



Ausarbeitung

Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeichersysteme



Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeichersysteme[REDACTED]
Aktenzeichen:

Abschluss der Arbeit:

Fachbereich:

[REDACTED]
WD 8 - 3000 - 032/14

10. Juni 2014

WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

[REDACTED]

[REDACTED]

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Energiespeichersysteme	4
2.1.	Speicherformen für Energie	4
2.2.	Anforderungen an Speichersysteme	5
2.3.	Typisierung von Stromspeichern	6
2.3.1.	Speicherdauer	7
2.4.	Speicherkosten	8
2.5.	Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher	9
3.	Arten von Speichersystemen	10
3.1.	Vorbemerkung	10
3.2.	Kurzzeitspeicher	10
3.2.1.	Akkumulatoren	10
3.2.1.1.	Blei-Säure-Akkumulatoren	10
3.2.1.2.	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	11
3.2.1.3.	Natrium-Schwefel-Batterien	11
3.2.1.4.	Redox-Flow-Batterien	11
3.2.1.5.	Kombinationen verschiedener Akkumulatoren	12
3.2.1.6.	Weitere Akkumulatortypen	12
3.3.	Langzeitspeicher	12
3.3.1.	Druckluftspeicherkraftwerke	12
3.3.2.	Pumpspeicherkraftwerke	13
3.3.3.	Speicherung als Wasserstoff oder synthetisches Methan	14
3.3.3.1.	Wasserstoff	15
3.3.3.2.	Synthetisches Methan	16
3.4.	Wärmespeicher	18
4.	Zusammenfassung	19
5.	Literatur- und Quellenverzeichnis	20
6.	Linksammlung	22
7.	Anlagenverzeichnis	24

1. Einleitung

Im Verlauf des **Umbaus der Energielandschaft** zu einem von erneuerbaren Energien geprägten System in der Bundesrepublik Deutschland gewinnen die verschiedenen Energiespeichersysteme immer mehr an Bedeutung.

Zur Kompensation von **witterungs- und saisonal bedingten Schwankungen** des Leistungsangebotes von **Windkraft und Photovoltaik** sind neben Maßnahmen des Erzeugungs-, Einspeise- und Demand Side Managements, der Flexibilisierung des Kraftwerksparks¹ sowie des Netzausbaus vor allem **neue Möglichkeiten zur Mittel- und Langzeitspeicherung** von deutlich größeren Energiemengen mit **ausreichender Speicherkapazität** und den jeweiligen Erfordernissen **entsprechender Verfügbarkeit** der gespeicherten Energie erforderlich.

Auf diese Weise können die erneuerbaren Ressourcen trotz der auftretenden Fluktuationen über die Zeit (ihrer sogenannten Volatilität) optimal nutzbar gemacht und fossile Quellen zuverlässig ersetzt werden.

Die vorliegende Ausarbeitung gibt einen Überblick über die **wesentlichen Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeichersysteme**. Für weitere umfangreiche Details wird auf das Literatur- und Quellenverzeichnis sowie auf die beigefügten Anlagen und die Linksammlung verwiesen.

2. Energiespeichersysteme

2.1. Speicherformen für Energie

Im Moment der Gewinnung oder des Anfallens (z.B. von prozessbegleitender Wärmeenergie) überschüssige Energie kann in unterschiedlichen Formen gespeichert werden.

Dabei gilt in allen Fällen, dass **jede Umwandlung** einer Energieform in eine andere **unweigerlich mit Umwandlungsverlusten verbunden** ist. Das bedeutet zum Beispiel, dass, solange der aus erneuerbaren Quellen gewonnene Strom in Form von Elektrizität weitergeleitet und sofort verbraucht werden kann, dies in den meisten Fällen die energetisch günstigste Variante ist.

Technisch **gebräuchliche Speicherformen** für Energie sind:

- | | |
|----------------------------|--|
| • elektrische Energie | z.B. Kondensatoren, Super Caps |
| • potenzielle Energie | z.B. Pump- und Druckluftspeicherkraftwerke |
| • kinetische Energie | z.B. Schwunghmassespeicher |
| • elektrochemische Energie | z.B. Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien |
| • chemische Energie | z.B. Wasserstoff, synthetisches Methan |
| • Wärmeenergie | z.B. Wärme- und „Kälte“-speicher |

¹ Flexibilisierung des Kraftwerksparks bedeutet, dass Kraftwerke so konzipiert werden, dass sie sich schnell starten und abschalten lassen und in der Lage sind, die Menge an produzierter elektrischer Leistung dynamisch und flexibel an den tatsächlichen aktuellen Bedarf anzupassen.

2.2. Anforderungen an Speichersysteme

Stromspeicher sollen Schwankungen im Stromangebot im Bereich von Millisekunden (unterbrechungsfreie Stromversorgung) bis zu einigen Stunden abfedern.

Eine Speicherung von größeren Energiemengen über Tage oder Wochen (Langzeitspeicherung) soll meteorologische und jahreszeitliche Schwankungen im Energieangebot ausgleichen (siehe 2.4. und 3.3.).

Auswahlkriterien für Energiespeichersysteme sind z.B.:

- Speicherkapazität Welche **Energiemenge** kann insgesamt gespeichert werden?
- Energiedichte Wie viel **Energie** kann **pro Massen- bzw. Volumeneinheit** gespeichert werden?
- Reaktionszeit **Wie schnell** steht die gespeicherte Energie zur Verfügung?
- Zyklfestigkeit **Wie oft** kann Ein- und Ausspeicherung wiederholt werden?
- Kosten für Bau und Betrieb Welche **Kosten** entstehen für Bau und Betrieb? (und damit **pro** gespeicherter **Energieeinheit**)
- Wirkungsgrad Welche (Umwandlungs-) **Verluste** treten auf?
- Speicherdauer Über **welche Zeiträume** soll die Energie gespeichert werden?

Anforderungen an Speichertechnologien

- Energetische Effizienz hohe Energiedichte
hohe Leistungsdichte
niedriger kumulierter Energieaufwand
geringe Verluste
geringe Selbstentladung
geringer Hilfsenergieverbrauch
hoher Systemnutzungsgrad
- Sicherheit hohe Betriebssicherheit
geringes Schadenspotenzial
- Lebensdauer hohe kalendarische Lebensdauer
hohe Anzahl möglicher Ein- und Ausspeicherzyklen
- Umweltverträglichkeit bei der Herstellung
bei der Nutzung
beim Recycling bzw. bei der Entsorgung
- Wirtschaftlichkeit niedrige Kosten für die Investition

