

Peter Vennemann

# Ausgleichsenergie – Perspektiven für Pumpspeicher

Batterien, Pump- und Druckluftspeicher können schnell Leistung bereitstellen und verfügen über ein breites Regelband. Die Überbrückung von Flauten, der Ausgleich von Residuallastgradienten oder die Bereitstellung von Regelleistung führen zu unterschiedlichen Zahlen für den Bedarf an Leistung, Kapazität oder Speicherarbeit. Im Westen und Südwesten Deutschlands können etwa 3,5 GW Pumpspeicher mit einer Kapazität von rund 14 GWh ökologisch verträglich zugebaut werden.

## 1 Speicherbedarf

Was steckt hinter der Forderung nach mehr Stromspeichern bei zunehmender Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen? Zunächst erfordert ein Stromversorgungssystem, das auf der einen Seite aus einer kaum beeinflussbaren Last und auf der anderen Seite aus einem hohen Anteil unregelter Einspeisung (Wind, Photovoltaik) besteht, einen Ausgleich. Es gibt zahlreiche Vorschläge und Studien die einen Speicherbedarf beschreiben und darlegen, wie dieser Ausgleich bereitgestellt werden kann, die jedoch oft sehr unterschiedliche Zahlen enthalten. Dabei müssen mindestens vier Kennzahlen unterschieden werden, um diese Angaben richtig einordnen zu können (Bild 1).

Den Ausgleich zwischen Last und volatiler Einspeisung kann prinzipiell jeder herstellen, der ausreichend schnell die Abgabe oder die Aufnahme einer elektrischen Leistung regeln kann. In dieser

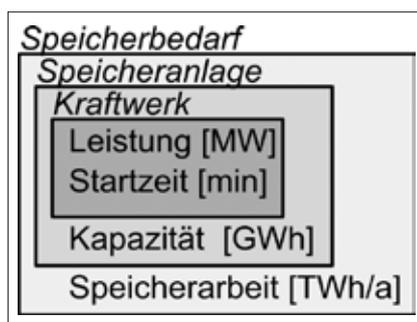
Forderung stecken bereits die ersten zwei Kennzahlen: die regelbare Leistung und die Startzeit. Beide zusammen genommen charakterisieren die Flexibilität einer Anlage. Je größer der Regelbereich der Leistung ist, desto flexibler ist die Anlage einsetzbar. Die Flexibilität ist ebenfalls größer, wenn eine Leistung schneller geregelt werden kann. Speicher erfüllen in besonderer Weise die Flexibilitätsanforderung an das Regelband. Während Kraftwerke ihre Leistungsabgabe und einige Verbraucher ihre Leistungsaufnahme regeln können, erstreckt sich das Regelband von Speichern über beide Bereiche. Viele Stromspeicher, wie zum Beispiel Batterien oder Pumpspeicherkraftwerke, erreichen auch sehr kurze Startzeiten. So können Pumpspeicher im Allgemeinen in weniger als 5 Min. aus dem Stillstand bis zur vollen Leistungsabgabe oder -aufnahme angefahren werden.

Um einen Stromspeicher ausreichend genau zu charakterisieren, muss zusätzlich zum regelbaren Leistungsbereich und zur minimalen Startzeit noch die Kapazität des Speichers angegeben werden (Bild 1). Die Speicherkapazität, gemessen in Joule (J), oder in speziellen Einheiten, wie Gigawattstunde (GWh) oder Voltamperestunde (VAh), gibt an, welche Energiemenge maximal in der Anlage gespeichert sein kann. Im Fall eines Pumpspeichers folgt die Speicherkapazität aus der Größe der Speicherbecken und dem Höhenunterschied zwischen den Becken. Die Kapazität eines Stromspeichers kann auf die Energiemenge bezogen sein, die ein Speicher bis zur maximalen Aufladung aus dem Netz aufnehmen kann, oder auf die

Energiemenge, die er bis zur vollständigen Entladung wieder dem Netz zuführen kann. Beide Werte sind wegen der Lade- und Entladeverluste nicht identisch.

