

Speichertechnologien für erneuerbare Energien – Voraussetzung für eine nachhaltige Energieversorgung

Dr. Rainer Tamme
DLR
rainer.tamme@dlr.de

Dr. Andreas Jossen
ZSW
andreas.jossen@zsw-bw.de

Dr. Hans-Martin Henning
Fraunhofer ISE
hans-martin.henning@ise.fhg.de

Eine weiter zunehmende Deckung des Energiebedarfs aus nachhaltigen Quellen ist erklärtes Ziel nationaler und europäischer Energiepolitik. Die Zielgröße der Europäischen Kommission für diesen Anteil ist 20% bis 2020, wobei signifikante Zuwächse im Bereich der solaren Wärme- und Kälteerzeugung und im Bereich der Stromerzeugung durch Windenergie an Offshore-Standorten erwartet werden [1].

Ein solches Ausbauziel mit einem stark vergrößerten Anteil fluktuierender Energiequellen erfordert effiziente und wirtschaftlich attraktive Speichertechnologien. Für einen erfolgreichen weiteren Ausbau erneuerbarer Energien kommt daher der Querschnittstechnologie Energiespeicherung eine Schlüsselfunktion zu.

Energiespeicher – Schlüsselkomponente zur nachhaltigen Energieversorgung

Der heutige Stand der Elektrizitätswirtschaft und die hohe Qualität der Heizwärmeversorgung beruhen im Wesentlichen auf der Verwendung der fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Gas. Die enorme Entwicklung im Verkehrssektor ist nur möglich gewesen, weil mit den Flüssig-

kohlenwasserstoffen Benzin, Diesel oder Kerosin Kraftstoffe mit sehr hoher Energiedichte zur Verfügung stehen. In allen Fällen stellen die fossilen Brennstoffe Energiespeicher dar, die von der Natur durch Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie in prähistorischer Zeit erzeugt worden sind. Ihre extrem hohe Energiedichte beruht auf der Nutzung im offenen Kreislauf, d.h. sie werden bei der „Entladung“ stofflich verbraucht und stehen für den nachfolgenden Ladevorgang nicht mehr zur Verfügung.

Ein wichtiges Kriterium zur Einteilung erneuerbarer Energiequellen ist der Aspekt ihrer Verfügbarkeit (Tab. 1). Während Biomasse, geothermische Energie und Wasserkraft eine hohe Verfügbarkeit aufweisen, sind Sonne und Wind nur sehr unregelmäßig verfügbar. Die derzeit diskutierten Techniken zur Nutzung der Wellenenergie weisen einen unterschiedlichen Grad an Verfügbarkeit auf. D.h. bei verstärkter Einbindung von Sonnen- und Windenergie zur Strom- und Wärmeerzeugung muss der Verfügbarkeitsaspekt durch zusätzliche technische Maßnahmen gelöst werden. Dazu ist eine hocheffiziente Speichertechnologie notwendig, um die zeitliche und räumliche Inkongruenz von Angebot und Nachfrage auszugleichen und die Realisierung eines integrierten energieeffizienten Gesamtprozesses zu ermöglichen.

Tabelle 1
Einteilung
erneuerbarer
Energiequellen
hinsichtlich
ihrer
Verfügbarkeit

	hohe Verfügbarkeit	unregelmäßig verfügbar
Biomasse	hohe Verfügbarkeit	
Geothermie	hohe Verfügbarkeit	
Wasserkraft	hohe Verfügbarkeit	
Wellenenergie	unregelmäßig verfügbar	unregelmäßig verfügbar
Photovoltaik		unregelmäßig verfügbar
Solarthermie		unregelmäßig verfügbar
Windenergie		unregelmäßig verfügbar

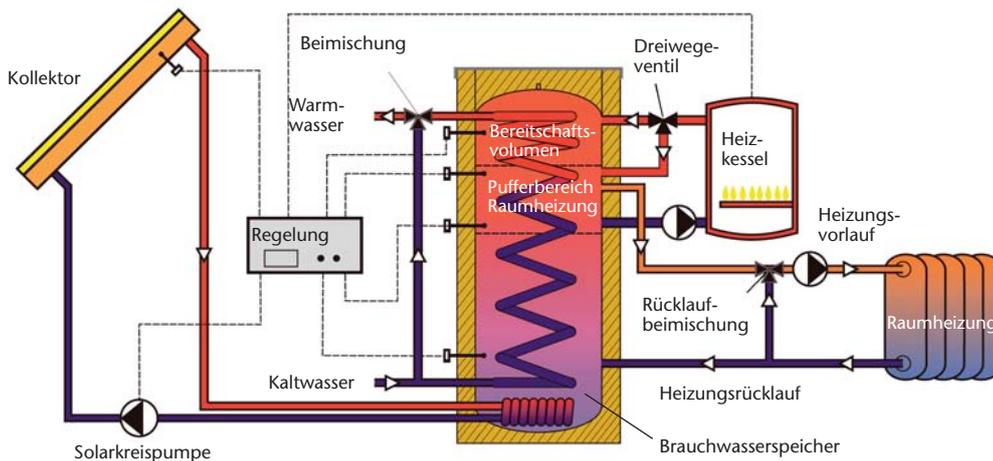


Abbildung 1
Schema einer
solaren Kleinanlage
mit integriertem
Brauchwasserspeicher

