



## Speicher in der Energiewende (Teil 1)

*Welche Technologien gibt es und wo werden sie eingesetzt – jetzt und in Zukunft?*

Von Tim Wehrenberg

### Einleitung

Zu Beginn der Energiewende stand die Entwicklung und Markteinführung von Erzeugungstechnologien auf Basis erneuerbarer Energien (EE), und hier hauptsächlich von Photovoltaik- und Windenergieanlagen, im Vordergrund. Maßgeblich gefördert durch einen gesetzlich festgelegten Einspeisevorrang und hohe Vergütungssätze, hat sich der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch Deutschlands zwischen den Jahren 2000 und 2016 mit einer Erhöhung von 6,2 % auf 31,7 % mehr als verfünffacht. Dabei liegt der Anteil von Strom aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen an der gesamten EE-Bruttostromerzeugung bei derzeit etwas mehr als 60 % (Stand 2016).<sup>1</sup>

Hatte der EE-Ausbau zu Anfang noch wenig Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem als Ganzes, befindet sich die Energiewende in Deutschland mittlerweile in einer Phase, in der eine Systemintegration der erneuerbaren Energien notwendig wird. In einem Energiesystem auf Basis fluktuierender Solar- und Windenergie bedeutet dies vor allem, die Stromerzeugung und -nachfrage miteinander in Einklang zu bringen. Dabei stellt, neben der Möglichkeit des Lastmanagements sowie der Flexibilisierung des thermischen Kraftwerkparcs, der Einsatz von Energiespeichern einen zentralen Baustein dar. Fachstudien gehen derzeit davon aus, dass der Neubedarf an Energiespeichern ab einem EE-Anteil von ca. 50 % am Stromverbrauch

in größerem Maße zunehmen wird. Je weiter sich das Energiesystem dabei in Richtung EE-Vollversorgung bewegt, desto unerlässlicher werden sie. <sup>2,3</sup>

## Energiespeichertechnologien

Grundsätzlich lassen sich Energiespeicher in elektrische, elektrochemische, chemische, mechanische und thermische Speicher unterteilen. Dabei haben die unterschiedlichen Technologien in der Regel verschiedene Anwendungsfelder. Diese hängen mit den unterschiedlichen Speichereigenschaften zusammen. Zu den wichtigsten technischen Eigenschaften eines Energiespeichers zählen Energie- und Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Selbstentladung, Lebensdauer, Reaktionszeit sowie die typische Entladezeit und -tiefe. Weiterhin spielen die Speicherkosten sowie Fragen der Sicherheit und des Recyclings eine wichtige Rolle. <sup>4,5</sup>

Die folgende Betrachtung der aus heutiger Sicht realistischsten Speicheroptionen beschränkt sich auf elektrische, elektrochemische und mechanische Speicher. Chemische (Power-to-Gas) und thermische Speicher werden in einem Folgeartikel separat behandelt, da hierfür eine zusätzliche Betrachtung der Integration des Wärmesektors erforderlich ist.