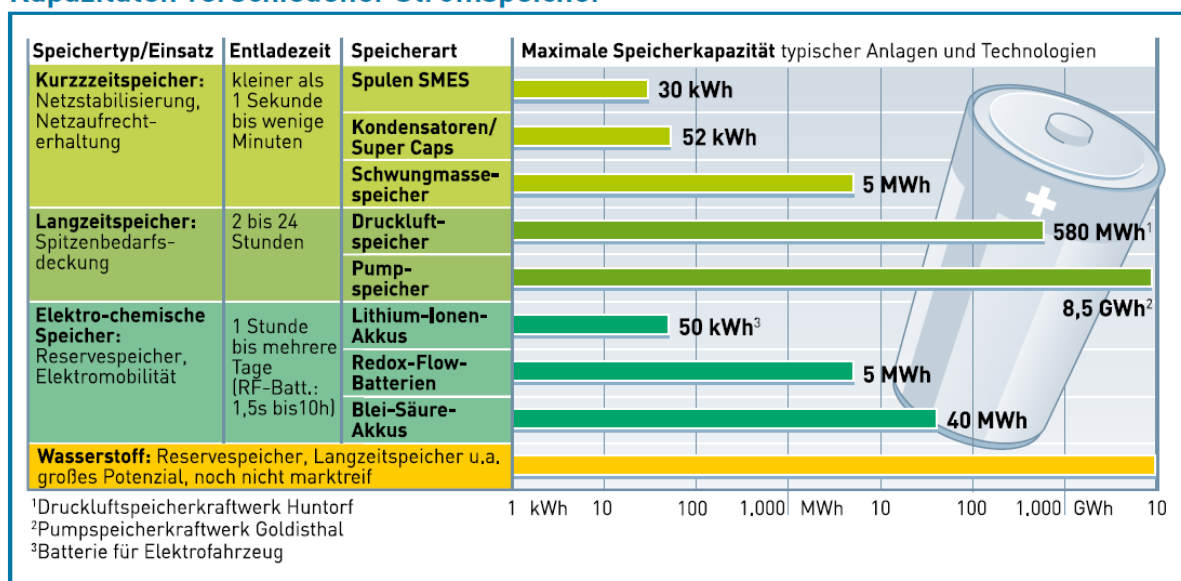
2.3. Typisierung von Stromspeichern

Die in der nachfolgenden Tabelle vorgenommene Typisierung von Stromspeichern ausgehend vom benötigten Speicherzeitraum ist dem Arbeitsbericht Nr. 147 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag entnommen (Grünwald et al. 2012: 64; Zusammenstellung nach Gatzten/Riechmann 2011 bzw. Sauer 2011).

Speicherzeitraum	Minuten- bis Stundenspeicher	Minuten- bis Tagesspeicher	Langzeitspeicher
Einsatzbereiche	Systemdienstleistungen, Sekundärregelung, Minutenreserve, Blindleistung	Spitzenlastdeckung, Netz- bzw. Einspeisemanagement, Ausnutzung von Preisdifferenzen	saisonaler Ausgleich
Energieabgabe bei Volllast	weniger als 15 Minuten	bis zu 10 Stunden	viele Tage
Zyklenzahl	viele am Tag	1 bis 2 am Tag	wenige im Jahr
Beispiele	Redox-Flow-Batterie	Pumpspeicher, Druckluftspeicher	Wasserstoff, Power to Gas

In der **Abbildung 1** (aus Mahnke et al. 2012: 7) werden die maximalen Speicherkapazitäten von verschiedenen, bereits heute genutzten Speichereinrichtungen bzw. -technologien verglichen.

Kapazitäten verschiedener Stromspeicher



Quelle: IFEU, TAB, Sauer, eigene Darstellung

Abbildung 1: Kapazitäten verschiedener Stromspeicher
[Quelle: Mahnke et al. 2012: 7]

2.3.1. Speicherdauer

Die unterschiedlichen Schwankungsmuster bei der Einspeisung von Strom aus Photovoltaik bzw. aus Windenergie einerseits und dem Stromverbrauch andererseits erfordern **Speicherkapazitäten für verschieden lange Zeiträume**. Dabei kommen je nach betrachteter Zeitskala unterschiedliche Technologien zum Einsatz.

Schwankungen treten innerhalb folgender Zeitfenster auf (nach Einhellig und Eisfelder 2012):

- Subsekundenbereich bis zu wenigen Minuten (Fluktuationen bei der Einspeisung)
- bis zu einem Tag (z.B. Tagesgang bei Photovoltaik)
- bis zu drei Tagen (Schwankungen)
- ein bis zwei Wochen (anhaltende Stark- oder Schwachwindperioden)
- saisonaler Ausgleich (Sommer/Winter)

Eine graphische Übersicht in der **Abbildung 2**, die die Einsatzbereiche verschiedener Speichertechnologien anhand des **Verhältnisses von Leistung zu gespeicherter Energiemenge** visualisiert, ist dem Arbeitsbericht Nr. 147 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag entnommen (Grünwald et al. 2012: 65; nach LBST et al. 2012: 70).

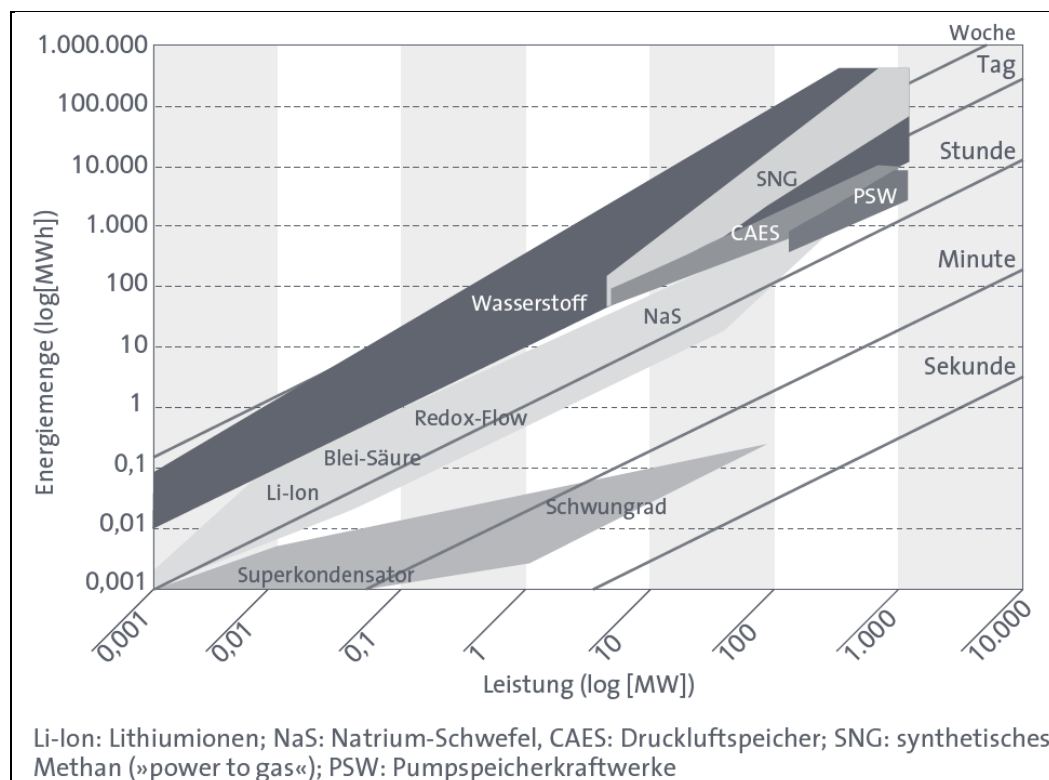


Abbildung 2: Einsatzbereiche verschiedener Speichertechnologien
[Quelle: Grünwald et al. 2012: 65]

Dieser Darstellung kann entnommen werden, dass die verschiedenen Batterieformen (Lithium-Ionen, Redox-Flow, Natrium-Schwefel, Blei-Säure) sowie Druckluft- und Pumpspeicherwerke im Bereich der stunden- bis tageweisen Speicherung von Energie eingesetzt werden können.

Die chemischen Speicherformen (Wasserstoff und synthetisches Methan) eignen sich für eine Langzeitspeicherung (über Tage bzw. Wochen).

Den **Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und Ansprechzeit des Speichers** visualisiert die Darstellung in der **Anlage 1** (aus Sterner 2013).

2.4. Speicherkosten

Ein Kostenvergleich der unterschiedlichen Speichertechnologien ist schwierig, da die Speicherkosten von einer Vielzahl von Faktoren abhängen, wie z.B. Investitionskosten, Stromkosten, energetische Verluste (z.B. durch Umwandlungsprozesse), Betriebsmodus (Anzahl der Speicherzyklen im Jahr) u.a. (Sauer 2008).

