



Einleitung

W. BUSCH, F. KAISER

Energiespeicher werden in der zukünftigen Stromwirtschaft mit steigenden Anteilen an fluktuierend einspeisenden Wind- und Photovoltaikanlagen eine zentrale Rolle spielen, um Last und Erzeugung in der Waage zu halten und dabei keine großen Überkapazitäten aufbauen oder Lastabwürfe in Kauf nehmen zu müssen. Pumpspeicherwerke (PSW) stellen dabei, aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades von etwa 80 % sowie des technologischen Reifegrades, die Spitzentechnologie dar. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb oder gar die Investition in Pumpspeicherwerke haben sich mit steigender Einspeisung von Erneuerbaren jedoch - aus volkswirtschaftlicher Sicht *sinnwidrigerweise* - eher verschlechtert. Es stellt sich daher die Frage welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die netzdienlichen Eigenschaften von Pumpspeichern, wie die Lieferung von hohen Beträgen positiver und negativer Regelleistung innerhalb kurzer Zeit, eines breiten Regelbandes, Blindleistungskompensation, Stabilisierung der Netzfrequenz und Netzsymmetrie durch rotierende Massen sowie Schwarzstartfähigkeit, im Energiemarkt entsprechend zur Geltung zu bringen und somit die Integration von größeren Mengen fluktuierend eingespeistem Wind- und Sonnenstrom zu ermöglichen.

Ein Schlüsselbereich zur Lösung der derzeit mangelhaften Rahmenbedingungen des Betriebs sind die rechtlichen Rahmenbedingungen, die sowohl die Genehmigung als auch die Regulierung betreffen. Dabei ist ein Kernthema die derzeit gültige rechtliche Einordnung von Pumpspeichern als *Letzverbrauchern* und die damit einhergehenden Implikationen für die Zahlung von Netzentgelten. Ein weiterer entscheidender Faktor für einen zukünftigen Ausbau von PSW ist die gesellschaftliche Akzeptanz. Großbauprojekte sollten nach den Erfahrungen der vergangenen Jahre stets in Abstimmung mit der betroffenen Bevölkerung entwickelt und realisiert werden, um bedarfsgerechte Lösungen in der Region zu finden.

Wie auch bei der ersten Tagung „Unkonventionelle Pumpspeicher 2013“ soll auch bei dieser zweiten Pumpspeicher-Tagung eine transdisziplinäre Lösungssuche erfolgen. Die Leitfragen der Tagung sind:

- Gibt es technische Möglichkeiten Pumpspeicherwerke zu flexibilisieren?
- Welche rechtlichen Anpassungen würden die Integration von erneuerbaren Energien heute und in Zukunft begünstigen?
- Gibt es wirtschaftliche Methoden zur Optimierung der Auslastung?
- Wie können politische Vorgaben die Energiewende zum Erfolg führen?

Tiefere Einblicke und Antworten auf diese Fragen liefern die Beiträge der Referenten der Tagung, welche dieser Tagungsband, kapitelweise nach den Disziplinen

- 1 Technologie,
- 2 Recht,
- 3 Ökonomie und
- 4 Gesellschaft darlegt.