Die Effizienz von Energieprozessen wird durch den Einsatz von thermischen Speichersystemen deutlich gesteigert. Die Integration von Speichersystemen kann unterschiedliche Ziele verfolgen:

- Bei zyklischen Prozessabläufen kann Energie, die sonst am Ende eines Zyklus verloren gehen würde, gespeichert werden, um dann im nachfolgenden Zyklus wieder genutzt zu werden. Besteht in einem System eine zeitliche Verschiebung zwischen dem Angebot und dem Bedarf an thermischer Energie, so können Speicher diese zeitliche Differenz zwischen Erzeuger und Verbraucher ausgleichen.
- Bei Prozessen mit ausgeprägten zeitlichen Lastspitzen können Systemkomponenten für ein mittleres Leistungsniveau dimensioniert werden. Der Speicher wird in Phasen mit hohem Leistungsbedarf entladen, während bei Unterschreitung der durchschnittlichen Leistung Energie zwischengespeichert wird. Die optimale Ausnutzung der Systemkomponenten vermeidet Teillastverluste und reduziert Investitionskosten. Die Belastung des Systems durch thermische Wechsellast wird reduziert, wodurch die Lebensdauer der Komponenten erhöht wird.

Die Bereitstellung einer effizienten und wirtschaftlichen Speichertechnik erfordert die Anpassung an periphere Komponenten und Prozessparameter d.h. eine optimale Systemintegration. Aufgrund deutlich variierender Anforderungsprofile hinsichtlich Art, Menge und Leistung der benötigten Energie müssen

für elektrische, thermische, mechanische oder chemische Energiespeicher jeweils spezifische, optimale Lösungen hinsichtlich Effizienz und Wirtschaftlichkeit gefunden werden. Das hat zur Konsequenz, dass es nicht den einen optimalen Energiespeicher für alle Anwendungen gibt. Entsprechend ist ein breites Spektrum an Speichertechnologien, Materialien und Methoden gefordert. Übergeordnete Ziele, die auf dem Gebiet Speichertechnik erfüllt werden müssen, sind:

- die Reduktion der spezifischen Investitionskosten
- die Erhöhung von Effizienz und Zuverlässigkeit
- Berücksichtigung von Materialaspekten, Auslegungsfragen und Systemintegration

Wärmespeicher für solare Klimatisierung

Gerade bei der Nutzung regenerativer Energiequellen für die Hausenergieversorgung stimmen Angebot und Nachfrage zeitlich oft nicht überein. Da der größte Teil des Energieverbrauchs in Haushalten für den Bereich der Raumwärme – bei Bürogebäuden auch für Kühlung – und Brauchwasserbereitstellung verwendet wird, ist das Einsparpotenzial an fossiler Energie durch solarthermische Systeme besonders hoch. Erst durch die Einbeziehung thermischer Energiespeicher sind hohe solare Deckungsraten erreichbar.

