



VDI / ASME Projektgruppe:

„Energiekonzept der Zukunft – 100% nachhaltige Energieversorgung 2050“

Hintergrundpapier der VDI-suj Projektgruppe

Energiespeicher (Energy storage)

November 2011

Hauptautor: Stefan Hübner

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	2
I. Executive Summary	3
II. Einführung und Methodik.....	4
III. Aufgaben elektrischer Energiespeicher	5
IV. Technologien elektrischer Energiespeicher	7
V. Einsatzgebiete elektrischer Energiespeicher.....	14
VI. Wärmespeicher	17
VII. Zusammenfassung und Ausblick.....	19
Referenzen.....	21
Abbildungsverzeichnis	23
Tabellenverzeichnis.....	23

I. Executive Summary

This background paper is part of the co-operation project “Energy concept of the future – 100% sustainable energy until 2050” of the VDI-suj (Students and Young Engineers of the German Association of Engineers) and the ASME (American Society of Mechanical Engineers). It is also known as part of the “Leadership in Sustainability” programme in the US.

This report focuses on energy storage technologies.

In a 100 % renewable energy system based on volatile wind and solar energy, energy storage systems will be indispensable. Fluctuations occur both on the generation side and on the demand side. However, the electricity generation has to match the demand in every moment in order to secure a stable grid and not to harm the machinery. On the generation side, wind calms and days without sunlight can last up to two weeks. Fluctuations on the demand side occur daily (day/night), weekly (labor days/weekend) and seasonally (summer/winter). The daily and annually demanded power in Germany ranges from 40 and 75 GW.

Energy storage systems will be required to either store large amounts of electricity or to guarantee a secure electricity supply (frequency and voltage stabilization) in every moment. Model calculations [BMU, 2010] have shown that about 10 TWh/y long term energy storage capacities will be necessary.

In order to store large amounts, pumped hydro storage and compressed air energy storage are adequate storage technologies. They store energy for several hours up to a few days. Adequate weekly or seasonal energy storage technologies are hydrogen and synthetic natural gas storage due to its very high energy density. Batteries, flywheels and long duration capacitors are usually applied for short term energy storage to bridge power blackouts and to control the grid frequency and voltage. Redox flow batteries can be used for both, long term energy storage and for grid stability reasons.

Apart from pumped hydro storage, there is currently no economically competitive storage technology. Especially high investment costs and missing market structures for energy storage systems impede the installation of storage technologies. Thus, incentives and tax reductions have to be set in order to decrease investment costs as well as to create operational scenarios for energy storage systems.

Low temperature heat storage systems are interesting in the building sector to secure warm water and heat supply at all times. These heat storages are important in houses with solar or geothermal heatings. Furthermore, these heat storage systems allow for decoupling the heat and energy generation of combined heat and power plants. High temperature heat storage systems will be required to make industry processes more efficient, especially in batch processes.

II. Einführung und Methodik

Dieses Hintergrundpapier entstand im Rahmen des Kooperationsprojekts der VDI-suj (VDI Studenten und Jungingenieure) mit der ASME (American Society of Mechanical Engineers). Die deutsche Projektgruppe arbeitet dabei unter dem Titel „Energiekonzept der Zukunft – 100% nachhaltige Energieversorgung 2050“, die englische unter dem Titel „ASME & VDI Joint Project: Leadership in Sustainability“.

Als Diskussionsgrundlage wurden verschiedene Hintergrundpapiere erstellt, die die Situation und den möglichen Wandel des deutschen Energiesystems näher beleuchten. Der vorliegende Bericht befasst sich hauptsächlich mit dem Thema Energiespeicher.

III. Aufgaben elektrischer Energiespeicher

Um eine konstante Frequenz und Spannung im Stromnetz zu halten, müssen das Stromangebot und die Nachfrage jederzeit übereinstimmen. Dies ist nötig, da sich elektrische Energie nicht in den Stromnetzen zwischenspeichern lässt und es bei Frequenzänderungen zu Beschädigungen der angeschlossenen Leistungsabnehmer führt. Über die Zeit ändern sich aber sowohl der Lastgang, also die Nachfrage nach elektrischer Leistung, als auch das Angebot, also die Bereitstellung der Leistung. Insbesondere mit einer Zunahme an erneuerbaren Energien sinkt die Anzahl thermischer Kraftwerke, die Regelleistung bereitstellen (siehe auch [PG, 2011a]).

Eine Stromspeicherung stellt die sinnvollste Alternative dar um diese Unterschiede auszugleichen und positive bzw. negative Überschussleistung aufzunehmen oder abzugeben. Stromspeicher werden für folgende Aufgaben benötigt. Hierbei zählen die ersten vier Punkte als direkte Stromspeicherung und die letzten drei als Bereitstellung von Systemdienstleistungen [VDE, 2009]:

- Bereitstellung von Regelleistung (Kapitel III.4 in Energieversorgung heute)
- Bereitstellung von Spitzenleistung für die Spitzenlast
- Zur Lastfolge und Netzentlastung bei intermittierenden Lasten
- Wöchentlicher und saisonaler Angebots- & Lastausgleich
- Spannungs- und Frequenzstabilisierung
- Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
- Sicherheitsanwendungen
- in abgelegenen Gegenden und Inselnetzen
- Schwarzstartfähigkeit
- Bereitstellung von Blindleistung

Regelleistung muss aus verschiedensten Gründen bereitgestellt werden. Während erneuerbare Energien wie Wind und Photovoltaik stark wetterabhängig sind (Abbildung III-1), gibt es auf der Nachfrageseite energieintensive Industriezweige mit intermittierenden Leistungsabnahmen¹. Die Nachfrage steigt auch, wenn z.B. zur Mittagszeit in vielen Haushalten und Kantinen gekocht wird. Ebenso wird an Werktagen mehr Energie benötigt als an Wochenenden, wenn ein Großteil der Bevölkerung nicht arbeitet. Zum saisonalen Lastausgleich zählt ein höherer Energieverbrauch im Winter auf Grund geringerer Umgebungstemperaturen und kürzeren Tageslichtzeiten. Einen typischen Tageslastgang für alle Monate eines Jahres zeigt Abbildung III-2. Auch angebotsseitig kommt es zu Unterschieden, da im Winter mehr Wind als im Sommer weht, während im Sommer mehr Energie durch Photovoltaik und Solarthermie gewonnen werden kann.

Sensible Industrieprozesse, sicherheitsrelevante Steuerungs-, Kontroll- und Überwachungssysteme (z.B. im Kernkraftwerk) oder Einrichtungen wie Krankenhäuser dürfen auf keinem Fall einem Stromausfall unterliegen. So wird eine USV durch Notstromgeneratoren gewährleistet, die aber gewisse Startzeiten mit sich bringen. Um diese zu überbrücken, werden Ener-

¹ z. B. Lichtbogenofen zum Metallschmelzen

giespeicher benötigt. Ebenso kann auch die gesamte Notstromversorgung (ungung) durch Speichersysteme bereitgestellt werden.

Für die Wiederaufnahme des Netzbetriebes nach einem Netzzusammenbruch sind Kraftwerke nötig, die ohne Energiezufuhr hochfahren können: sogenannte Schwarzstartfähige Kraftwerke. Wärmekraftwerke benötigen beispielsweise Energie um die Pumpen des Dampfkreislaufs in Betrieb zu nehmen. Die meisten Energiespeichertechnologien (Pumpspeicher, Druckluft, Batterien) hingegen sind schwarzstartfähig.

