 36,6 Mrd. m³ steigen. [Bundesnetzagentur, 2010]

Neben Gas werden grundsätzlich auch andere Energieträger bevorratet. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Bevorratung von Mineralöl bzw. Mineralölprodukten sowie von Kohlen. Motivation sind mögliche geopolitisch bedingte Versorgungsengpässe aufgrund der hohen Importabhängigkeit. Die Pflicht zur Bevorratung sowie der Bevorratungsumfang werden durch Gesetze bzw. Verordnungen

(z.B. durch das Erdölbevorratungsgesetzes sowie durch §50 des Energiewirtschaftsgesetzes) geregelt.

V. Trend 2010

Speichertechniken gewinnen zukünftig wesentlich an Bedeutung mit steigendem Anteil fluktuierender Energieerzeugung in stationären Einsatzgebieten sowie zur mobilen Speicherung von elektrischer Energie im Verkehrsbereich. Die gestarteten Forschungs- und Demonstrationsaktivitäten in Deutschland im Bereich der Elektromobilität lassen in naher Zukunft insbesondere im Bereich leistungs- und kapazitätsstarker sowie kostengünstiger Li-Ionen-Batterien Fortschritte erhoffen. Der Ausbau bestehender Pumpspeicherwerk-Kapazitäten ist in Deutschland beschränkt und mit einem massiven Neubau von PSW wird nach Einschätzung von Experten nicht zu rechnen zu sein. Adiabate Druckluftspeicher oder Redox-Flow-Batterien könnten mögliche Alternativen sein. Wichtige Schlüsselkomponente bei den adiabaten Druckluftspeichern ist die Entwicklung von großskaligen thermischen Speichern. Die Entwicklung von elektrischen und thermischen Speichern ist daher eng verknüpft. Große Speicherkapazitäten für elektrische Energien, wie sie für eine saisonale Speicherung z.B. von Windenergie erforderlich wären, können durch die Kombination der elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff, dessen Lagerung in geologischen Speicherformationen und der anschließenden Rückverstromung mit Brennstoffzellen oder Gasturbinen erreicht werden. Wesentliche Entwicklungsziele hierbei sind die Verbesserung der Speichernutzungsgrades und eine Reduktion der derzeit noch sehr hohen Investitionskosten.

VI. Quellen

- ARBEITSGEMEINSCHAFT-ENERGIEBILANZEN (2010) Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2008 nach Sektoren, Energieträgern und Anwendungsbereichen.
- BINE (2009) Latentwärmespeicher in Gebäuden. *BINE Informationsdienst Themeninfo I/2009*.
- BINE (2010) Überschüssigen Strom in Erdgas umwandeln. *News 30.04.2010*.
<http://www.bine.info/hauptnavigation/themen/energiespeicher/stromspeicher/news/ueberschuessigen-strom-in-erdgas-umwandeln/>.
- BOXLEITNER, M. & BRAUNER, G. (2009), *Virtuelle Schwungmasse*.
 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT 2009),
 Wien,
http://www.eeg.tuwien.ac.at/events/iewt/iewt2009/papers/2C_1_BOXLEITNER_M_P.pdf (2009-08-31).
- BUCHMANN, I. (2007) *Batteries in a portable world*. www.buchmann.ca.
- BUNDESNETZAGENTUR (2010) *Monitoringbericht*. Bonn.

- DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR, et al. (2010) Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien. *Abschlussbericht PSW - Integration EE*. www.dena.de.
- DLR (2010) Versuchsanlage HOTREG. *Pressemitteilung der DLR vom 22.06.2010*.
- ENERTRAG (2010) ENERTRAG-Hybridkraftwerk - Kurzbeschreibung. https://www.enertrag.com/download/prospekt/hybridkraftwerk_kurzinfo_090417.pdf.
- ESA (2011) Storage Technologies - Past and Present Use. http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies2/storage_technologies_past_and_present_use/.
- HAUER, A., et al. (2010) Energiespeicher - Steigerung der Energieeffizienz und Integration Erneuerbarer Energien. *Report Themen 2010 - Forschung für das Zeitalter der erneuerbaren Energien (Hrsg. Forschungsverbund Erneuerbare Energien, FVEE)*, S. 110 - 114.
- HENNINGS, W. & LINSSEN, J. (2010) Welche Netzdienstleistungen können Elektrofahrzeuge sinnvoll erbringen? *VDE-Kongress 2010 "E-Mobility"*, Leipzig, Nov. 2010.
- KÜBLER, R. & FISCH, N. (1998) *Wärmespeicher*. TÜV Verlag.
- LBEG (2010) *Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2009*. Hannover, Landesamt für Bergbau; Energie und Geologie.
- OERTEL, D. (2008) *Energiespeicher - Stand und Perspektiven*. Berlin.
- POPP, M. (2010) *Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit Erneuerbaren Energien*. Heidelberg, Springer.
- RWE POWER (2010) ADELE – Der Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung. www.rwe.com/rwepower.
- SCHLUCHSEEWERK (2011) Neubauprojekt Pumpspeicherkraftwerk Atdorf , Informationsflyer zum Projekt. www.neubauprojekt-atdorf.de.
- SCHOSSIG, P., et al. (2005) Wärmespeicher für die Hausenergieversorgung. *Report Themen 2005 - Wärme und Kälte: Energie aus Sonne und Erde (Hrsg. Forschungsverbund Erneuerbarer Energien, FVEE)*, S. 120-125.
- SRU (2010) *100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar*. Berlin, Sachverständigenrat für Umweltfragen.
- STADTWERKE & JÜLICH (2008) Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich (STJ). www.solarturm-juelich.de.
- TAMME, R. (2009) Energiespeicher - Schlüssel für effizientere und flexiblere Energiesysteme. *Brennstoff Wärme Kraft*, 61:Nr. 7/8, 28 - 31.
- TAMME, R., et al. (2005) Speicherung für Hochtemperaturwärme. *Report Themen 2005 - Wärme und Kälte: Energie aus Sonne und Erde (Hrsg. Forschungsverbund Erneuerbarer Energien, FVEE)*, S. 126-130.
- VDE (2009) *Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf* Frankfurt.
- WIETSCHEL, M., et al. (2010) *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*. Fraunhofer Verlag
- ZUNFT, S. (2007), *Druckluftspeicher und adiabatische Speicher der Zukunft*. Energieforum „Life Needs Power“; Hannover Messe 2007, 19.04.2007.

Preprints 2011

- 01/2011 Baufumé, Sylvestre, Hake, Jürgen-Friedrich, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter: Infrastrukturanalyse einer möglichen wasserstoffbasierten Stromerzeugung unter Berücksichtigung von Kohlendioxidabtrennung, -transport und –speicherung.
- 02/2011 Hennings, Wilfried, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter, Vögele, Stefan: Energie-transport und –verteilung.
- 03/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: Measuring Income and Energy Distribution in Germany with the Atkinson Index
- 04/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: The History of Sustainability and the Impact of the Energy System.
- 05/2011 Baufumé, Sylvestre, Hake, Jürgen-Friedrich, Linssen, Jochen. Markewitz, Peter: Carbon capture and storage: a possible bridge to a future hydrogen infrastructure for Germany?

Research Reports 2011

- 01/2011 Kuckshinrichs, W., Bickert, S.: Country profiles for UK, the Netherlands, Germany and Norway as further contribution to the 'Comparison of R&D Programs for Carbon Abatement Technologies'.
- 02/2011 Bickert, S., Kuckshinrichs, W., Sage P.: Strategy and action plan for the implementation of multi-national programs on clean fossil energy.
- 03/2011 Hansen, Patrick, Schulze, Peggy: The Effects of Climate Change on the Energy Industry in Germany

Systems Analysis and Technology Evaluation at the Research Centre Jülich

Many of the issues at the centre of public attention can only be dealt with by an interdisciplinary energy systems analysis. Technical, economic and ecological subsystems which interact with each other often have to be investigated simultaneously. The group Systems Analysis and Technology Evaluation (STE) takes up this challenge focusing on the long-term supply- and demand-side characteristics of energy systems. It follows, in particular, the idea of a holistic, interdisciplinary approach taking an inter-linkage of technical systems with economics, environment and society into account and thus looking at the security of supply, economic efficiency and environmental protection. This triple strategy is oriented here to societal/political guiding principles such as sustainable development. In these fields, STE analyses the consequences of technical developments and provides scientific aids to decision making for politics and industry. This work is based on the further methodological development of systems analysis tools and their application as well as cooperation between scientists from different institutions.

Leitung/Head: Prof. Jürgen-Friedrich Hake
Forschungszentrum Jülich
Institute of Energy and Climate Research
IEK-STE: Systems Analysis and Technology Evaluation
52428 Jülich
Germany
Tel.: +49-2461-61-6363
Fax: +49-2461-61-2540,
Email: preprint-ste@fz-juelich.de
Web: www.fz-juelich.de/ste