Die drei vorstehenden Kennzahlen für Speicher werden auch in Studien zum Speicherbedarf angegeben. Damit ist die Frage beantwortet, wie viel Leistung in welcher Zeit bereitgestellt werden muss und welche Energiemenge dabei maximal gespeichert oder abgegeben werden soll. Offen ist die Frage, wie oft dieser Speicher genutzt werden soll. Der Speicherbedarf ist daher erst dann ausreichend charakterisiert, wenn auch die Speicherarbeit angegeben wird (Bild 1). Diese Größe gibt an, wie viel Energie innerhalb eines bestimmten Zeitraums kumuliert gespeichert oder abgegeben wurde. Sie wird in einer Einheit für Arbeit angegeben und ist auf einen Zeitraum bezogen, z. B. Terawattstunden pro Jahr (TWh/a). Aus dieser Größe lässt sich die Nutzung eines Speichers ableiten. Je häufiger und vollständiger ein Speicher geladen und entladen wird, desto größer ist die Speicherarbeit. Besonders die Größen Speicherarbeit und Speicherkapazität werden in Diskussionen vielfach nicht klar getrennt.

Der Bedarf nach flexibler Leistung wird immer wieder mit dem Bedarf nach Speichern gleichgesetzt. Das ist nur für den Grenzfall richtig, in dem die Regelfähigkeit der Last vernachlässigt ist und eine hundertprozentige Versorgung mit erneuerbaren Energien stattfindet. Prinzipiell können auch fossil gefeuerte Kraftwerke oder Kombinationen aus Speichern und fossil gefeuerten Kraftwerken den geforderten Ausgleich zwischen Last und vola-



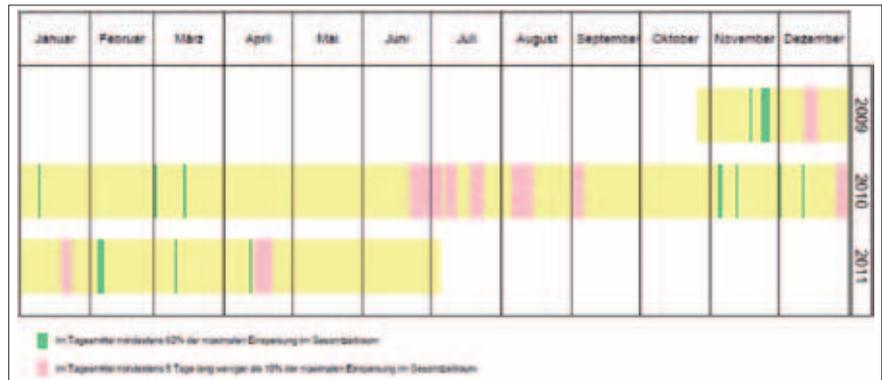
**Bild 1:** Die wichtigsten Kennzahlen zur Charakterisierung eines flexiblen Kraftwerks, eines Speichers, und des Speicherbedarfs

tiler Einspeisung herstellen. Die Höhe des in Studien angegebene Speicherbedarfs kann je nach Berücksichtigung dieser Aufteilung stark variieren.

Um die teils sehr unterschiedlichen Zahlen zum Speicherbedarf zu verstehen, muss beschrieben werden, worin genau der Ausgleich zwischen volatiler Einspeisung und Last besteht. Dabei können mindestens drei verschiedene Zusammenhänge zwischen volatiler Stromspeisung und der energiewirtschaftlichen Notwendigkeit von Stromspeichern identifiziert werden, die, jeweils für sich genommen, zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen für den Speicherbedarf führen.