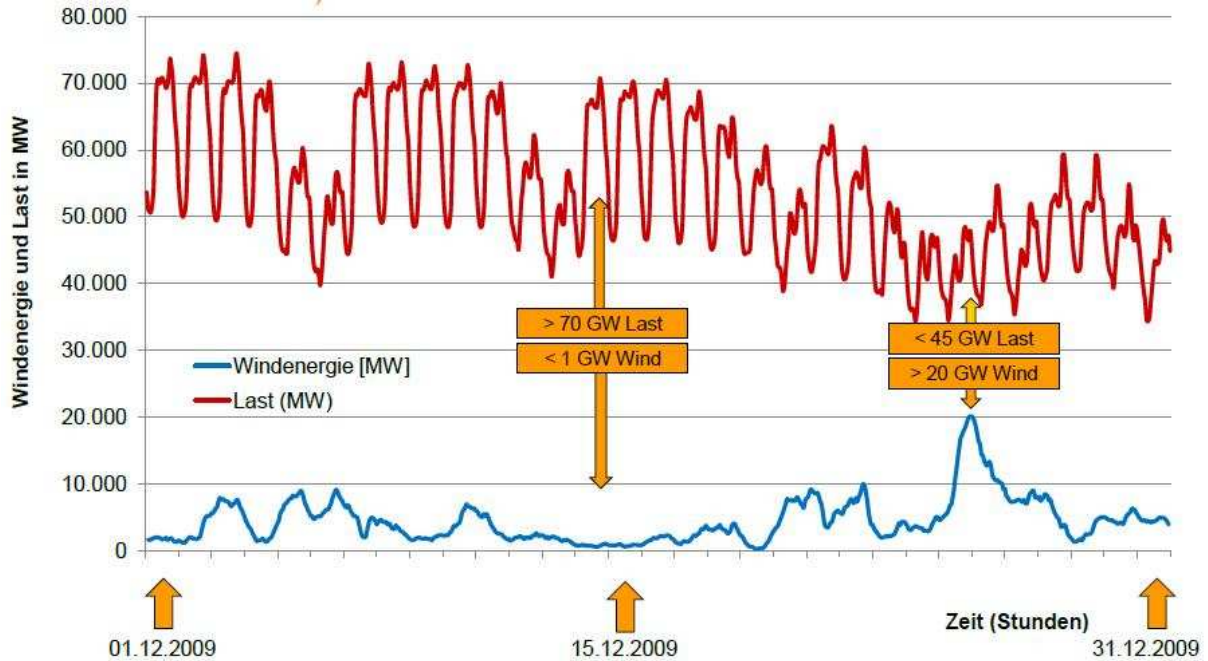


Abbildung III-1: Windstromeinspeisung im Winter 2009 verglichen mit Gesamtnachfrage [Seidl, 2011]

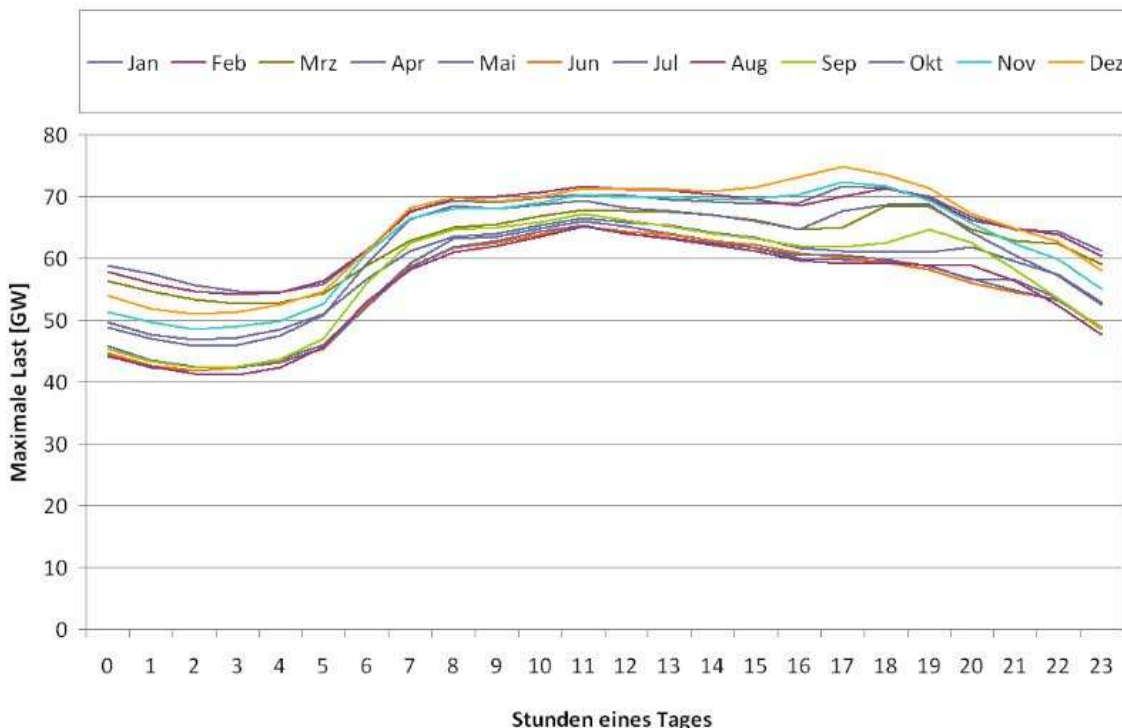


Abbildung III-2: Nachfrage Last in Deutschland [Schulz, 2011]

Ein Ausgleich der Schwankungen zwischen Angebot und Nachfrage kann auf Seiten der Produktion, im Netz oder auf Seiten der Abnehmer ausgeglichen werden. Produktionsseitig können Energiespeicher in Kraftwerke integriert werden und somit für eine konstante, grundlastfähige Produktion sorgen. Auch nachfrageseitig kann Energie zwischengespeichert werden und anschließend während Leistungsspitzen abgerufen werden. Der Großteil des Ausgleiches wird und muss aber durch die Netzbetreiber gewährleistet werden, die dafür Regelleistungen anfragen und abrufen.

Für die in Kapitel III.4 in [PG, 2011a] beschriebenen Formen der elektrischen Regelleistung insbesondere die Sekundär- und Tertiärregelleistung (Minutenreserve) werden hauptsächlich Gas- und Ölkraftwerke sowie Pumpspeicherkraftwerke eingesetzt. Die derzeit vorgehaltene Reserveleistung beträgt insgesamt 10.700 MW und teilt sich wie in

Tabelle III-1 zu sehen auf. Nach Ablauf der Leistungsregelung (Minutenreserve) müssen langfristige Schwankungen durch das Hoch- oder Runterfahren von Reservekraftwerken abgedeckt werden. Die maximal nachgefragte Last innerhalb eines Jahres schwankt zwischen 40 GW und 75 GW. Auch die täglichen Schwankungen liegen in dieser Größenordnung wie in Abbildung III-2 zu sehen ist.

Das bisherige Prinzip der Spitzenlastkraftwerke (Öl & Gas) scheint insbesondere bei einem Ausbau der Erneuerbaren Energien nicht effizient, da eine Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung dazu führt, dass Kraftwerke in Teillast gefahren werden müssen bzw. stillstehen. Dies führt zu einer geringen Anzahl an Volllaststunden. Der Vorteil von Speicherkraftwerken bzw. Energiespeichern ist, dass sie sowohl negative als auch positive Regelleistung bereitstellen.

Tabelle III-1: Reserveleistung für Regelung in MW [Bauer, 2010]

	Positiv	Negativ	Aktivierungsgeschwindigkeit
Primärregelleistung	623	623	Sekunden
Sekundärregelleistung	2231	2163	5 Minuten
Tertiärregelleistung	2244	2118	15 Minuten
EEG-Reserveleistung	175	485	1 Stunde
Gesamt	5273	5389	

IV. Technologien elektrischer Energiespeicher

Zur Speicherung elektrischer Energie gibt es eine Vielzahl verschiedener Technologien, die abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet sowie der zu speichernden Kapazität (kWh) sowie Ein- und Ausspeicherleistung (kW) geeignet sind. Prinzipiell können Energiespeicher wie folgt unterteilt werden.

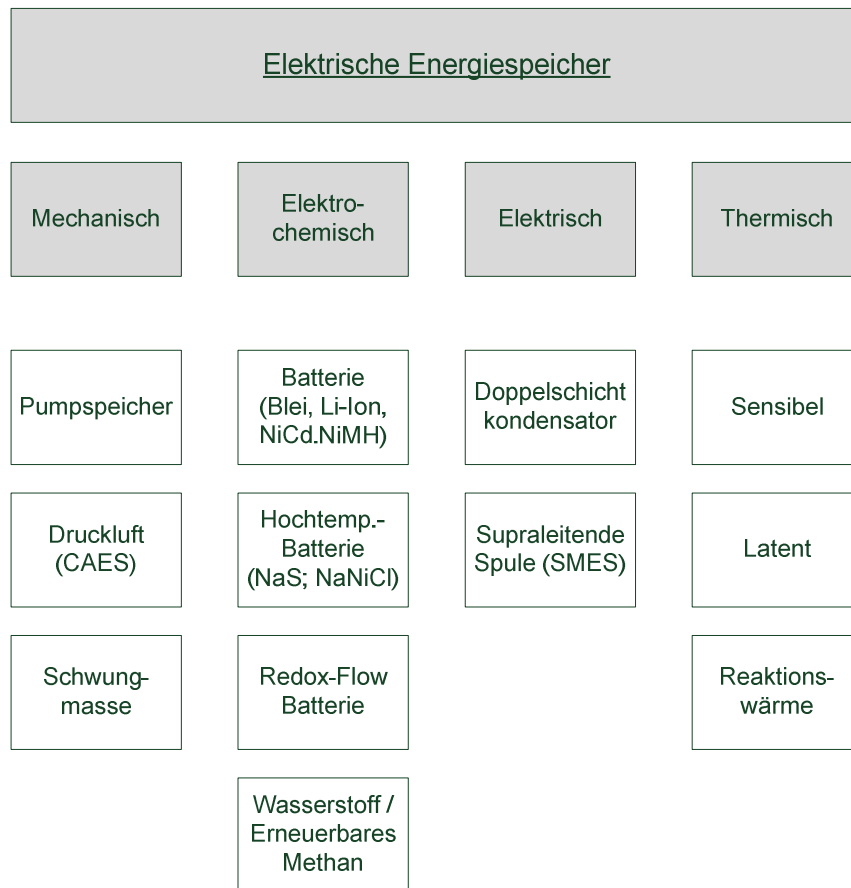


Abbildung IV-1: Einteilung Energiespeicher

Technologien:

In einem **Pumpspeicherkraftwerk**, das aus einem höher gelegenen und einem tiefer gelegenen Wasserreservoir besteht, kann Wasser mit Hilfe elektrischer Energie vom tieferen in das höhere gepumpt werden. Im Gegenzug zur Stromproduktion wird Wasser vom höheren Reservoir in das tiefere abgelassen. Hierbei kann über eine Wasserturbine die potentielle Energie des Wassers in Strom umgewandelt werden (Abbildung IV-2). Pumpspeicherkraftwerke zeichnen sich im Bereich der Energiespeicher durch ihren sehr hohen Wirkungsgrad von bis zu 80 % sowie die bedingte Fähigkeit² Primärregelleistung bereitstellen zu können aus. Zurzeit existieren in Deutschland 6,7 GW an Pumpspeicherkapazität. Allerdings ist die Kapazität eines weiteren Ausbaus begrenzt, da es an geeigneten Lokalitäten zur Installation großer Wasserreservoirs in verschiedenen Höhen mangelt. Gleichzeitig ist auch die Umsetzung solcher Großprojekte auf Grund geringer öffentlicher Akzeptanz schwierig. Zurzeit befinden sich vier Kraftwerke in Planung wobei aber noch offen ist, ob sie realisiert werden oder nicht. Allgemein wird den Pumpspeicherkraftwerken kein Ausbaupotential für die Zukunft angerechnet [Neupert, 2008].

² Nur bei laufendem Betrieb durch Verstellung der Leitschaufeln

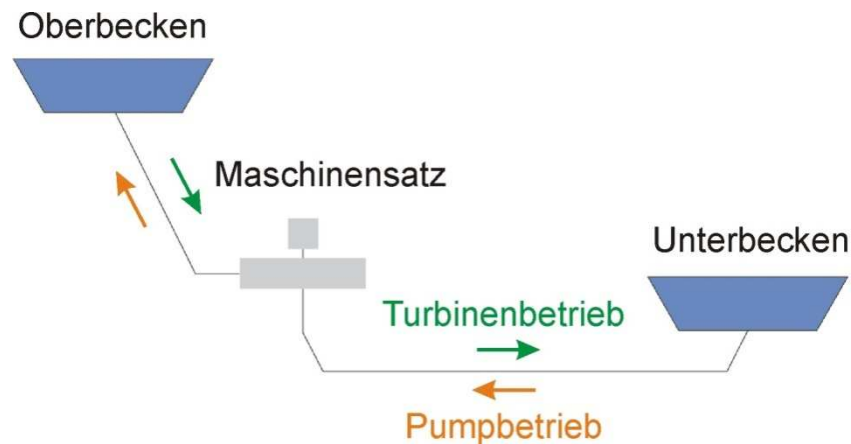


Abbildung IV-2: Pumpspeicherkraftwerk [VDE, 2009]

Trotz geringer Ausbaupotentiale der Pumpspeichertechnik gibt es unterschiedliche Ansätze, die sich auf diese Technologie berufen. Zum einen werden in stillgelegten Kohletagebauen oder direkt im Meer (offshore) sogenannte Ringwallspeicher vorgeschlagen [Popp, 2010]. Bei dieser Form wird das zweite Becken künstlich durch einen Ringwall geschaffen (Abbildung IV-3).

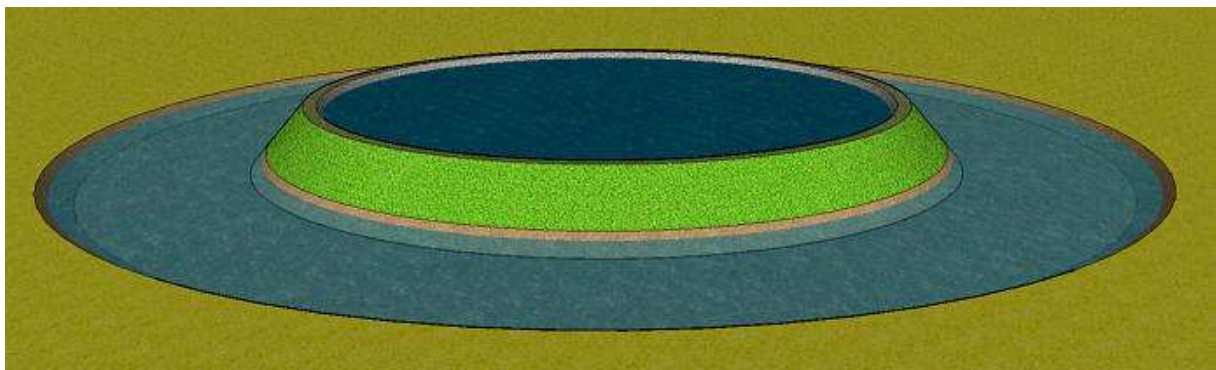


Abbildung IV-3: Pumpspeicherkraftwerk [Popp, 2010]

Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke verdichten Umgebungsluft und speichern die dabei entstehende Wärme in einem Wärmespeicher. Die komprimierte Luft wird in riesigen Tanks, für die sich ausgesolte Salzkavernen anbieten, gespeichert. Bei der Rückverstromung wird die komprimierte Luft der Salzkaverne entnommen, im Wärmespeicher aufgewärmt und anschließend in einer Heißluftturbine entspannt (Abbildung IV-4). Da hierbei kein Erdgas, wie bei einer üblichen Gasturbine, hinzugegeben wird, handelt es sich um einen klimaneutralen Speicherprozess. Da bisher noch keine gebauten Kraftwerke dieser Art vorliegen können Wirkungsgrade nur geschätzt werden. Sie sollen ca. 70 % erreichen und bei weiterer Entwicklung von Heißluftturbinen im Bereich der Sekundär- und Tertiärregelleistung eingesetzt werden können [Neupert et al. 2008].

Diabate Kraftwerke, die ohne Wärmespeicher und mit Erdgasbefeuerung³ arbeiten, erreichen Wirkungsgrade von 42 - 54 %. Bisher existieren zwei gebaute Anlagen, von denen sich eine in Huntorf, Deutschland befindet [BINE, 2011].

³ In einer Gasturbine oder zur Luftvorwärmung

Nachteilig sind bisher die hohen Kosten vor allem des Wärmespeichers, die ca. $\frac{1}{4}$ der Gesamtkosten ausmachen, sowie die Nutzungskonkurrenz der Speicherorte zu Erdgasspeichern und CCS-Technologie (siehe auch Kapitel III.2 in [PG, 2011b]) [DENA, 2010].

