

Übersicht über derzeitige PSW-Projekte in Europa und Deutschland

Dr.-Ing. Alexander Arch, Vorstandsbereich Technik – Erzeugung Konventionell/Wasser (HOL TTK), Projektleiter, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe, Deutschland



Das politische Bestreben, auf europäischer und insbesondere auf deutscher Ebene, die Stromversorgung kontinuierlich auf eine Erzeugung aus erneuerbaren Energien umzubauen, bringt weitreichende Folgen für den bestehenden Energiemarkt und das Versorgungssystem als Ganzes mit sich. Vor allem das volatile Verhalten der Stromproduktion aus Windkraft- und Solaranlagen erfordert zukünftig ein umfangreicheres Erzeugungsmanagement vor dem Hintergrund von Angebot (Erzeugung) und Nachfrage (Last), Stromtransport zu den Verbraucherzentren (Netze) und Gewährleistung der Versorgungssicherheit (Frequenzhaltung/Netzstabilität). Bereits jetzt spielen in der täglichen Optimierung Pumpspeicherwerke (PSW) – als derzeit einzige Großspeichertechnologie – eine zentrale Rolle hinsichtlich der Deckung von Verbrauchsspitzen, des Ausgleichs von Prognoseabweichungen und der Sicherung der Netzstabilität. Ausgehend von einer Betrachtung des Bestands an Pumpspeicherkraftwerken in Europa und Deutschland werden die Entwicklung in der Vergangenheit sowie die Ausbaupläne in einzelnen europäischen Ländern vorgestellt. Auswirkungen aufgrund ökologischer, energiewirtschaftlicher und betrieblicher Randbedingungen auf die Konstruktion und das Design werden basierend auf dem Einsatz von Speicherkraftwerken diskutiert.

Overview of Pumped Storage Projects currently developed in Europe and Germany. *The political consensus in Europe as well as in Germany to continuously change the electricity generation system from conventional plants towards renewable energy sources has a crucial impact on the existing energy markets and the entire supply systems. Above all, because of the volatile generation of electricity coming from wind and photovoltaic, a comprehensive management of energy production against the background of electricity-supply (generation) and demand (load), transport of electricity to the centers of consumption (grid) and the assurance of electricity supply (frequency stability/stability of the grid) will be required. By now pumped storage plants – offering the only economic feasible possibility of large scale storing of electricity – play a major role with respect of covering load peaks, balancing deviations from generation forecasting and securing grid stability. Having a look on the status quo in Europe and Germany regarding the installed pump storage capacity, the growth in the past as well as future prospects for pumped storage in several European countries are presented. Effects on the design of a pumped storage scheme due to the boundary conditions set by ecology, energy markets and plant operation are discussed.*

Weltweit ist die Notwendigkeit erkannt worden, mit Klimaschutzziele die Erderwärmung zu verlangsamen beziehungsweise zu stoppen.

Hintergrund

Die Vereinbarungen zum Kyoto-Protokoll dokumentieren den Willen der Weltgemeinschaft zur Trendwende. Mit der UN-Klimakonferenz im Dezember 2011 in Durban wurden weitere Weichenstellungen für die internationale Klimapolitik vorgenommen. Danach soll bis zum Jahr 2015 ein rechtlich verbindlicher Klimavertrag aufgesetzt werden und bis zum Jahr 2020 in Kraft treten.

Auf der europäischen Ebene manifestieren sich diese Ziele in der EU-Energiestrategie 2020 sowie den Langfristzielen einer Dekarbonisierung der Energieversorgung, das heißt dem Abschied von der Kohleverstromung bis 2050. Deutlich wird dies auch in diversen Maßnahmenpaketen zur Infrastrukturförderung wie der EU-Roadmap 2050 oder dem EU-Energieeffizienzaktionsplan. Die entwickelten Konzepte setzen dabei auch zu einem erheblichen Teil auf die Speicherung von Energie. In Zeiten eines europäischen Energiebinnenmarkts erwachsen zudem Sicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung zunehmend zu einer staatenübergreifend zu lösenden Aufgabe. Ähnliches

gilt für Stromspeicher in der Größenordnung von Pumpspeicherkraftwerken. Sie haben nicht nur regionale oder nationale Bedeutung, sondern sind Voraussetzung für die Umgestaltung der europäischen Energieversorgung.