### 1. Reserveenergie

Die Einspeiseleistung aller volatilen Stromerzeuger (im allgemeinen Wind und Photovoltaik) kann die aktuell benötigte Leistung, die Last, nur zufällig treffen. Die Einspeiseleistung wird die Last im Regelfall also entweder übersteigen oder zu ihrer Deckung nicht ausreichen. Stromspeicher können diese Differenz ausgleichen. Soll ein Ausgleich über Speicher erfolgen, erhält man in der Regel sehr große Kennzahlen für Leistung, Kapazität und Speicherarbeit. So treten üblicherweise mehrmals im Jahr Schwachwindphasen auf, während derer über einen Zeitraum von mehreren Tagen nur ein geringer Teil der installierten Windleistung regenerativ bereitgestellt werden kann (**Bild 2**). In diesem Fall muss ein Großteil der notwendigen Last aus Speichern oder aus fossilen Kraftwerken gedeckt werden. Unabhängig von den exakten Annahmen, wird man in diesem Fall immer eine benötigte, flexible Leistung im zweistelligen GW-Bereich ermitteln. Die benötigte Speicherkapazität liegt in der Größenordnung niedriger zweistelliger TWh. Die Speicherarbeit in TWh/a kann bis zu einer Größenordnung darüber liegen. Berechnete Kapazitäten zur Einspeicherung und zur Ausspeicherung sowie die entsprechende negative und positive Speicherarbeit müssen dabei nicht notwendigerweise identisch sein. Diese Asymmetrie geht ebenfalls unmittelbar aus **Bild 2** hervor. Ausgeprägte Windleistungsspitzen sind in der Regel zeitlich sehr begrenzt, während Windflauten häufig länger andauern. So errechnet das Fraunhofer-UMSICHT-Institut in einer aktuellen Forschungsarbeit [1] unter Annahme des BMU-Leitszenarios 2009 für einen 90-%-Anteil regenerativer Stromerzeugung eine zusätzlich benötigte



**Bild 2:** Schwachwindphasen ab 5 Tagen Dauer in Deutschland in den letzten 20 Monaten: In den rot markierten Zeiträumen steht im Tagesmittel mindestens fünf Tage lang weniger als 10 % der maximal während dieses Zeitraums eingespeisten Windleistung von knapp 23 GW zur Verfügung; an den grün markierten Tagen werden im Mittel 60 % der maximalen Einspeiseleistung überschritten

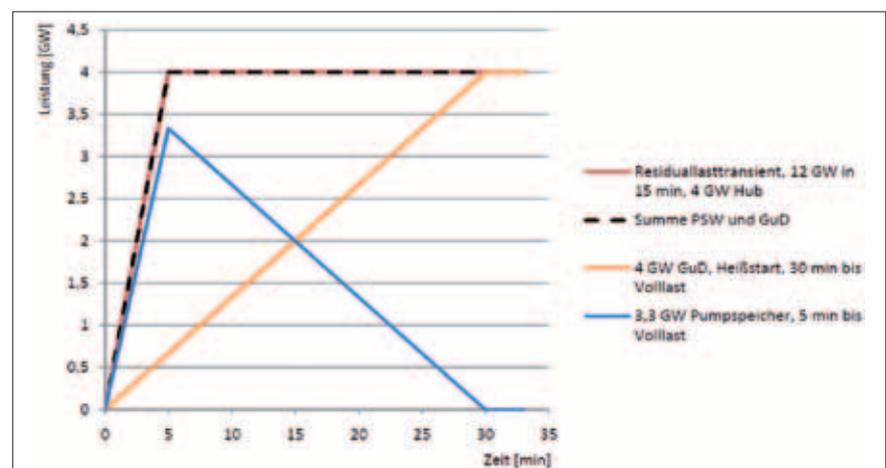
Speicherleistung zwischen etwa 30 und 45 GW (positiv wie negativ). Die zusätzlich geleistete Speicherarbeit soll zwischen 27 und 132 TWh/a positiv (Ausspeicherung) und zwischen 2 und 10 TWh/a negativ (Einspeicherung) liegen. Diese deutliche Asymmetrie zwischen Ein- und Ausspeicherung legt nahe, dass die Bereitstellung dieser Energiemenge allein aus Speichern nicht die ökonomisch sinnvollste Lösung ist, sondern eher die Kombination fossiler gefeuerter Reserven mit Speichern. Längere Windflauten sind in der Regel prognostizierbar, wodurch die Forderungen an die Startzeiten für diesen Fall eher moderat sind.