1 Technologie



Die Energiewende durch einen Pumpspeicherausbau erfolgreich gestalten

K. KRÜGER

Kurzfassung

Die zukünftige Gewährleistung von operativer Flexibilität und die Bereitstellung gesicherter Leistung sind zwei wesentliche Herausforderungen der Energiewende, die bislang nicht näher betrachtet wurden. Die konsequente Nutzung der kostengünstigen und bewährten Pumpspeichertechnologie kann wesentliche Beiträge zur Bewältigung dieser Herausforderungen leisten. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse einer Studie vor, in der gezeigt wird, dass ein Ausbau von Pumpspeicherwerken im Rahmen der Energiewende eine technisch und volkswirtschaftlich interessante Option für Deutschland darstellt. Dazu werden zwei Zukunftsszenarien für die Energieversorgung in Deutschland mit einem Anteil von 60 % bzw. 80 % erneuerbare Energien in den Jahren 2030 und 2050 betrachtet. Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die entsprechende Nutzung des Pumpspeicherbestands und dessen weiterer Ausbau auch die bisher durch fossile Kraftwerke vorzuhaltende gesicherte Leistung signifikant reduzieren kann. In einem Szenario mit 80 % erneuerbaren Energien ersetzen 23 GW Pumpspeicher bis zu 16,6 GW thermische Kraftwerke. Außerdem reduzieren die Pumpspeicherwerke die Notwendigkeit deutlich, Energie aus erneuerbaren Quellen abzuregeln und substituieren mit der eingespeicherten Energie fossile Erzeugung. Dies trägt auch zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen bei. Die Flotte der Pumpspeicherwerke kompensiert außerdem die Volatilität der erneuerbaren Energien und ermöglicht dadurch einen schonenden und wirtschaftlichen Betrieb des verbleibenden thermischen Kraftwerkparks. Infolgedessen kann größtenteils auf die Abschaltung von Verbrauchern in Industrie und Privathaushalten verzichtet werden [1].

1. Pumpspeicherausbau und Einsatz als „Multifunktionskraftwerke“

Voith Hydro hat 2013 beim Institut und Lehrstuhl für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen eine Studie in Auftrag gegeben. Die Studie betrachtet die Rolle von Pumpspeichern als Multifunktionskraftwerke, die nicht nur die erforderliche Aufgabe als Speicher erfüllen, sondern auch gesicherte Leistung und Flexibilität bereitstellen. Sie basiert auf einer Simulation des kompletten deutschen Kraftwerkparks und dessen Betrieb [2]. Die Besonderheit der Untersuchung liegt darin, die kombinierten Nutzungsmöglichkeiten der Pumpspeicher im Kurzzeitspeicherbetrieb volkswirtschaftlich zu bewerten. Die Wissenschaftler gingen bei ihrer Untersuchung auf zwei Zukunftsszenarien ein und untersuchten, ob ein wirtschaftlicher Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken (kurz PSW) im deutschen Energiesystem möglich ist. Die Studie geht von einer



Energieversorgung in Deutschland mit einem Anteil von 60 % erneuerbare Energien (kurz EE) im Jahr 2030 sowie von einem EE-Anteil von 80 % im Jahr 2050 aus. Für die beiden Szenarien werden folgende Themenkomplexe qualitativ und quantitativ beleuchtet:

- Integration der Überschüsse aus EE.
- Veränderung des Einsatzplans der Pumpspeicher und des thermischen Kraftwerksparks.
- Beitrag von Pumpspeichern zur Bereitstellung von sicherer Leistung. Dazu sind insbesondere die folgenden Randbedingungen von Bedeutung:
 - Maximale Energiemengen, die in den Oberbecken gespeichert werden müssen.
 - Hinreichende Auslastung der Pumpspeicher für einen wirtschaftlichen Betrieb.
- Veränderung der Investitionskosten, der Stromgestehungskosten und der gesamten CO₂-Emissionen durch einen vorausschauenden Pumpspeicher-ausbau in Deutschland.

Die Studie zeigt, dass Pumpspeicherkraftwerke die bisher durch fossile Kraftwerke vorzuhaltende gesicherte Leistung reduzieren können. Pumpspeicherkraftwerke mit einer Kapazität von 15 GW und einem Speichervolumen von 96 GWh ersetzen in einem 60 %-Szenario bis zu 13 GW aus Gaskraftwerken. Im 80 %-Szenario ersetzen 23 GW Pumpspeicherkraftwerke mit einem Speichervolumen von rund 152 GWh sogar bis zu 16,6 GW thermische Kraftwerke (kurz KW).

Pumpspeicherkraftwerke speichern überschüssigen „grünen“ Strom ein und geben ihn später wieder ab. Dies verhindert signifikant die Abregelung von EE. Die Studie zeigt, dass wir in Deutschland mit Pumpspeicherkraftwerken ab 2030 etwa 70 % der Überschüsse der Erzeugung aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen nutzen könnten. Dabei werden die eingespeicherten EE-Überschüsse CO₂-frei ein- und später wieder CO₂-frei ausgespeichert.