Mit dem von der Bundesregierung verabschiedeten Klimaschutzpaket wurde als Ziel vorgegeben, den Ausstoß an Kohlendioxid (CO₂) bis zum Jahr 2020 um 40 % bezogen auf das Basisjahr 1990 zu senken. Durch die Energiegesetzgebung im Sommer 2011 mit den Änderungen im Atomgesetz (ATG), Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und Erneuerbare Energien Gesetz (EEG 2012) wird der Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 beschleunigt. Der weitere Ausbau der Erzeugung aus erneuerbaren Energien wird bis 2020 auf 35 % und bis 2050 auf 80 % festgeschrieben.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen die erneuerbaren Energien massiv ausgebaut werden. Dies wird nach den Vorgaben der Energiepolitik vor allem durch den Ausbau von Windenergie (On- und Offshore), Photovoltaik und Biomasse erfolgen. In dem Punkt sind sich die Energiewirtschaft, Umweltverbände, Industrie und Politik einig: Erneuerbare Energien werden in Zukunft einen immer höheren Anteil an der Stromerzeugung haben. Doch damit Strom aus Wind, Wasser, Sonne, Geothermie oder Biomasse einen Großteil der Energieversorgung übernehmen kann, sind

Arch:
Übersicht über derzeitige PSW-Projekte in Europa und Deutschland

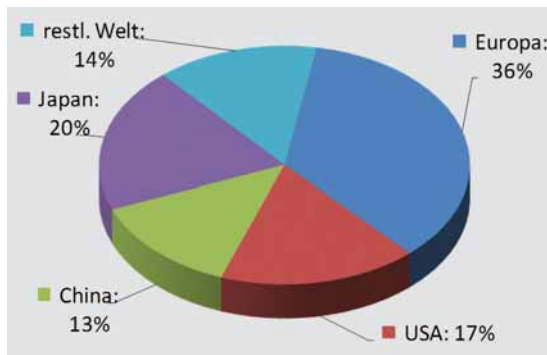


Bild 1. Prozentuale Verteilung der weltweit installierten PSW-Leistung von rund 127 GW.

erhebliche Herausforderungen zu meistern. Denn eines haben die Photovoltaik und die Windenergie gemeinsam: Sie erzeugen volatil Strom. Neben dem Ausbau der Netze für die Aufnahme des Stroms aus erneuerbaren Energien ist deshalb vor allem auch die Aufgabe zu lösen, wie dieser volatil erzeugte Strom in verbrauchsschwachen Zeiten ökonomisch sinnvoll gespeichert werden kann. Insbesondere die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen und Solarmodulen ist wetter-, saison- und tageszeitabhängig. Die daraus resultierende Anforderung, in Zeiten geringer Nachfrage in großem Maßstab „Strom zu speichern“ und in Zeiten hoher Nachfrage den gespeicherten Strom zielgenau wieder abzugeben, kann derzeit nur mit PSWs wirtschaftlich und großtechnisch realisiert werden.

Status Quo

In den Energieversorgungssystemen der Industrienationen werden Pumpspeicherwerke bereits seit dem Beginn des letzten Jahrhunderts für den Ausgleich von Lastspitzen und zur Optimierung des Betriebs eines gesamten Anlagenparks genutzt. Bei rasch steigender Nachfrage (Lastspitze) können diese aus einem Ober- und Unterbecken bestehenden Kraftwerke innerhalb kürzester Zeit durch turbinieren aus dem Oberbecken Leistung im Versor-

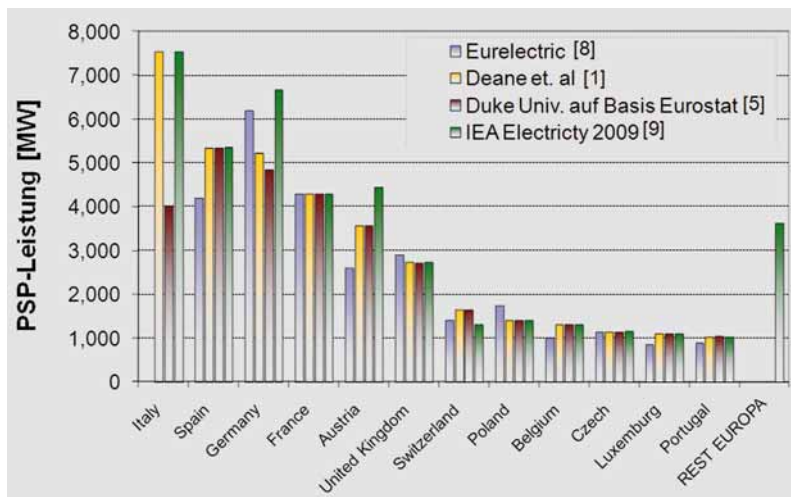
gungssystem bereitstellen. In verbrauchsarmen Zeiten ist man aber auch auf eine Mindestzahl an laufenden konventionellen Kraftwerken, vor allem vor dem Hintergrund der Versorgungssicherheit und der Netzstabilität, angewiesen. Um in diesem Fall negative Lasten, das heißt ein Überangebot an Leistung im Netz auszugleichen, fördern die Pumpen eines Pumpspeicherkraftwerks das Wasser aus dem Unterbecken unter Energieaufnahme wieder zurück in das höher gelegene Oberbecken. Tagesganglinien des Leistungsbedarfs (Last) können heutzutage auf Basis von Erfahrungen sehr gut im Vorfeld abgeschätzt und somit der optimale Einsatz des Kraftwerksparks konfiguriert werden. Durch die zunehmende Energieerzeugung aus Wind- und Solarkraftwerken wird zwar das tägliche Lastprofil nicht verändert, aber der bestehende Kraftwerkspark aus fossilen Energieträgern muss sich an die zukünftige Einspeisesituation anpassen. Vorrang hat die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien. Dies bedeutet zum einen eine Flexibilisierung des vorhandenen Kraftwerksparks, zum anderen den vermehrten Einsatz von Speichern als zusätzliche Lastsenken.