### 2. Transienten

Erneuerbare Energiequellen, wie Sonne und Wind, können in sehr kurzen Zeiträumen sehr stark schwanken. Diese Schwankungen fallen rein stochastisch mit den

Transienten des Tageslastgangs zusammen. Dadurch werden die residualen Transienten, d. h. die Leistungsänderungsgeschwindigkeit der Lücke zwischen erneuerbarer Einspeisung und Last, abgeschwächt oder verstärkt. Anlagen, die diese Lücke, die sogenannte Residuallast, decken müssen, können in ihrer Gesamtheit nicht beliebig großen Transienten folgen. Laut einer aktuellen Studie des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart [2] mussten in 2008 in Deutschland im Extremfall Transienten von -3 GW pro 15 Min. bis 4 GW pro 15 Min. bewältigt werden. Schon bei einem Anteil erneuerbarer Stromerzeugung von 40 % werden der Studie zufolge Transienten von -12 GW pro 15 Min. bis 11 GW pro 15 Min. auftreten.

**Bild 3** verdeutlicht, warum schnelle Stromspeicher benötigt werden, diese



**Bild 3:** Schematisches Beispiel zur Deckung eines Residuallasttransienten mittels 4 GW GuD-Leistung und 3,3 GW Pumpspeicherleistung

Transienten zu decken. Die schnellsten verfügbaren GuD-Blöcke benötigen 30 Min. für einen Heißstart aus dem Stillstand bis zu vollen Leistung von 800 MW [3]. Um einen Hub von z. B. 4 GW Leistung bereitzustellen, der mit einem Transienten von 12 GW/15 Min. ansteigt, könnten theoretisch 24 GW GuD-Leistung parallel angefahren werden. Da insgesamt aber nur 4 GW benötigt werden, müssten schon nach wenigen Minuten Betrieb die meisten Anlagen wieder abgefahren werden. Dieses etwas hypothetische Beispiel verdeutlicht, dass zum Ausgleich schneller Transienten deutlich mehr Kraftwerksleistung benötigt wird als der Residuallasthub eigentlich erfordert. Solange ein großer, thermischer Kraftwerkspark für den Ausgleich zur Verfügung steht, ist diese Situation unkritisch. Schwierig werden Situationen, in denen die Residuallast sehr gering ist. Alternativ kann eine deutlich geringere thermische Leistung mit Pumpspeichern kombiniert werden. Da diese ihre Leistung wesentlich schneller bereitstellen können, genügt es, 4 GW GuD-Leistung und etwas mehr als 3 GW Pumpspeicherleistung parallel anzufahren. Da diese Leistung nur kurze Zeit zur Verfügung stehen muss, ist für diese Aufgabe eine Speicherkapazität im einstelligen oder niedrigen zweistelligen GWh-Bereich ausreichend. Diese Betrachtung führt also auf einen Bedarf an Speicherkapazität, der zwei bis drei Größenordnungen kleiner ist als der Bedarf zur Überbrückung von Windflauten. Da Residuallasttransienten prognostizierbar sind, können weitere Maßnahmen berücksichtigt werden, die zu kleineren Zahlen für den Speicherbedarf führen. So könnte ein Teil der Windleistung schon vor dem Hauptausfall reduziert werden. Thermische Anlagen könnten bereits vor dem Anstieg der Last mit angedrosselter Leistung angefahren werden.

### 3. Regelenergie

Die beiden oben beschriebenen Aufgaben für Stromspeicher sind weitgehend planbar. Eine dritte Aufgabe für Stromspeicher ergibt sich aus der nicht planbaren Prognoseabweichung der tatsächlichen regenerativen Einspeisung. Zusätzlich zur Prognoseabweichung der Last steigt bei einem hohen Anteil regenerativer Einspeisung der Einfluss der Prognoseabweichung auf der Stromerzeugungsseite. Die notwendige Regelleistung muss sehr kurzfristig bereitgestellt werden können. Schon eine

geringfügig höhere Last führt zum Abbremsen der Generatoren, da die Leistungsdifferenz den rotierenden Massen der Generatorläufer entzogen wird. Die Netzfrequenz sinkt. Umgekehrt wird ein Leistungsüberschuss den rotierenden Massen zugeführt, indem die Läufer der Generatoren beschleunigt werden. Innerhalb weniger Sekunden müssen primärregelfähige Anlagen die Leistung regeln und damit die Netzfrequenz stabil bei 50 Hz halten. Alle größeren Kraftwerke halten dafür eine Primärregelreserve vor. Die Primärregelreserve muss bei größeren Abweichungen innerhalb von fünf Minuten wieder hergestellt werden, d. h. die erbringenden Kraftwerke müssen durch andere Regelleistungs-Erbringer abgelöst werden. Die Abweichung wird in die Sekundärreserve verschoben. Aus dieser anspruchsvollen Forderung nach einer kurzen Startzeit von 5 Min. folgt, dass Sekundärregelleistung in Deutschland fast ausschließlich von Pumpspeichern bereitgestellt wird. Gaskraftwerke sind dazu nur in der Lage, wenn sie sich bereits mit einer gewissen Leistung am Netz befinden. Für typische Spitzenlastkraftwerke ist dies aber nur wenige Stunden am Tag der Fall. Ab-