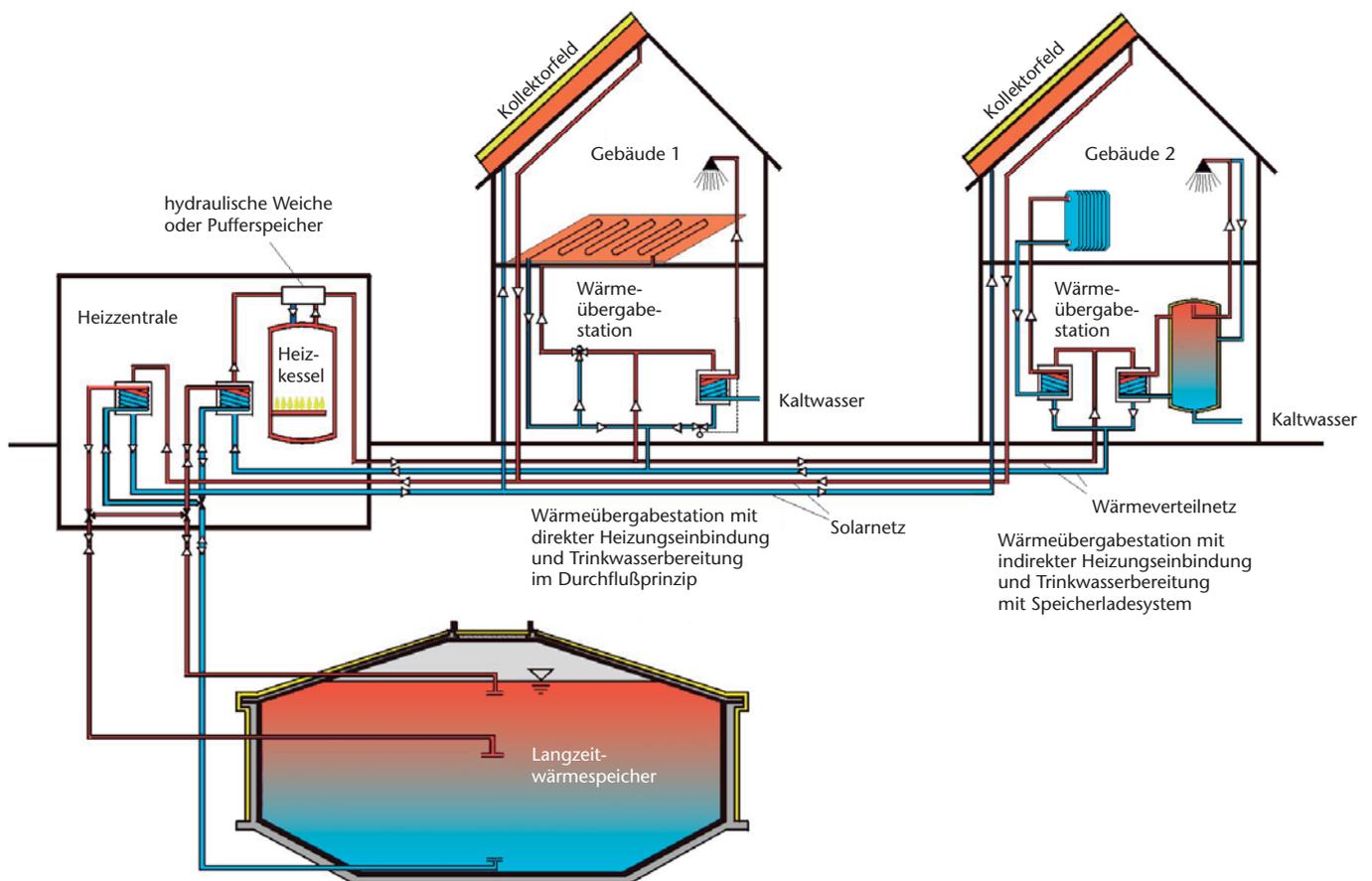


Abbildung 2
Schema einer solaren
Nahwärmeversorgung
mit Langzeit-
Wärmespeicher

Für die Kurzzeitspeicherung und dezentrale Wärme- und Brauchwasserversorgung sind derzeit Wasserspeicher der Standard (Abb 1). In Verbindung mit Kollektorflächen von 10-20 m² lassen sich hiermit in Deutschland 15-25% am Gesamtwärmebedarf solar decken.

Mit Anlagen, die mit saisonalen oder mehrwöchigen Wärmespeichern ausgestattet sind, kann der fossile Brennstoffbedarf zur Gesamtwärmeversorgung sogar auf etwa die Hälfte reduziert werden. In Kombination mit solaren Nahwärmesystemen (Abb. 2) könnten große Teile des Niedertemperaturwärmemarktes in Deutschland mit solarer Energie versorgt werden. Ein wichtiger Baustein derartiger Versorgungskonzepte ist die Integration effizienter saisonaler Wärmespeicher. Hierfür stehen erste Pilotanlagen zur Verfügung. Entscheidend für die Markteinführung werden geringe Speicherkosten und die Minimierung von Speicher- und Netzverlusten sein, um eine hohe Nutzwärmeausbeute zu erzielen [2].

Die mittelfristige Zielsetzung zur Erhöhung des solaren Deckungsanteils ist mit der derzeit kommerziell verfügbaren Speichertechnik nicht erreichbar. Benötigt werden verbesserte Speichersysteme mit hoher Kapazität, Effizienz und Leistung. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine deutliche Senkung der Investitionskosten für die jeweiligen Speicher. Nur dann wird man die Vision eines durch fossile Energiequellen unterstützten solaren Wärmeversorgungssystems verwirklichen können.



Abbildung 3 Grundprinzip eines solarthermischen Kraftwerks mit integriertem Speicher

Wärmespeicher für solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke wandeln konzentrierte Solarstrahlung in Hochtemperaturwärme um, die den fossilen Brennstoff im Kraftwerksprozess ersetzt (Abb. 3). Hochtemperatur-Solarthermie kann zwar in Deutschland selbst mangels hinreichender Direktstrahlung nicht wirtschaftlich angewendet werden, stellt aber eine neue Chance dar, schlüsselfertige Anlagen, Komponenten, Systemtechnik und Engineering auf dem Weltmarkt zu exportieren.

