

Pumpspeicherkraftwerke an Bundeswasserstraßen?

Dipl.-Ing. Sven Wohlfart, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1. Einleitung

Die energetische Nutzung der Wasserkraft hat in Deutschland eine lange Geschichte. Zu Beginn des letzten Jahrhunderts waren zehnfach mehr Wasserkraftanlagen in Betrieb als heute. Hintergrund für den hohen Anteil der Wasserkraftnutzung, speziell im süddeutschen Raum, war die beschränkte Verfügbarkeit von Energierohstoffen und das Dargebot an Wasser bei entsprechender Fallhöhe. Der weitreichende Einsatz von fossilem und nuklearem Brennstoff zur Energieproduktion in großen thermischen Kraftwerken führte allmählich zur Ineffizienz und Aufgabe vieler Standorte auf derzeit knapp 7400 Wasserkraftanlagen (Anderer et. al, 2010).

Mit der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2012, §2) verfolgt die Bundesregierung das Ziel einer Reduktion fossiler und schrittweise Zunahme der erneuerbaren Energien. In den kommenden acht Jahren soll der regenerative Energieanteil auf insgesamt 35 % ansteigen und bis zum Jahr 2050 auf 80% der Stromversorgung ausgebaut werden. Durch die Erhöhung der Einspeisung von fluktuierender, dezentral produzierter Energie steigt der Bedarf an flexibel einsetzbarer Kraftwerksleistung zur Grundsicherung bei Störfällen und zur Kompensation von Leistungsdefiziten. Im Bereich der Wasserkraftnutzung ist mit dem Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken (PSW) in unterschiedlichen Konstellationen zu bestehenden und neuen Speicherräumen die Möglichkeit vorhanden, Speicherkapazitäten zur Integration der erneuerbaren Energien bereitzustellen.

2. Energiespeicherung mit Pumpspeicherkraftwerken

Die großtechnische Speicherung von Energie wird zurzeit durch vier Anlagenarten in elektrochemischer und mechanischer Form mit unterschiedlichen Wirkungsgraden nach Tabelle 1 (Dena, 2010) bereitgestellt:

Tabelle 1: Energiespeicher und Wirkungsgrad

Anlage	Wirkungsgrad
Pumpspeicherkraftwerke	≥ 75 %
Druckluftspeicherkraftwerke	≥ 42 %
Akkumulatoren ((Blei-Säure /Lithium-Ionen)	≥ 57 %
Wasserstoffspeicher	≥ 40 %

Der Einsatzbereich der Energiespeicher ist durch die Speicherkapazität [KWh] und Entladungsdauer [h] definiert. Akkumulatoren zeichnen sich durch ein weites Speicherspektrum im

niedrigen kWh bis zweistelligen MWh Bereich aus. Druckluft- und Pumpspeicherkraftwerke liegen bei einer Kapazität von 10 MWh bis 100 GWh und Wasserstoffspeicher im oberen GWh – Bereich. Momentan steht nur die Pumpspeicherung als ausgereifte und über Jahrzehnte bewährte Technik zur Verfügung. Die anderen Speichertechniken sind (immer) noch in der Phase der Erprobung und Weiterentwicklung. Im Vergleich der Betriebsmittel setzen Druckluft- und Pumpspeicherkraftwerke vorhandene Ressourcen (Luft/Wasser) ein, während Wasserstoffspeicher das Speichermedium Wasserstoff mehrfach zur Speicherung und Energiegewinnung (mit Verlust) umwandeln müssen („Power2Gas2Power“). Bei der Speicherkapazität unterliegen Wasserstoffspeicher jedoch nur geringen Beschränkungen (maximaler Wasserstoffanteil im Gasnetz, Speichergröße) und werden als zukünftige Langzeit-Speichertechnologie angesehen.