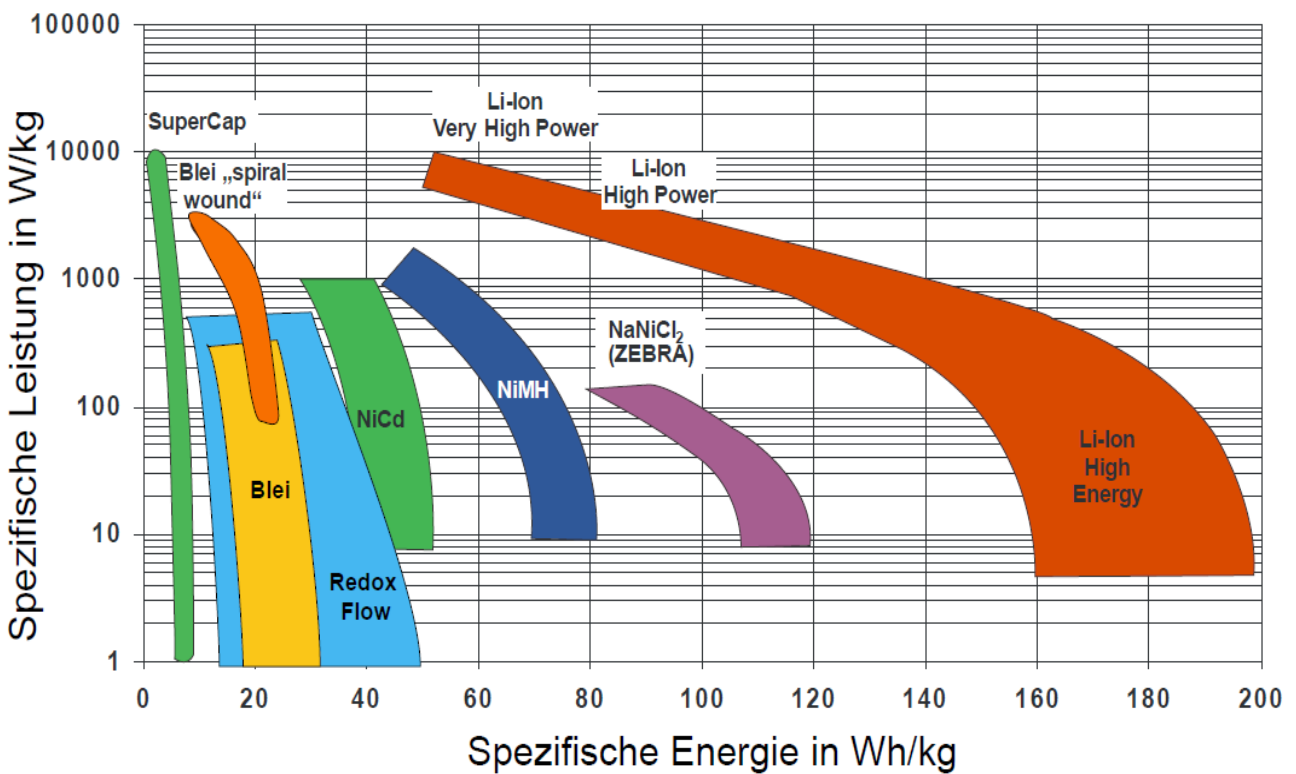
### ELEKTRISCHE SPEICHER

Im Energiesystem der Zukunft wird Strom, dann hauptsächlich ein Primärenergieträger, eine bedeutende Rolle spielen. Daher ist es naheliegend, ihn in Form elektrischer Energie direkt zu speichern. Diese Möglichkeit bieten sowohl Supercaps (Superkondensatoren) als auch sogenannte supraleitende Spulen. Erstere speichern dabei die Energie im elektrischen, letztere im magnetischen Feld. <sup>4,5</sup>

Elektrische Speicher besitzen eine hohe Leistungs- und lediglich geringe Energiedichte. Daher sind sie vor allem in Anwendungsbereichen gefragt, wo große Leistungen für kurze Zeit zur Verfügung gestellt werden müssen. So werden sie zum Beispiel zur Bereitstellung von Startenergie im Transportbereich und zur Stützung des Stromnetzes für einen kurzen Zeitraum (Frequenzstabilisierung) eingesetzt. Ein großer Vorteil von elektrischen Speichern liegt in ihrem hohen Wirkungsgrad. Dieser beträgt für Supercaps ca. 95 %. Gerade für supraleitende Spulen gibt es zurzeit jedoch nur einige Demonstrationsprojekte und wenig kommerzielle Installationen. <sup>4,5</sup>

**ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER**

Während die direkte Speicherung elektrischer Energie in Kondensatoren und Spulen die effizienteste Art der Stromspeicherung mit den höchsten Wirkungsgraden ist, hat sie gleichzeitig den Nachteil einer lediglich geringen Speicherkapazität sowie hoher Kosten. Dieser Nachteil wird durch die Verwendung elektrochemischer Speicher (Energiespeicherung in Form von Ladungsträgern) weitestgehend überwunden. Exemplarisch zeigt Abbildung 1 die Leistungs- und Energiedichten derzeitiger Batterietechnologien im Vergleich zum Supercap. <sup>4</sup>



**Abbildung 1: Ragone-Diagramm (qualitative Darstellung) <sup>6</sup>**

Wie zu erkennen ist, gibt es innerhalb der Klasse der elektrochemischen Speicher viele verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Energie- und Leistungsdichten. Dabei weisen jedoch alle Batterietechnologien den Vorteil weitaus höherer Speicherkapazitäten als elektrische Speicher, hier in Form des Supercaps, auf.

Die weltweit meistverbreitete Batterietechnologie ist die Bleibatterie, welche überwiegend als Starterbatterie, Elektroantriebsbatterie und in der ortsfesten Notstromversorgung Anwendung findet. So bestand zum Beispiel der BEWAG-Speicher, der zur Stabilisierung des West-Berliner Inselnetzes zwischen 1986 und 1994 eingesetzt wurde, aus Bleibatterien. Neben der im Vergleich zu anderen Batterietechnologien geringen Kosten, gelten die hohe Betriebserfahrung und -sicherheit als Hauptvorteile der Bleibatterie. Nachteile sind die im Verhältnis zu anderen Batterietechnologien niedrige Leistungs- und Energiedichte sowie die geringe Lebensdauer.<sup>4,5,7</sup>

Im Gegensatz zur Bleibatterie ist die Energiedichte eine der größten Stärken von Lithium-Ionen-Batterien. Je nach Ausführung besitzen sie die im Vergleich zu allen anderen kommerziellen Batterietechnologien höchste Energie- bzw. Leistungsdichte (vgl. Abbildung 1). Aus diesem Grunde haben sich Lithium-Ionen-Batterien auf dem Gebiet der mobilen Anwendungen, wie zum Beispiel Laptops, Smartphones und Elektrofahrzeugen, in den letzten Jahren zur bedeutendsten Speichertechnologie entwickelt. Neben der hohen Energiedichte liegt ein weiterer Vorteil in der im Vergleich zu Bleibatterien deutlich höheren Lebensdauer. Daher stellen sie auch für stationäre Anwendungen eine interessante Technologie dar. Während in Europa vor allem noch hauptsächlich Demonstrationsprojekte mit Lithium-Ionen-Batterie-Containern existieren, befinden sich diese in den USA in schwachen Netzbereichen bereits im kommerziellen Einsatz. Derzeit errichtet Tesla auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien in Südaustralien den nach eigenen Angaben weltgrößten Batteriespeicher. Dieser soll eine Speicherkapazität von 129 MWh (100 MW Leistung) besitzen und 30.000 Haushalte mit Windstrom versorgen. Nachteile der Lithium-Ionen-Technologie sind jedoch die im Vergleich zu Bleibatterien in der Regel noch deutlich höheren Kosten sowie die höheren Sicherheitsanforderungen. Aufgrund der gestiegenen Produktionsmenge und des hohen Herstellerwettbewerbs unterliegen Lithium-Ionen-Batterien allerdings seit einigen Jahren einem deutlichen Preisverfall, der aus heutiger Sicht auch in Zukunft anhalten wird.<sup>5,7,8</sup>

Ähnliche Vor- und Nachteile wie Lithium-Ionen-Batterien besitzen Natrium-Schwefel-Batterien, die durch Betriebstemperaturen von über 300 °C charakterisiert sind. Darüber hinaus liegt jedoch ein zusätzlicher Nachteil in der benötigten Isolation sowie dem erforderlichen thermischen Management. Dies senkt den Wirkungsgrad erheblich. Außerdem existiert aktuell lediglich ein Hersteller, sodass aufgrund des mangelnden Herstellerwettbewerbs für die Zukunft mit einer im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie eher geringen Preisreduktion und Performance-Steigerung zu rechnen ist.<sup>4,5,7</sup>

