

## Untertägige Pumpspeicher- kraftwerke – Ein realisierbarer Weg der Energiespeicherung?



Nagler, N.

*Angesichts der weltweiten Steigerung des Energiebedarfs kommt dem Ausbau der erneuerbaren Energien, z. B. resultierend aus Wind- und Wasserkraft, eine immer größere Bedeutung zu. Hinsichtlich der fluktuierenden Energieerzeugung aus Windkraft steigt der Bedarf an verfügbaren Kapazitäten von Zwischenspeichern und in diesem Zusammenhang auch der der Weiterentwicklung von dort genutzten Speichertechnologien. Im Rahmen dieses Artikels wird näher auf die Speichertechnologie Pumpspeicherkraftwerke (PSW) eingegangen, wobei der Schwerpunkt auf der Vorstellung einer Weiterentwicklungsmöglichkeit dieser Speichertechnologie liegt; der Nutzung von in ungenutzten Bergwerken integrierten, untertägigen Pumpspeicherkraftwerken. Es wird die maschinentechnische Herangehensweise an die Auswahl und Auslegung allgemein, sowie Aspekte mit Hinblick auf die Aufstellung im Besonderen dargestellt.*

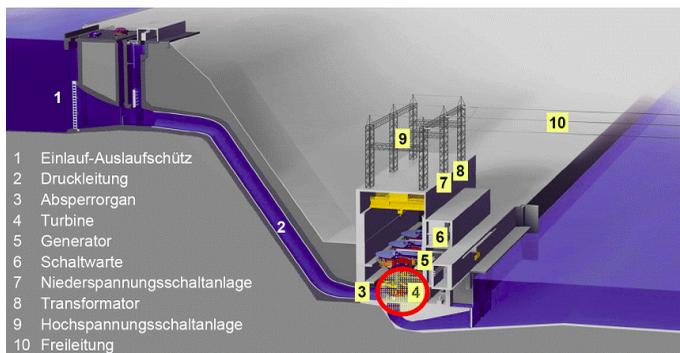
*Due to the worldwide growing energy demand the increase of renewable energy sources like wind and water power gains in importance. With regard to the fluctuating energy generation resulting from wind power the demand for available storing capacities increases. In this context also the storing technologies have to be further developed. In this article pumped storage plants as one storing technology for wind energy are described more detailed. The article is focused on the presentation of a possibility to further develop pumped storage plants by integrating them into old mines as a subsurface pumped storage plant. The technical approach to such a subsurface pumped storage plant with regard to its design in general and aspects of the realization in particular are shown respectively.*

### 1 Einleitung

Laut Einschätzungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in /1/ ist davon auszugehen, dass der Beitrag der Windenergie an der gesamten Energieerzeugung aus den Quellen der erneuerbaren Energien weiter stark anwachsen wird.

/1/ sieht den Schwerpunkt dieser Entwicklung vor allem im Bereich von Offshore Windparks in der Nord- und Ostsee, wo sehr gute Bedingungen für den Betrieb von Windenergieanlagen vorliegen. Aus der witterungsbedingt stark variierenden Energieerzeugung aus Windenergie und somit auch dem differierendem Umfang an in die Übertragungsnetze eingespeister Energie resultieren erhöhte Ansprüche an die jeweiligen Übertragungsnetze. Es bedarf hier des Einsatzes von Speichertechnologien, die beispielsweise in sehr kurzer Zeit bei Energieüberschuss durch Windenergieeinspeisung ins Übertragungsnetz in der Lage sind, große Mengen an Energie aus dem Netz herauszunehmen und zwischenzuspeichern und im Falle eines Energieengpasses kurzfristig Spitzenlastenergie bereitzustellen. Für die benannten Anforderungen kommen vor allem Speichertechnologien wie PSW und Druckluftspeicher in Frage, jedoch bieten nach /2/ nur PSW die Möglichkeit als „Puffer“ für elektrische Energie in großem Umfang (größer ein Gigawatt über mehrere Stunden) zu fungieren und binnen sehr kurzer Anlaufzeiten elektrische Energie aufzunehmen oder zur Verfügung zu stellen.