PSW dienen der Speicherung temporär überschüssiger elektrischer Energie und deren zeitversetzter Rückgabe bei entsprechendem Bedarf. Durch das Pumpen von Wasser in ein höher gelegenes Oberbecken wird potentielle Energie gewonnen, welche über den Rückfluss des Wassers durch eine Turbine wieder in elektrische Energie zurück verwandelt wird. PSW erzeugen somit keinen zusätzlichen Strom, sondern speichern diesen mit 20 bis 25 Prozent Verlust (reine Pumpspeicherung). Die Wirtschaftlichkeit ist gewährleistet, sobald der Marktpreis für Spitzenstrom die eingesetzten Pumpstromkosten um ein Viertel übersteigt. Der Zeitpunkt ist bei einer gemischten Pumpspeicherung früher erreichbar, wenn der vorhandene natürliche Zufluss in das Oberbecken bei der Pumpstrategie berücksichtigt und für die Energieerzeugung mit herangezogen werden kann. Durch das schnelle Umschalten zwischen Pumpbetrieb und Energieproduktion eignen sich PSW insbesondere zur Bereitstellung von Regelenergie zur Kompensation von Schwankungen bei der Stromproduktion.

3. Pumpspeicherkraftwerke, Speicherbecken an Bundeswasserstraßen

Das Netz an Binnenwasserstraßen in Deutschland hat eine Gesamtlänge von 7350 km, und besteht aus frei fließenden/geregelten (35%), staugeregelten (41 %) Flussstrecken und Kanälen (24 %). Das vorhandene Wasserdargebot wird vielfältig genutzt, vorrangig durch die Schifffahrt und die Kraftwerksbetreiber. Wasserentnahmen für die Wasserversorgung, Landwirtschaft und Industrie greifen in den vorhandenen Abfluss ein und senken den Wasserspiegel. Der Betrieb eines PSW führt zu einer zusätzlichen, stoßartigen Veränderung des Wasserspiegels.

Im Allgemeinen werden PSW mit zwei künstlich angelegten Speicherbecken mit großer Höhendifferenz im Wälzbetrieb, d.h. ohne weiteren Zufluss, betrieben. Bei entsprechenden topographischen und hydrologischen Verhältnissen kann auf das Unterbecken verzichtet werden, wenn stattdessen ein vorhandenes Gewässer als Speicherraum in Verbindung mit einem Oberbecken (Ringdamm, Talsperre), genutzt werden kann. Von den 31 PSW in Deutschland nutzt gegenwärtig nur eines, das PSW bei Geesthacht an der Elbe, eine Bundeswasserstraße als Unterbecken.

3.1 Speicherbecken am frei fließenden (geregelten) Fluss

Der frei fließende (geregelte) Fluss, stellt ein komplexes System dar, das ständigen Anpassungen zu hydrologischen, topographischen und flussbaulichen Veränderungen unterworfen ist (Giesecke und Mosonyi, 2009) und dessen Reaktionen auf Veränderungen im Abflussregime ungefiltert weitergeleitet werden. Frei fließende Flüsse sind als Unterbecken für ein PSW nur dann geeignet, wenn die natürlichen Wasserspiegeländerungen nicht übermäßigen Schwankungen unterliegen. Die Entnahme von Wasser für den Pumpbetrieb, führt wie die Einleitung des Turbinenwassers (Bild 1a) zu einer Erhöhung der Wasserspiegelschwankungen, die sich unterhalb der Entnahmestelle in Fließrichtung fortpflanzen können. Die Schwebstoffkonzentration in der Wasserstraße erfordert zudem den Einsatz von Wasserfassungen (Entsander, Einlaufschwelle, Tauchwand, Rechen) zum Schutz des Ein-/Ausleit- Bauwerkes vor Geschiebeeintrag. Eine nachträgliche Dämpfung der durch PSW induzierten Wellen ist nur durch erhebliche Veränderungen im Fließquerschnitt zu erreichen. Dies ist an einer Bundeswasserstraße kaum umsetzbar.

