

Energiespeicher – Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien

Dr. Andreas Hauer
Fraunhofer ZAE
hauer@muc.zae-bayern.de

Dr. Michael Specht
ZSW
michael.specht@zsw-bw.de

Dr. Michael Sterner
Fraunhofer IWES
michael.sterner@iwes.fraunhofer.de

Energiespeicherung ist in der Lage, das Energieangebot dem Energiebedarf zeitlich oder räumlich anzupassen. Dadurch wird ansonsten ungenutzte Energie nutzbar gemacht, die Energieeffizienz gesteigert und die schwankende Verfügbarkeit erneuerbarer Energien vergleichmäßigt. Energie kann prinzipiell in Form von elektrischer, elektrochemischer, mechanischer, chemischer oder thermischer Energie gespeichert werden.

- Die Lade- oder Entlade-**Leistung** des Speichers wird in kW angegeben. Sie hängt neben dem grundlegenden Speichermechanismus auch von der technischen Realisierung des Speichers ab.
- Der **Wirkungsgrad** eines Speichers beschreibt das Verhältnis der Energiemenge Ausspeicherung/Einspeicherung. Er hängt von Verlusten und der Speicherdauer ab.
- Die **Speicherdauer** gibt an, über welchen Zeitraum die Energie gespeichert wird. Dies reicht für die hier betrachteten Systeme von Sekunden bis zu einem Jahr.
- Die **Kosten** für Energiespeicherung beziehen sich auf die Energiemenge, die dem Speicher entnommen und genutzt werden kann (€/kWh). Sie hängt neben den Investitionskosten auch entscheidend von der Zahl der Speicherkzyklen in einem bestimmten Zeitraum ab.

Eigenschaften von Energiespeichern

Energiespeicher können durch folgende Eigenschaften beschrieben werden:

- Die **Speicherkapazität** gibt die pro Masse (oder Volumen) des Speichermediums (oder des Speichers) gespeicherte Energie in kWh/kg (oder kWh/m³) an. Sie hängt hauptsächlich von der der Speicherung zu Grunde liegenden physikalischen oder chemischen Effekt ab.

Tabelle 1 zeigt verschiedene Speichertechnologien mit ihren Eigenschaften. Die Zahlen sind als Richtwerte zu verstehen, da bei vielen Energiespeichern die aktuellen Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss haben.

Tabelle 1
Speichertechnologien
und ihre Eigenschaften

Speicher-Technologie	Kapazität kWh/t	Leistung MW	Wirkungsgrad	Speicherdauer	Kosten €/kWh
Mechanisch					
Pumpspeicherwerke	1	1–500	80%	Tag – Monat	50
Druckluftspeicher	2 kWh/m ³	300	40–70%	Tag	400–800
Elektrochemisch					
Bleisäurebatterien	40		85%	Tag – Monat	200
Li-ion-Batterien	130	0,02–??	90%	Tag – Monat	1000
NaS-Batterien	110	0,05–??	85%	Tag	300
Redox-Flow-Batterien	25	0,01–10	75%	Tag – Monat	500
Thermisch					
Warm-Wasser-Speicher	10–50	0,001–10	50–90%	Tag – Jahr	0,1
Latentwärmespeicher	50–150	0,001–1	75–90%	Stunde – Woche	10–50
Thermochemische Speicher	120–250	0,01–1	100%	Stunde – Tag	8–40
„Stofflich“					
Wasserstoff	30000	0,001–1	25–50%	Tag – Jahr	1000 €/kWh

Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien durch Energiespeicher

Der Steigerung der Energieeffizienz bei der Primärenergienutzung kommt eine entscheidende Rolle zu, weil auf diese Weise der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden kann, ohne industrielle Aktivitäten zurückfahren oder auf Komfort z. B. im Wohnbereich verzichten zu müssen. Alle energetischen Umwandlungsprozesse sind mit Verlusten behaftet und setzen Abwärme frei. Die Nutzung dieser Abwärme birgt große Potenziale. Energiespeicher können hier einen entscheidenden Beitrag leisten. Durch den Einsatz thermischer Energiespeicher können in industriellen Bereichen mit hohem Energieverbrauch, z. B. in Gießereien, Zementwerken oder bei der Glasherstellung, große Wärmemengen zum Teil wieder in Form von Prozesswärme oder in Nahwärmenetzen zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung nutzbar gemacht werden. Blockheizkraftwerke können stromgeführt betrieben werden, wenn die Abwärme gespeichert und bei Bedarf bereitgestellt werden kann

