

STE Research Report

08/2011

Baufumé, Sylvestre, Bongartz, Richard, Markewitz, Peter

Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke
– Eine Kurzsynopse –

Institut für Energie- und Klimaforschung
Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke

– Eine Kurzsynopse –

Sylvestre Baufumé, Richard Bongartz, Peter Markewitz

Forschungszentrum Jülich, Institute of Energy and Climate Research - Systems Analysis and Technology Evaluation (IEK-STE), D-52425 Jülich, Germany

Executive Summary

The ongoing increase of intermittent renewable electricity generation is a significant challenge for future electricity systems, both on the production and on the grid sides. Within this context, energy storage facilities are increasingly required to ensure a secured and uninterrupted system operation. To date, Pumped Hydro Energy Storage (PHES) is the only cost effective technology for large scale electricity storage. The potential for additional conventional PHES in Germany is limited with regard to the necessary natural drop height and the associated land use – leading to poor public acceptance. This potential could be increased by using man-made structures having drop heights. This short report – based on a literature review – lists the various concepts currently under consideration in Germany to gain additional PHES capacity with limited footprint and dependency on the actual surface relief. Possible options would be the subsequent use of former underground and open cast mining locations to site the lower water reservoir underground (and possibly the upper one) – thus, forming Underground Pumped Hydro Energy Storages (UPHES). Some projects also aim at using abandoned mining waste dumps or even propose to build a full artificial relief for purpose.

Each of the envisaged concepts is briefly presented with its respective benefits and drawbacks and with the potential estimated by the research actors involved at the moment. Expectable legal and environmental restrictions on the permitting process are also pointed out. To our knowledge, proposed options rely on state-of-the-art technics but current studies are not detailed enough to assess the economic implications of the proposed technical options. Therefore, more applied Research and Development (R&D) should be performed to refine potential and cost estimates on a case-by-case basis. On the short term, the most promising option seems to be the reuse of depleted underground mining sites. Finally, it is noted that PHES and their underground variants would be one part of the mix of solutions required to meet the high capacity energy storage needed in a near future.

Keywords

Bergwerk, Energiespeicher, PSW, Pumpspeicher, Tagebau, Unterflur-Pumpspeicher, UPW

Energy storage, Open cast mining, Pumped hydro energy storage (PHES), Underground mining, Underground pumped hydro energy storage (UPHES)

Inhalt

I	Einleitung	1
II	Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland	1
III	Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke	4
III.1	Untertagekonzept	4
III.2	Tagebaukonzepte	8
III.3	Küstenkonzept	10
III.4	Sonstige Konzepte (nicht unterflurig)	11
IV	Rechtliche Aspekte, Umweltauswirkungen	13
V	Energiewirtschaftliche Einordnung	14
VI	Kosten, Wirtschaftlichkeit	15
VII	Forschungsaktivitäten, Akteure und möglicher F&E-Bedarf	17
VIII	Zusammenfassung	19
IX	Literatur	22

I Einleitung

Der Ausbau fluktuierender – erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung erfordert zusätzliche Maßnahmen wie z.B. den Ausbau der Netzinfrastruktur sowie den Ausbau geeigneter Speicherkapazitäten. In ihrem Energiekonzept vom 28. September 2010 sowie dem Eckpunktepapier vom 6. Juni 2011 unterstreicht die Bundesregierung die Notwendigkeit dieser Maßnahmen und beabsichtigt u.a., die verfügbaren Potenziale für Pumpspeicherkraftwerke (auch Pumpspeicherwerke genannt, PSW) im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zu erschließen. Hierunter sind auch Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke (auch Unterflur-Pumpspeicherwerke, UPW) zu verstehen. In der vorliegenden Kurzsynopse, die auf vorliegende Untersuchungen basiert, wird zunächst die konventionelle Bauweise von Pumpspeicherkraftwerken und deren Nutzungsstand in Deutschland kurz behandelt. Nachfolgend werden die prinzipiell möglichen Arten von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken, deren Vor- und Nachteile sowie mögliche Potenziale dargestellt. Daran schließt sich ein qualitativer Kurzabriss über die rechtlichen Aspekte und Umweltauswirkungen, über die mögliche grundsätzliche energiewirtschaftliche Bedeutung, sowie über Kosten an. Abschließend werden die bereits angelaufenen Forschungsaktivitäten, die daran beteiligten Akteure, sowie der mögliche F&E-Bedarf aufgezeigt.