Neben der direkten Einleitung der Pendelwassermenge in den frei fließenden Fluss ist die Anordnung eines seitlichen Beckens im Nahfeld der Wasserstraße möglich (Bild 1b). Die Beaufschlagung eines Unterbeckens im Vergleich zur direkten Einleitung in die Wasserstraße begrenzt das Ausmaß der Wasserspiegelschwankungen auf die Volumendifferenz zum Beckeninhalt. Wasserverluste im Becken, infolge Versickerung und Verdunstung, sind durch die Wasserstraße kompensierbar. Das Becken entspricht dabei einem großen Sandfang, ein Grobrechen vor dem Ein-/Ausleitbauwerk ist ausreichend. Entscheidend sind jedoch die topographischen Verhältnisse am Fluss und die erheblichen Kosten, die durch den Bau eines seitlichen Beckens an einer Bundeswasserstraße zu erwarten sind.

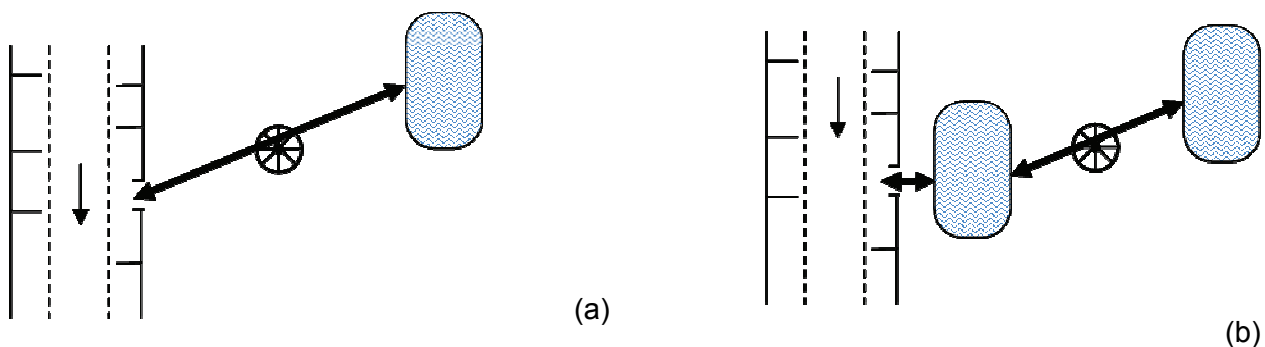


Bild 1: Frei fließender Fluss, Oberbecken (a), Oberbecken mit einem seitlichen Becken (b)

3.2 Speicherbecken am staugeregelten Fluss

Nach DIN 4054, wird der Begriff der Stauregelung als Einbau von Staustufen zur Verbesserung der Wasserstandsverhältnisse für die Schifffahrt und/oder zur Wasserkraftnutzung in einem Fluss beschrieben. Staustufen sind mehrteilige Bauwerke und bestehen grundsätzlich aus Wehr- und Schleusenanlage, mit Einbauten zur Fischpassage, Bootsanlage und dem Bauwerk zur Energieerzeugung. Die Stauregelung erfolgt in Abhängigkeit vom Abflussgeschehen über Laufwasserkraftwerke (LWKW) und/oder den bewegliche Verschlüsse der Wehranlage. Betriebsvorgabe für beide Regelorgane ist die Einhaltung des Stauziels im Oberwasser der Staustufe.