Weltweit sind derzeit rund 300 PSWs mit einer Gesamtleistung von rund 127 GW installiert [1, 2]. Vor allem in Europa, den USA und Japan wurde bereits im frühen 20. Jahrhundert mit dem Bau von PSWs begonnen [3]. Den größten Anteil mit 35 % an der weltweit installierten Leistung stellt heutzutage Europa mit etwa 45 GW [2]. In den USA sind derzeit rund 22 GW (17 %) an PSW-Leistung installiert [1]. Das Versorgungssystem Japans, welches bisher hauptsächlich auf Kernenergie basierte, wird mit circa 25 GW (20 %) PSW-Leistung unterstützt [4]. China verfügt über etwa 17 GW (13 %) an installierter Leistung [5]. Insgesamt decken Europa, Japan, USA und China rund 86 % der gesamten weltweit installierten Pumpspeicherleistung ab (Bild 1).

Bezogen auf die in einem Land installierte Gesamtleistung bewegt sich die PSW-Leistung in der Größenordnung von 5 bis 7 %. Zur Deckung der Spitzenlast werden in manchen Ländern neben PSWs auch Gaskraftwerke eingesetzt. Am Beispiel der USA, wo in den 1980er-Jahren bereits 15 GW an PSW-Leistung ausgeschrieben, aber letztendlich – weil wirtschaftlicher – als Gaskraftwerke realisiert wurden, zeigt sich, dass die Errichtung von PSWs stark von der Energiemarktsituation abhängig ist. Vor allem in Versorgungssystemen mit preissetzenden Gaskraftwerken prägen der Gaspreis und heutzutage der Preis für CO₂-Emissionen in Relation zum Strompreis die energiewirtschaftlichen Randbedingungen für eine Investition und den wirtschaftlichen Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks [6, 7].

Mit Blick auf Europa (EU-27-Länder und Schweiz) sind – je nach Bezugnahme – Pumpspeicherkraftwerke mit einer Gesamtleistung von rund 32 bis 42 GW installiert [5, 8, 9]). Abweichungen in den verschiedenen statistischen Untersuchungen entstehen durch die variierende Angabe der Leistung (Turbinen- und/oder Pumpleistung) der Kraftwerke. In Europa stellen Italien, Spanien, Deutschland und

Bild 2. Pumpspeicherleistung in der EU-27 einschließlich der Schweiz.



Österreich rund 65% der installierten Pumpleistung (Bild 2). Ähnlich wie im weltweiten Durchschnitt stellen Pumpspeicherkraftwerke in den europäischen Ländern rund 4 bis 7% der installierten Gesamtleistung je Land. Ausnahme dabei ist Luxemburg mit einem Ausbaugrad von rund 47 %. Hierbei sei aber anzumerken, dass das Kraftwerk Vianden mit einer Gesamtpumpleistung von rund 1,1 GW (inklusive der neuen Maschine 11 (M11)) auch am deutschen Netzregelverbund hängt und somit nicht ausschließlich im luxemburgischen Netz Ausgleichsenergie liefert.

Generell erscheint die prozentuale Angabe bezugnehmend auf die gesamte installierte Leistung zunehmend weniger aussagekräftig zu werden, da durch den Ausbau der erneuerbaren Energien die Angabe einer besicherten Leistung erneut zu diskutieren ist. Gerade am Beispiel Deutschland mit einer Gesamtleistung von rund 165 GW – davon sind etwa 52 GW der volatilen Wind- und Solarkraft zuzuordnen – wird klar, dass der direkte Bezug der PSW-Leistung auf die gesamte installierte Leistung zukünftig nicht mehr aussagekräftig sein wird. Vielmehr wird sich dieser Referenzwert auf eine im System sicher und zu jeder Zeit zur Verfügung stehende Leistungsgröße beziehen müssen.