Energiespeicher erhöhen den Solaranteil des Kraftwerks, sie verbessern das Betriebsverhalten, bewirken eine höhere Ausnutzung des Kraftwerksblocks und verbessern die Erlössituation. Das Zusammenwirken aller genannten Faktoren

führt dazu, dass sich die solaren Stromgestehungskosten eines solarthermischen Kraftwerks mit integrierter Speichertechnik gegenüber dem Betrieb ohne Speicher absenken lassen. Energiespeicher sind daher für eine erfolgreiche Positionierung der solaren Kraftwerkstechnologie zwingend notwendig. Um das Kostensenkungspotenzial zu erreichen, werden effiziente Speicher mit hoher Lebensdauer und niedrigen spezifischen Kosten benötigt.

Abhängig von den spezifischen Speicherkosten und der Speicherkapazität lassen sich Kostensenkungen von 20-30% gegenüber einem Betrieb ohne Speicher erzielen. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 4 dargestellt. Dabei sind die spezifischen Speicherkosten zwischen 10 und 40 €/kWh variiert worden. Die der Abbildung zugrunde liegenden Werte wurden für ein solarthermisches Kraftwerk von 80 MW_{el} mit

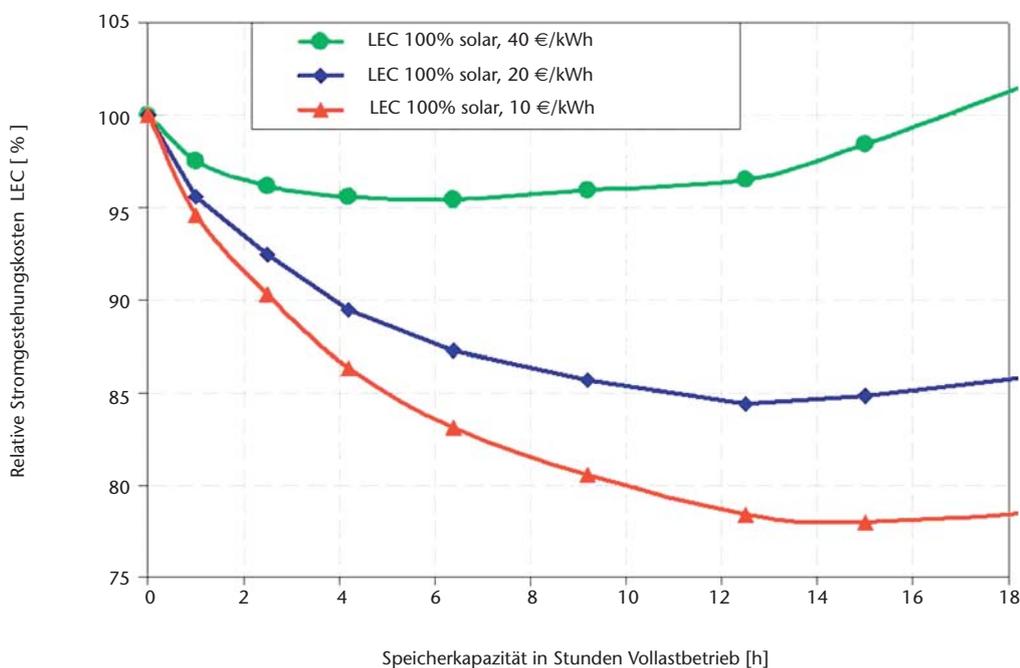


Abbildung 4 Kostensenkungspotenziale für solarthermische Stromerzeugung durch Integration von drei verschiedenen kostengünstigen Speichertechniken (LEC=Levelized Electricity Costs)

Abbildung 5
Übersicht technischer
Spezifikation für
Integration thermischer
Energiespeicher

Kraftwerkstyp	primäres Wärmeträgermedium	Druck	Temperatur	Wärme- kraft- maschinen
Parabolrinne	Öl	15 bar	400° C	ORC
Solarturm	Sattdampf	40 bar	260° C	Dampfturbine
Parabolrinne	überhitzter Dampf	50 – 100 bar	400 – 500° C	Gasturbine
Parabolrinne/ Solarturm	Salzschmelze	1 bar	500 – 600° C	GuD
Solarturm	Luft	1 bar	700 – 1000° C	Stirling
Solarturm	Luft	15 bar	800 – 900° C	andere



dem Standort „Südlicher Mittelmeerraum“ ermittelt. Zugrunde gelegt wurden Investitionskosten von 700 €/kW für die Energieeinheit und 200 €/m² für das Solarfeld.

Die wesentliche Herausforderung bei der Speicherentwicklung für die solarthermische Kraftwerkstechnik liegt in der Vielfalt der Kraftwerkskonzepte und damit resultierenden Bandbreite an Prozessparametern und den Erfordernissen der jeweiligen Wärmekraftmaschinen, wodurch vom Speicher – an der Nahtstelle zwischen dem Solarteil und der Wärmekraftmaschine – ein breites Spektrum technischer Spezifikationen abgedeckt werden muss (Abb. 5).

Großtechnisch erprobt und für den Einsatz in den projektierten Anlagen in Spanien vorgesehen sind thermische Speicher auf der Basis von Flüssigsalz. Allerdings sind hier die spezifischen Kosten mit 30-60 € pro kWh zu hoch, so dass sie für die Erschließung des Marktpotenzials nur begrenzt in Frage kommen.