Abbildung 1 zeigt den repräsentativen Lastgang einer Woche für das 2050 Szenario (oben ohne PSW-Einsatz und unten mit PSW-Bestand und Zubau von 16 GW). Mit grau ist der Anteil EE, mit gelb der Anteil thermischer KW und mit rot das Abregeln von EE gekennzeichnet. Der gelbe Anteil im oberen Teilbild ist nicht das Ergebnis eines einsatzoptimierten KW-Fahrplans, sondern die Differenz zwischen Lastgang und Anteil EE. Diese Darstellung wurde gewählt, um einen Eindruck zu bekommen, wie volatil die thermische KW-Flotte eingesetzt werden müsste, wenn weder Energieimporte/-exporte möglich noch Pumpspeicher vorhanden wären. In den Bildern mit PSW-Einsatz sind die gelben Lastkurven hingegen immer das Ergebnis eines einsatzoptimierten KW-Fahrplans gemäß den Berechnungsergebnissen des IAEW-Modells.

Technologie

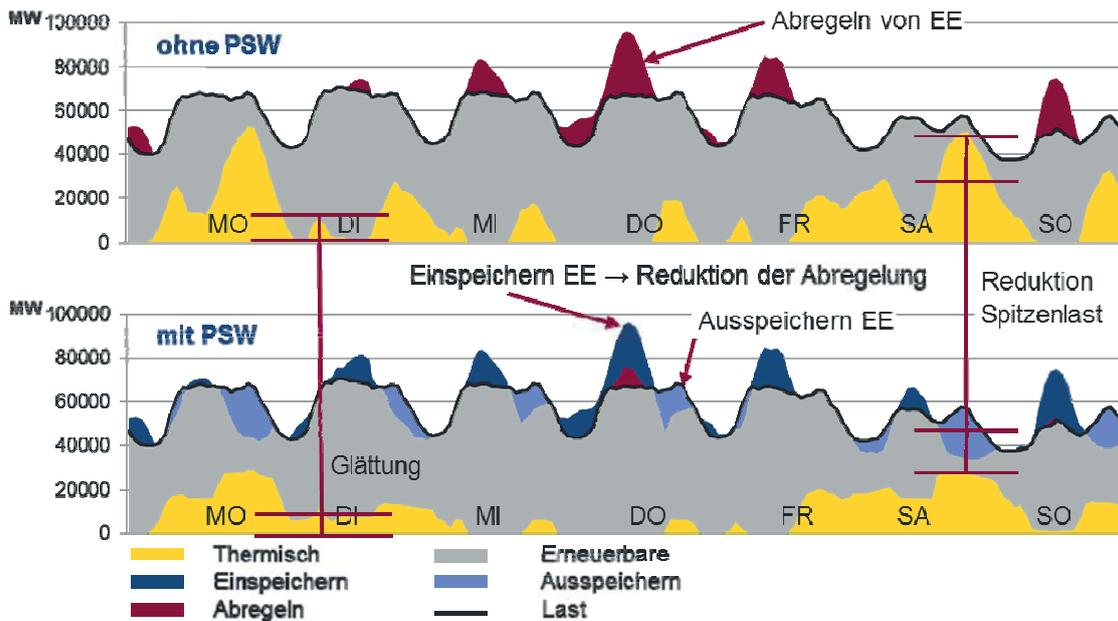


Abbildung 1: Wochenlastgang 2050 (80 % EE)