PSW – Entwicklungen in der Vergangenheit und in der Zukunft

Pumpspeicherwerke waren und sind ein integraler Bestandteil der Elektrizitätssysteme in den Industrienationen. Wie bereits erwähnt, wurden PSWs zum täglichen und wöchentlichen Ausgleich von Lastspitzen und Lastsenken, hierbei vor allem zwischen den Werktagen und dem Wochenende, herangezogen. Dies begründet sich in einem wirtschaftlich optimalen Betrieb des Kraftwerksparks in einem Versorgungsgebiet. In den USA folgte der Ausbau der PSW-Leistung dem Zuwachs an Kernenergieanlagen. Bis in die 1990er-Jahre wurden etwa 90 % der PSW-Leistung in den USA errichtet (Bild 3). Ein ähnliches Bild ergibt sich für Europa, wo mit Ende der 1980er Jahre bereits 80 % der heutigen PSW-Leistung am Netz waren (Bild 4).

Mit dem Umbau der Elektrizitätsproduktion hin zu einer 80%-igen Stromversorgung in Deutschland und 75%-igen in Europa aus erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2050 ändert sich auch das derzeitige Versorgungsmanagement („Leitszenario 2010“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und „Energiefahrplan 2050“ der europäischen Kommission(CE)). Stand bisher – vor dem Hintergrund einer kostengünstigen Stromerzeugung – der betriebswirtschaftlich optimale Betrieb eines gesamten Anlagenparks im Vordergrund, werden zukünftig Aufgaben hinsichtlich der Netzstabilität sowie einer Ressourcen schonenden Stromerzeugung an Wichtigkeit gewinnen. In diesem Zusammenhang ist nicht nur ein verminderter Einsatz an fossilen Energieträgern, sondern vor allem die optimale Einbindung der Energie aus erneuerbaren Anlagen (EE-Anlagen) gemeint. Aufgrund der Entkoppelung des „An-

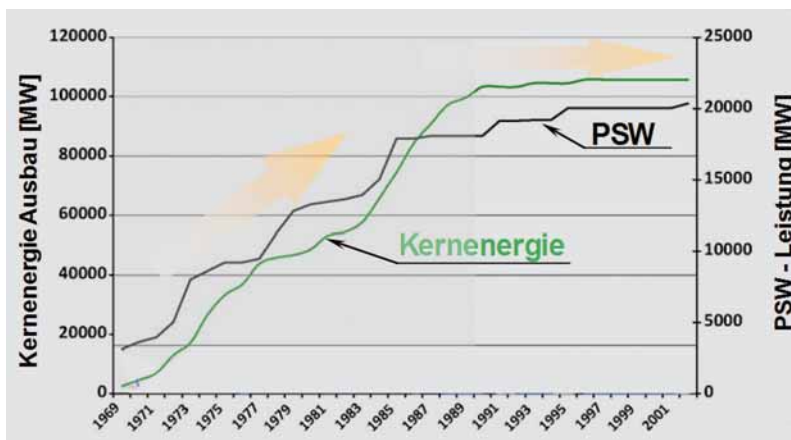


Bild 3. Der PSW-Ausbau in den USA folgte dem Kernenergieausbau [1].

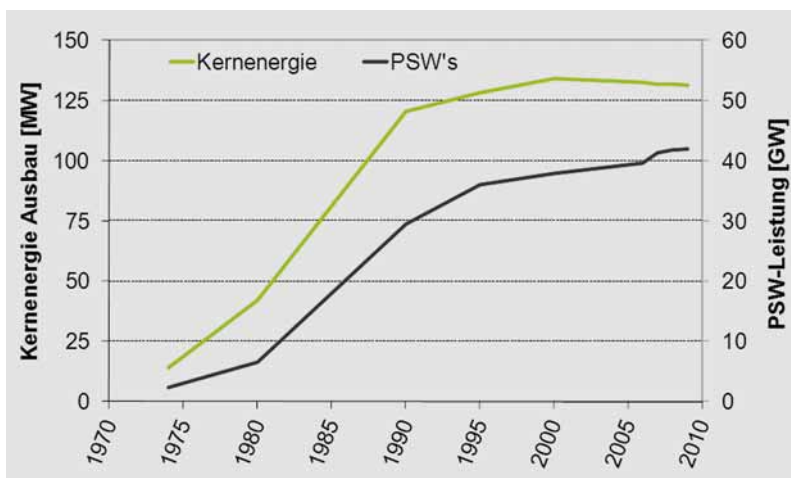


Bild 4. Der PSW-Ausbau in Europa im Vergleich zum Ausbau der Kernenergie seit dem Jahr 1973 (Daten aus [9]).

gebot-und-Nachfrage-Prinzips“ mit zunehmender Stromeinspeisung aus EE-Anlagen kommt – neben dem Netzausbau und dem Energiemanagement auf der Nachfrageseite – der Speicherung von Strom bei Überangebot (zum Beispiel: Starkwindfront gepaart mit starker Sonneneinstrahlung am Wochenende) eine besondere Rolle zu [10]. Basierend auf den derzeitigen Forschungsschritten bei alternativen Optionen bieten Pumpspeicherwerke mittelfristig die einzige großtechnische und wirtschaftliche Option zur effizienten Speicherung von Strom [7, 11]. Ist zwar der Nutzen von Speichern in Politik und Energiewirtschaft unstrittig, so gibt es derzeit eine rege Diskussion hinsichtlich der Speicherleistung sowie der Tankgröße des Speichers (Energieinhalt). Verschiedene Untersuchungen gehen alleine in Deutschland von bis zu dem Hundertfachen der derzeit installierten Speicherkapazität von rund 40 GWh aus [7].