In Bild 2a ist der Stauraum eines staugeregelten Flusses als Speicherbecken für den Betrieb eines PSW in Verbindung mit einem separaten Oberbecken dargestellt. Das Ein-/Ausleitbauwerk des PSW ist im Oberwasser der Staustufe, in direkter Nähe zu Wehr und Kraftwerk, angeordnet. Damit ist ein gekoppelter Betrieb zwischen PSW und LWKW bzw. Wehr ohne Berücksichtigung von Fließzeiten möglich. Die Ausbauleistung der Wasserkraftanlagen ist abhängig von der Durchflussmenge und der Fallhöhe des Wassers, sowie dem Gesamtwirkungsgrad. Entscheidender Unterschied zwischen einem LWKW und einem PSW ist, das LWKW das vorhandene Wasserdargebot permanent umsetzen. LWKW nutzen Fallhöhen im ein bis zweistelligen Meterbereich bei einem Abflussspektrum bis zu mehreren 1000 m³/s, während PSW durch den Maschinensatz festgelegte Abflüsse für den Pump- und Turbinenbetrieb vorweisen, die im Mittel um den Faktor 10 geringer sind, bei Fallhöhen im dreistelligen Meterbereich. Das Speicherwasser wird nach Bild 2a aus dem gestauten Bereich oberhalb des Kraftwerks entnommen. Dies hat den Vorteil, dass im Abflussspektrum unterhalb des Ausbaudurchflusses des LWKW, der Wasserverlust durch Drosselung der Turbinenleistung kompensiert und das Verfallen des Oberwasserstandes verhindert werden kann. Im Turbinenbetrieb des PSW wird entweder die Turbinenleistung des LWKW erhöht oder die Verschlüsse der Wehranlage zur Übernahme des Abflusses mit herangezogen. Steigt der Zufluss über die Ausbauwassermenge des LWKW an, übernimmt allein das Wehr die Wasserführung. Die Einhaltung des Stauziels ist dann abhängig von der Verstellgeschwindigkeit, dem minimalen Verstellschritt und der Beaufschlagung der Verschlüsse. Bis zur Staulegung, sind die Wasserspiegelschwankungen infolge des PSW-Betriebes durch das Wehr ausgleichbar. Danach stellen sich Bedingungen, wie in Kapitel 3.1 ein, wobei die Speicherwassermenge im Vergleich zum Gesamtabfluss vernachlässigbar ist.

Die (zusätzliche) Einlagerung der Pendelwassermenge eines PSW in der Stauhaltung, ist im begrenzten Umfang durch die Änderung des vorhandenen Stauziels möglich. Wird eine Abweichung des Stauzieles gewährt, so ergibt sich eine Bewirtschaftungslamelle die sich mit dem Zufluss in die Stauhaltung ändert. Reduziert man das Stauziel für das LWKW bzw. das Wehr und lässt eine Überschreitung in der Regelung zu, dann erhält man ein nutzbares Speichervolumen für die Pendelwassermenge des PSW. Um über den regelbaren Abflussbereich das nutzbare Speichervolumen vorhalten zu können, bedarf es einer entsprechend großen Stauzieltoleranz. Bei

einer Stauhaltungskette (Bild 2b) ist die oberste Stauhaltung (Kopfspeicher) für den Betrieb mit einem PSW vorzusehen, da dadurch die Abflussbedingungen und die Schifffahrtsverhältnisse insgesamt verbessert werden können (Bassler, 1971).

Die Kopplung der Betriebsweisen aus PSW und Laufwasserkraft/Wehr als Mehrzweckanlage, bietet die meisten Vorteile bei der Minimierung der Wasserspiegel- und Abflussschwankungen in der Stauhaltung in die ein/ausgeleitet wird und in der unterhalb anschließenden. Die höhere Spitzenenergie des PSW erfordert jedoch eine Berücksichtigung der jeweiligen Pump- und Turbinenzeiten in der Regelung der LWKW und Wehre. So wird es zu Spitzenzeiten dazu führen, dass der Betrieb der LWKW hinsichtlich der Energieausbeute Einbußen erfährt, die jedoch von den höheren Erträgen aus dem PSW-Betrieb ausgeglichen werden.