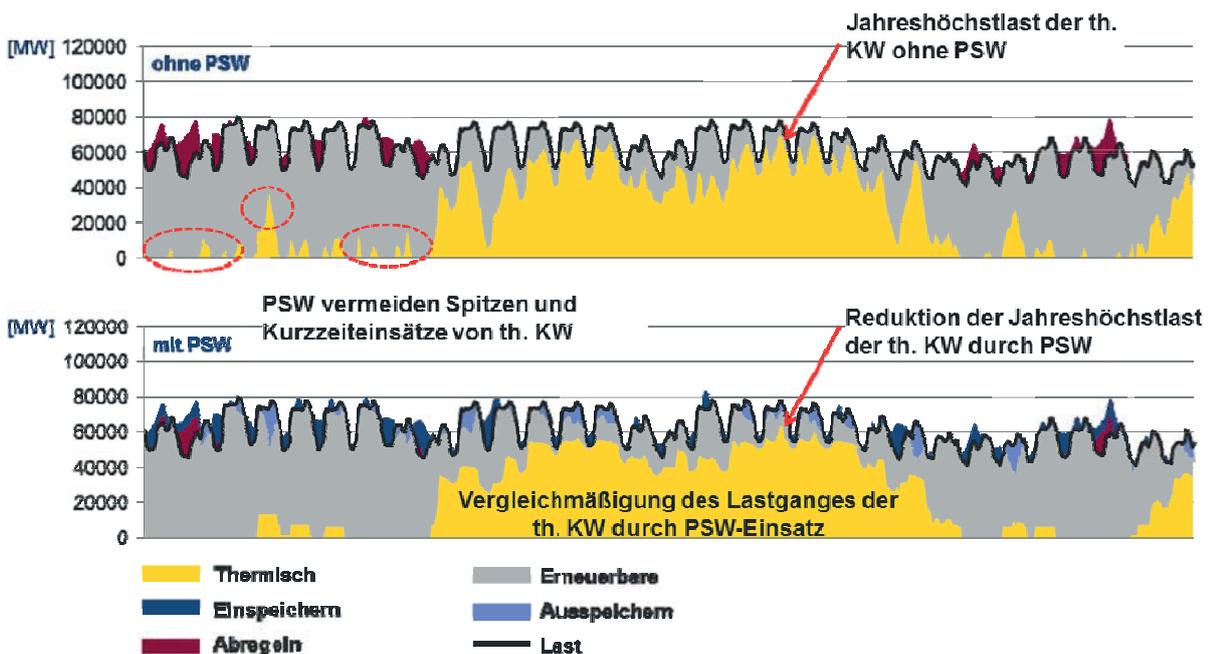


Abbildung 2: Monatslastgang mit 2-wöchiger Windflaute im Dezember 2050 (80 % EE)

Die Versorgungssicherheit (gesicherte Leistung) muss auch in Zeiten mit geringer Erzeugung aus erneuerbaren Quellen gewährleistet werden. Man erkennt im Abbildung 2, dass während der Windflaute zwei Wochen lang die thermischen Kraftwerke den Löwenanteil der Residuallast¹⁾ erbringen müssen (oben ohne, unten mit PSW). Der Einsatz der PSW-Flotte reduziert in diesem Fall die maximale

¹⁾ die Residuallast ist im Wesentlichen die Last abzüglich der EE-Erzeugung



erforderliche thermische KW-Leistung um ca. 10 %. Darüber hinaus wird das Lasteinsetzprogramm der thermischen KW durch das zyklische Ein- und Ausspeichern der Speicherbecken deutlich vergleichmäßigt.

Abbildung 2 verdeutlicht außerdem, dass PSW in der Tat gesicherte Leistung bereitstellen können, wenn die gesamte PSW-Flotte als Kurzzeitspeicher für 2 bis 3 Tage eingesetzt wird und wenn die „Bevorratung“ in den Speicherbecken abhängig von der Residuallast durch EE und/oder durch den thermischen Kraftwerkspark erfolgt. Natürlich sind PSW nicht in der Lage, wie thermische KW die Grundlast zu decken. Die maximale nationale Höchstlast, die für die Dimensionierung der vorzuhaltenden gesicherten Leistung relevant ist, setzt sich jedoch immer aus dem Grundlastanteil und einem variablen Spitzenlastanteil zusammen. Aus diesem Grund können Speicher sehr wohl die durch fossile Kraftwerke vorzuhaltende Leistung reduzieren, indem sie den Spitzenlastanteil decken. Sie leisten somit tatsächlich einen Beitrag zur Bereitstellung gesicherter Leistung. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Leistung der thermischen KW während der Nacht immer ausreicht, um die Last zu decken und zusätzlich die Oberbecken der PSW weitestgehend zu füllen, und zwar – und dies ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung – auch dann, wenn überhaupt keine EE-Einspeisung verfügbar ist. Dies war eine der Prämissen bei der Optimierung, insofern ist diese Voraussetzung in den untersuchten Szenarien stets erfüllt.