Neben der Erschließung des verfügbaren topografischen Potenzials in Mitteleuropa, welches durch ökologische Belange wie Naturschutz-, Vogelschutz-, Wasserschutz- und Flora-Fauna-Habitat-Gebiete (FFH) sowie den ökologischen Maßregeln der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) eingeschränkt wird, bieten Lösungsansätze wie

Arch:
Übersicht über derzeitige PSW-Projekte in Europa und Deutschland

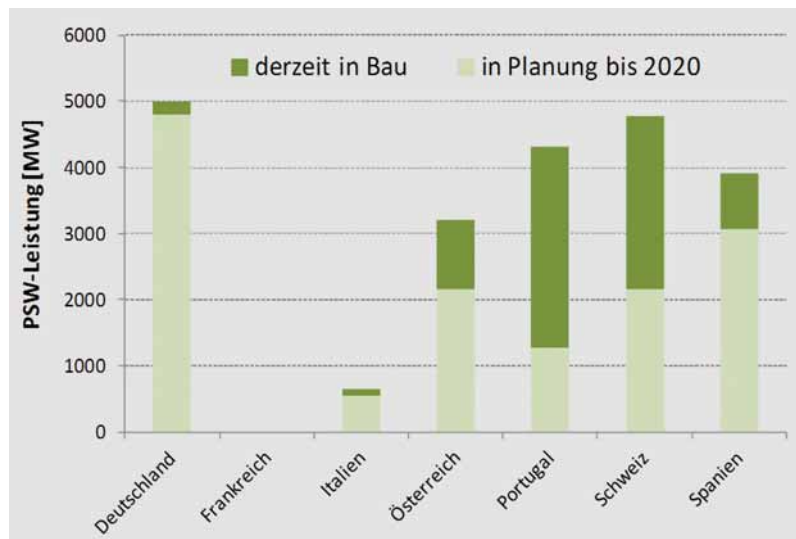


Bild 5. Europäische PSW-Projekte „in Planung“ und „in Bau“ – vorausgesetztes Inbetriebnahmejahr 2020.

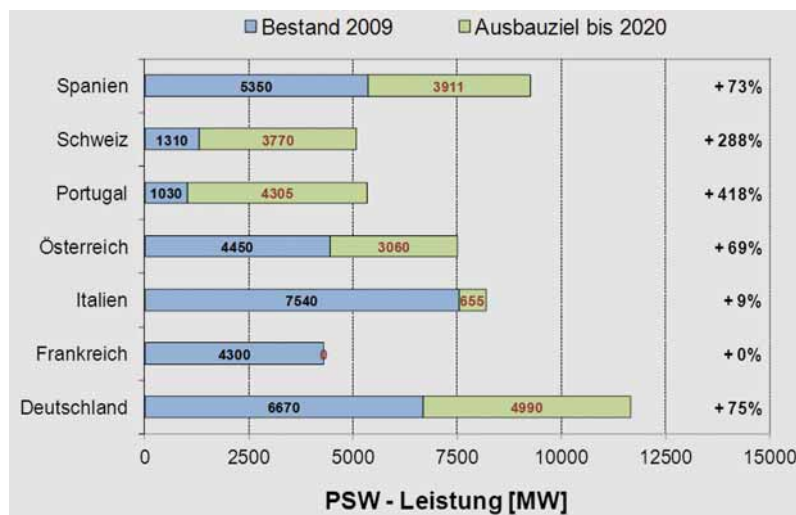


Bild 6. PSW-Ausbau in Europa – Leistungszahlen und prozentuale Steigerung.

eine Nutzung der norwegischen Speicher im Prinzip weitere Möglichkeiten. Letztere werden auch vor dem Hintergrund diskutiert, dass Norwegen zwar ein Teil der europäischen Lösung sein kann, aber ein Zusammenschluss des norwegischen Energiemarkts mit dem europäischen Binnenmarkt unter anderem unerwünschte Preissteigerungen in Norwegen nach sich ziehen könnte. Des Weiteren sind auch besonders in den nördlichen Regionen Europas ökologische Auswirkungen zu beachten. Einschätzungen des Leistungsbeitrags der norwegischen Speicher bis zum Jahr 2030 bei einem derzeitigen Energiespeichervolumen von circa 80 TWh belaufen sich auf etwa 10 bis 20 GW.