Eine andere Form der Batterietechnologie stellt die Redox-Flow-Batterie dar, bei der sich die Aktivmaterialien in flüssiger Form in getrennten Tanks befinden und ähnlich einer Brennstoffzelle durch eine Reaktionseinheit gepumpt werden. Ihr größter Vorteil besteht in der separaten Auslegung von Energie und Leistung. Ein weiterer Vorteil ist die prinzipielle Möglichkeit des Schnellladens durch Austausch der flüssigen Aktivmaterialien. Nachteilig sind jedoch vor allem die geringe Energie- und Leistungsdichte. Anwendungsgebiete sind überwiegend Bereiche, in denen hohe Energiespeicherkapazitäten vonnöten sind. Insgesamt sind derzeit nur wenige kommerzielle Systeme auf dem Markt, jedoch existieren diverse Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur technischen und ökonomischen Verbesserung dieser Technologie. <sup>4,5,7</sup>

Für die Zukunft gilt vor allem die Klasse der sogenannten Metall-Luft-Batterien als vielversprechende Option. Sie ist aus heutiger Sicht die einzig realistische Batterietechnologie für Energiedichten von mehr als 1.000 Wh/kg. Im Vergleich dazu kommen die derzeit stärksten Lithium-Ionen-Batterien auf Werte von kaum mehr als 200 Wh/kg (vgl. Abbildung 1). Allerdings gilt die Verfügbarkeit von Metall-Luft-Batterien als wiederaufladbare Variante innerhalb der nächsten 10 Jahre als sehr unwahrscheinlich. <sup>5</sup>

## **MECHANISCHE SPEICHER**

Mechanische Speichertechnologien speichern Energie in potenzieller Form (Pump- und Druckluftspeicher) sowie kinetischer Form (Schwungmassenspeicher). Dabei sind Pumpspeicherkraftwerke die weltweit mit großem Abstand am meisten eingesetzte Speichertechnologie überhaupt. So hatten sie im Jahr 2010 einen Anteil von mehr als 99 % an der gesamten weltweit installierten Stromspeicherkapazität in Höhe von 141 GW. Sie besitzen mit Abstand das größte Speicher- und Leistungsvermögen aller aktuell etablierten Energiespeichertechnologien. Darüber hinaus stellen sie trotz sehr hoher Investitionskosten die günstigste Speichertechnologie bezogen auf die Energiespeichermenge dar. Nachteile sind die Reaktionszeit von einigen Minuten, und somit die Nichtprimärregelfähigkeit, sowie die extrem hohe Standortabhängigkeit. Grundsätzlich gibt es im Vergleich zu anderen Speichertechnologien nur sehr wenige geeignete Standorte. Weiterhin verfügen Pumpspeicherkraftwerke trotz ihres hohen Speichervermögens über eine extrem geringe Energiedichte. Theoretisch müsste sich das Oberwasserbecken in einer Höhe von fast 100 km befinden, damit ein Pumpspeicherkraftwerk eine ähnlich hohe Energiedichte wie eine Lithium-Ionen-Batterie erreicht. Im Vergleich dazu besitzt das derzeit größte Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland (Goldisthal) eine mittlere Fallhöhe von lediglich 302 m. <sup>4,5,9</sup>



Die prinzipiell hohe Stromspeicherkapazität ist ebenso ein Vorteil des Druckluftspeichers. Dieser speichert Energie über eine Druckdifferenz in Form komprimierter Luft. Während Druckluft im industriellen Bereich bereits großflächig eingesetzt wird, zum Beispiel zum Bohren oder Reinigen, hat sie sich in der Energieversorgung jedoch bis heute nicht als Speicher etabliert. So gibt es aktuell weltweit lediglich zwei kommerziell betriebene Druckluftspeicher. Diese befinden sich in Deutschland in der Nähe von Oldenburg (Inbetriebnahme 1978) sowie in den USA (Inbetriebnahme 1991). Neben ihrer hohen Speicherkapazität liegt ein weiterer Vorteil dieser Technologie in ihren im Verhältnis zu elektrochemischen Speichern geringen Kosten. Nachteile sind der bei den derzeit eingesetzten Druckluftspeichern noch geringe Wirkungsgrad von kaum mehr als 50 % sowie die allgemein hohe Standortabhängigkeit. Außerdem sind Druckluftspeicher mit einer Reaktionszeit von ca. 10 Minuten nicht primärregelfähig. <sup>4,5</sup>