Nicht nur aus technischer Sicht sollten die beschriebenen Möglichkeiten zur Gestaltung der Energiewende genutzt werden. Ein Hochtechnologieland wie Deutschland sollte sich eine Verschwendung aufwändig erzeugter EE durch Abregeln nicht leisten sondern sollte Überschüsse sinnvoll und effizient nutzen, z. B. indem diese mittels PSW „recycelt“ werden – insbesondere, wenn sich solche intelligenten Lösungen auch noch volkswirtschaftlich rechnen. Es gibt zwar eine Reihe von anderen Vorschlägen, wie man mit EE-Überschüssen umgehen könnte (z. B. Power-to-Gas, Power-to-Heat), aber die Wirkungsgrade sind deutlich schlechter als bei PSW (80 %) und diese Lösungen liefern ohne zusätzliche Investitionen keine gesicherte Leistung in der Größenordnung von 13 bis 16,6 GW. Es gibt zwar auch Batterien mit hohen Lade-/Entladewirkungsgraden, aber diese Technologie ist für Speicherkapazitäten in der hier betrachteten Größenordnung auf dem heutigen Entwicklungsstand bei weitem noch nicht wirtschaftlich.

Ein großes PSW mit einer Leistung von 1,3 GW kann jährlich die Abregelung von einer 1 TWh Windstrom verhindern. Dies entspricht der Jahresproduktion von 150 Windrädern der 2,5 MW-Klasse, die folglich gar nicht erst gebaut werden müssen, um dann still zu stehen. Außerdem kann durch den Ausbau der PSW-Leistung die Vorhaltung von thermischer KW-Kapazität reduziert werden, hier im Beispiel um 1 GW. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Sachverhalt, bei dem durch den Aufbau von ausreichender PSW-Leistung sowohl der EE-Ausbau moderater verläuft als auch

die Vorhaltung von thermischen Kraftwerken geringer ist als in Ausbauszenarien ohne PSW.

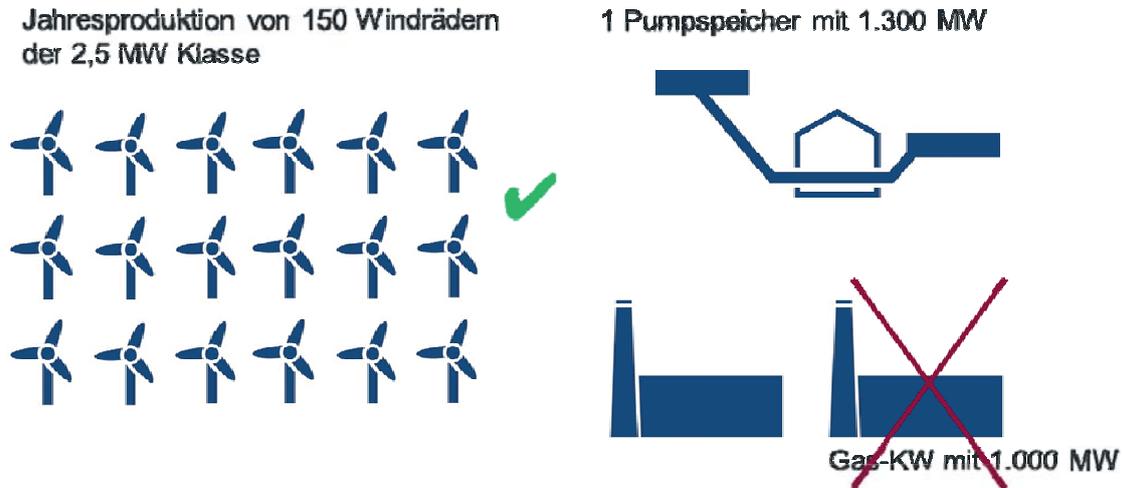


Abbildung 3: Ein PSW mit 1,3 GW verhindert das Abregeln von 1 TWh Wind und stellt gleichzeitig 1 GW gesicherte Leistung bereit, die dann nicht mehr durch thermische KW vorgehalten werden muss