PSW-Ausbau in Europa und Deutschland

Der derzeitige und absehbare Ausbau der PSW-Leistung in Europa konzentriert sich zum einen stark

auf den mitteleuropäischen Raum mit Deutschland, Österreich, Schweiz und Norditalien, zum anderen auf die iberische Halbinsel mit Portugal und Spanien. Insgesamt sind derzeit in diesen Regionen rund 7,8 GW an PSW-Leistung in Bau sowie weitere 14 GW in Planung (Bild 5).

Erfolgt der Ausbau der PSW-Leistung in Zentraleuropa vorwiegend auf Basis der Nutzung bestehender Speichersysteme, werden in Spanien und Portugal neben der Nutzung vorhandener Speicherseen auch vollständig neue Speicherkomplexe errichtet. Im Gegensatz zu PSW-Projekten im alpinen Raum - bestehend aus zwei Speicherseen getrennt durch Fallhöhen von mindestens 300 m - werden zurzeit in Portugal mehrere Speicherseen entlang eines Flusslaufs durch den Neubau von Talsperren errichtet. Durch das Hochpumpen aus dem nahe am Krafthaus anstehenden Unterwasserreservoir in das direkt oberwasserseitig anschließende Oberbecken wird die Leistungsgröße der Anlagen aufgrund der geringen Fallhöhe vorrangig durch hohe Volumenströme erreicht (Back-Pumping).

Die größten Leistungszuwächse sind mit 418% in Portugal und mit 288% in der Schweiz zu verzeichnen. Bis zum Jahr 2020 sollen in Europa insgesamt 48 Kraftwerke mit rund 22 GW Leistung in Betrieb gehen - 18 dieser Projekte befinden sich bereits in der Bauphase, 30 Projekte befinden sich in der Planung (Bild 6).

Detaillierte Informationen zu den einzelnen Projekten sind zum einen über die Homepages der einzelnen Versorgungsunternehmen wie edp, Iberdrola, gasNatural fenosa, Endessa und Eon für Portugal und Spanien; Alpiq, Axpo, Atel, SBB, KWO Grimselstrom und REPOWER in der Schweiz; Verbund, TIWAG, Kelag und VIW in Österreich, sowie zum anderen unter [12] und [13] zu finden.

Mit dem rasanten Zubau der erneuerbaren Energien seit 2005 in Deutschland - vorwiegend Wind und Photovoltaik - werden in letzter Zeit vermehrt Pumpspeicherprojekte von Energieversorgern, Stadtwerkeverbunden und Kommunen annciert. Die Vielzahl dieser Speicherprojekte geht von konventionellen PSWs durch Nutzung natürlicher Geländestufen bis hin zu PSW-Projekten unter Tage durch Umbau vorhandener Bergwerke. Werden zwar einerseits viele Projektideen in verschiedensten Leistungsklassen in den Medien publiziert, so haben bis dato nur das Projekt Atdorf (1.400 MW) und der Energiespeicher Riedl (300 MW) das Raumordnungsverfahren (ROV) als ersten Genehmigungsschritt positiv absolviert sowie das Projekt Forbach (270 MW) den ersten Verfahrensschritt (ROV) angestoßen. Von insgesamt 12 Projekten sind 11 mit rund 4.800 MW in Planung und eines mit 200 MW in Bau. Hierzu sei angemerkt, dass die Erweiterung des Projekts Vianden um eine elfte Maschine zwar auf luxemburgischen Boden passiert, dieses Kraftwerk aber zum Netzregelverbund in Deutschland gezählt wird. Eine aktuelle Zusammenstellung der derzeitigen Projekte kann [14] entnommen werden (Bild 7).