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die Speicherkosten steigen, wenn die Speicherdauer ansteigt (DENA 2010: 76).

Die nachfolgenden beiden Abbildungen aus dem Arbeitsbericht Nr. 147 des Büros für Technikfolgenabschätzung zeigen Kostenvergleiche für den täglichen (**Abbildung 3**) bzw. den wöchentlichen (**Abbildung 4**) Zyklus verschiedener Speicheroptionen (Grünwald et al. 2012: 69f).

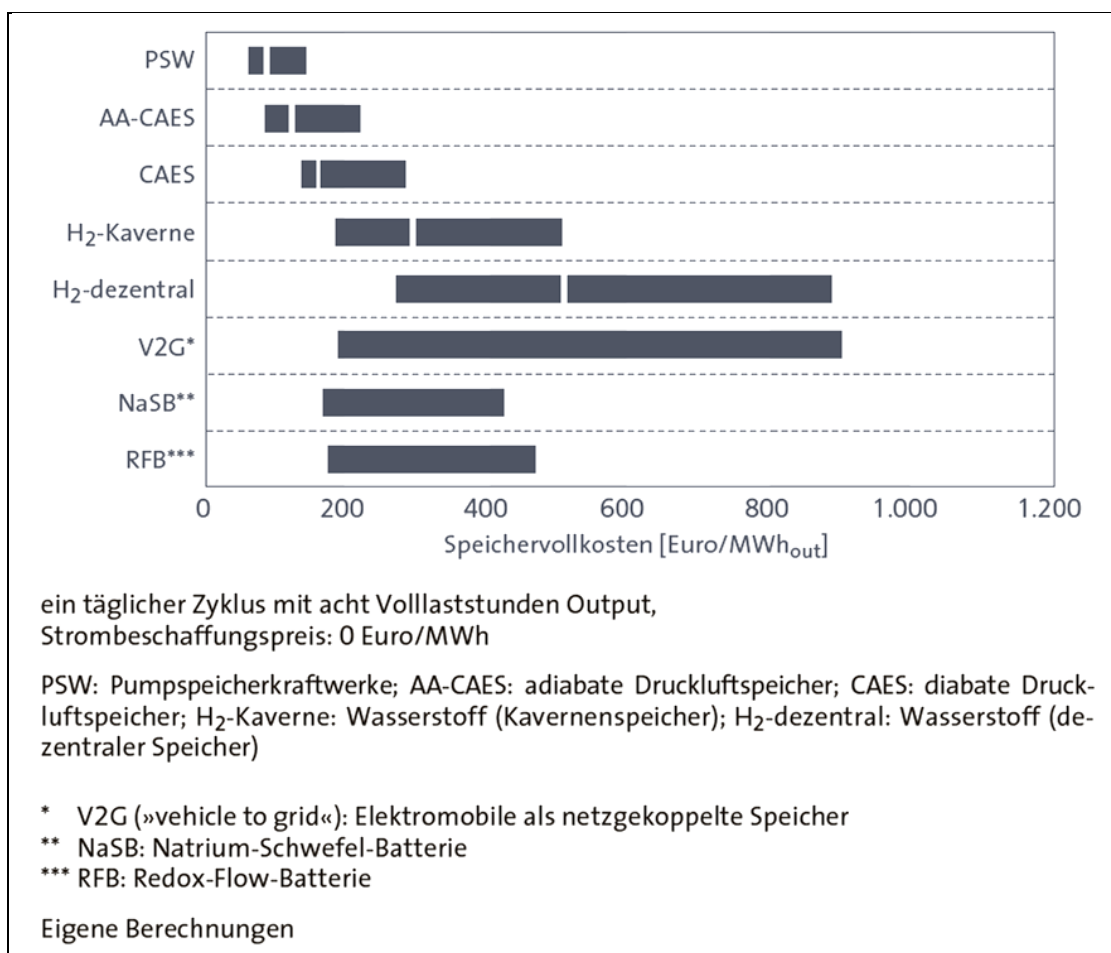


Abbildung 3: Kostenvergleich verschiedener Speichertechnologien (Täglicher Zyklus)
[Quelle: Grünwald et al. 2012: 70]

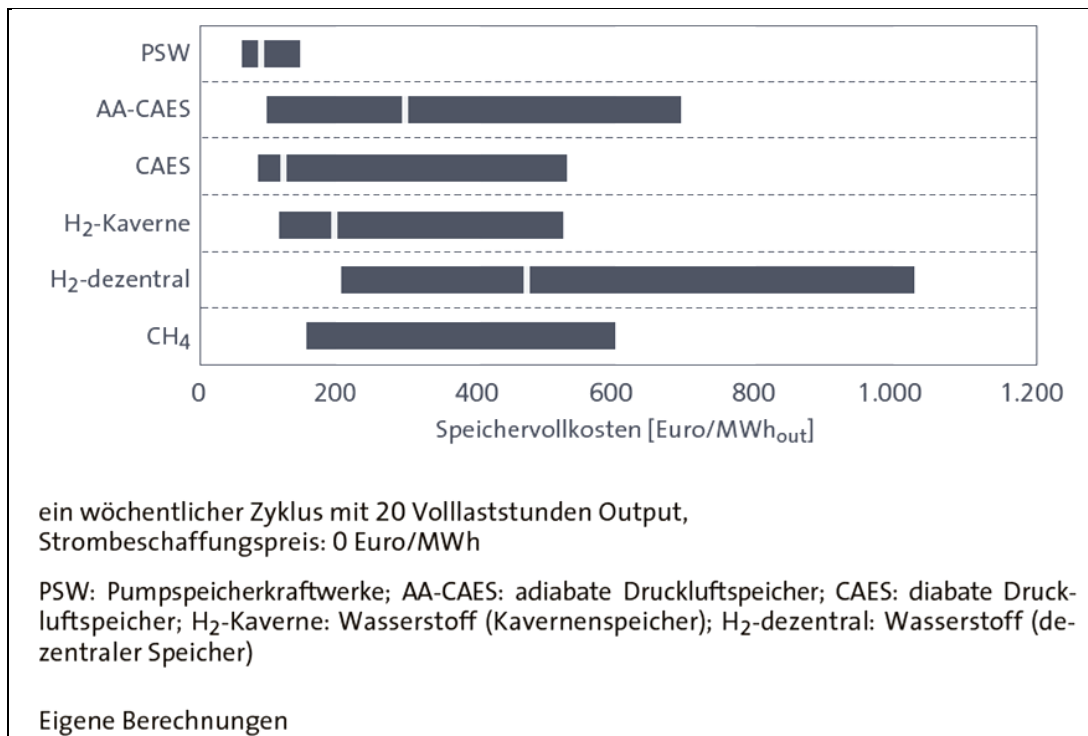


Abbildung 4: Kostenvergleich verschiedener Speichertechnologien (wöchentlicher Zyklus)
[Quelle: Grünwald et al. 2012: 69]

2.5. Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher

In der **Abbildung 5** (aus Mahnke et al. 2012: 8) sind die Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher graphisch dargestellt.

Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher

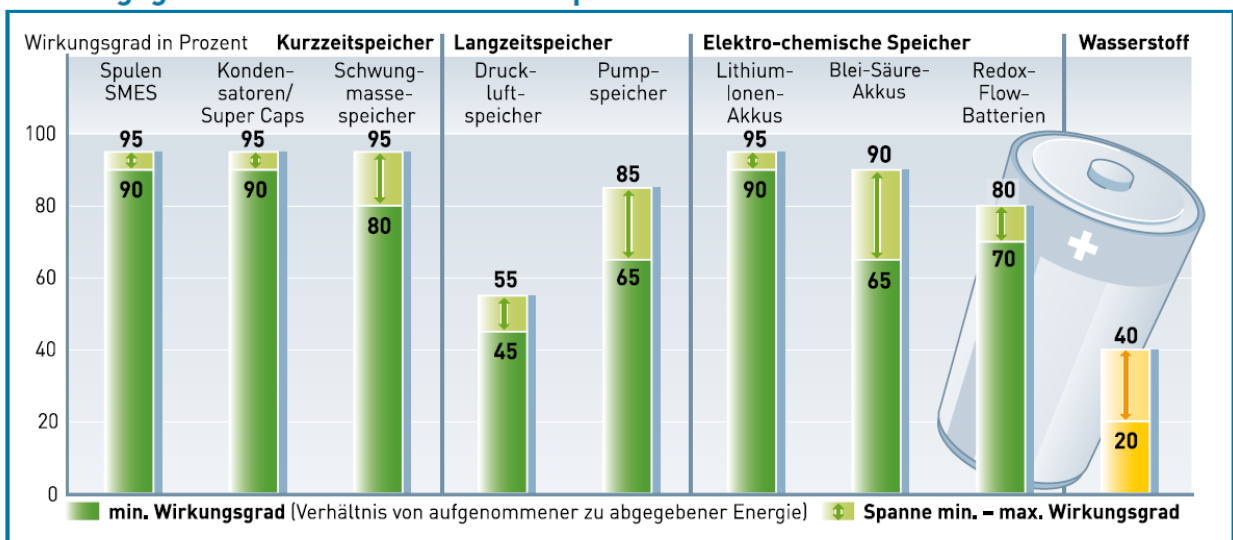


Abbildung 5: Stromgestehungskosten verschiedener Stromspeicher
[Quelle: Mahnke et al. 2012: 7]

3. Arten von Speichersystemen

3.1. Vorbemerkung

Bei der folgenden Betrachtung wird zwischen Kurz- (Stunden- bis Tagebereich) und Langzeitspeicherung (Wochen bis Monate) unterschieden (siehe **Anlage 1**). Es werden solche Speichertechnologien betrachtet, die jetzt oder in absehbarer Zukunft Energiemengen in energiewirtschaftlich relevanter Größenordnung speichern und wieder bereitstellen können

Speichersysteme für den Sekunden- bis Minutenbereich (Kondensatoren, Spulen und Schwungmassespeicher) sollen hier nicht weiter betrachtet werden, weil diese vor allem als kurzzeitige Leistungsreserve, im Rahmen der unterbrechungsfreien Stromversorgung oder zur Sicherung der Netzspannung zum Einsatz kommen, im Bereich eines längerfristigen Fluktuationsausgleiches (wie im Falle der Fluktuationen im Bereich von Sonnen- und Windenergie) aber keine Rolle spielen. Weitere Informationen zu diesen Speichersystemen und zu ihren Anwendungsgebieten finden sich u.a. bei Mahnke et al. (Mahnke und Mühlhoff 2012: 12-15).

3.2. Kurzzeitspeicher

Hierunter sollen Speichersysteme verstanden werden, die Energie im Bereich von Stunden bis zu mehreren Tagen speichern können.

Neben den unterschiedlichen Batteriesystemen können hierzu, abhängig von der Speicherdauer, auch Druckluft- und Pumpspeicherkraftwerke gezählt werden, die in dieser Ausarbeitung unter 3.3. (Langzeitspeicher) abgehandelt werden.

Auch Wärmespeicher dienen einer Stunden- bzw. tageweisen Energiespeicherung, werden aber auch über längere Zeiträume eingesetzt (wie beispielsweise der Wärme- und Kältespeicher des Reichstagsgebäudes in Berlin).

3.2.1. Akkumulatoren

In den verschiedenen Typen von Akkumulatoren dient eine reversible elektrochemische Reaktion zur Speicherung von Energie. Die Umkehrung der Speicherreaktion setzt die gespeicherte Energie wieder frei.

3.2.1.1. Blei-Säure-Akkumulatoren

Blei-Säure-Akkumulatoren sind vor allem als Starterbatterien für Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen bekannt.

Im Energiesystem werden sie als Spitzenlast- und Minutenreserve, für den Schwarzstart² von Kraftwerksanlagen sowie zur Pufferung von Inselsystemen von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen in netzschwachen Regionen eingesetzt.

Es besteht Entwicklungspotenzial bei der Verlängerung der Lebensdauer sowie der Leistungsfähigkeit.

² Als **Schwarzstart** wird das Anfahren eines Kraftwerks oder Kraftwerksblocks unabhängig vom Stromnetz (d.h. ohne Energiezufuhr aus dem Netz) bezeichnet.

3.2.1.2. Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Lithium-Ionen-Akkumulatoren stellen keinen einheitlichen Batterietypus dar. Für die Kathode werden vielmehr unterschiedliche Lithium-Metalloxide verwendet, um die Speichereigenschaften je nach Bedarf anzupassen. Li-Ionen-Akkus kommen als Spitzenlastreserve, für den Schwarzstart und als Minutenreserve zum Einsatz.

Aufgrund ihrer hohen Energiedichte spielen Li-Ionen-Akkus eine entscheidende Rolle für die Elektromobilität. Neben dem Einsatz zur Energieversorgung des Fahrzeuges wird auch diskutiert, die Lithium-Ionen-Akkus von Elektrofahrzeugen zur Flexibilisierung der Stromversorgung einzusetzen. Das würde bedeuten, diese Akkus einerseits beim Laden zur Aufnahme einer Überschussproduktion an Strom zu verwenden und andererseits eine Rückeinspeisung des Stroms ins Netz bei Spitzenlast oder in Zeiten geringer Stromproduktion vorzusehen („vehicle to grid“ bzw. V2G). Diese Option diskutieren Grünwald et al. (Grünwald et al. 2012: 77-79).

Entwicklungspotenzial besteht im Falle von Lithium-Ionen-Akkumulatoren vor allem im Hinblick auf eine Erhöhung der Zyklenzahl und der Energiedichte sowie eine Reduktion der Herstellungskosten und den Einsatz neuer, kostengünstigerer bzw. besser verfügbarer Materialien.

3.2.1.3. Natrium-Schwefel-Batterien

Natrium-Schwefel-Batterien gehören zu den Hochtemperaturbatterien (erforderliche Betriebstemperatur 290 bis 360°C) und werden vor allem im stationären Betrieb eingesetzt. Sie eignen sich zum Fluktuationsausgleich für erneuerbare Energien, zur Reduzierung elektrischer Leistungsspitzen, zur unterbrechungsfreien Stromversorgung und zur Notstromversorgung. Durch Weiterentwicklung können die Investitionskosten perspektivisch noch verringert werden.

3.2.1.4. Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien sind elektrochemische Speichersysteme, die im Niedertemperaturbereich arbeiten und die Energie im Unterschied zu den vorgenannten Akkumulatoren nicht am Ort der elektrochemischen Umwandlung, sondern extern in Form von Salzlösungen speichern. Das bedeutet, dass Leistungs- und Speicherteil voneinander getrennt und die speicherbaren Energiemengen unabhängig von der Zellgröße sind. Die Speicherung der Elektrolyten (und damit der durch elektrochemische Reaktion gespeicherten Energie) erfolgt in externen Tanks, die gegebenenfalls auch manuell befüllt und auf diese Weise „geladen“ werden können. Über die Größe dieser Tanks besteht auch die Möglichkeit einer flexiblen Dimensionierung der Speicherkapazität, während die Leistung der Redox-Flow-Batterie durch die Dimension von Flusszelle und Membran variiert werden kann.