Im Rahmen laufender, vom Bundesumweltministerium unterstützter Entwicklungsvorhaben wird ein Wärmespeicher auf Basis von Beton als Speichermedium entwickelt. Die bisherigen erzielten Ergebnisse zeigen, dass hiermit eine technisch und wirtschaftlich attraktive Lösung für einen Wärmespeicher realisiert werden kann.

Die Zielparаметer für die weiterentwickelte Feststoffspeichertechnik sind ein modulares, skalierbares Design und Investitionskosten von 20 €/kWh Speicherkapazität. Dabei liegt das größte Kostensenkungspotenzial beim Rohrregister zur Wärmeübertragung vom Wärmeträgeröl auf das Speichermedium [3].

Neue Untersuchungen zeigen, dass das Potenzial für Effizienzverbesserung und Kostensenkung noch nicht ausgeschöpft ist. Neue Entwicklungen befassen sich mit sensiblen Feststoffspeichern in Festbett- oder Fließbettkonfiguration, sowie mit Latentwärmespeichern und mit verbesserten Salzspeichern. Bei kontinuierlicher Weiterentwicklung sollte die technische Umsetzung in Pilotspeichern mittelfristig möglich sein.

Stromspeicher für dezentrale Stromerzeugung mit PV

Dezentral, photovoltaisch versorgte Systeme benötigen in Inselanwendungen ein Speichersystem. Die Anforderungen reichen von einer hohen Effizienz und einer möglichst hohen Lebensdauer bis hin zu möglichst niedrigen Kosten. Prinzipiell sind hierfür elektrochemische, elektrostatische, elektrodynamische und elektromechanische Speicher geeignet. Eine Übersicht zeigt Abb. 6.

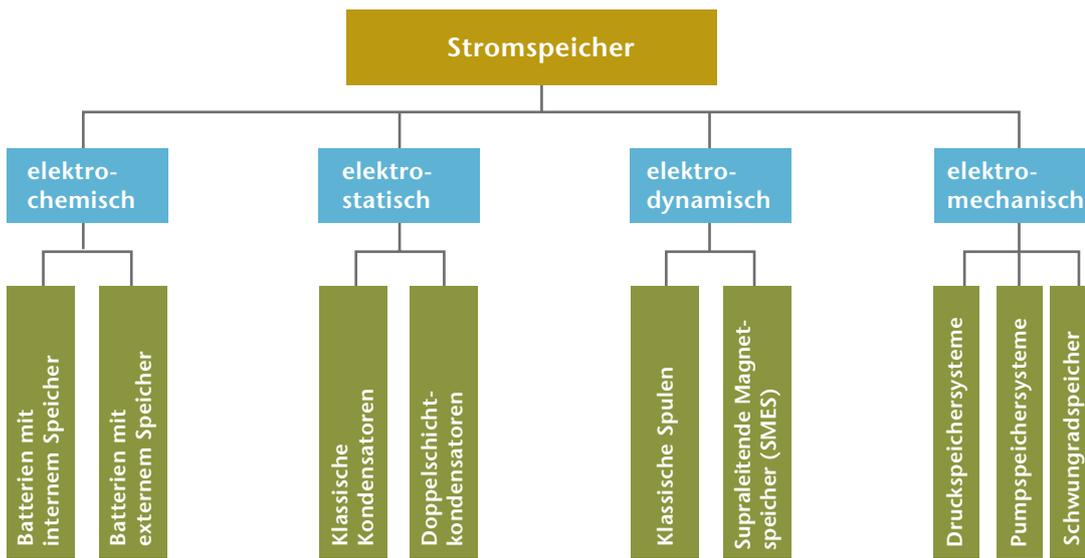


Abbildung 6
Möglichkeiten der elektrischen Stromspeicherung

Die Speichersysteme unterscheiden sich grundlegend in ihren Eigenschaften, so dass sich für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Speichertechnologien etabliert haben. Eine der wichtigsten Eigenschaften ist die schnellstmögliche Entladezeit des Speichers. Hier wird unterschieden zwischen Kurzzeitspeichern und Langzeitspeichern. Zu den Kurzzeitspeichern gehören die elektrostatischen und die elektrodynamischen Speicher sowie Schwungradspeicher. Diese Systeme sind für Entladedauern von weniger als einer Minute optimiert. Zu den Langzeitspeichern (typische Entladezeiten ab etwa 10 Stunden) gehören Druck- und Pumpspeichersysteme sowie die

elektrochemischen Speicher (Batterien und Akkumulatoren). Elektrochemische Speicher nehmen hierbei eine Sonderstellung ein, da es einerseits eine Vielzahl von unterschiedlichen Systemen gibt und andererseits auch Entladezeiten ab etwa einer Minute erreicht werden. Sie sind heute auch die bevorzugten Speichersysteme für kleine und mittlere Systeme (bis etwa 10 MWh).