Bei der Integration erneuerbarer Energiequellen mit fluktuierendem Angebot können Energiespeicher helfen, Energie kontinuierlich bereit zu stellen. Solarthermische Wärme kann sowohl für Kraftwerke bei Temperaturen über 400 °C zentral als auch für die häusliche Warmwasserbereitung dezentral gespeichert und zum gegebenen Zeitpunkt abgegeben werden. Durch Photovoltaik und Wind erzeugter Strom kann gespeichert werden, womit die meteorologischen Schwankungen in der Verfügbarkeit ausgeglichen werden können.

Speicherung elektrischer Energie

Elektrizität kann grundsätzlich in Form von mechanischer, chemischer, elektrochemischer und elektrischer Energie gespeichert werden.

Mechanische Speicher zeichnen sich vor allem durch große Speicherkapazität (Absolute, nicht spezifische) und Leistung aus. Darüber hinaus sind sie heute die wirtschaftlichste Lösung der Elektrizitätsspeicherung:

- **Pumpspeicherwerke:** Pumpspeicher können zur Vergleichmäßigung der durch Kraftwerke zu deckenden Last (Lastglättung) sowie zur Speicherung der Energieüberschüsse genutzt werden und so zu einem technisch effizienteren Einsatz der konventionellen Kraftwerke sowie der Vermeidung des Abregelns erneuerbarer Energien beitragen.
- **Druckluftspeicher:** In Schwachlastzeiten speichern sie Strom aus Grundlastkraftwerken durch Kompression von Luft in unterirdische Kavernen. Bei Spitzenlastbedarf wird der Kavernenspeicher entladen, indem die komprimierte Luft zunächst erhitzt und dann in einer Gasturbine entspannt wird. Diese „konventionelle“ Druckluftspeichertechnik benötigt für ihren Betrieb Erdgas, ist also eine „Hybridtechnik“. Damit bleibt der Wirkungsgrad auf ca. 40% beschränkt. Als Weiterentwicklung zielt die so genannte adiabate Druckluftspeichertechnik darauf, eine lokal emissionsfreie, reine Speichertechnik mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung zu stellen. Dieses Konzept verwendet einen zusätzlichen Wärmespeicher. Damit wird es möglich, die für den Expansionsprozess benötigte Wärme durch die Kompressionswärme des Beladungsprozesses bereitzustellen und so den bisher benötigten Gasbrenner zu vermeiden. Solche Anlagen können hohe Stromspeicherwirkungsgrade von etwa 70% realisieren.

In Zukunft kann die Integration erneuerbarer Elektrizität aus Photovoltaik und Wind aber auch von elektrochemischen Speichersystemen übernommen werden. Der Bedarf an elektrochemischen Speichern (Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien) und Hybridsystemen aus Batterien und Superkondensatoren mit hoher Leistungsdichte und langer Lebensdauer wird in den kommenden Jahren stark ansteigen, denn der Anteil an Strom aus dezentralen und fluktuierenden Quellen wird sich erhöhen, was den stationären Einsatz dieser Technologien forcieren wird. Gleichzeitig wird die Entwicklung leistungsstarker Batterien für mobile Anwendungen im Verkehr zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Die zukünftigen Herausforderungen liegen in einer nutzerfreundlichen Kostenstruktur elektrochemischer Speicher und der Produktion von anwendungsorientierten Systemlösungen. Dies gilt

insbesondere für eine stationäre elektrochemische Stromspeicherung für fluktuierende Einspeisungen aus Photovoltaik- und Windanlagen. Hier zeichnet sich eine Entwicklung ab, mit der überschüssiger Windstrom in große Batteriesysteme geleitet wird, um diese in ein Energiedienstleistungssystem einzubinden, das Spannung und Frequenz im Verteilnetz effizient stabilisiert.

Speicherung thermischer Energie

Auch die Speicherung thermischer Energie ist ein wichtiges Instrument für eine effiziente Energienutzung. Die möglichen Einsatzbereich thermischer Energiespeicher reichen von der stundenweisen Speicherung von Niedertemperaturwärme für die Warmwasserbereitung bis zu Hochtemperaturspeichern bei der solarthermischen Elektrizitätserzeugung (Concentrated Solar Power). Ein großer Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz kann insbesondere bei der Abwärmenutzung erwartet werden.