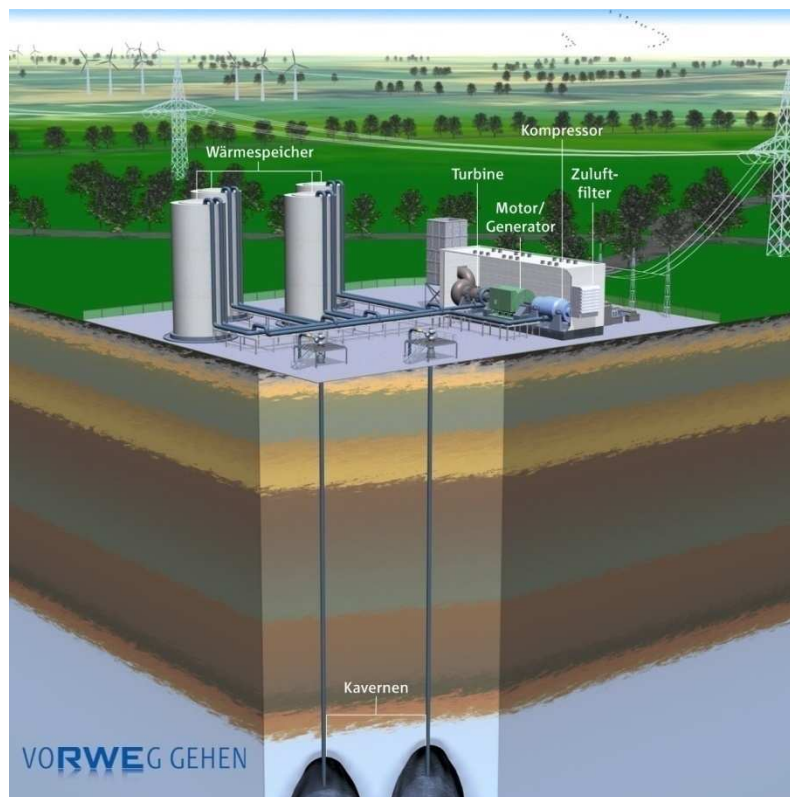


Abbildung IV-4: Adiabates Druckluftspeicherkraftwerk

Beim **Wasserstoffspeicher** wird elektrische Energie in chemischer Energie umgewandelt, die wiederum gespeichert werden kann. Die Umwandlung erfolgt per Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Anschließend wird der Wasserstoff (wie Druckluft in Druckluftspeicherkraftwerken) in großen Salzkavernen gelagert. Bei erhöhter Stromnachfrage wird er per Brennstoffzelle oder per Gas- und Dampfkraftprozess (GuD) umgewandelt (Abbildung IV-5). Die Wirkungsgrade dieser Prozessketten sind allerdings recht gering. Bei Rückverstromung über eine Brennstoffzelle werden ca. 35 % erreicht und mit einem GuD-Prozess knapp 40 % [VDE, 2009]. Bei weiterer Entwicklung der Elektrolyse werden Wirkungsgrade von knapp 50 % angestrebt [Neupert, 2008], [Kruck, 2008]

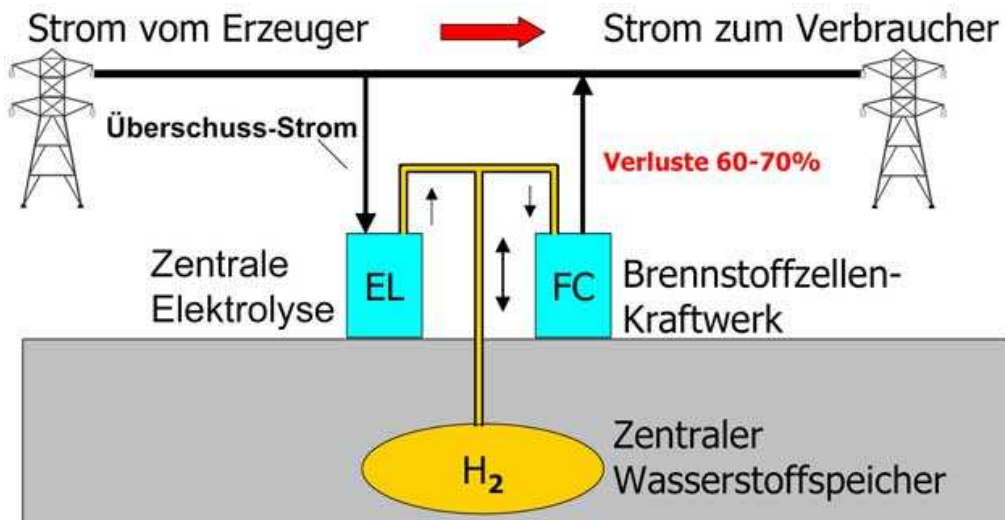


Abbildung IV-5: Wasserstoffspeicherkraftwerk [FRSW, 2011]

Die Herstellung **erneuerbaren Methans** verläuft wie die des Wasserstoffs. Der aus der Elektrolyse gewonnene Wasserstoff wird anschließend mit CO₂ im sogenannten Sabatier-Prozess in Methan umgewandelt ($\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{O}_2$). Dieses kann nun in bereits vorhandenen Erdgasspeichern, die seit Jahrzehnten als saisonale Erdgasspeicher eingesetzt werden, eingelagert werden (Abbildung IV-6). Obwohl der Speicherwirkungsgrad durch den zusätzlichen Umwandschritt noch geringer als beim Wasserstoff ist, bieten sich große Vorteile durch das bereits vorhandene Verteiler- und Speichernetz. Der Wirkungsgrad bezogen auf $\text{kWh}_{\text{Methan}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$ wird mit > 60 % angegeben, was bei einer Rückverstromung per GuD-Prozess mit 60 % Wirkungsgrad zu 36 % Gesamtspeicherwirkungsgrad führt. Die in Deutschland vorhandene Kapazität an Erdgasspeichern beträgt 217 TWh. Zusätzlich befinden sich derzeit weitere 79 TWh in Planung. Außerdem sind diese Speicher schon direkt mit den Kraftwerken und Endverbrauchern per Pipeline oder über einen anderen Transportmechanismus verbunden [FVEE, 2010]. Um die Gesamtwirkungsgrade zu steigern ist es auch möglich, einen begrenzten Teil Wasserstoff in das Erdgasnetz mit einzuspeisen.

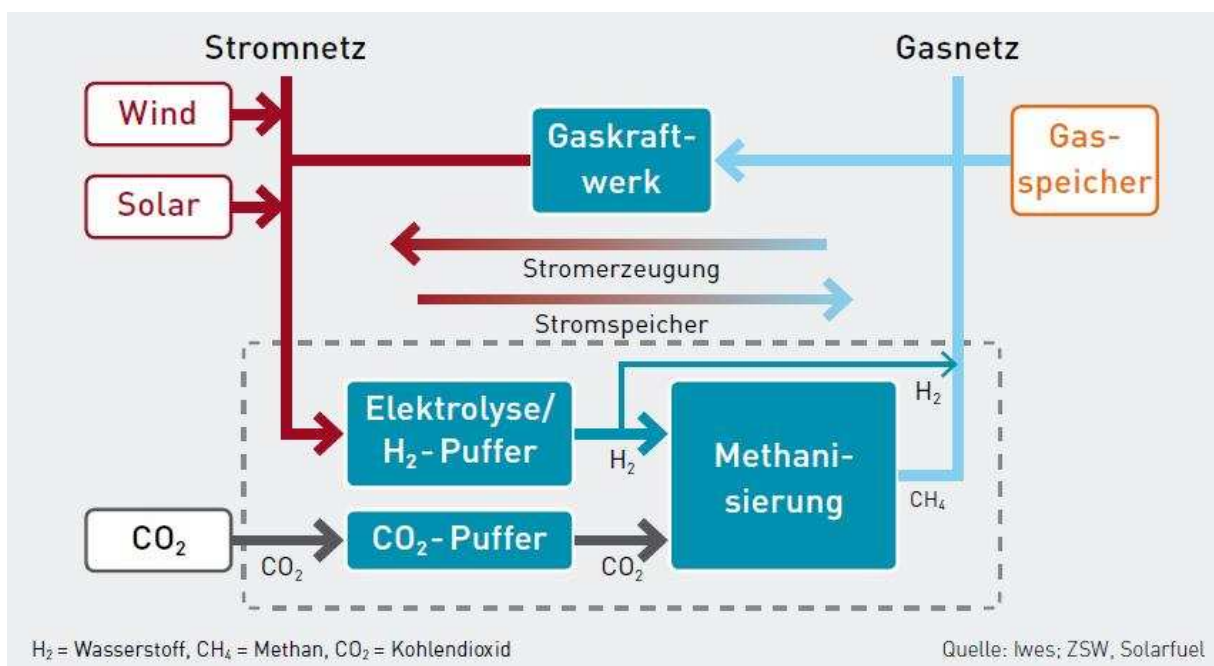


Abbildung IV-6: Erneuerbares Methan – Speicherung

Thermische Energiespeicher wiederum werden in Hoch- und Niedertemperaturspeicher unterteilt. Hochtemperaturspeicher ab 500°C werden zur Speicherung und späteren Erzeugung von Elektrizität genutzt, die mittels eines Dampfprozesses gewonnen wird. Aktueller Stand der Technik sind geschmolzene Salze (bis 565°C), mit denen in solarthermischen Kraftwerken Wolkenstunden und Nachtzeiten überbrückt werden können. Die Speicherung von Reaktionswärme hingegen befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Hierbei wird eine exotherme Reaktion zweier Stoffe ausgelöst und Wärme deutlich über 600°C (bis ca. 1000°C) kann gewonnen werden. Beim Einspeichervorgang wird die Reaktion dann in umgekehrter Richtung durchgeführt.