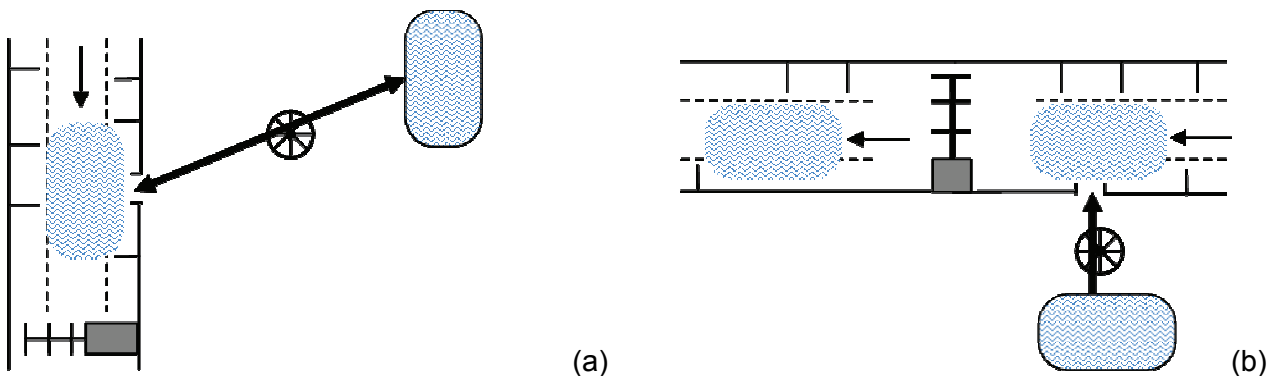


Bild 2: Staugeregelter Fluss, Oberbecken(a), Oberbecken und Stauhaltungskette (b)

3.3 Speicherbecken am Kanal

Schifffahrtskanäle sind künstliche Wasserstrassen die in Form von Regelquerschnitten (Trapez, Rechteckprofil und Kombinationen (KRT)) für den Gütertransport angelegt wurden. Der Ausbaugrad unterliegt dem Wandel, da Wassertiefe und Wasserspiegelbreite in Bezug zu sieben Schiffsklassen bemessen werden, die sich in der Größe an der erforderlichen Abladetiefe sowie der gegebenen Schiffsbreite orientieren. Der Mittellandkanal, ein Kanal der Klasse Vb, ist mit einer Länge von mehr als 325 km die längste Kanalstrecke in Deutschland bei einer Breite zwischen 40 m und 50 m und einer Tiefe bis 5 m. Kanalhaltungen haben keinen oder nur geringen natürlichen Wasserzufluss. Die Wasserverluste die durch Schleusungen an einer Kanalstufe entstehen müssen durch Pumpwerke ausgeglichen werden, eine weitere Stauregelung ist nicht vorgesehen.

Der PSW-Betrieb im Kanal nach Bild 3, wird zurzeit für den Elbe-Seitenkanal mit Fallhöhen von 23 m bzw. 35 m untersucht. Speicherbecken sind die zwei Kanalhaltungen im Ober- und Unterwasser der Kanalstufe. Im Vergleich zum staugeregelten Fluss breiten sich

Wasserspiegelschwankungen in Kanälen über die ganze Haltungslänge aus und werden an Querbauwerken reflektiert. Die Überlagerung von Schleusungswellen führen zum Teil schon heute zu Problemen mit Abladetiefen auf der Kanalstrecke. Die Einlagerung der Pendelwassermenge in der Kanalhaltung ist abhängig von der Varianz der Wasserspiegelhöhe, die in Kanalstrecken betriebs- und sicherheitsbedingt (Brückendurchfahrtshöhen) wenig Schwankungsbreite zulässt und durch Windstau beeinflusst ist. Im Vergleich zur staugeregelten Wasserstraße muss der Zeitraum der Umwälzung im PSW-Betrieb schärfer begrenzt werden, um ein Absinken des Wasserspiegels im Kanal zu vermeiden. Durch den teilweise fehlenden Zufluss und infolge der geringen Strömungsgeschwindigkeiten wirken sich Entnahme und Einleitungen nachhaltiger auf Wasserspiegeländerungen aus. Für eine gleichmäßige Verteilung der Pendelwassermenge sind Rohrleitungen über längere Distanzen zu verlegen, da ein Regelungseingriff zur Vermeidung von Wasserspiegelschwingungen fehlt. Bei der Einleitung sind der Rohrquerschnitt und die turbinierte Abflussmenge das Kriterium für Quergeschwindigkeiten die sich auf die Schifffahrtsverhältnisse auswirken. Diese sind nur durch betriebliche Vorgänge reduzierbar, da für Einbauten im Kanal wenig Raum zur Verfügung steht.