schätzungen des Speicherbedarfs auf Basis der Regelleistungsbereitstellung führen auf Größenordnungen im Bereich einstelliger GW Leistungen, niedriger zweistelliger GWh Kapazität, und einstelliger TWh/a Speicherarbeit.

## 2 Speichertechniken

Für die stationäre, großtechnische Speicherung elektrischer Energie kommen Batterien, Pumpspeicher, Druckluftspeicher und die Umwandlung in Brenngase, zum Beispiel Wasserstoff, in Frage. Andere Techniken, wie Schwungräder und Kondensatoren, verfügen über zu geringe Kapazitäten, so dass ihre Leistung nicht ausreichend lange zur Verfügung steht. Sie eignen sich vornehmlich zur Verbesserung der Wechselstromqualität.

Innerhalb der großtechnischen Speicheroptionen gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich Leistung, Kapazität, Wirkungsgrad, Startzeiten und Speicherkosten. So liegen realisierte Batteriespeicher zur Zeit unter 100 MW Leistung und 1 000 MWh Kapazität [4]. Druckluftspeicher liegen in ihrer Leistung und Kapazi-



Bild 4: Untersuchtes Gebiet und Ergebnis der Pumpspeicher-Standortsuche

Peter Vennemann

### Reserve Energy – Perspectives for Pumped Storage

Batteries, pumped storage plants and compressed air energy storage provide rapid load changes over a broad control margin. Backing up periods of low renewable electricity generation, ramping up residual load changes, or the provision of control energy, require different amounts of future electricity storage capacity. This demand must be differentiated in a demand for electric power, a demand for storage capacity and a demand for annual electric energy storage. Pumped storage plants are the first choice among all available bulk energy storage technologies. An environmentally compatible potential of 3.5 GW electric power and 14 GWh storage capacity for new pumped storage could be identified in the west and southwest of Germany.

Петер Феннеманн

### Компенсаторная энергия – перспективы насосно-аккумулирующей установки

Батареи, насосно-аккумулирующие установки и пневмоаккумуляторы могут достаточно быстро достигать своей мощности и имеют широкий диапазон регулировки. Резервная поддержка по время паводка, выравнивание остаточных градиентов нагрузки или предоставление стандартной мощности означает различные численные параметры, касающиеся производительности, мощности или работы аккумулирующего устройства. На западе и юго-западе Германии без значительной нагрузки для экологии могут быть дополнительно построены насосно-аккумулирующие установки мощностью примерно 3,5 ГВ (общая мощность около 14 ГВ/ч).

tät eine Größenordnung höher und Pumpspeicher decken den Bereich bis zu zwei Größenordnungen über den Batteriespeichern ab. So hat das Pumpspeicherkraftwerk Bath County (USA) zum Beispiel eine Leistung von rund 2,8 GW und eine Speicherkapazität von etwa 25 GWh [5].

Den höchsten Wirkungsgrad zeigen Lithium-Ionen-Batterien. Bis zu 95 % der bei der Ladung zugeführten Energie können zurück ins Netz gespeist werden [6]. Pumpspeicher folgen an zweiter Stelle mit 75 bis 80 %, Nickel-Cadmium- und Vanadium-Redox-Batterien liegen bei 70 bis 75 %, adiabate Druckluftspeicher unter 70 % [6]. Der Wasserstoffspeicherzyklus, einschließlich Elektrolyse, Verdichtung und Rückverstromung in einer GuD-Anlage liegt unter 40 % Wirkungsgrad [6].