Grundsätzlich kann thermische Energie in Form von sensibler oder latenter Wärme oder in thermochemischen Prozessen gespeichert werden.

- **Sensible Speicherung thermischer Energie**

Bei der sensiblen Speicherung wird ein Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. In den meisten Fällen wird Wasser eingesetzt, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und sehr kostengünstig ist. Kleinere Speicher werden als Pufferspeicher in thermischen Solaranlagen (Warmwasserbereitung) für eine Speicherung von Tagen oder Wochen eingesetzt. Große Wasserspeicher (bis zu mehreren tausend m³) werden zur saisonalen Speicherung solarer Wärme zum Heizen im Gebäudebereich meist in Verbindung mit einem Nahwärmenetz gebaut. Mit großen saisonalen Wärmespeichern kann in Deutschland etwa die Hälfte des Gesamtwärmebedarfs von größeren Gebäudeeinheiten solar gedeckt werden. Wärme und Kälte wird auch im Erdreich gespeichert. Hier kann beispielsweise thermische Energie mit einem Temperaturniveau von ca. 10 °C im Winter von einer Wärmepumpe genutzt werden und im Sommer direkt zur Gebäudekühlung eingesetzt werden.

Sensible Speicherung thermischer Energie

*Warmwasserspeicher zur saisonalen Speicherung solarer Wärme in einem Nahwärmenetz am Ackermannbogen, München
(ZAE Bayern)*



- **Latentwärmespeicher**

Latentwärmespeicher nutzen zusätzlich zur Temperaturerhöhung (oder -absenkung) einen Phasenwechsel (engl. Phase Change Materials PCM) des Speichermediums. Dadurch kann bei kleineren Temperaturunterschieden deutlich mehr thermische Energie gespeichert werden. Dies ist vor allem bei der Kältespeicherung von Vorteil. In die Gebäudestruktur integrierte PCMs können z. B. mit Schmelztemperaturen um 25 °C die Raumtemperatur bei komfortablen Werten halten und vor Überhitzung schützen. Die hohe Speicherkapazität trägt zu einer kompakten Speichergeometrie bei. Auch die Nutzung industrieller Abwärme kann in Zukunft durch Latentwärmespeicher bei hohen Temperaturen (über 150 °C) umgesetzt werden.

- **Thermochemische Speicherprozesse**

Zur Speicherung thermischer Energie können auch reversible chemische Reaktionen genutzt werden. Solche Systeme verfügen über hohe Energiespeicherdichten und sind in der Lage, die Temperaturniveaus beim Laden und Entladen den aktuellen Bedürfnissen anzupassen. Am meisten untersucht sind auf diesem Gebiet Ad- und Absorptionsprozesse.

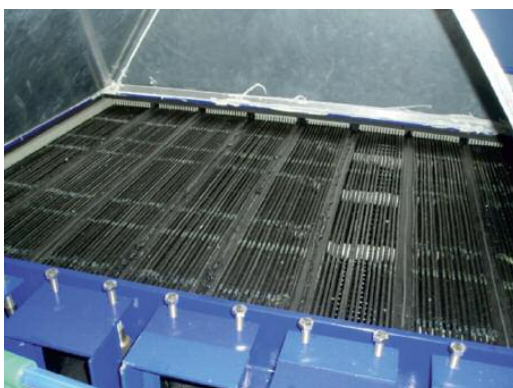
Offene Sorptionsspeicher werden momentan für ihren Einsatz bei der Nutzung industrieller Abwärme untersucht. Vor allem im Bereich industrieller Trocknungsprozesse können hier effiziente und wirtschaftlich interessante Systeme entstehen. Die Möglichkeit neben der Speicherung auch Wärme in Kälte zu transformieren wird in Anwendungen wie der solaren Gebäudeklimatisierung genutzt.