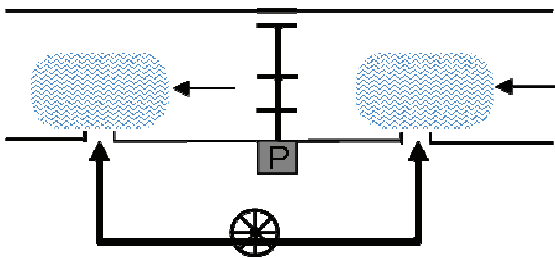


Bild 3: Kette von Kanalhaltungen

4. Einfluss von PSW auf die Wasserspiegellagen

4.1 Schwall und Sunk:

Der intermittierende Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken an Bundeswasserstraßen führt zwangsläufig zu Abflussschwankungen die im natürlichen Abflussspektrum so nicht auftreten. Die Abflussspitzen entstehen durch den vorübergehenden hohen Zufluss von Betriebswasser, wenn alle Turbinen unter Vollast stehen oder wenn bei abgeschaltetem bzw. stark reduziertem Kraftwerksbetrieb der Minimalabfluss erreicht wird. Die Häufigkeit von Schwall und Sunk nimmt bei PSW, die zur Regelung des Stromnetzes eingesetzt werden, zu im Vergleich zur Veredelung von Spitzenenergie im tageszeitlichen Betrieb. Zur Ermittlung der Wasserspiegelauslenkung infolge von Schwall und Sunk müssen hydrodynamisch-numerische Modelle eingesetzt werden, die es erlauben die Wellenausbreitung über den gesamten Querschnitt zu erfassen.

4.2 Nutzbares Speichervolumen:

Charakteristische Größen von Stauhaltungen wie der Talweg, die Haltungslänge und der benetzte Umfang sind mit der Festlegung eines Stauziels entscheidende Kriterien für die Ermittlung des Speichervolumens. In Kanalhaltungen ist die Berechnung des Speicherinhaltes einfach, da die Form künstlich vorgegeben und der funktionale Zusammenhang zwischen Wasserspiegelverlauf und Speicherinhalt linear ist. In staugeregelten Wasserstraßen ist das Speichervolumen hingegen nicht linear proportional zum Wasserstand, sondern wird durch Staukurven begrenzt, die sich mit dem Zufluss in die Stauhaltung ändern. In Bild 4, sind das Speichervolumen einer Stauhaltung gegenüber dem nutzbaren Speichervolumen für die Pumpspeicherung, über einen Abflussbereich bis $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ aufgetragen. Das resultierende nutzbare Speichervolumen ist beispielhaft für die Moselstauhaltung Trier berechnet worden. Bei einer Variation des Stauziels von $0,10 \text{ m}$ und minus $0,30 \text{ m}$ um das Betriebsstauziel, ergibt sich über den Abfluss eine Speicherinhaltslinie für das Stauziel nach der roten Linie aus Bild 4 gegenüber den beiden schwarzen Inhaltlinien bei verändertem Stauziel. Das nutzbare Speichervolumen für ein PSW ist durch die blaue (Stauzieldifferenz $0,10 \text{ m}$) und grüne Speicherlinie (Stauzieldifferenz $-0,30 \text{ m}$) gekennzeichnet und beträgt im jahreszeitlich relevanten Abflussspektrum bis $400 \text{ m}^3/\text{s}$ in etwa $0,25 \text{ Mio m}^3$ bis $0,7 \text{ Mio m}^3$ Wasser.