**Bild 1** zeigt die schematische Darstellung eines PSW. In einem PSW wird die aus Schwachlastzeiten zur Verfügung stehende, überschüssige elektrische Energie genutzt, um ein Speichermedium (meist Wasser) aus einem tiefer in ein höher gelegenes Speicherbecken (Unter-/Oberbecken) zu pumpen. Bei stark gesteigener Energienachfrage in Spitzenlastzeiten wird das Speichermedium aus dem Oberbecken über die Druckleitung der Turbine zugeführt, dadurch in die Übertragungsnetze einspeisbare Energie erzeugt und von dort aus ins Unterbecken geleitet, wo es wiederum für einen späteren Pumpzyklus verfügbar ist.



**Bild 1:** Schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks (Quelle: [www.voith.de](http://www.voith.de))

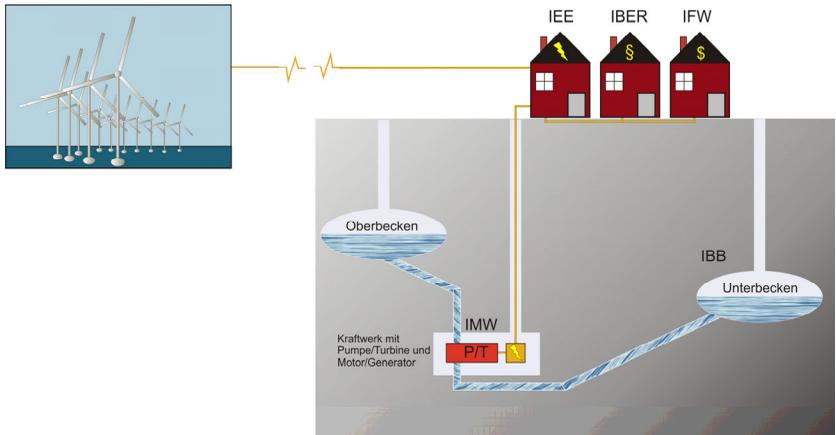
Neben der oben beschriebenen Möglichkeit der Energiezwischen- speicherung im Bedarfsfall können PSW auch genutzt werden, um die aus der fluktuierenden Einspeisung der beispielsweise Windenergie resultierenden verstärkten Schwankungen der Verbundnetzfrequenz zu regulieren, wodurch sie sich als ideale Technologie im Zusammen- hang mit Windenergieanlagen darstellen. Mit Hinblick auf die Sit- uation in Deutschland, in der der Erzeugungsschwerpunkt der Windenergie im Norden, die Verbrauchsschwerpunkt jedoch in der Mitte und im Süden liegen, bieten sich PSW-Standorte „dazwischen“ an um eine zusätzliche Belastung der Übertragungsleitungen und Lei- tungsverluste durch lange Übertragungsdistanzen zu vermeiden. Eine Problematik hinsichtlich des Neubaus von PSW, die entsprechend po- sitioniert als Zwischenspeicher für Windenergie fungieren können, ist die geringe Akzeptanz bezüglich der Realisierung solcher Projekte mit Hinblick auf die Eingriffe in die Umwelt, beispielsweise durch die Speicherbeckenschaffung. Eine Lösungsmöglichkeit, dem oben dar- gelegten Dilemma zu entrinnen, ist die Integration von PSW in alte, stillgelegte Bergwerke, die somit noch eine Nachnutzung erfahren könnten.

## **2 Projekt und Projektpartner**

Im Rahmen der durch das BMU geförderten Projektstudie „Windener- giespeicherung durch die Nachnutzung stillgelegter Bergwerke“ widmen sich Forscher der TU Clausthal und des Energieforschungs- zentrums Niedersachsen (EFZN) unter Koordination des EFZN der Entwicklung eines Konzepts zur Nachnutzung stillgelegter Bergwerke durch die dortige Integration eines untertägigen PSW. An diesem Pro- jekt sind folgende Partner beteiligt:

- Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN)
- TU Clausthal:
  - Institut für Elektrische Energietechnik (IEE)
  - Institut für Bergbau (IBB)
  - Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (IGMC)
  - Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER)
  - Institut für Wirtschaftswissenschaften (IFW)
  - Institut für Maschinenwesen (IMW)
- Voith AG (Voith Hydro Power Generation, VH)
- Harz Energie GmbH & Co. KG

- OECOS GmbH
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG).