Mittel- und Niedertemperaturspeicher ($100\text{-}500^{\circ}\text{C}$ bzw. $<100^{\circ}\text{C}$) können zum einen für geothermische Anlagen in Dampf- oder Organic-Rankine-Cycle Prozessen eingesetzt werden um ebenfalls Strom zu gewinnen. Zum anderen können sie zur Speicherung von Prozesswärme oder zur direkten Wärmespeicherung z.B. im Bereich der Gebäudeklimatisierung und Warmwasserversorgung eingesetzt werden (Kapitel III.4).

Ein weiteres System zur Speicherung großer Mengen an Energie ist die **Redox-Flow Batterie**. Auch hier sind Leistung und Speicherkapazität unabhängig voneinander, da die Energie in flüssigen Elektrolyten in Tanks gespeichert wird. Die Leistungsumsetzung hingegen findet in einer elektrochemischen Zelle durch Ionentransport durch eine semipermeable Membran statt. Dieser Vorgang ist ähnlich der Elektrolyse bzw. Brennstoffzelle, so dass gleichzeitig Energie gewonnen wird. Sind beide Elektrolyten aufgebraucht, kann die Reaktion in umgekehrter Richtung erfolgen (Abbildung IV-7). Obwohl es schon einige wenige kommerzielle Anlagen vor allem in Japan gibt, mangelt es noch an Langzeiterfahrungen mit dem System. Auch gibt es eine Reihe verschiedener Elektrolyte, die sich hinsichtlich Verfügbarkeit, Wirkungsgrade, etc. unterscheiden. Für das gesamte System werden Wirkungsgrade von 75 % angesetzt [VDE, 2009].

Die bisher in Japan eingesetzten Redox-Flow Batterien werden hauptsächlich zur Spannungs- und Frequenzstabilisierung (Netzstabilisierung) und zur Bereitstellung von Regelleistung eingesetzt. Aber auch ein Einsatz als USV ist durch die sehr geringen Startzeiten möglich [Jossen, 2007]

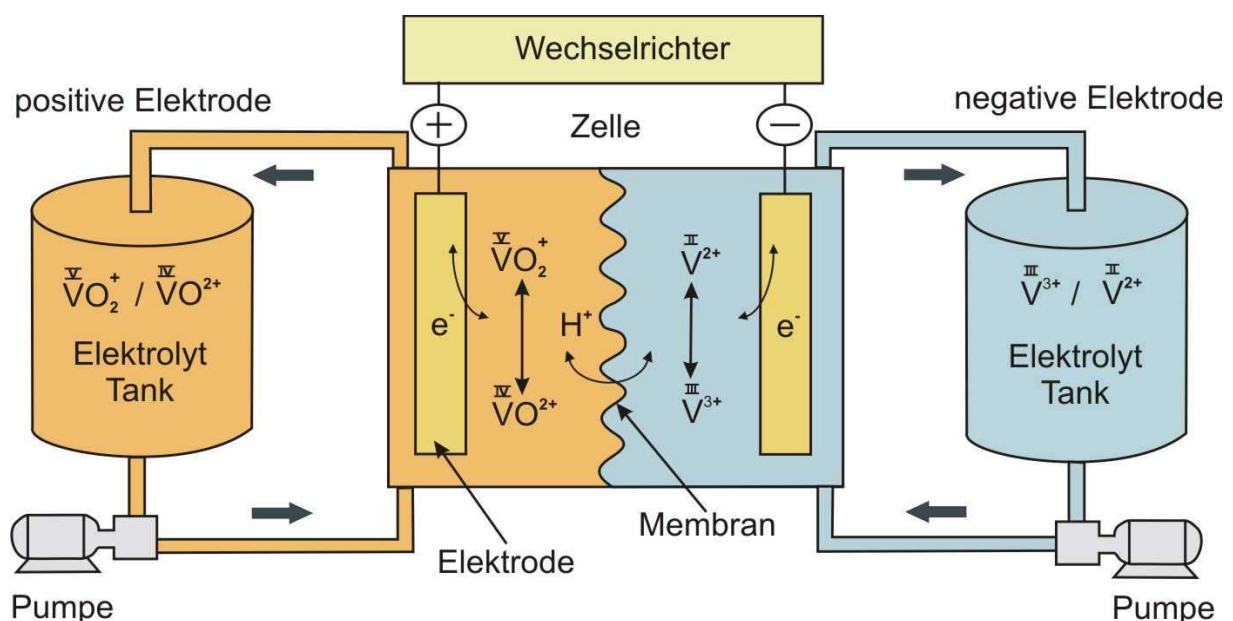


Abbildung IV-7: Vanadium Redox-Flow Batterie [Neupert, 2008]

In einem **Schwungmassenspeicher** wird Energie in Form kinetischer Rotationsenergie einer Schwungmasse gespeichert. Sie sind innerhalb von Millisekunden zur Leistungsaufnahme oder Abgabe bereit und können bis einige Minuten lang Energie ausspeichern. Außerdem zeichnen sie sich durch eine hohe und verlustarme Zyklenzahl sowie Wirkungsgrade von 90 % aus. Bei einer Zusammenfassung in Modulen können sie zu Leistungen von einigen MW zusammengefasst werden. Ein Nachteil ist allerdings die hohe Verlustrate von mehreren Prozent pro Stunde. Dadurch eignen sie sich besonders für den Bereich der USV und Netzstabilisierung oder in Kombination mit Notstromaggregaten. Auch in Micro-Grid Netzwerken können somit Laständerungsanforderungen an KWK-Anlagen gemindert werden. Niedertourige Schwungmassenspeicher werden bereits in großen Stückzahlen eingesetzt und auch für hochoctourige wird eine Marktreife in absehbarer Zeit gesehen [VDE, 2009], [Hanning et al., 2009].

In **Doppelschichtkondensatoren** wird elektrische Energie direkt in Form eines elektrischen Feldes gespeichert. Zur Erhöhung der Kapazität und somit der Leistung und Speicherkapazität gegenüber herkömmlichen Kondensatoren wird ein hochporöses Elektrodenmaterial mit sehr großer effektiver Oberfläche eingesetzt. Auf Grund einer hohen Selbstentladungsrate und sehr hohen möglichen Zykluszahlen eignen sie sich für Lade-/Entladezeiten von ca. 10 Sekunden und somit für den Bereich der USV und Netzqualitätssicherung. Aktuell werden sie vor allem zur Spannungsstabilisierung in Bordnetzen z.B. von Hybridfahrzeugen. Ein großflächiger Einsatz in Stromnetzen und –systemen wird auf Grund hoher Kosten und geringer Leistungen nicht erwartet [VDE, 2009], [Hanning, 2009], [DENA, 2010]

Ebenso wie für Doppelschichtkondensatoren wird auch für **Supraleitende Magnetische Energiespeicher (SMES)** nur ein sehr eingeschränktes Speicherpotential für die elektrische Energieversorgung gesehen. Zum einen ist eine energieintensive Kühlung (mit Helium auf 4,2 K) notwendig um Supraleitung in Spulen zu ermöglichen. Zum anderen treten Verluste im Anschlussbereich der kurzgeschlossenen Spule zu einem Koppelstromrichter, der die elektrische Energie ein- und ausspeichern kann, auf.

Im Bereich der **Batterien** gibt es eine Vielzahl verschiedener Technologien. Zu den Niedertemperaturbatterien zählen die Bleibatterie, die Nickel-Cadmiumbatterie (NiCd), die Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH) sowie die Lithium-Ionen Batterie. Zu den Hochtemperaturbatterien zählen die Natrium-Nickel-Chlorid (NaNiC bzw. auch Zebrabatterie) sowie die Natrium-Schwefel-Batterie (NaS). Hohes Potenzial wird auch der Schwefel-Luft-Batterie und der Lithium-Luft-Batterie zugetraut, die aber noch in einem frühen Entwicklungsstadium sind. Insgesamt lassen sich mit Batterien teilweise sehr hohe Wirkungsgrade von bis zu 95 % erreichen, wobei sie aber eine schlechte Zykluslebensdauer besitzen. Sie erreichen durchschnittliche Lebensdauern von drei bis zwölf Jahren. Dafür überzeugen sie durch ihre Bereitschaftszeiten im Millisekundenbereich, wodurch sie prinzipiell für einen Einsatz als Primärreserve (Sekundenreserve) sowie zur Netzstabilisierung und zum Abfangen von Spitzenlasten denkbar sind. Weitere Einsatzbereiche von Batterien liegen bisher hauptsächlich im Automobilsektor, der Elektrotraktion⁴, und im Bereich portabler Anwendungen⁵.