Bei elektrochemischen Speichern kann zwischen solchen mit internem Speicher und solchen mit externem Speicher unterschieden werden. Das prinzipielle Funktionsprinzip ist in [Abb.7](#) dargestellt.

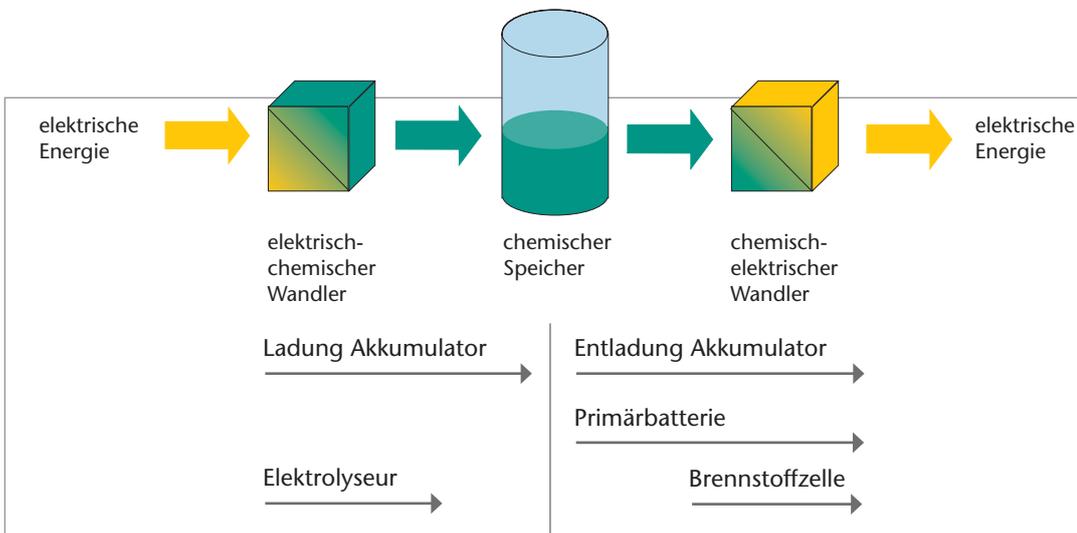


Abbildung 7
Prinzip elektrochemischer Speicher

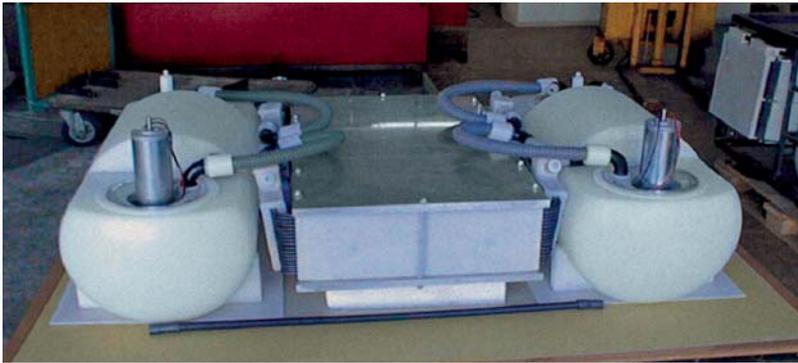


Abbildung 8
Vanadium Redox-
Flow-Batterie

Systeme mit externem Speicher bestehen aus einem oder zwei elektrochemischen Wandlern, in denen die Reaktanden (gasförmig oder flüssig) elektrochemisch reagieren. Die Speicherung der Reaktanden und der Reaktionsprodukte erfolgt in Tanks. Abb.8 zeigt ein entsprechendes System (Vanadium Redox-Flow Batterie).

Bei diesen Systemen kann der Energieinhalt durch die Größe der Tanks leicht angepasst werden. Sie sind daher besonders als Langzeitspeicher interessant. Systeme bis zu einer Größe von 100 MWh bei etwa 10-stündiger Entladung werden für diese Technologie prognostiziert.

Zu den Systemen mit internem Speicher gehören unter anderen Blei-, Nickel-Kadmium-, Nickelmetallhydrid- und Lithiumbatterien. Bei photovoltaischen Systemen werden heute in der Regel Bleibatterien eingesetzt.

Innerhalb der letzten Jahre gab es große Fortschritte bei den Lithium-Batterien. Diese sind heute die Voraussetzung für eine hohe Mobilität portabler Geräte. Zur Zeit werden diese Systeme für Hybridfahrzeuge weiterentwickelt, wo sie ab etwa 2008 in Serie gehen werden. Neue Lithiumsysteme, basierend auf neuen Elektrodenmaterialien, versprechen niedrigere Kosten und sehr lange Lebensdauern. Hierdurch werden diese Systeme auch zunehmend Einzug in den Bereich der photovoltaischen Inselssysteme haben.