Implikationen Energiemarkt und Projektdesign

Heutzutage werden PSWs vorwiegend mit unter Tage liegenden Triebwasser- und Unterwasserstollen als Kavernen- oder Schachtkraftwerk errichtet. Dies begründet sich zum einen durch das Ziel einer Minimierung des Flächenverbrauchs sowie zum anderen – besonders in alpinen Regionen – zum Schutz der Kraftwerkskomponenten vor äußeren witterungsbedingten Einflüssen [15]. Im Vergleich zu Lösungen über Tage sind Kavernenkraftwerke und Stollensysteme bautechnisch aufwändiger und kostenintensiver, bieten dem Vorhabensträger aber die besten Chancen einer positiven Genehmigung aufgrund des minimierten Eingriffs in die Natur. Bei Fallhöhen größer 800 m ist die Wahl des PSW-Konzepts aufgrund der technischen Möglichkeiten auf eine ternäre Lösung mit Pelton-turbine und separater Pumpe bereits sehr eingeschränkt. Diese Fallhöhen stellen aber eher die Ausnahme als die Regel dar. Im Durchschnitt werden PSWs mit einer Fallhöhe von 300 bis 600 m realisiert. Bei diesen Fallhöhen hat man die Möglichkeit zwischen einer Pumpturbine mit Synchrongenerator, einem asynchronen Maschinenkonzept mit drehzahlvariablem Generator oder einer ternären Lösung (jeweils ein Pumpen- und ein Turbinenlaufrad auf einer Welle) zu wählen. Sind Lösungen mit nur einem Laufrad, welches sowohl die Funktion der Pumpe als auch der Turbine übernimmt, durch die Drehrichtungs-umkehr bei Betriebsartenwechsel in ihrer Flexibilität beschränkt, bieten ternäre Konzepte volle Freiheit hinsichtlich ihres flexiblen Einsatzes (zum Beispiel beträgt die Regelfähigkeit der Pumpe 100 % aufgrund der Möglichkeit des hydraulischen Kurzschlussbetriebs). Die maschinellen Einrichtungen sind bei solchen Konzepten nicht nur komplexer und kostenintensiver, sondern gehen auch mit aufwändigeren Hohlrumbaumaßnahmen einher. Auf maschineller Seite begründet sich dies durch eine größere Bauhöhe respektive Baubreite bei vertikaler beziehungsweise horizontaler Wellen-anordnung. Die erhöhte Dynamik in einem solchen hydraulischen System bedingt höhere Druckspitzen und erfordert größere Ausgleichsvolumina (Wasserschloss). Im Vergleich zu Konzepten mit Pumpturbine und Synchrongenerator gestalten sich solche Systeme bautechnisch aufwändiger. Dies bedeutet grundsätzlich, dass flexiblere Anlagen kostenintensiver sind.

Wie aus den weltweiten Vorgängen abzuleiten ist, geht der Ausbau von Speichern mit wachsender fluktuierender Einspeisung aus EE-Anlagen einher – vor allem die Einspeisungen aus Windkraftanlagen prägen das Bild hoher positiver und negativer Lastgradienten. Dies zieht zukünftig auch eine dementsprechende Flexibilisierung des deutschen Kraftwerksparks mit sich. In diesem Zusammenhang ist bereits im Projektierungsstadium der zukünftige Einsatz eines PSWs entscheidend für das Projekt-design. Die Streubreite der Kavernenvolumina bei gleicher Ausbauleistung zeigt sich letztendlich auch in einer Zusammenstellung von [16]. Neben

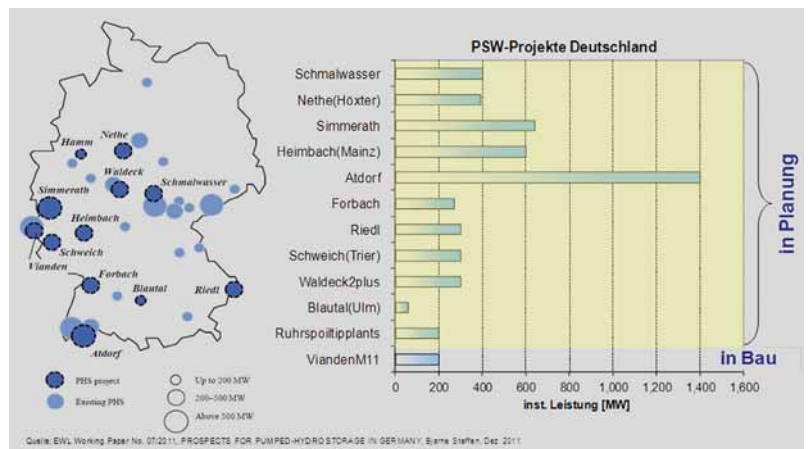


Bild 7. PSW-Projekte in Deutschland (basierend auf [14]).