Laut einer Studie des VDE [6] bleiben die spezifischen Speicherkosten (€/kWh) aller Speichertechniken auf absehbare Zeit deutlich über denen der Pumpspeicher. Lediglich Druckluftspeicher könnten für den Fall täglicher Speicherzyklen in einigen Jahren ein ähnliches Kostenniveau erreichen.

Unter den großtechnischen Speichern können zur Zeit nur Batterien und Pumpspeicher aus dem Stand Sekundärregelleistung anbieten. Anfahrzeiten adiabater Druckluftspeicher könnten künftig möglicherweise die Erbringungskriterien für Sekundärregelleistung erreichen, sind aber noch nicht realisiert.

### 3 Perspektiven für Pumpspeicher

Insgesamt sprechen technische und ökonomische Argumente gleichermaßen für Pumpspeicher als erste Wahl für den Ausbau der Regelfähigkeit des Stromnetzes. Aus diesem Anlass erhöht die Beteiligungsgesellschaft SEO S. A. (Luxembourg) der RWE Power AG zur Zeit die Leistung des Pumpspeicherwerks Vianden um 200 MW und die Speicherkapazität um 350 MWh. Die Beteiligungsgesellschaft Schluchseewerk AG plant im Südschwarzwald das Pumpspeicherwerk Atdorf mit 1 400 MW Leistung und etwa 14 GWh Speicherkapazität.

Möglichkeiten zur Realisierung weiterer Pumpspeicherprojekte in Deutschland wurden im Rahmen einer Standortstudie im Jahr 2010 in Zusammenarbeit mit der Fichtner GmbH & Co. KG für den Westen und Südwesten Deutschlands systematisch untersucht. Auf Basis von Geoinformationssystem-Daten (GIS-Daten) wurde eine Vorauswahl interessanter Standorte getroffen. Das System berücksichtigt topografische Randbedingungen und Ausschlusskriterien wie besiedelte Gebiete, Fauna-Flora-Habitat-Gebiete (FFH-Gebiete), Vogelschutzgebiete (Special Protected Areas, SPA) und Nationalparke. In einem zweiten Schritt wurden die Standorte entsprechend individueller Randbedingungen sortiert. Kriterien waren die Möglichkeiten zur Netzanbindung, zur Erstbefüllung mit Wasser, zur Erschließung bestehender Wasserkörper und die Beeinträchtigung von Biosphären, Naturparken, Naturschutz- und Landschaftsschutzgebieten. Die am besten bewerteten Standorte wurden anhand topografischer Karten manuell geprüft und daraufhin 20 Standorte für Ortsbegehungen ausgewählt. **Bild 4** fasst das Ergebnis der Standortsuche zusammen.

#### Autor

**Dr.-Ing. Peter Vennemann**

RWE Power AG

Huyssenallee 2, 45128 Essen

peter.vennemann@rwe.com

#### Literatur

- [1] Doetsch, Ch.: Stromspeicher – Technologien, Herausforderungen und Perspektiven. In: EU-ROFORUM-Konferenz Stromspeicher – Potenziale und Investitionsfelder für EVU. Berlin, 06.-07. Juni 2011.
- [2] Hundt, M.; Barth, R.; Sun, N.; Brand, H.; Voß, A.: Herausforderungen eines Elektrizitätsversorgungssystems mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag der E.ON Energie AG, Stuttgart, 2010 ([www.ier.uni-stuttgart.de](http://www.ier.uni-stuttgart.de)).
- [3] Johnson, E.: Flexible Power Supply – Fast Cycling Power Plants. In: Siemens-Kundenmagazin Living Energy (2010), Heft 2, S. 14-19.
- [4] Vennemann, P.; Gruber K. H.; Haaheim, J. U.; Kunsch, A.; Sistenich, H. P.; Thöni, H.-R.: Pumped storage plants – Status and perspectives. In: VGB PowerTech (2011), Heft 4, S. 32-38.
- [5] Dominion Energy: Bath County Pumped Storage Station ([www.dom.com/about/stations/hydro/bath-county-pumped-storage-station.jsp](http://www.dom.com/about/stations/hydro/bath-county-pumped-storage-station.jsp); Juli 2011).
- [6] Leonhard, W.; et al.: VDE Studie Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. Verband der Elektrotechnik – VDE (2008).