Redox-Flow-Batterien haben einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad, eine hohe Lebenserwartung und zeigen keine nennenswerte Selbstentladung. Allerdings ist ihre Energiedichte vergleichsweise gering.

3.2.1.5. Kombinationen verschiedener Akkumulatoren

Verschiedene Akkumulatorsysteme können auch kombiniert werden. So entsteht in Aachen ab Herbst 2014 der weltweit erste modulare Batteriespeicher mit einer Leistungsklasse von fünf Megawatt. Dieser soll Lithium-Ionen-Batterien beispielsweise als kurzfristige Leistungsspeicher, Hochtemperatur-Batterien für eine Energiebereitstellung über mehrere Stunden und Bleibatterien für kurze als auch für mittlere Entladezeiten einsetzen.

Eine Tabelle in **Anlage 2** stellt einige wesentliche Eigenschaften verschiedener Akkumulatoren gegenüber.

3.2.1.6. Weitere Akkumulatortypen

Außer den vorgenannten existiert noch eine Reihe weiterer Akkumulatortypen, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll, wie z.B. Metall-Luft-Batterien, Hybrid-Flow-Batterien, Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren („ZEBRA-Batterien“).

Weitere Informationen zu diesen Akkumulatoren finden sich z.B. bei Oertel (Oertel 2008: 54-73), Grünwald et al. (Grünwald et al. 2012: 74-77) sowie bei Mahnke et al. (Mahnke und Mühlhoff 2012: 16-20).

3.3. Langzeitspeicher

Durch die Nutzung von Langzeit- bzw. Reservespeichern ist es insbesondere möglich, saisonale Überschussproduktionen aus jahreszeit- und witterungsabhängigen erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonnenstrahlung für solche Zeiten zu speichern, in denen die Energieproduktion geringer ist als der Strombedarf. Für solche Langzeitspeicher wurde der gefunden, dass die Speicherkosten mit der Speicherdauer und der Verringerung der Zahl der Speicherzyklen steigen (DENA 2010: 76).

3.3.1. Druckluftspeicherkraftwerke

Die Speicherung von Energie in Druckluftspeicherkraftwerken (**Compressed Air Energy Storage - CAES**) erfolgt in der Regel in unterirdischen Kavernen (z.B. in ausgelaugten Salzstöcken) in Form der potentiellen Energie komprimierter Luft.

Zur Stromerzeugung lässt man die komprimierte Luft aus den Kavernen geregelt in die Brennkammer einer Gasturbine strömen, die mit einem Generator verbunden ist. Gleichzeitig wird der Turbine über eine Gasleitung Erdgas zugeführt und das so entstehende Luft-Brenngas-Gemisch in der Brennkammer verbrannt. Die mit Hilfe der Turbine aus dem Brenngasstrom entnommene Energie wird mit Hilfe des Generators in elektrische Energie umgewandelt.

In einem Druckluftspeicherkraftwerk übernimmt demnach die aus der Kaverne strömende Druckluft die Arbeit des einer Turbine im gewöhnlichen Betrieb vorgeschalteten Verdichters, der im Normalbetrieb bis zu zwei Drittel der in der Turbine gewonnenen Gesamtarbeit benötigt.

Bislang existieren weltweit nur zwei Druckluftspeicherkraftwerke, eine davon in Huntorf (Niedersachsen). Diese Anlage kann über einen Zeitraum von zwei Stunden 321 MW elektrische Leistung bereitstellen.

Müsste der Verdichter von der allein durch die Verbrennung des Erdgases erzeugten Energie angetrieben werden (würde also keine verdichtete Luft aus den Kavernen entnommen und in die Brennkammer geleitet), könnte das Kraftwerk mit der gleichen Erdgasmenge nur für etwa 40 Minuten seine volle Leistung abgeben.

Die Turbine kann ohne fremde Energie gestartet werden und innerhalb von sechs Minuten ihre volle Leistung erreichen. Der Kraftwerkstyp ist damit ein Schnellstarter und liefert Energie bei Belastungsspitzen oder Kraftwerksausfällen.

Der Wirkungsgrad der Anlage in Huntorf liegt bei 40 Prozent, die in den Vereinigten Staaten, in McIntosh, betriebene kleinere zweite Anlage hat einen Wirkungsgrad von 54 Prozent.

Der Unterschied der Wirkungsgrade ist in der Prozessführung der Speicherung begründet – in McIntosh wird die Abwärme der Gasturbine zum Vorwärmen der Luft benutzt, was den zusätzlichen Energieverbrauch reduziert.

Dieser **zusätzliche Energieverbrauch** liegt darin begründet, dass die Luft sich während des Kompressionsvorganges erwärmt und die Druckluft vor ihrer Einlagerung gekühlt werden muss. Beim Ausspeichern, also bei der Expansion, tritt Abkühlung auf und die entspannte Luft muss mit Hilfe von Gasbrennern erwärmt werden.

Forschungen zur Weiterentwicklung von Druckluftspeicherkraftwerken konzentrieren sich auf die Verringerung des zusätzlichen Energieverbrauchs durch Zwischenspeicherung der beim Komprimieren freiwerdenden Wärmemenge, um diese beim Expansionsprozess mit dem Ziel wieder zu nutzen, ohne fossile Zufeuerung auszukommen.

In solchen **adiabatischen Druckluftspeicherkraftwerken**³ (AA-CAES-Kraftwerke) wird ein Wirkungsgrad zwischen 62 und 70 Prozent angestrebt.

Die weltweit erste großtechnische Demonstrationsanlage eines adiabatischen Druckluftspeicherkraftwerkes mit einer Speicherkapazität von 360 Megawattstunden und einer Leistung bis zu 90 Megawatt soll ab 2013 in Staßfurt (Sachsen-Anhalt) errichtet werden (Mahnke und Mühlhoff 2012: 11).

3.3.2. Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke erzeugen, abgesehen von der Nutzung natürlicher Zuflüsse in das Oberbecken, keinen zusätzlichen Strom, sondern stellen die derzeit einzige großtechnisch nutzbare und in großtechnischem Maßstab auch in Deutschland eingesetzte Speichertechnologie für Energie in regionalen und überregionalen Stromversorgungsnetzen dar.

Vorteile von Pumpspeicherkraftwerke sind die beliebig lange Vorhaltezeit für die gespeicherte Energie, da kaum Speicherverluste auftreten (bis auf Verdunstung und Versickerung) und die schnelle Verfügbarkeit durch kurze Ein- und Umschaltzeiten.

In Deutschland sind gegenwärtig 28 Pumpspeicherwerke mit einer Leistung von 6,58 GW und einem kumulativen Speicherenergieinhalt pro Lastzyklus (LZ) von 38,78 GWh/LZ installiert (Keuneke et al. 2014: 164ff).

3 Bei einer adiabatischen (von griechisch α διαβαίνω [a diabaínein] = nicht hindurchgehen) Zustandsänderung erfolgt kein Wärmeaustausch über die Systemgrenzen.
Das „System“ im AA-CAES besteht aus komprimiertem Gas und dem Wärmetauscher.

Indem Wasser unter Nutzung von überschüssigem Strom vom Unter- in das Oberbecken gepumpt wird, wird elektrische in potenzielle Energie umgewandelt. Durch die Rückumwandlung bei Generatorbetrieb können zwischen 65 und 85 Prozent des ursprünglich eingesetzten Stroms zurückgewonnen werden. Pumpspeicherkraftwerke dienen vor allem als Leistungsreserve bei Spitzenlast, zum Ausgleich unerwarteter Schwankungen im Stromverbrauch, zur Bereitstellung von Primär-⁴ und Sekundärregelleistung⁵ sowie zur Blindleistungsregelung.