Eine Variante von Lithiumbatterien sind Hochleistungstypen, die mit spezifischen Leistungen von mehreren 1000 W/kg entladen werden können. Dies entspricht in etwa einer Entlade-

zeit von 2 bis 5 Minuten. Längere Entladezeiten sind mit diesen Systemen ebenfalls problemlos möglich. Hierdurch sind zukünftig auch Anwendungen wie etwa die Stützung von Windkraftanlagen denkbar.

Die Verwendung von Batteriespeichersystemen zur Stützung elektrischer Netze, auch im Verbund mit Photovoltaik- und Windkraftanlagen, wurde in den letzten Jahren intensiv in Japan und in den USA untersucht und vorangetrieben.

Zentrale Druckspeicher- kraftwerke

Von allen erneuerbaren Energien hat sich insbesondere die Windenergie in Deutschland rasant entwickelt. Circa 18.000 Windenergieanlagen erzeugen heute in Deutschland den Strom für 7,6 Millionen Haushalte und vermeiden so etwa 25 Millionen Tonnen CO₂.

Bis 2030 soll die heutige Windstrommenge durch Offshore-Ausbau und Repowering – Ersatz alter Anlagen durch effizientere leistungsstärkere Anlagen – mindestens verfünffacht werden. Die Netzintegration großer Leistungen an Windstrom stellt jedoch die Netz- und Kraftwerkssysteme vor erhebliche Herausforderungen. Studien weisen darauf hin, dass die bestehende Netzinfrastruktur schon sehr bald an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen wird. So ermittelt die „dena-Netzstudie“ Engpässe beim Netzausgleich und Transportkapazitäten ab 2015 [4].

Der Betrieb von Speicherkraftwerken mit leistungsfähiger und kosteneffektiver Technik kann die Integrationsprobleme erheblich mildern: Spitzenlaststrom kann CO₂-neutral bereitgestellt werden. Auch kann durch Vergleichmäßigungseffekte eine bessere Ausnutzung der knappen Transportnetzkapazitäten erreicht werden. Im Prinzip sind Pumpwasserkraftwerke dazu besonders geeignet und werden entsprechend eingesetzt. Leider sind die vorhandenen Kapazitäten wegen geographischer Beschränkungen nicht weiter ausbaubar. Druckluftspeicherkraftwerke auf der Basis unterirdischer Kavernen haben diesen Nachteil nicht und werden daher als Alternative mit vergleichbaren Betriebseigenschaften gesehen.

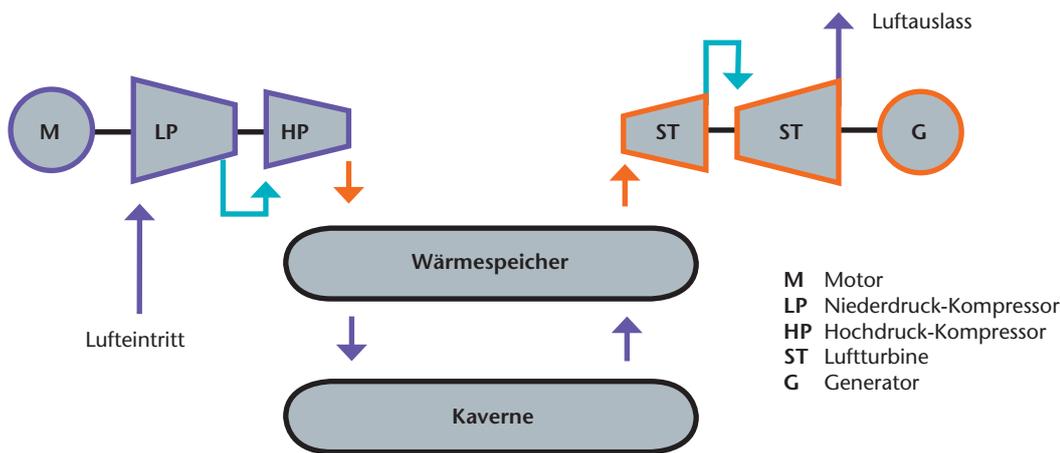


Abbildung 9
Prinzip eines adiabaten
Druckspeicherkraft-
werks

Für den Betrieb von Druckluftspeicherkraftwerken gibt es mittlerweile mehr als 25 Jahre Betriebserfahrung. Eine erste Anlage mit einer Leistung von 290 MW wurde 1978 in Deutschland bei Huntorf gebaut. Eine weitere 100 MW-Anlage entstand 1991 in McIntosh/Alabama. Beide Anlagen sind bis heute in Betrieb. 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“, die zudem konzeptinhärente Wirkungsgradbeschränkungen aufweist.

Als Weiterentwicklung zielt die adiabate¹ Druckluftspeichertechnik darauf, diese Nachteile zu überwinden und eine lokal emissionsfreie, reine Speichertechnik mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung zu stellen. Dieses Konzept verwendet einen zusätzlich Wärmespeicher. Damit wird es möglich, die für den Expansionsprozess benötigte Wärme aus der Kompressionswärme des Beladungsprozesses bereitzustellen und so den bisher benötigten Gasbrenner zu vermeiden: Bei der Speicherbeladung wird die Wärme der komprimierten Luft entzogen und gespeichert. Zur Entladung wird die kalte Druckluft mit der gespeicherten Wärme auf die Turbineneintrittstemperatur aufgeheizt (Abb. 9). Erst die Einbeziehung großer Wärmespeicher erlaubt es also, solche Anlagen ohne externe Feuerung und mit hohen Stromspeicherwirkungsgraden von etwa 70% zu realisieren.