**Bild 2:** Schematische Darstellung eines untertägigen Pumpspeicherkraftwerks

Ziel der Projektstudie ist es, das verfügbare Potential für die Realisierung untertägiger PSW (s. **Bild2**) in einem stillgelegten Bergwerk in Deutschland abzuschätzen. Dazu wurde im Rahmen der Projektstudie ein Kriterienkatalog unter Berücksichtigung der Aspekte aus den jeweiligen, oben benannten, Teilgebieten erstellt und auf Bergbauregionen in Deutschland angewandt. Neben der Abschätzung des Potentials wurde hierbei ein erster möglicher Pilotstandort ermittelt und die bislang vorliegenden Erkenntnisse und Kriterien unter dem Fokus einer ggf. späteren Realisierung eines untertägigen PSW in dieses Modellbergwerks genutzt und erweitert. Im Folgenden werden die Ziele, das Vorgehen bei der Maschinensatzauslegung und erste Ergebnisse aus dem Teilbereich Maschinenbau, bearbeitet durch das IMW, vorgestellt.

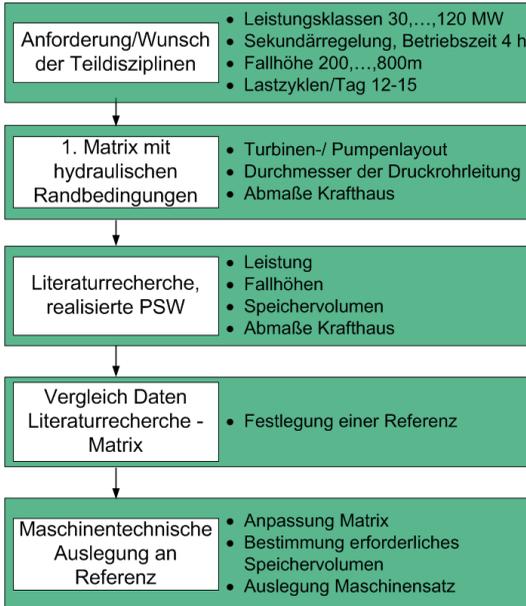
## 2.1 Ziele des Teilprojekts

Ziel des IMW, in Zusammenarbeit mit der Voith AG, im Rahmen dieses Teilprojektes ist die Erstellung eines maschinentechnischen Konzepts für ein untertägiges PSW. Hierzu gehören die Maschinenauslegung, die Simulation der Gesamtanlage mit Hinblick auf die Pumpe und Turbine sowie die Berücksichtigung besonderer Erfordernisse, die z. B. die Instandhaltung oder die Installation der Maschinensätze un-

ter Tage betreffen. Im weiteren Verlauf wird v. a. das Vorgehen zur Maschinenauslegung sowie erste Ergebnisse vorgestellt.

## 2.2 Maschinenauslegung – Vorgehen und Ergebnisse

Das Vorgehen zur Erstellung des maschinentechnischen Konzeptes zeigt **Bild 3**



**Bild 3:** Vorgehen des IMW im Projekt

Zu Beginn wurden als Basis für die spätere Konzepterstellung die Anforderungen und Wünsche der anderen Teildisziplinen an den Bereich Maschinenbau zusammengetragen. Anschließend erfolgte durch die Voith AG eine erste Auslegung unter hydraulischen Randbedingungen, die Daten zum Pumpen- und Turbinenlayout, der Geometrie der Druckrohrleitung und den überschlägigen Abmaßen der benötigten Maschinenkaverne abhängig von der Fallhöhe, der zu erzielenden Maschinensatzleistung und der Art des Maschinensatzes enthält. Um einen Überblick über den Stand der Technik von bereits realisierten PSW und deren Randbedingungen zu erlangen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, bei der u. a. Daten zu den hyd-