Pumpspeicherkraftwerke sind eine bewährte, technologisch ausgereifte und kostengünstige Speichertechnologie. Sie sind technisch auch als Langzeitspeicher geeignet. Für weitere konventionelle Pumpspeicherkraftwerke gibt es in Deutschland aber aufgrund der für ihren Bau erforderlichen Geländetopografie (kaum noch freie Kapazitäten) und der mit ihrem Bau verbundenen erheblichen Landschaftseingriffe kein ausreichendes Potenzial. In der Diskussion sind **unterirdische Pumpspeicher**, die Nutzung künstlicher Erhebungen bzw. Senken (Abraumhalden, Tagebaue), der Ausbau bzw. eine Modernisierung vorhandenen Standorte sowie die Nutzung zusätzlicher **Pumpspeicherkapazität in Norwegen**. Letztere setzt aber den Bau einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstrasse voraus und eine Realisierung des Projekts gilt momentan als fraglich.

3.3.3. Speicherung als Wasserstoff oder synthetisches Methan

Neben den vorgenannten Speichern sind insbesondere weitere **Groß- und Langzeitspeicher** erforderlich, um saisonale Schwankungen in Stromangebot und -nachfrage auszugleichen und die Versorgungssicherheit mit Energie aus erneuerbaren Quellen zu gewährleisten. Dabei bietet sich gegenwärtig vor allem eine Speicherung in Form von chemischer Energie als Wasserstoff oder Methan an („Power to Gas“). Chemische Energiespeicher sind zur Zeit die einzige technisch und wirtschaftlich realisierbare Option, erneuerbare Energien in großen Mengen langfristig zu speichern und bedarfsgerecht mit hohen Leistungen bereit zu stellen.

Wasserstoff (H_2) ist ein flüchtiges, brennbares Gas mit einem Siedepunkt von $-252^\circ C$, das mit Luft explosive Gemische bilden und durch eine Reihe von Materialien hindurch diffundieren kann. Daher müssen praktikable Lösungen für sichere Handhabung, Transport und Vorratshaltung entwickelt oder vervollkommen werden.

Methan (CH_4), der einfachste Kohlenwasserstoff, ist ein farbloses Gas mit einem Siedepunkt von $-161,5^\circ C$, das den Hauptbestandteil von natürlichem Erdgas bildet und einen Brennwert (bzw. oberen Heizwert) von 39,86 Megajoule pro Kubikmeter (das entspricht einem Wert von 890,3 kJ/mol bei 298,15 K) aufweist. Damit ist die (volumetrische, also die auf das Volumen bezogene) Energiedichte von Methan etwa dreimal höher als die von Wasserstoff, dessen Brennwert (i.e. oberer Heizwert) etwa 11,7 Megajoule pro Kubikmeter (das sind 286 kJ/mol bei 298,15 K) beträgt.

4 Die Primärregelung dient dazu, Ungleichgewichte zwischen physikalischem Leistungsangebot und -nachfrage auszugleichen. Ziel dabei ist eine stabile Netzfrequenz.

5 Auch die Sekundärregelung hat das Ziel, das Gleichgewicht zwischen physikalischem Stromangebot und der Stromnachfrage wieder herzustellen, wobei im Gegensatz zur Primärregelung hier nur die Situation in der jeweiligen Regelzone inklusive des Stromaustausches mit anderen Regelzonen betrachtet wird und die geplanten mit den tatsächlichen Leistungsflüssen zu anderen Regelzonen verglichen und ausgeregelt werden.

Sowohl Wasserstoff als auch Methan können bei Raumtemperatur unter Druck nicht verflüssigt werden (kritische Temperaturen: $T_{\text{krit.}}(\text{H}_2) = -239,97^\circ\text{C}$; $T_{\text{krit.}}(\text{CH}_4) = -82,6^\circ\text{C}$).

3.3.3.1. Wasserstoff

Wasserstoff kann durch die Elektrolyse von Wasser, also dessen elektrochemische Spaltung in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2), hergestellt und in oberirdischen Druck- oder Flüssiggasspeichern, in Metallhydridspeichern oder auch in geeigneten unterirdischen Hohlräumen gelagert bzw. bis zu einem gewissen Anteil auch in das Erdgasnetz eingespeist und über dieses transportiert werden. Außerdem können bestehende Erdgasspeicher in vielen Fällen solche Erdgas-Wasserstoff-Mischungen bis zu einer Verwendung aufnehmen.

Der durch Elektrolyse erzeugte Wasserstoff kann im Anschluss auch zu Methan umgewandelt werden („Power to Natural Gas“) (siehe 3.3.3.2.).

Durch die Nutzung von „überschüssigem“ erneuerbarem Strom zur Wasserelektrolyse kann die Abregelung von Windkraft- oder Photovoltaikanlagen vermieden werden. In ihren Monitoringberichten^{6,7} macht die Bundesnetzagentur Angaben zu den gesamten potentiell erzeugbaren, nicht eingespeisten Jahresarbeitsmengen (zur sogenannten **Ausfallarbeit**) aus erneuerbaren Energien, also zu den Energiemengen, die infolge Abregelung von Windkraft- oder PV-Anlagen nicht „gewonnen“ wurden:

Jahr	Ausfallarbeit [GWh]
2009	74
2010	127
2011	421
2012	385

Die Wasserelektrolyse (1) verläuft unter Zufuhr von elektrischer Energie nach der Gleichung



6 Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB.

7 Monitoringbericht 2013 im Internet unter:
www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217_Monitoringbericht2013.pdf?__blob=publicationFile&v=14 [Stand 10.06.2014].

8 Der Ausdruck ΔH ist die **Reaktionsenthalpie** (eine Angabe zum energetischen Verlauf einer Reaktion). Reaktionen, für die eine positive Reaktionsenthalpie ($\Delta H = +n \text{ kJ/mol}$) angegeben ist, verlaufen (in Schreibrichtung) unter Energie**zufuhr**, solche mit negativer Reaktionsenthalpie ($\Delta H = -n \text{ kJ/mol}$) unter Energie**freisetzung**.

9 Alle angegebenen Reaktionsenthalpien nach:
Holleman, Arnold F. (1995). Lehrbuch der Anorganischen Chemie / Holleman-Wiberg. Begr. Von A.F. Holleman. Fortgef. Von Egon Wiberg. 101., verbesserte und stark erw. Auflage / von Nils Wiberg. Berlin. de Gruyter.

Die für die elektrolytische Spaltung des Wassers aufgewendete Energie ist danach in Form von chemischer Energie in den Produkten „gespeichert“. Das bedeutet, dass die Umkehrung der Spaltung des Wassers in seine elementaren Bestandteile, also die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser, diese Energie wieder freisetzt. Das kann sowohl durch direkte Verbrennung des Wasserstoffs (unter Freisetzung von Wärmeenergie und Volumenarbeit) geschehen als auch durch Reaktionsführung in einer Brennstoffzelle, wobei in diesem Fall neben Wärme- vor allem elektrische Energie gewonnen wird.

Wie bei jeder Energieumwandlung, treten auch bei der Wasserelektrolyse Wirkungsgradverluste auf. Abhängig vom Elektrolyseverfahren werden in der Literatur Wirkungsgrade zwischen 55 und 70 Prozent (sogenannte Hochleistungs-Elektrolyseure unter bestimmten Bedingungen bis 80 Prozent) angegeben. Eine „Rückverstromung“ des Wasserstoffs ergäbe einen noch deutlich geringeren Gesamtwirkungsgrad, was für die direkte stoffliche Weiternutzung des Wasserstoffs spricht. Ersetzt der Wasserstoff fossile Energieträger in einem Brennstoffzellenfahrzeug, kann dies im Sinne einer **CO₂-neutralen Mobilität** sinnvoll sein. Der gespeicherte Wasserstoff muss also nicht unbedingt rückverstromt werden, sondern kann auch als Brennstoff, als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen bzw. als Edukt (d.h. als Ausgangsverbindung) in der chemischen Industrie benutzt werden, was neue Märkte für Strom aus erneuerbaren Quellen eröffnet („Power to Chemicals“ oder Power to Fuel“).