2. Volkswirtschaftlicher und ökologischer Nutzen

Eines der Hauptergebnisse der IAEW-Studie ist die Erkenntnis, dass der Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke um 8 GW bis 2030 und um 16 GW bis 2050 gesamtwirtschaftlich sinnvoll sein kann. Der volkswirtschaftliche Nutzen entsteht durch die Verrechnung der Einsparungen für Neuinvestitionen in Gaskraftwerke und der variablen Stromgestehungskosten (davon sind 80 % Brennstoffkosten und 20 % CO₂-Emissionszertifikate) mit den Investitionskosten für Pumpspeicherkraftwerke. 2050 ergibt sich dadurch ein volkswirtschaftlicher Nutzen von 184,4 Mio. Euro pro Jahr.

Ein weiterer volkswirtschaftlicher Vorteil entsteht durch die optimierte Nutzung des verbleibenden thermischen Kraftwerksparks. Abbildung 1 und Abbildung 2 illustrieren diese Win-Win Situation zwischen PSW und den thermischen KW, weil die konsequente Nutzung der PSW als Kurzzeitspeicher den Leistungsverlauf der fossilen KW glättet und die Spitzenlast der fossilen KW reduziert. Dies führt wiederum zu folgenden Vorteilen für die thermischen KW:

- Die Anzahl der Anfahr-/Abschaltvorgänge geht zurück und die Lastgradienten werden reduziert. Das verringert die Beanspruchung hochbelasteter Bauteile wie Dampferzeuger und Dampfturbine samt verbindenden Dampfleitungen.
- Dadurch werden auch die An- und Abfahrkosten signifikant reduziert. Die volkswirtschaftliche Betrachtung in der Studie berücksichtigt diese Kosten für die thermischen KW genauso wie deren lastabhängigen Wirkungsgrad.
- Durch den PSW-Ausbau werden außerdem die gelben Flächen kleiner, d. h. der PSW-Einsatz schont den Einsatz des fossilen Langzeitspeichers Gas bzw.



Kohle. Die tatsächliche Einsparung ist allerdings noch deutlich größer als in der Grafik dargestellt, weil dort die oben angesprochenen An- und Abfahrverluste der thermischen KW in den gelben Flächen nicht berücksichtigt sind.

Auch die CO₂-Bilanz verbessert sich durch das „Recyclen“ von Strom aus EE: Im Jahr 2050 werden durch den Einsatz der Speicher die CO₂-Emissionen um bis zu 2 Mio. t/a reduziert, da sie die Abregelung von EE-Anlagen verhindern und mit der CO₂-frei eingespeicherten Energie fossile Erzeugung in Deutschland verdrängen. Außerdem können effiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen langfristig besser eingesetzt werden und eine höhere Auslastung erzielen [1]. Darüber hinaus ergeben sich weitere Vorteile für die Wirtschaftlichkeit und Systemsicherheit der deutschen elektrischen Energieversorgung:

- Ein PSW-Ausbau auf 23 GW hat auch in Ausnahmesituationen wie dem Netzwiederaufbau Vorteile, da PSW im Unterschied zu thermischen KW grundsätzlich schwarzstartfähig sind.
- Insbesondere im Szenario 2050 kommt es zu einer signifikanten Verdrängung von Erdgas durch die wieder ausgespeicherte (also „recycelte“) EE. Die daraus resultierende Reduzierung der Abhängigkeit von Gasimporten ist ein weiterer energiepolitischer Vorteil.
- Ein PSW-Ausbau erhöht die Gesamtkapazität zur Bereitstellung weiterer Systemdienstleistungen wie Primärregelleistung, Ausgleich von Prognosefehlern, Engpassmanagement, Spannungshaltung, Sicherung der Netzstabilität und Versorgungsqualität bis hin zum Inselnetzbetrieb. Diese Systemdienstleistungen wurden in der IAEW-Studie allerdings monetär nicht bewertet.