Die zurzeit weitverbreitetste Technologie ist die Bleibatterie, die insbesondere im Automobilbereich und als Starterbatterie eingesetzt wird. Auch wurden und werden sie weltweit für die Spannungs- und Frequenzstabilisierung insbesondere in Inselnetzen eingesetzt. Die größte deutschlandweite Anlage wurde in Berlin zur Stabilisierung des dortigen Inselnetzes zu Zeiten des kalten Krieges errichtet (17 MW).

⁴ Rollstühle, Gabelstapler

⁵ Laptops, Handys, etc.

Das größte Potential wird derzeit den Lithium-Ionen-Batterien zugesprochen, da sie innerhalb der Batterietechnologien über eine sehr hohe gravimetrische Speicherdichte verfügen. Da sie auch von vielen Automobilherstellern als Batterie für elektrische Automobile vorgesehen ist, wird eine weitere Entwicklung und Kostenreduzierung durch eine Massenproduktion erwartet [VDE, 2009], [Hanning et al., 2009], [DENA, 2010].

V. Einsatzgebiete elektrischer Energiespeicher

Eine Einteilung der Aufgaben elektrischer Energiespeicher ist in Kapitel III zu sehen. In diesem Kapitel sollen nun die verschiedenen Technologien den einzelnen Aufgaben zugeordnet werden.

Wasserstoff, erneuerbares Methan, Druckluft und Pumpspeicherkraftwerke sind hierbei auf Grund ihrer großen Speicherkapazitäten für eine mittlere bis langfristige Stromspeicherung geeignet. Beginnend mit der Bereitstellung von Sekundär- und Tertiärregelleistung reicht das Einsatzspektrum bis hin zu einer saisonalen Speicherung. Auch Redox-Flow Batterien sind u.a. für den Einsatz als Regelleistung und im Tageslastausgleich sehr gut denkbar. Die Vorteile der Speichersysteme liegen in der Entkoppelung der Speichereinheit und der Leistungseinheit. Dadurch kann die Speichergröße unabhängig von der Ein- und Ausspeicherleistung bestimmt werden.

Für die saisonale Speicherung sind insbesondere der Wasserstoff und das erneuerbare Methan auf Grund ihrer hohen Speicherdichte am besten geeignet. Abbildung V-1 zeigt einen Vergleich von Wasserstoff, Druckluft und Pumpspeicherkraftwerken bei gleichem Speichervolumen von 8 Millionen m³.

Der Einsatz von Batteriesystemen und Redox-Flow Batterien sind sowohl für Aufgaben im Sekundenbereich (USV, Spannungs- & Frequenzstabilisierung) als auch für Tagesspeicherleistungen geeignet. Doppelschichtkondensatoren sowie Schwungradspeicher hingegen werden durch ihre hohen Zyklenzahlen für Ausspeicherungen im Sekundenbereich eingesetzt (Abbildung V-2; Tabelle V-1).

Bei Batterien hingegen ist die Ein-/Ausspeicherleistung direkt mit der Speicherkapazität gekoppelt wodurch große Batteriesysteme teuer und großflächig werden. Im Allgemeinen zeichnen sie sich durch ihre schnellen Zugriffszeiten aus und sind somit auch für die USV und Spannungs- & Frequenzstabilisierung (SFS) einsetzbar. Allerdings sind Batterien nicht für hohe Zykluszahlen ausgelegt, wodurch sich die Lebenszeit auf drei bis zwölf Jahre begrenzt. Dies widerspricht einem Einsatz im Bereich der USV und SFS. Meist werden dafür auch sehr große Leistungen in sehr kurzen Zeiten abgerufen, was sich ebenfalls negativ auf die Leistungsausnutzung von Batterien auswirkt. Bleibatterien können bei einer Schnellentladung nur 50 – 70 % ihrer eigtl. Kapazität ausspeichern [VDE, 2009].

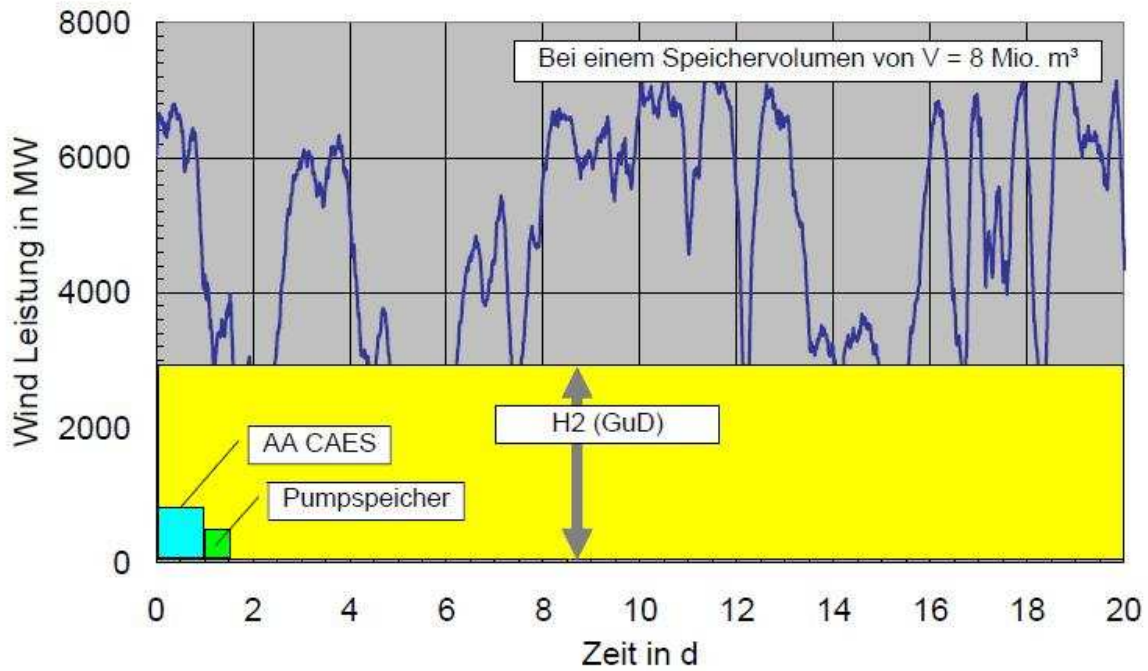
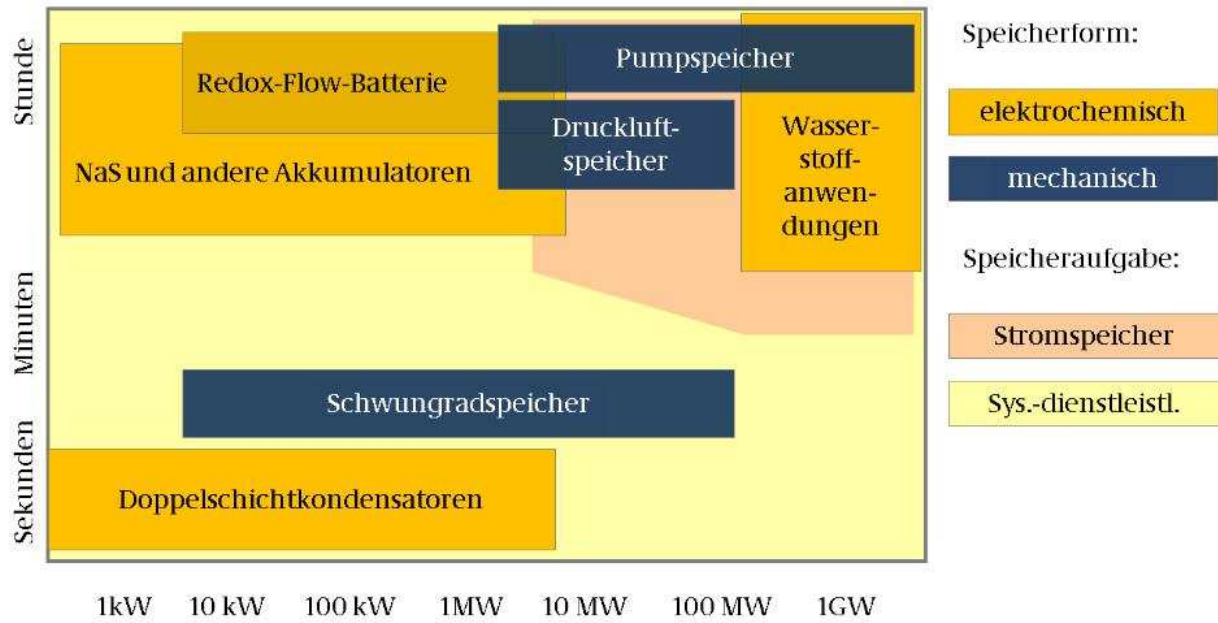