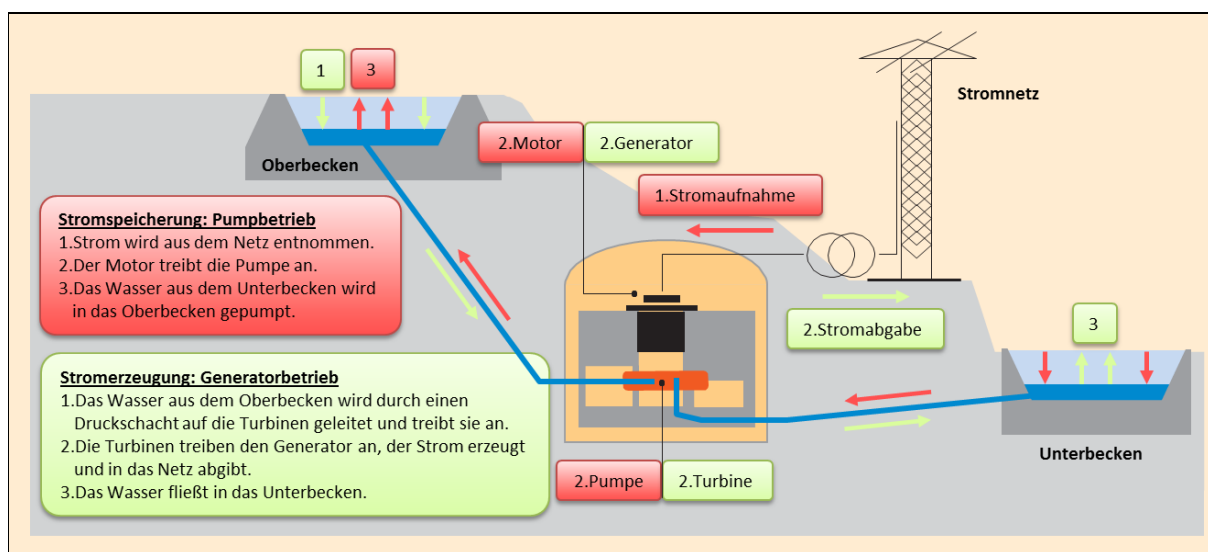
II Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland

Prinzip

Nach heutigem Stand der Technik, sind Pumpspeicherkraftwerke die einzige wirtschaftliche Lösung zur indirekten Speicherung von elektrischer Energie über längere Zeiträume. In PSW wird elektrische Energie in hydraulische potenzielle Energie umgewandelt und solange gespeichert, bis sie im Bedarfsfall wieder zu Strom umgewandelt wird.

Das Kreislaufprinzip ist in Abb.1 dargestellt. Im Pumpbetrieb wird Wasser mit Hilfe von Strom in das Oberbecken gepumpt. Im Generatorbetrieb wird es auf Turbinen geleitet und befüllt wieder das Unterbecken. Da die Turbinen mit Generatoren gekoppelt sind, wird in dieser Phase Strom erzeugt. Der heute erreichbare Gesamtwirkungsgrad von 80 % liegt weit über dem anderer Speichertechnologien. Vom eingesetzten Strom gehen durch die Umwandlungskette somit letztlich 20 % verloren. Obwohl bei PSW Wasserkraft eingesetzt wird, kann die Stromerzeugung nicht als regenerativ bewertet werden, da sie durch Stromverbrauch erfolgt. Nur wenn ein natürlicher Zufluss in das Oberbecken gegeben ist, wird ein Teil des Stroms regenerativ erzeugt.