Im Gegensatz zum Pump- und Druckluftspeicher ist der Schwungmassenspeicher aufgrund seiner hohen Kapazitätskosten und extrem schnellen Selbstentladung lediglich als Kurzzeitspeicher eine geeignete Option. Sein Prinzip ist dabei so alt (erste Nutzung 6.000 v. Chr.) wie einfach: Es wird eine Schwungmasse zum Rotieren gebracht, welche die aufgewendete Energie in Form kinetischer (Rotations-) Energie speichert. Ein Vorteil des Schwungmassenspeichers ist die vor allem im Verhältnis zu elektrochemischen Energiespeichern sehr hohe Lebensdauer. Seine Anwendungsbereiche ähneln denen des Supercaps. So findet er zum Beispiel Verwendung zur Bereitstellung von Beschleunigungs- und Bremsenergie in Fahrzeugen sowie zur kurzfristigen Frequenz- und Spannungsregelung des Stromnetzes. <sup>4,5</sup>

## Zusammenfassung und Vergleich

Abschließend stellt Abbildung 2 die betrachteten Energiespeicheroptionen sowie ihre potenziellen Aufgaben im Energiesystem der Zukunft vergleichend gegenüber. Zusätzlich ist die Power-to-Gas-Technologie (H<sub>2</sub> / Methan) dargestellt, welche, ebenso wie die Gruppe der thermischen Speicher, in einem Folgeartikel zusammen mit der hierfür notwendigen Integration des Wärmesektors genauer betrachtet wird.

Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Einsatzgebiete der verschiedenen Speicher im zukünftigen Energiesystem. Während zum Beispiel Superkondensatoren aufgrund ihrer begrenzten Speicherkapazität bei im Verhältnis dazu hoher Leistung überwiegend für die Erhaltung der Stromqualität (Frequenzstabilisierung) zuständig sind, bietet die Power-to-Gas-Technologie (H<sub>2</sub> / Methan) prinzipiell die Möglichkeit einer echten Energiereserve, zum Beispiel zur Überbrückung längerer windschwacher Zeiträume.