unterschiedlichen geologischen Voraussetzungen sind der geplante Einsatz und damit einhergehend die geometrischen Ausdehnungen der Kaverne die Hauptgründe für die Streubreite. Wurden in der Vergangenheit vor allem Pumpturbinenkonzepte mit Synchrongeneratoren mit einer recht gedungenen und damit platzsparenden Bauweise verfolgt, sind die Konzepte der zukünftigen PSWs vor dem Hintergrund der Entwicklungen am Energiemarkt vermehrt mit flexiblen Maschinensätzen ausgerüstet. Vor allem Systeme mit Asynchrongeneratoren, welche den Vorteil einer variablen Pumpleistung durch Drehzahlsteuerung mit sich bringen, finden vorrangig Anwendung in den aktuellen Projekten. Ein Hauptgrund dafür liegt in der verfügbaren zusätzlichen Flexibilität bei moderater Steigerung des Bauvolumens und der Kosten.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem weltweiten Ausbau der erneuerbaren Energien steigt auch der Zubau von Pumpspeicherleistung als Ausgleich zur fluktuierenden Einspeisung. Bis zum Jahr 2020 ist allein in den USA, Europa, China und Japan ein Zubau von rund 67 GW geplant. Dies würde die derzeit weltweit installierte Leistung von 127 GW um circa 50 % steigern. In Europa werden besonders in Portugal und Spanien, basierend auf dem starken Zubau an Windenergie, 8 GW an zusätzlicher Leistung geplant, wovon 4 GW sich bereits in Bau befinden. Neben der iberischen Halbinsel wird vor allem in Zentraleuropa mit Deutschland, Italien, Österreich und der Schweiz der Zubau an PSW-Leistung vorangetrieben. Von insgesamt rund 12 GW zusätzlicher Leistung sind hier aber erst etwa 20 % im Bau. Im Gegensatz zu Portugal und Spanien begründet sich dies besonders in unterschiedlichen regulatorischen und energiewirtschaftlichen Randbedingungen. Nichts desto trotz werden Pumpspeicherwerke aufgrund ihrer Eigenschaften wie Schwarzstartfähigkeit, Blindleistungsbereitsteller, Lastausgleicher und Frequenzstabilisator als wichtiger und integraler Bestandteil der zukünftigen Energieversorgung basierend auf erneuerbaren Energiequellen mit deren fluktuierenden Einspeisung gesehen.

Quellenverzeichnis

- [1] Deane, J. P.; Gallachoir, B. P. O and McKeogh, E. J.: Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. *Renewable and Sustainable Energy Review* (14), pp. 1293-1302, (2010).
- [2] European Commission: SETIS – Strategic Energy Technologies Information System: 03-2012. [Online]. Available: <http://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/electricity-storage-in-the-power-sector>. (2012).
- [3] Miller, R. and Winters, M.: Energy Storage: Opportunities for Pumped Storage: Supporting Renewable Energy Goals. *HydroReview*, 01-2012. [Online]. Available: www.hydroworld.com. [Zugriff 02.2012].
- [4] The Federation of Electric Power Companies of Japan: Information Plaza of Electricity – Electricity Review Japan. [Online]. Available: http://www.fepc.or.jp/english/library/electricity_eview_japan/index.html. [Zugriff am 20.03.2012].
- [5] Yang, C.-J.: Pumped Hydroelectric Storage. 2011 [Online]. Available: <http://www.duke.edu/~cy42/>. [Zugriff am 03.2012].
- [6] Steffen, B. and Weber, C.: Efficient Storage Capacit in Power Systems with Thermal and Renewable Generation. EWL, Duisburg, (2011).
- [7] Auer, J. und Keil, J.: Moderne Stromspeicher – Unverzichtbare Bausteine der Energiewende: 31.01.2012. [Online]. Available: http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000284196/Moderne+Stromspeicher%3A+Unverzichtbare+Bausteine+der+Energiewende.pdf. [Zugriff 04.2012].
- [8] eurelectric: Hydro in Europe: Powering Renewables – RESAP. (2010).
- [9] International Energy Agency (IEA): Electricity Information – IEA Statistics. IEA, (2011).
- [10] Klobasa, M.: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen Gesichtspunkten. ETH – DISS Nr. 17324, Zürich, (2007).
- [11] Vennemann, P.; Gruber, K. H.; Haaheim, J. U.; Kunsch, A.; Sistench, H.- P. and Thöni, H. -. R.: Pumped storage plants – Status and perspectives. *VGB Power Tech* (4), pp. 32-38, (2011).
- [12] Montero, F. P. and Pérez, J. J.: Wind-Hydro Integration: Pumped storage to Support Wind. *HydroReview*, (2011). [Online]. Available: www.hydroworld.com. [Zugriff 03.2012].
- [13] Zuber, M.: Renaissance for Pumped Storage in Europe. *HydroReview*, (2011). [Online]. Available: www.hydroworld.com. [Zugriff 02.2012].
- [14] Steffen, B.: Prospects for Pumped-Hydro Storage in Germany. EWL, Duisburg, (12.2011).
- [15] Broch, E.: Why did the hydropower industry go underground?. In: *Proceedings of 31st ITA World Tunnel Congress - Underground Space Use*, 7-12 May, 2005, Istanbul, Turkey, (2005).
- [16] Saurer, E. and Marcher, T.: Decisive Parameters for the Design of Power Plant Caverns. In: *Calculation Methods in Geotechnics – Failure Mechanisms and Determination of Parameters*, Salzburg, (2011).
- [17] Ingram, E. A.: Worldwide Pumped Storage Activity. *HydroReview*, (2011). [Online]. Available: www.HydroWorld.com. [Zugriff 02.2012].