Abbildung V-1: Speicherkapazitäten im Vergleich mit Einspeisung von Windenergie in das Netz der E.ON Netz AG Anfang 2007 [VDE, 2009]

Tabelle V-1: Eignungen der Energiespeichertechnologien: nach [Neupert, 2008]

	USV	Sekundenreserve	Spannungs- & Frequenzstabilisierung	Tageslastausgleich	Wochen & Jahreslastausgleich
Akkumulatoren	+	+	o	+	-
Doppelschichtkondensatoren	+	++	+	-	-
SMES	+	++	++	-	-
Schwungräder	+	++	++	-	-
Redox-Flow	+	+	o	++	o
Druckluft	-	-	-	++	+
Pumpspeicher	-	o	-	++	+
Wasserstoff	-	-	-	+	++
Ern. Methan	-	-	-	+	++



Quelle: verändert nach energy storage association (2011).

Abbildung V-2: Einteilung Energiespeicher nach Speicheraufgabe und Bereitstellungszeit [Seidl, 2011]

VI. Wärmespeicher

Wie in Kapitel III.2 erläutert können thermische Energiespeicher im Bereich der Brauchwasser- und Raumheizungspeicherung eingesetzt werden. Prinzipiell lässt sich ein Wärmespeicher in den Bereich der Hochtemperaturspeicher (über 500°C), Mitteltemperaturspeicher (100° bis 500°C) und Niedertemperaturspeicher (unter 100°C) einteilen (Tabelle VI-1). Die Hoch- und Mitteltemperaturspeicher eignen sich zur Speicherung von Prozesswärme, die anschließend in Dampf- bzw. Organic-Rankine Cycle Prozessen in Strom umgewandelt werden kann. Prozesswärme kann neben einer Stromproduktion auch für weitere heiße Prozessschritte z.B. Warmglühen von Stahl zwischengespeichert werden. Weiterhin lassen sich Wärmespeicher auch nach der Speicherdauer oder der Speichertechnologie einteilen. Eine Übersicht der verschiedenen Möglichkeiten zeigt

Tabelle VI-1: Einteilung von Wärmespeichern [Neupert, 2008]

<p>Einsatztemperaturbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> - Niedertemperaturbereich (bis 100 °C) - Mitteltemperaturbereich (ca. 100-500 °C) - Hochtemperaturbereich (über 500 °C) 	<p>Speicherdauer</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kurzzeitspeicher (Minuten bis Stunden) - Langzeitspeicher (Tage bis Monate)
<p>Anwendungsbereiche</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brauchwassererwärmung - Raumheizung - Speicherung von Prozesswärme 	<p>Speichertyp</p> <p>Kapazitive (Sensible) Wärmespeicher</p> <ul style="list-style-type: none"> - Heißwasser-Speicher - Kies-Wasser-Speicher - Erdsonden-Speicher - Aquifer-Speicher - Dampfspeicher - Fluidspeicher - Feststoffspeicher <p>Sorptionsspeicher</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adsorptionsspeicher - Absorptionsspeicher - Speicher auf Basis reversibler chem. Bindungen <p>Latentwärmespeicher</p> <ul style="list-style-type: none"> - Latentwärmespeicher

Für die Speicherung von Brauchwasser und Raumheizungen werden meist Kurzzeitspeicher in den einzelnen Haushalten eingesetzt. Zur größeren Wärmespeicherung in Nahwärmenetzen hingegen kommen eher Langzeitspeicher zum Einsatz. Diese können die Wärme im Sommer einspeichern und im Winter an ganze Wohnsiedlungen wieder abgeben.

Technologisch lässt sich die Wärmespeicherung in die sensible Speicherung, die chemische Speicherung und in latente Wärmespeicher unterteilen. In sensiblen Speichern wird die Wärme mittels der jeweiligen Wärmekapazität eines Stoffes gespeichert. Latentwärmespeicher hingegen nutzen die meist deutlich größeren Verdampfungs bzw. Schmelzenthalpien. Wasser z.B. hat eine Schmelzwärme von 332,5 kJ/kgK und eine Verdampfungsenthalpie von 2257 kJ/kgK. Die Wärmekapazität hingegen beträgt nur 4,18 kJ/kgK. Ein weiterer Vorteil von Latentwärmespeichern ist, dass sie ihre Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau abgeben und dass sie sowohl zur Temperierung als auch zur Kühlung eingesetzt werden können. Ein Speichermaterial, dass bei 22°C die Phase wechselt kann somit an heißen Tagen ($T_{umg} > T_{22}$) Kühlleistung bereitstellen und an kalten Tagen ($T_{umg} < T_{22}$) Heizleistung.

In chemischen Speichern wird die Wärme durch eine reversible chemische Reaktion gespeichert. Diese Speichermethode eignet sich auf Grund ihrer geringen Verlusten insbesondere für eine Langzeitspeicherung.

In Kombination mit einer solarthermischen Anlage kann somit eine konstante Wärmeversorgung im Bereich privater Haushalte oder für Bürogebäude gewährleistet werden.

Hierfür eignen sich besonders Latentwärmespeicher, die Energie als Phasenwechselenthalpie aufnehmen bzw. abgeben. Dadurch kann die Wärme und/oder Kälte auf einem konstanten Temperaturniveau angeboten werden. Im Niedertemperaturbereich sind über 100 verschiedene Latentwärmespeichermaterialien bekannt, von denen einige bereits kommerziell eingesetzt werden. Tabelle VI-2 zeigt eine Übersicht über verschiedenen Einsatzgebiete von Wärmespeichertechnologien.

Tabelle VI-2: Wärmespeichertechnologien und ihre Einsatzgebiete [Neupert, 2008]

	Kurzzeit-speicher	Langzeit-speicher	Niedertempe-raturwärme	Mitteltempe-ratur-wärme	Hochtempe-ratur-wärme
<i>Kapazitive (Sensible) Wärmespeicher</i>					
Heißwasserspeicher	+	+	+	-	-
Kies-Wasser-Speicher	-	+	+	-	-
Erdsonden-Speicher	-	+	+	-	-
Aquifer-Speicher	-	+	+	-	-
Dampfspeicher	+	-	-	+	-
Fluidspeicher	+	-	-	+	+
Feststoffspeicher	+	-	-	+	+
<i>Sorptionsspeicher</i>					
Adsorptionsspeicher	- ¹⁾	+	+	+	-
Absorptionsspeicher	- ¹⁾	-	-	-	-
Reversible chemi-sche Bindungen	- ¹⁾	+	+	+	-
<i>Latentwärmespeicher</i>					
Latentwärmespei-cher	- ¹⁾	+	+	-	-

+ zutreffend - nicht zutreffend

1) Verwendung als Kurzzeitspeicher generell denkbar, Verwendung als Langzeitspeicher steht jedoch im Vordergrund

VII. Zusammenfassung und Ausblick

Bei einem Umbau des Stromversorgungssystems hin zu 100% erneuerbaren Energien steigt die Volatilität der in das Netz eingespeisten Energien beträchtlich. Die Hauptlast der Stromversorgung werden durch die Windkraft und die Photovoltaik getragen werden, die an sich nicht grundlastfähig sind. Trotzdem muss der Lastgang stets dem Stromverbrauch folgen um die Netzstabilität gewährleisten zu können. Durch die Volatilität der beiden Technologien insbesondere aber der Photovoltaik müssen zum einen Systemdienstleistungen⁶ und zum anderen Stromspeicher für Regelleistung und für langfristige Windflauten⁷ und Nicht-Sonnenzeiten (vgl. Abbildung V-2) bereitgestellt werden.