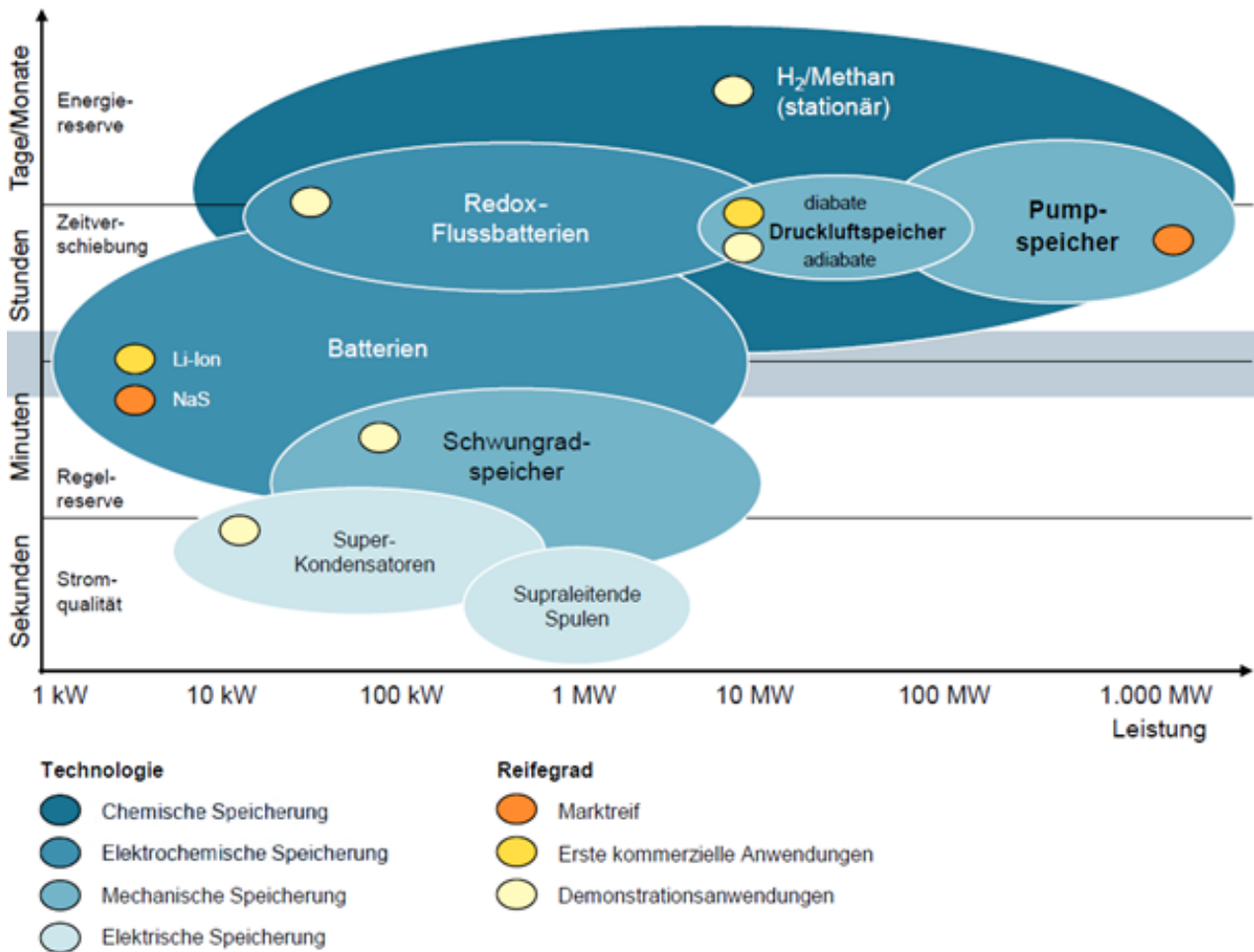


Abb. 2: Einordnung heutiger Energiespeichertechnologien (qualitative Darstellung) <sup>10</sup>

Die übrigen Speicher ordnen sich hinsichtlich ihrer Kapazität und Entladezeit zwischen diesen beiden Extremen ein. So sind Lithium-Ionen-Batterien zum Beispiel geeignet, mögliche in der Mittagszeit auftretende Stromüberschüsse aus Photovoltaik aufzunehmen und diese zu sonnenarmen Tageszeiten wieder zur Verfügung zu stellen.

## Quellen

- 1 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin.
- 2 Agora Energiewende (2014). Stromspeicher in der Energiewende. Berlin.
- 3 Merten, F. (2015). Langfristiger Bedarf an Energiespeichern für die Strom- und Energiewende. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- 3 Sterner, M. u. Stadler, I. (2014). Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Köln, Regensburg.
- 4 Technische Universität Berlin, Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik (2015).
- 6 Saft S.A.
- 7 VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015). Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene: Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze. Frankfurt am Main.
- 8 manager magazin. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/elon-musk-gewinnt-mit-tesla-energie-wette-in-australien-a-1168650.html> (letzter Zugriff am 04.10.2017)
- 9 Ulbig, A. (2015). Die Rolle zentraler und dezentraler Speicher für die Energiewende. ETH Zürich.
- 10 Siemens AG (2015). Energiesystem der Zukunft. Berlin.