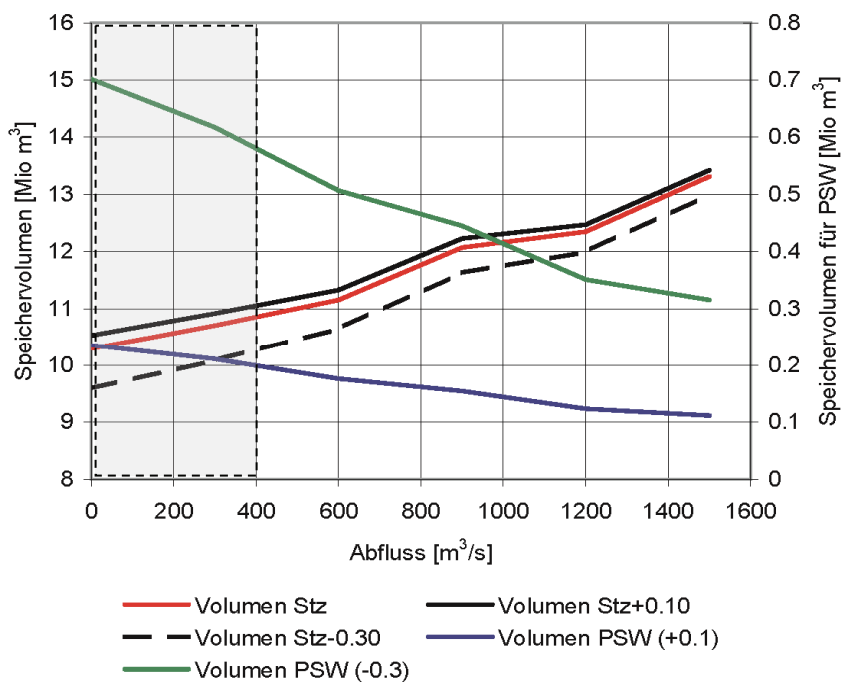


Bild 4: Speichervolumen einer Stauhaltung und nutzbares Speichervolumen für ein PSW

4.3 Wasserspiegelschwankungen , Regelungstechnische und bauliche Maßnahmen

Die automatisierte Abfluss und Stauzielregelung von Staustufen mit LWKW und Wehren ist an der Mosel Stand der Technik und an weiteren Bundeswasserstraßen in der Planung. Die Kopplung von Laufwasserkraftwerken mit dem Betrieb eines PSW ist an Bundeswasserstraßen bisher nicht realisiert. Im Rheinstauraum der RADAG am Oberrhein wurde die erfolgreiche Umsetzung außerhalb der Bundeswasserstraßen bestätigt. Die BAW setzt für die Modellierung der ASR Simulationsmodelle unter Matlab/SIMULINK ein, die für den Betrieb von PSW erweitert werden könnten. Betriebliche Vorgaben, wie beispielsweise die Anpassung der maximalen Turbinendurchflüsse im PSW-Betrieb und deren Auswirkungen auf die Wasserstraße sind durch Simulationen nachzuweisen. Aus den Betriebszeiten bestehender PSW können Ganglinien für Pump- und Turbinenzeiten abgeleitet werden, die als Eingangsdaten für Simulationen dienen. Die Wirtschaftlichkeit ist über die Anbindung des Simulationsmodells an die Strombörse European Energy Exchange (EEX) anhand einer Erweiterung zu MATLAB darstellbar. Bauliche Maßnahmen zur Minimierung der Auswirkungen von Ein- und Ausleitungen eines PSW können durch die Aufweitung des Austrittsquerschnitts, die Vergrößerung des Fließweges (Umlenkung in Fließrichtung und entgegen) und durch Einbauten, wie Prall-, Leit- und Schlitzwänden oder Grundschnellen erreicht werden. In der BAW wurden von Stauder und Gehrig (1968) für das geplante PSW Bremm an der Mosel umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Anhand von Modellversuchen zur Gestaltung des Entnahmebauwerks konnte unter den damaligen Randbedingungen nachgewiesen werden, dass eine Bauwerksform mit teilweise durchbrochener Leitwand über eine Länge von 400 m zu Strömungsverhältnissen führt, die für die Schifffahrt im gesamten Abflussbereich tragbar sind.