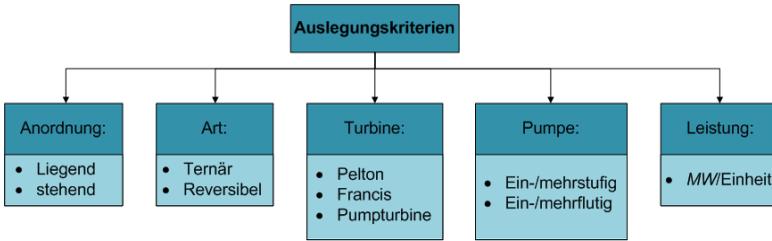
raulischen Randbedingungen erfasst wurden. Im nächsten Schritt erfolgte der Vergleich der Daten aus der „Praxis“ in Form der Literaturrecherche mit denen der Auslegungsmatrix, um eine Referenz für das weitere gemeinsame Vorgehen bei der Auslegung zu definieren. Entsprechend den Überlegungen fiel die Wahl auf das PSW Säckingen (s. Bild4).

	<b>Leistung Turbinenbetrieb [MW]</b>	<b>Mittl. Fallhöhe [m]</b>	<b>Speichervolumen [Mio. m³]</b>	<b>Kaverne L x B x H [m]</b>
Schluchseewerk Säckingen	360 (4 x 90)	400	2,1	161 x 23 x 34
Waldeck II	480 (2 x 240)	300	4,6	100 x 34 x 50
Goldisthal	1060 (4 x 265)	300	12	137 x 26 x 49

Hydraulic Boundary conditions				Turbine layout (acc. to Quicksizing)				House planning (acc. to HRW article 5e)			
Project Name	Turbine Type	Turbine Output (MW)	Head H (m)	turbine diameter	diameter Main Inlet Valve (MIV)	turbine flow	diameter penstock / turbine	unit spacing	PH length (w service bay)	PH width	PH height
3	reversible	30	400	1,68	0,76	8,43	1,20	4,50	18,00	9,00	26,00
11	reversible	90	400	2,81	1,30	25,28	2,07	5,80	23,20	11,60	36,00
12	reversible	129	400	2,95	1,40	33,71	2,39	6,30	25,90	11,60	41,00

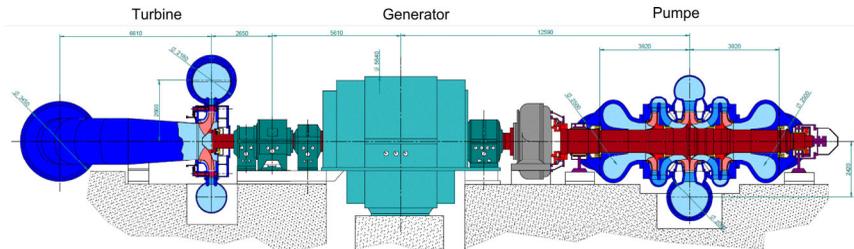
**Bild 4:** Vergleich der Daten aus der Literaturrecherche mit denen der Auslegungsmatrix (Quelle unteres Bild: Voith)

Somit lagen Randbedingungen z. B hinsichtlich der avisierten Leistung der Maschinensätze und der mittleren Fallhöhe für das weitere Vorgehen bei der Erstellung eines maschinentechnischen Konzepts für ein „ideales“, untertägiges PSW bzw. dessen Maschinensatz vor. Die Auslegung des Maschinensatzes erfolgte in Abhängigkeit der örtlich gegebenen Randbedingungen (wie beispielsweise der mittleren Fallhöhe) sowie Anforderungen, die aus der zukünftigen Betriebsweise des PSW resultieren (Ausgleich von Lastschwankungen, Bedarfschwankungen oder Bereitstellung von Spitzenlastenergie). Die zur Verfügung stehenden Kriterien für die Maschinenauslegung zeigt Bild 5



**Bild 5:** Kriterien für die Maschinenauslegung

Unter Berücksichtigung der in **Bild 3** benannten und aus dem Referenzkraftwerk bekannten Randbedingungen einer mittleren Fallhöhe von 400 m, einer Betriebszeit von 4 h, einer Druckrohrleitungsgeschwindigkeit von 7,5 m/s einem avisierten Wirkungsgrad von 0,91 im Turbinenbetrieb sowie 10-12 Lastwechseln pro Tag ergibt sich als Resultat der Auslegung der Maschinensatz aus **Bild 6**.