„Thermische Energie - speicherung zur Speicherung von Elektrizität“

Die Umwandlung der verschiedenen Energieformen – elektrisch, elektrochemisch, mechanisch, chemisch oder thermisch – bietet neue Möglichkeiten der effizienten Energiespeicherung. So kann z. B. erneuerbar erzeugte Elektrizität, wenn diese kurzzeitig nicht ins Netz einspeisbar ist, nach der Umwandlung in Wärme oder Kälte dezentral, kostengünstig und effizient thermisch gespeichert werden. Auch Sonnenwärme von über 400 °C kann in thermischen Speichern aufgehoben und in der Nacht der Turbine wieder zugeführt werden. Damit werden die Effizienz und vor allem die Laufzeit von solarthermischen Kraftwerken deutlich erhöht. Durch die Möglichkeit der Umwandlung der Energieformen kann das technisch und ökonomisch am besten geeignete Speicherkonzept realisiert werden.



Latentwärmespeicher mit Calcium-Chlorid zur Rückkühlung eine Absorptionskältemaschine zur solaren Klimatisierung (ZAE Bayern)



Thermochemische Speicherprozesse:

Offener Absorptionsspeicher mit Lithium-Chlorid zur Raumklimatisierung in München (ZAE Bayern)

Möglichkeiten durch „stoffliche Energiespeicher“ Neben der direkten Speicherung von Energie kann auch eine „stoffliche“ Speicherung durchgeführt werden. Dabei wird unter Energieeinsatz ein Energieträger produziert, der die Energie über einen beliebigen Zeitraum speichert. Bei den Energieträgern handelt es sich in der Regel um Wasserstoff oder Methan.

- **Wasserstoff als Energiespeicher**

Durch Wasserelektrolyse kann z. B. der überschüssige Windstrom als chemische Energie gespeichert werden. Zentraler Punkt einer Wasserstoffwirtschaft ist die ökologisch und wirtschaftlich vertretbare Erzeugung des Wasserstoffs mit verschiedenen Verfahren (Elektrolyse aus erneuerbarem Strom, thermische Wasserspaltung oder Reformierung von aus regenerativen Ressourcen hergestellten Kohlenwasserstoffen (z. B. erneuerbares Methan)).

Erneuerbarer Strom kann so in transportablen Energieträgern gespeichert werden, um ihn zeitlich oder räumlich versetzt zu nutzen. Der hergestellte und gespeicherte Wasserstoff kann so zur netzunterstützenden Rückverstromung eingesetzt werden und/oder als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Großmaßstäblich wird die elektrische Pufferung z. B. von Strom aus Off-Shore-Windkraftparks über die Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung in Kavernen mit einer Verstromung in Gasturbinen angedacht.

- **Erneuerbares Methan als Energiespeicher**

Das FVEE-Konzept sieht in der Herstellung von erneuerbarem Methan einen besonders interessanten Lösungsweg zur Speicherung erneuerbarer Energien. Mit einem Methangasreservoir kann auch zu Zeiten eines geringen Angebots an erneuerbaren Energien (z. B. Windflaute) die Energieversorgung für alle Verbrauchssektoren gedeckt werden.

Das neue Konzept besteht darin, aus überschüssigem Windstrom über die Wasserstofferzeugung via Elektrolyse und anschließender Methanisierung von CO₂ synthetisches Methan zu erzeugen, das ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Dieser neue Lösungsansatz zur saisonalen Speicherung von erneuerbaren Energien bietet die Möglichkeit, intelligente und bidirektional verbundene Strom- und Gasnetze zu entwickeln.

Während sich die Speicherkapazität des Stromnetzes heute auf nur ca. 0,04 TWh beläuft – mit

einer Speicherreichweite von unter einer Stunde –, beträgt die Speicherkapazität des heute schon vorhandenen Gasnetzes in Deutschland über 200 TWh mit Speicherreichweiten im Bereich von Monaten.

Ausblick

Damit zukünftige F&E-Aktivitäten möglichst schnell und zuverlässig zu einer kommerziellen Umsetzung gelangen ist es wichtig, dass Grundlagen- und angewandte Forschung Hand in Hand arbeiten. Die Entwicklung neuer Speichermaterialien sollte bereits die zukünftige Verfahrenstechnik und die Randbedingungen der konkreten Anwendung im Auge haben.

Darüber hinaus kann die gemeinsame und vergleichende Entwicklung elektrischer und thermischer Energiespeicher Synergien fördern, die eine Steigerung der Energieeffizienz und die Integration erneuerbarer Energien unterstützen werden.