5. Fazit

Pumpspeicherkraftwerke als Energiespeicher für erneuerbare Energien werden nach Art der Einspeisung und der Vergütung am Strommarkt geregelt. Heutige PSW sind überwiegend seit Jahrzehnten im Einsatz, wurden für den Tagesspeicherbetrieb ausgelegt und müssen für die neuen Anforderungen ertüchtigt werden. Der Betrieb eines PSW erfolgt, wie auch bei anderen Wasserkraftanlagen, innerhalb eines komplexen Rechtsrahmens der Wassergesetze des Bundes und der Länder. Restriktionen bezüglich Mindestwasserführung, sicheren Anlagenbetrieb, Hochwasserschutz und weitere Umweltauflagen belastet die Umsetzung von Projekten zusätzlich. Die schon heute vielfältige Nutzung der Wasserstraße in Kombination mit einer zusätzlichen Energiespeicherung durch PSW lassen bei eingeschränktem Ausbaupotenzial nur wenige Standorte zu. Für die Einhaltung der Schifffahrtsverhältnisse wären separate Speicherbecken entlang der Wasserstraße zur Minderung des stoßartigen Betriebs von PSW ein Kompromiss gegenüber größeren baulichen Maßnahmen innerhalb der Wasserstraße. Für beides sind die Bedingungen am frei fließenden (geregelten) Fluss selten gegeben. In Stauhaltungen sind PSW über einen kombinierten Betrieb mit bestehenden Laufwasserkraftwerken und Wehren integrierbar. Eine angepasste und erweiterte Abfluss- und Stauzielregelung, die die Energiespeicherung und Produktion unter Wahrung der Belange der Schifffahrt einhält, ist dazu notwendig. Speichervorteile

ergeben sich bei der Nutzung von Stauhaltungsketten als Unterbecken eines PSW. Kanalhaltungen haben noch weiter reichende Restriktionen bezüglich der Wasserkraftnutzung, da während der Planung ausschließlich schiffahrtsrelevante Faktoren (schiffsbezogene Abladetiefen, Durchfahrtshöhen, Kanalbreiten und Schleusenanlagen) die Dimensionierung beeinflussten. Die Lamelle der tolerierbaren Wasserspiegelschwankungen und das nutzbare Speichervolumen in Kanälen sind dementsprechend eng gefasst. Eine generelle Aussage zu den Auswirkungen eines PSW auf die Schifffahrtsverhältnisse ist nicht möglich und hat daher standortspezifisch zu erfolgen.

Literatur

- Anderer, P/ Dumont, U./ Heimerl, S./ Ruprecht, A./ Wolf-Schumann, U (2010):
Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland, WasserWirtschaft, Heft 9.
- Bassler, F/ Bauer, L./Fuchs, H./ Gehrig, W/ Müller, J/ Stauder, H (1973): Pumpspeicherkraftwerke
an schiffbaren Wasserstraßen,
- Dena (2010): Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen
Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien, Abschlussbericht.
- Giesecke, J., Mosonyi, E. (2009): Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb, Springer Verlag.
- Stauder, H/ Gehrig, W (1972): Modellversuche zur Gestaltung des Entnahme- und
Rückgabebauwerkes des Langzeitpumpspeicherwerkes Bremm an der Mosel sowie über
die Auswirkungen des Pumpen- und Turbinenbetriebes auf die Stauhaltung Fankel,
unveröffentlicht
- The MathWorks (2011): Matlab/SIMULINK Version R2011b, <http://www.matlab.de>.