Entscheidende Vorteile von Wasserstoff als Speichermedium sind dessen hohe Speicherdichte und seine vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten. Die gravimetrische (massenbezogene) Energiedichte von H₂ ist mit 33,3 Kilowattsunden pro Kilogramm enorm hoch.

Würde man beispielsweise die Kaverne des Druckluftspeicherkraftwerkes in Huntorf mit Wasserstoff statt mit Luft füllen, ließe sich in darin etwa 60-mal so viel Energie speichern (Greenpeace-Magazin 2009).

Den Vorteilen der Energiespeicherung in Form von Wasserstoff stehen gegenwärtig neben den relativ niedrigen Wirkungsgraden auch vergleichsweise hohe Speicher- und Transportkosten und eine relativ aufwändige Systemtechnik gegenüber.

3.3.3.2. Synthetisches Methan

Wird der elektrolytisch erzeugte Wasserstoff in einer nachgelagerten **Hydrierungsreaktion (2)** bei 250 bis 500°C und Drücken bis zu 25 bar mit Kohlendioxid umgesetzt, erhält man „synthetisches“ Methan (auch als **EE-Methan** bezeichnet), wobei Wasser als Nebenprodukt entsteht und die frei werdende Prozesswärme abgeführt werden muss, weil die Reaktion (2) exotherm ist. Diese Wärme sollte nach Möglichkeit genutzt werden, da sie einen Teil der durch die Wasserelektrolyse „gespeicherten“ Energie darstellt.



Eine interessante, noch im Forschungsstadium befindliche Variante zur Herstellung von synthetischem Methan ist die sogenannte **Biologische Methanisierung**, bei der elektrochemisch erzeugter Wasserstoff im Fermenter einer Biogasanlage mit Hilfe von Mikroorganismen, die bei **Umgebungsdruck und -temperatur** arbeiten (sogenannte wasserstoffverwertende Archaeen) in Methan umgewandelt wird. Dadurch kann der Methangehalt im Biogas von durchschnittlich 53 Prozent auf mehr als 95 Prozent gesteigert werden¹⁰.

Wasserstoff und Methan sind die aus heutiger Sicht für eine langfristige Speicherung am besten geeigneten Energieträger. Eine Umwandlung von Wasserstoff in Methan kann von Vorteil sein, weil eine Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz, im Gegensatz zur Einspeisung von Wasserstoff, keine Gasbeschaffenheitsveränderung hervorruft. Für die Speicherung und den Transport von EE-Methan kann die bestehende Erdgasinfrastruktur genutzt werden, während Wasserstoff nur bis zu einem bestimmten Anteil dem Erdgas beigemischt werden kann.

Sowohl mit Wasserstoff, der aus Wind- oder Sonnenenergie erzeugt wurde, als auch mit synthetischem Methan können **neue Einsatzmöglichkeiten für Wind- und Sonnenenergie im Verkehrsbereich** erschlossen werden.

Wasserstoff, der mit Hilfe erneuerbarer Energien erzeugt wurde, kann direkt im Mobilitätssektor eingesetzt werden (Kraftfahrzeuge mit Brennstoffzellen- bzw. Wasserstoffantrieb). EE-Methan kann problemlos in solchen Fahrzeugen verwendet werden, die über Erdgasantrieb verfügen.

10 mehr Informationen u.a. im Internet (siehe Linksammlung)

3.4. Wärmespeicher

Vom gesamten Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2012 (8.998 Petajoule) entfielen 55 Prozent auf die verschiedenen Wärmeanwendungen (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme) (siehe **Anlage 5**); 30 Prozent des Endenergieverbrauches (2624 von 8744 PJ) entfielen auf die Industrie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014: 5 und 17). Ein nicht geringer Teil dieser Energie wird als Abwärme an die Umgebung abgegeben und kann somit nicht mehr genutzt werden.

In vielen **industriellen** Prozessen und auch bei der Energiegewinnung fällt diese **Abwärme** auf einem Temperaturniveau an, das eine weitere energetische Nutzung ermöglicht. Thermische Speicher können einen Beitrag zur besseren Erschließung dieser Potenziale leisten. Damit ergeben sich Möglichkeiten zur **Steigerung der Energieeffizienz** von Produktions- und Energiegewinnungsprozessen sowie zur Einsparung fossiler Energieträger und zur **Senkung des Primärenergieverbrauchs**.

Allerdings wird die Weiterverwendung solcher, im Moment der Gewinnung oder des Anfallens (z.B. von prozessbegleitender Wärmeenergie) überschüssiger Energie häufig dadurch erschwert, dass sie zu einer Zeit, an einem Ort, mit einer Intensität (Leistung) oder mit einer Temperatur anfällt, die ihre Nachnutzung für Folgeprozesse erschwert. Entsprechend vielfältig sind die Anforderungen an die zu verwendenden Wärmespeicher. Durch sie kann beispielsweise Abwärme gespeichert und der Wärmestrom gepuffert und so verstetigt werden, was die Weiternutzung im Produktionsprozess oder zur Stromerzeugung erleichtert.

Ein weiteres Einsatzgebiet für thermische Wärmespeicher liegt in der Unterstützung von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (**KWK-Anlagen**). Die Zwischenspeicherung von Wärme kann den Übergang von einer wärme- zu einer stromgeführten Arbeitsweise ermöglichen und so neben hohem Wirkungsgrad und optimaler Brennstoffnutzung auch ein besseres betriebswirtschaftliches Ergebnis erreicht werden, indem Strom zu lukrativen Zeiten erzeugt wird. Gleichzeitig können derartige stromgeführt betriebene KWK-Anlagen einen Beitrag zur Stabilisierung der Netze leisten.

Mobile Wärmespeichersysteme können im Fall von stromgeführt betriebenen Biogas-BHKW eine Möglichkeit für eine Nutzung der anfallenden Wärme schaffen (und damit den Gesamtwirkungsgrad erhöhen), wenn in der unmittelbaren Nähe ganzjährige Wärmeabnehmer fehlen.

Wärmespeicher dienen zur Speicherung thermischer Energie. Dabei unterscheidet man zwischen **Hoch- und Niedertemperatur-** und zwischen **Kurz- und Langzeitspeichern**.

Es gibt auch Hybridspeichersysteme, die aus einem Kurz- und einem Langzeitwärmespeicher bestehen.

Außerdem wird nach dem Prinzip der Wärmespeicherung unterschieden. Die Speichermedien in **sensiblen Wärmespeichern** verändern beim Laden bzw. Entladen ihre Temperatur und in **Latentwärmespeichern** ihren Aggregatzustand (die Temperatur bleibt hier konstant). **Thermochemische Wärmespeicher** speichern Wärmeenergie mit Hilfe von chemischen Prozessen (Adsorption/Desorption bzw. reversible chemische Umwandlungsprozesse).

Werden thermische Speicher in Kraftwerke oder Wärmenetze integriert, können sie indirekt zur Stabilisierung der Stromversorgung beitragen. So finden Wärmespeicher u.a. auch Einsatz in solarthermischen Kraftwerken, die mit Hilfe von Solarkollektoren die Strahlungsenergie der Sonne zur Erzeugung elektrischer Energie nutzen. Hier erfolgt eine Speicherung von Wärme mit dem Ziel, (tages-)zeitliche Leistungsschwankungen auszugleichen und die Stromproduktion auch in den Nachtstunden zu ermöglichen und damit eine kontinuierliche Versorgung zu gewährleisten.