**Bild 6:** Ausgelegter Maschinensatz (Quelle: Voith)

Es handelt sich um einen ternären Maschinensatz, gekennzeichnet durch die getrennte Anordnung von Pumpe und Turbine, der eine schnelle Reaktion auf Lastwechsel ermöglicht und einen Kurzschlussbetrieb zulässt. Aus Gründen des geringeren Raumbedarfs wurde eine liegende Maschinenanordnung gewählt. Aus der Wahl eines ternären Maschinensatzes und der Berücksichtigung einer mittleren Fallhöhe von 400 m resultiert die Nutzung einer Francis-Turbine und einer zweistufig, zweiflutigen Pumpe. Jeder Maschinensatz ermöglicht eine Leistung von 90 MW im Turbinenbetrieb. Die Leistung ist somit im mittleren Leistungsbereich angesiedelt. Für diese Leistungsklasse spricht, dass es Potential zur Vergrößerung oder Reduzierung der Leistung gibt. Die Gesamtleistung des PSW wird durch die Anzahl der verwendeten Maschinensätze bestimmt. Für ein PSW mit dem oben beschriebenen, detailliert ausgelegten Maschinensatz wird entspre-

chenden Berechnungen ein Druckrohrleitungsdurchmesser von 2,07 m, ein erforderliches Speichervolumen von mindestens 0,36 Mio. m<sup>3</sup> und eine Kavernengröße von 50x21x29 m (L x B x H) benötigt.

### **3 Anwendung auf ein Modellbergwerk**

Die bisherigen, allgemeinen Erkenntnisse wurden weiterhin auf ein Modellbergwerk angewendet. Problematisch erschien zunächst die Fallhöhe von 600 m. Es zeigte sich, dass durch eine tendenzielle Verkleinerung der Maschinenkomponenten durch die im Vergleich zur Auslegung größere Fallhöhe der ausgelegte Maschinensatz auch hier genutzt werden kann. Aus der Annahme der Nutzung eines Maschinensatzes und daher einer Gesamtleistung von 90 MW resultierte ein Druckrohrleitungsdurchmesser von 1,69 m, ein erforderliches Speichervolumen je Becken von 0,24 Mio. m<sup>3</sup> bei einer Betriebszeit von 4 h bzw. 0,12 Mio. m<sup>3</sup> bei einer Betriebszeit von 2 h und eine Kaverne der Abmaße (L x B x H) von 50x21x29 m für den ausgelegten Maschinensatz.

### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen des Artikels wurden neben dem allgemeinen Projekthintergrund und der Vorstellung der Projektpartner vor allem die Herangehensweise an die Erstellung eines maschinentechnischen Konzepts für ein untertägiges PSW sowie erste Ergebnisse vorgestellt. Daneben zeigte sich bei der Betrachtung eines realen Modellbergwerks, dass die bislang gewonnenen Erkenntnisse auch auf dieses übertragbar sind und aus maschinenbauerischer Sicht die Realisierung eines untertägigen PSW möglich ist.

### **5 Literatur**

- /1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2007, Erneuerbare Energien in Zahlen- nationale und internationale Entwicklung, Berlin
- /2/ Bard, J., 2006, Windkraft, Wasserkraft und Meeresenergie-Technik mit sozialer, ökologischer und ökonomischer Akzeptanz, in Forschung und Innovation für Nachhaltigkeit in der Stromerzeugung, Themenheft 2006, ForschungsVerbund Sonnenenergie