Gerade Photovoltaikanlagen mit ihren abrupten Leistungsabfällen im Falle von Wolkendurchzug müssen in Zukunft „grundlastfähiger“ gestaltet werden. Um solche kurzzeitigen Ausfälle innerhalb von Sekunden kompensieren zu können sind Batteriesysteme am geeignetsten. Diese können in Privathaushalten direkt mit der PV-Anlage installiert werden. In Zusammenhang mit Windparks, und regelbaren, biogasbetriebenen BHKW oder Mikrogasturbinen⁸ und/oder Geothermiekraftwerken können ergeben sich sogenannte „regenerative Kombikraftwerke“, die dezentral eine größtenteils autonome Versorgung ermöglichen [FVEE, 2010].

Für die langfristige Speicherung haben Modellrechnungen des Leitszenarios [BMU, 2010] ergeben, dass selbst trotz eines verstärkten internationalen Stromausgleichs durch ein europäisches Übertragungsnetz und trotz ausgeprägtem Demand-Side-Management weiterhin großtechnische Stromspeicher nötig sein werden. Hierfür kommen sowohl technologisch als auch kostentechnisch lediglich Wasserstoff bzw. EE-Methan in Frage [VDE, 2009], mit denen laut [BMU, 2010] ca. 10 TWh/a für einen Kraftwerkspark von 40 GW an Wasserstoff-GuD und BHKW bereitgestellt werden.

Eine Weitere Möglichkeit dem Lastgang flexibel folgen zu können ist die Entkopplung von Strom- und Wärmeabnahme in KWK-Anlagen und BHKW durch thermische Energiespeicher. Diese Anlagen werden z.T. nach dem Wärmebedarf gefahren, so dass die Stromproduktion ebenfalls volatil ist. Bei Installation eines im Vergleich zum Stromspeicher günstigeren Warmwasserspeichers können diese Anlagen flexibel auf die Volatilität von Wind und PV reagieren ohne die Wärmeversorgung zu beeinträchtigen.

Schlussendlich wird es eine wirtschaftliche Frage sein, ob und in welchem Anforderungsbereich sich Energiespeicher durchsetzen werden. Theoretisch ist bei ausreichenden Überkapazitäten mit regelbaren Kraftwerken und sehr gut ausgebauten Übertragungsnetzen auch ein Versorgungssystem ohne Stromspeicher denkbar. Größtes Hindernis der Wirtschaftlichkeit sind, die noch zu hohen Investitionskosten sowie das Fehlen einer Marktstruktur für Energiespeichertechnologien. Durch die derzeitige Entkopplung von Strommarkt und Netzbetrieb kann es außerdem noch zu Unterschieden in der netztechnischen und wirtschaftlich optimalen Betriebsweise kommen, wodurch eine Markteinführung erschwert wird. Bei derzeitigen Preisverhältnissen ist im Arbitrage-Modus keine der Speichertechnologien, selbst bei kostenlosen Strombezugspreisen finanzierbar [DNA, 2010]. Zukünftig ist eine Einbettung in bestehende Marktstrukturen zu entwickeln und Anreizsystem ähnlich den Einspeisevergütungen der Erneuerbaren Energien aufzusetzen um eine Kostendegression zu erzielen. Weiterhin ist

⁶ Unterbrechungsfreie Stromversorgung & Notstromversorgung

⁷ Im Bereich mehrerer Wochen

⁸ Wiederrum mit Biogaszwischenspeicher, da Biogas konstant produziert wird

die Frage zu klären in wessen Zuständigkeitsbereich die Speicher gehören: zum Anlagenbetreiber oder direkt dem Netzbetreiber.

Referenzen

[Bauer, 2010]

Bauer C.; Bereitstellung von Regelenergie durch industrielle Verbraucher und Erzeuger; Abgerufen am 15.07.2011 von http://www.vik.de/fileadmin/vik/Vortraege/isg/101007ISG_Bauer.pdf

[BINE, 2011]

BINE Informationsdienst (2011); Abgerufen am 15.07.2011 von <http://www.bine.info/hauptnavigation/publikationen/publikation/druckluftspeicher-kraftwerke/?subpageof=&artikel=277>

[BMU, 2010]

Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (Dezember 2010): „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2010“;

[DENA, 2010]

DENA- Deutsche Energie Agentur; „Dena-Netzstudie 2 – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025“

[FRSW, 2011]

Freiburg – Schwarzwald 2011, Solare Wasserstoffwirtschaft, Wasserstoff zum Endverbraucher“ abgerufen am 15.07.2011 von <http://www.frsw.de/bio-wasserstoff.htm>

[FVEE, 2010]

Fachverband Erneuerbare Energien (FVEE) (2010): „Energiekonzept 2050 - Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien“, Erstellt vom Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“, Berlin.

[Hanning, 2009]

Hanning F., Smolinka T., Bretschneider P., Nicolai S., Krüger S., Meißner F., Voigt M., (2009); „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie“ BMWi Auftragsstudie 08/28

[Jossen, 2007]

Jossen A. (2007); Elektrische Redox-Flow Batterien – Ein System zur Langzeitspeicherung“; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW), Ulm

[Kruck, 2008]

Kruck C.; „Integration einer Stromerzeugung aus Windenergie und Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Druckluft-Speicherkraftwerken“ Dissertation – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart

[Neupert, 2008]

Neupert et al.; Energiespeicher – Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial, Fraunhofer Institut

[PG, 2011a]

VDI-suj Projektgruppe „Energiekonzept der Zukunft – 100% nachhaltige Energieversorgung 2050“ (2011): „Hintergrundpapier zum Thema Energieversorgung heute in Deutschland“.

[PG, 2011b]

VDI-suj Projektgruppe „Energiekonzept der Zukunft – 100% nachhaltige Energieversorgung 2050“ (2011): „Hintergrundpapier zum Thema Carbon capture and sequestration / utilization“.

[Popp, 2010]

Popp M., 2010; „Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien“, Springer Verlag

[Schulz, 2011]

Schulz S. (2011); Warum der Stromausfall ausfällt; Abgerufen am 15.07.2011 von <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,765006-2,00.html>

[Seidl, 2011]

Seidl H. 2011; Beitrag von Pumpspeicherkraftwerken und anderen Stromspeichern zur Integration erneuerbarer Energien“ Kongress Energiespeicher – Technologien für die zukünftige Stromversorgung – Nürnberg 2011

[VDE, 2009]

VDE – Verband der Elektrotechnik, 2009; Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger

Abbildungsverzeichnis

Abbildung III-1:	Windstromeinspeisung im Winter 2009 verglichen mit Gesamtnachfrage [Seidl, 2011]	6
Abbildung III-2:	Nachgefragte Last in Deutschland [Schulz, 2011].....	6
Abbildung IV-1:	Einteilung Energiespeicher	8
Abbildung IV-2:	Pumpspeicherkraftwerk [VDE, 2009].....	9
Abbildung IV-3:	Pumpspeicherkraftwerk [Popp, 2010].....	9
Abbildung IV-4:	Adiabates Druckluftspeicherkraftwerk.....	10
Abbildung IV-5:	Wasserstoffspeicherkraftwerk [FRSW, 2011]	11
Abbildung IV-6:	Erneuerbares Methan – Speicherung.....	11
Abbildung IV-7:	Vanadium Redox-Flow Batterie [Neupert, 2008]	12
Abbildung V-1:	Speicherkapazitäten im Vergleich mit Einspeisung von Windenergie in das Netz der E.ON Netz AG Anfang 2007 [VDE, 2009].....	15
Abbildung V-2:	Einteilung Energiespeicher nach Speicheraufgabe und Bereitstellungszeit [Seidl, 2011]	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle III-1:	Reserveleistung für Regelung in MW [Bauer, 2010].....	7
Tabelle V-1:	Eignungen der Energiespeichertechnologien: nach [Neupert, 2008].....	15
Tabelle VI-1:	Einteilung von Wärmespeichern [Neupert, 2008].....	17
Tabelle VI-2:	Wärmespeichertechnologien und ihre Einsatzgebiete [Neupert, 2008]	18

Autoren für den VDI-suj:

Stefan Hübner (Dipl. - Ing. Energie- und Verfahrenstechnik)

Fabian Feldhoff (Dipl. - Ing. Energietechnik)

Carina Hofmann (Dipl. - Ing. Energiesystemtechnik (FH))

Jan Oliver Kammesheidt (International Industry Sector & Key Account Manager RE,
Dipl.-Wirtsch. -Ing.)

Franco Schubert (Student Energie- und Umwelttechnik, HTWK Leipzig)

Begleitung:

Hans Müller (VDI)

Claudia Rasche (VDI)

Tabea Wilk (VDI)

Cornelia Fleischer (VDI)

Philipp Leifeld (VDI)

Kontakt:

www.vdi.de/vdi-asme

Energieprojekt-VDI-ASME@vdi.de