3. Ausbaupotentiale für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland

Die notwendigen Potentiale für den Ausbau von PSW sind in Deutschland vorhanden: Aktuell befinden sich 23 Projekte mit einer Leistung von über 7 GW in Planungs- und Genehmigungsverfahren – sie könnten den deutschen Pumpspeicherpark mehr als verdoppeln und die benötigte Ausbauleistung bis 2030 abdecken [1]. Demnach stehen dem in der Studie gezeigten Bedarf von rund 8 GW schon heute genügend Projekte gegenüber. Aber auch für den weiter steigenden Bedarf in einer zukünftigen Energieversorgung, die sich zu 80 % aus erneuerbaren Energien speist, stehen ausreichende Standortoptionen zur Verfügung. Potentialanalysen in Baden-Württemberg und Thüringen haben zahlreiche weitere geeignete Standorte ermittelt – allein in Baden-Württemberg gibt es 13 Standorte zur Installation von insgesamt 19 GW PSW-Leistung, die als wirtschaftlich und technisch sehr geeignet eingestuft wurden. Weitere Potentiale mit knapp 5 GW sind in Thüringen vorhanden. Dies verdeutlicht, dass ausreichend Pumpspeicherpotential in Deutsch-



land vorhanden ist und eine erst kürzlich publizierte Analyse zu Pumpspeicherpotentialen in Bayern identifizierte 11 GW für allein 16 Top-Standorte.

4. Handlungsempfehlungen

Um den hier beschriebenen PSW-Ausbau erfolgreich umzusetzen, müssen jedoch einige Rahmenbedingungen auf politischer Ebene geändert werden [1]:

- a) Der überwiegende Teil der bisherigen Studien zur Entwicklung des Kraftwerksparks in Zentraleuropa fokussierte bislang ausnahmslos nur auf flexible thermische Erzeugungsanlagen wie Gasturbinen und Gas-KW zur Bereitstellung gesicherter Leistung. PSW sollten jedoch insbesondere bei der Betrachtung möglicher Kapazitätsmechanismen ebenfalls explizit berücksichtigt werden. Im europäischen Ausland entspricht dies dem Stand der Technik [3].
- b) Änderungen am Strommarktdesign sollten den Wert von kurzfristig verfügbarer Flexibilität stärker berücksichtigen. Hiervon profitieren auch PSW, da sie als Multifunktionskraftwerke eingesetzt werden können (gesicherte Leistung, Ausgleichenergie bei Prognosefehlern, extrem steile Lastgradienten, etc.).
- c) Einführung eines abgestimmten Begriffs für Stromspeicher und deren Befreiung von Letztverbraucherabgaben. Dies sollte für den Bestand und auch für den Zubau gelten.
- d) Der heutige und zukünftige Nettoexport von deutschen EE-Überschüssen in Nachbarländer (häufig zu sehr niedrigen Preisen) sollte signifikant reduziert werden, um die eigenen fossilen Brennstoffe in Deutschland zu substituieren. Diese EE-Exporte verdrängen nämlich die fossilen und nuklearen Energieträger im Ausland und verbessern die CO₂-Bilanz der Nachbarstaaten auf Kosten der deutschen EEG-Umlagezahler. Auf diese Weise wird ein Hauptziel der deutschen Energiewende gerade nicht erreicht [4].

Autor

Dr. Klaus Krüger

Voith Hydro Holding, Alexanderstraße 11 in 89522 Heidenheim an der Brenz

Literatur

- [1] Krüger, K., Rotering, N.: Energiewende erfolgreich gestalten durch Pumpspeicherausbau. VGB PowerTech 09/2014.
- [2] Moser, A., Rotering N., Schäfer, A.: Unterstützung der Energiewende in Deutschland durch einen Pumpspeicherausbau – Potentiale zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Versorgungssicherheit (im Auftrag der Voith Hydro). IAEW RWTH, Aachen, 4. April 2014, Online: www.wasserkraft.info