Zur Aufnahme der Druckluft dienen wiederum unterirdische Kavernen.

Die Techniken für die einzelnen Systemkomponenten sind zwar im Prinzip vorhanden, an den konkreten Entwurf der Komponenten wie Kompressor, Turbine, Wärmespeicher sind jedoch hohe, zum Teil von Industriestandards stark abweichende Anforderungen gestellt. Ebenso anspruchsvoll ist die Optimierung der freien Parameter des Gesamtsystems nach Kosten- und Effektivitätsgesichtspunkten.

Für den thermischen Speicher, ein zentrales Element des Aufbaus, gibt es bei den benötigten Betriebsbedingungen kaum vergleichbare Vorbilder, was hier grundsätzliche Überlegungen zur Wahl der Speichertechnik nötig macht. Hohe Drücke und Temperaturen, große Wärmeleistungen und Temperaturspreizungen sowie die Fähigkeit, den Betriebsbedingungen von Kompressor und Turbine zu folgen, sind zusammen mit Kostenaspekten die bestimmenden Spezifikationen.

¹ thermodynamische Zustandsänderung bei konstanter Wärme

Im Rahmen der Projektentwicklung für ein adiabates Druckluftspeicherkraftwerk wurde jetzt ein Leitkonzept für einen solchen Wärmespeicher realisiert, der die geforderten Effizienz- und Kostenziele erreicht (Abb.10). Damit konnte ein wichtiger Meilenstein zur Entwicklung eines 300 MW-Kraftwerks geleistet werden [5].

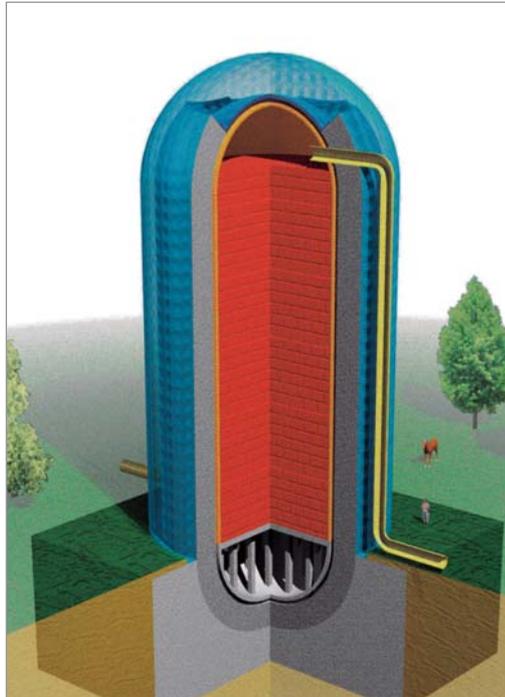


Abbildung 10
Schematische
Darstellung des
druckbeaufschlagten
Wärmespeichers

Methoden umfassen und sollten sich für die jeweiligen Anwendungsgebiete auf spezifische Lösungen hinsichtlich Leistung, Kapazität und Systemintegration fokussieren.

Literatur

- [1] EREC: Renewable energy target for Europe 20% by 2020, Januar 2004, www.erec-renewables.org
- [2] Tamme, R., Heidemann, W., Speicherung von Wärme, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 55. Jg., Heft 7, 446-450, 2005.
- [3] Laing, D., Steinmann, W.-D., Fiß, M., Tamme, R., Solid media thermal storage development and analysis of modular storage operation concepts for parabolic trough power plants, *Proc. 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Sevilla, 2006.
- [4] DENA (Ed.): *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore*. www.dena.de
- [5] Zunft, S., Tamme, R., Nowi, A., Jakiel, C., Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 55. Jg., Heft 7, 451-455, 2005.

Fazit

Energiespeicher sind ein zentrales Element zum effektiven Energiemanagement im Bereich Klimatisierung, Wärme- und Strombereitstellung. Sie sind für verstärkte Nutzung der Sonnen- und Windenergie unverzichtbar. Ein charakteristisches Merkmal der Speichertechnologie sind die für die jeweiligen Anwendungen hochspezifischen Anforderungsprofile, die ein Portfolio an Speichertypen, Materialien und Methoden erfordern. Die kommerziell verfügbaren Speichertechniken erfüllen nur eingeschränkt die für einen breiten Einsatz erforderliche Energieeffizienz, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit. Um diese Ziele zu erreichen sind verstärkte, kontinuierliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Die Forschungsaktivitäten sollten ein breites Spektrum an Speichertechnologien, Materialien und