4. Zusammenfassung


Eine kurz-, mittel- und langfristige Energiespeicherung dient der Glättung und Überbrückung von Angebots- und Nachfrageschwankungen im Strom- und auch im Wärmesektor.

Neben dem Ausgleich über das Stromnetz und einem intelligenten Lastmanagement ermöglichen Energiespeicher die bessere Koordination von Stromangebot und –nachfrage und tragen zur Netzstabilität und zur Zuverlässigkeit der Energieversorgung bei.

Energiespeichersysteme können aber, wie u.a. am Beispiel der Wärmespeicher erläutert, auch einen Beitrag zur Senkung des Primärenergieverbrauchs leisten oder, wie im Falle der Power to Gas-Technologie, verschiedene Segmente des Energiesektors (hier erneuerbare Energien und der Mobilitätssektor, Wärmeerzeugung bzw. die Chemische Industrie) miteinander verbinden helfen.

In der vorliegenden Ausarbeitung konnte nur auf einige **wesentliche Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeichersysteme** eingegangen und auch nur ein grober Überblick über diese Technologien vermittelt werden.

Weiterführende Informationen können der zitierten Literatur und den beigefügten Anlagen entnommen bzw. durch Nutzung der Linksammlung erhalten werden.



5. Literatur- und Quellenverzeichnis

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014). Energiedaten. Gesamtausgabe. Stand April 2014.
www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf [Stand 10.06.2014].
- DENA (2010). Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien (PSW-Integration EE). Endbericht.
[www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Energiesysteme/Dokumente/Endbericht_PSW - Integration EE dena.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Energiesysteme/Dokumente/Endbericht_PSW_-_Integration_EE_dena.pdf) [Stand 10.06.2014].
- Einhellig, Ludwig; Eisfelder, Andreas (2012). Stromspeicher als intelligente Lösung für den deutschen Markt? Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Jahresspecial). etv Energieverlag; Essen. S. 32–38.
- Gatzen, C.; Riechmann, C. (2011). Stationäre Stromspeicher – zukünftiger Nischenmarkt oder Milliardenengeschäft? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61(3), 20-23.
- Greenpeace-Magazin (2009). Im Internet:
<http://www.greenpeace-magazin.de/magazin/archiv/6-09/greenpeace-energy/>
[Stand 10.06.2014].
- Grünwald, Reinhard; Ragwitz, Mario; Sensfuß, Frank; Winkler, Jenny (2012). Regenerative Energieträger zur Sicherung der Grundlast in der Stromversorgung. Endbericht zum Monitoring. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Arbeitsbericht Nr. 147. April 2012.
www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab147.pdf
[Stand 10.06.2014].
- Keuneke, Rita et al. (2014). Stromerzeugung aus Wasserkraft. Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Zwischenbericht zum Vorhaben IId. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/XYZ/zwischenbericht-vorhaben-2d.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf [Stand 10.06.2014].
- LBST, HINICIO, CEPS, VTT (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik), (Centre for European Policy Studies), (Technical Research Centre of Finland) (2012): European Renewable Energy Network.
[http://www.lbst.de/ressources/docs2012/EP-08_European-%20Renewable-Energy-Grid JAN2012 PE-475-085.pdf?language=en&file=42728](http://www.lbst.de/ressources/docs2012/EP-08_European-%20Renewable-Energy-Grid_JAN2012_PE-475-085.pdf?language=en&file=42728) [Stand 10.06.2014].
- Mahnke, Eva; Mühlenhoff, Jörg (2012). Renew's Spezial. Ausgabe 57. Herausgegeben von der Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Berlin.
<http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/hintergrundpapiere/strom-speichern>
[Stand 10.06.2014].

- Oertel, Dagmar (2008). Energiespeicher – Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Arbeitsbericht Nr. 123. Februar 2008.
<http://www.tab-beim-bundestag.de/de/publikationen/berichte/ab123.html>
[Stand 10.06.2014].
- Sauer, D.U. (2008). Speichertechnologien der Zukunft. Innovationen für Energie und Klimaschutz – Tagung der Deutschen Umwelthilfe, 13.10.2008 Berlin.
www.duh.de/uploads/media/Sauer_Speichertechnologien.pdf [Stand 10.06.2014].
- Sauer, D.U. (2011). Überblick über die Speichertechnologien. Fachgespräch der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen „Die Speicherfrage – Stolperstein für die Energiewende?“
www.gruene-bundestag.de/cms/energie/dokbin/396/396695.ueberblick_ueber_die_speichertechnologie.pdf [Stand 10.06.2014].
- Sterner, Michael (2013). Energiespeicher für die Energiewende - Zusatzkosten vs. Zusatznutzen? Ringvorlesung Kraftakt Energiewende II. 2. Vorlesung.
<http://www.energieverein-leipzig.de/kraftakt/> [Stand 10.06.2014].

6. Linksammlung

Agentur für erneuerbare Energien

<http://www.unendlich-viel-energie.de/>

Adiabatisches Druckluftspeicherkraftwerk Staßfurt

<http://kraftwerkforschung.info/mit-druckluft-strom-speichern/>

<http://www.rwe.com/web/cms/de/365478/rwe/innovation/projekte-technologien/energiespeicher/projekt-adele-adele-ing/>

http://www.berliner-energietage.de/fileadmin/user_upload/2013/%0bTagungsmaterial/BET2013_105_BMWi_02_Moser_Zunft_ADELE.pdf

<http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht//DruckluftstattPumpspeicher/>

Biologische Methanisierung

http://www.viessmann.de/de/Industrie-Gewerbe/Produkte/Power_to_Gas.html

<http://www.bremer-energie-institut.de/mugristo/de/results/power-to-gas/methanisierung>

<http://www.krajete.com/technologie/biokatalysator/>

Energiespeicher in der Schweiz (Schlussbericht vom 12.12.2013)

www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33125.pdf

Mobile Wärmespeicher

<http://www.carmen-ev.de/biogas/705-mobile-waermespeicher>

<http://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/flexibilisierung-einer-biogasanlage>

Power to Gas

<http://www.powertogas.info/>

<http://www.dvgw-innovation.de/die-themen/power-to-gas/>

Studien zum Thema Energiespeicherung:

Fraunhofer UMSICHT: „Speicher für die Energiewende“

www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/studie_speicher_energiewende.pdf

https://www.oth-regensburg.de/fileadmin/media/professoren/ei/sterner/pdf/2014_Sterner_Energy_Storage.pdf

https://www.oth-regensburg.de/fileadmin/media/professoren/ei/sterner/pdf/2012_06_Sterner_VDI_Speicher_f.pdf

Thermische Energiespeicher (Wärmespeicher)

<http://www.thema-energie.de/energie-im-ueberblick/technik/speicher-netze/waermespeicher.html>

www.berliner-energetage.de/fileadmin/user_upload/2013/Tagungsmaterial/BET2013_105_BMWi_01_Doetsch_Thermische_Speicher.pdf

www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/111219_Prognos_Studie_AGFW_Waermespeicher_Integration_Erneuerbare_Energien_01.pdf

<http://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/ueberblick/>

Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (VDE)

Energiespeicher für die Energiewende (Studie aus dem Jahr 2012)

<http://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/V2/Aktuelles/Oeffentlich/Seiten/StudieSpeicherungsbedarf.aspx>

Alle angegebenen Links [Stand 10.06.2014].