Abb. 1: Funktionsschema von Pumpspeicherkraftwerken



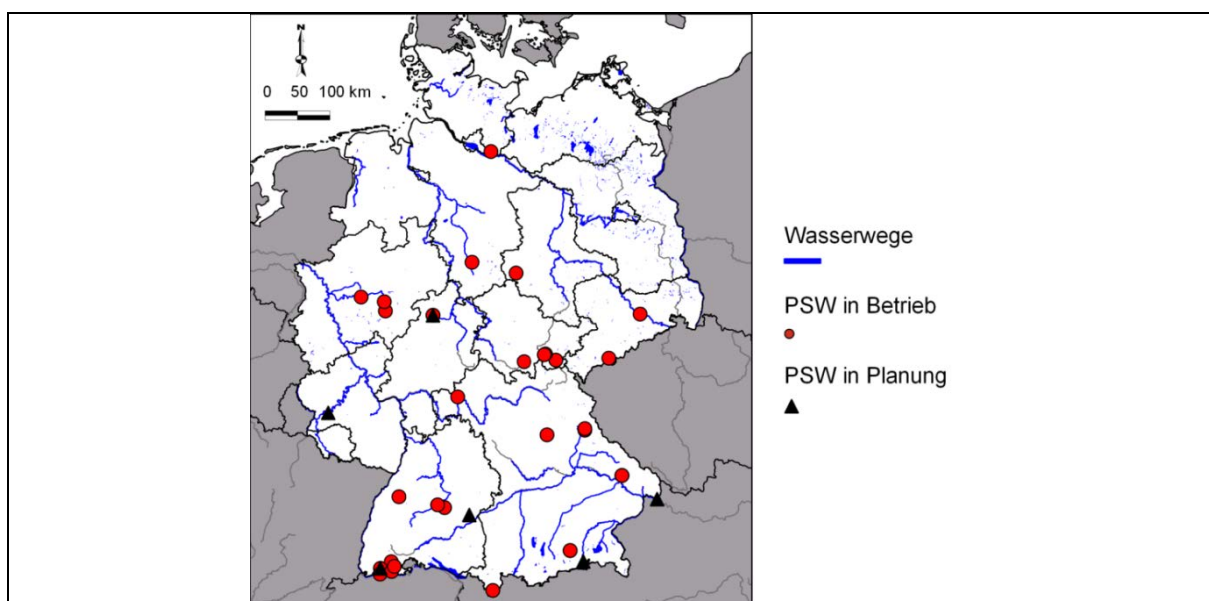
Quelle: nach [DENA, 2010b]

IEK-STE 2011

Stand in Deutschland

In Deutschland wurde das erste Pumpspeicherkraftwerk erstmals 1908 verwirklicht [Giasecke & Mosonyi, 2009]. Zurzeit befinden sich 32 solcher Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 6,5 GW in Betrieb. Abb. 2 zeigt die unterschiedliche Verteilung der vorhandenen und geplanten Standorte. Mehr als 80 % der installierten Leistung entfällt auf die Bundesländer Baden-Württemberg, Thüringen, Sachsen und Bayern.

Abb. 2: Bestand von Pumpspeicherkraftwerken in Deutschland und Projekte



Quelle: [BKG, 2010, Anderer et al., 2010]; eigene Datenbank

IEK-STE 2011

In Tab. 1 sind die wesentlichen Kenndaten des deutschen PSW-Parks aufgeführt. Etwa zwei Drittel dieser Pumpwasserspeicherkraftwerke besitzen keinen natürlichen Zufluss (mehr als 80% der installierten Leistung).

Tab. 1: Stand des deutschen Pumpspeicherkraftwerksparks (März 2010)

Pumpspeicherkraftwerke in Betrieb	Deutschland	Nordrhein-Westfalen
Anzahl (#)	32 ^a	3 (9,4%)
Installierte Leistung (MW)	ca. 6.540	300 (4,6%)
Bandbreite Leistung (MW/Anlage)	0,5 – 1.060	7,4 - 153
Durchschnittliches Alter ^b (Jahre)	50	46
Durchschnittliche Effizienz (%)	69	72
Kapazität (GWh)	40 – 50	8 - 9
Jahreserzeugung ^c über alle Zyklen (GWh)	6.413 ^d	261 (4%)

^a Inklusiv ein Kraftwerk (ca. 5 MW), das – aus wirtschaftlichen Gründen – zurzeit nur als Laufwasserkraftwerk betrieben wird

^b Modernisierungen nicht berücksichtigt

^c Durchschnitt 1998-2008

^d Davon ca. 10% aus natürlichem Zufluss (Rein regenerativ) und 90% aus Pumpspeicherbetrieb. Zum Vergleich: Laut [BMW, 2011], gab es in Deutschland – in dieser Periode – eine durchschnittliche Bruttostromerzeugung von ca. 598.000 GWh pro Jahr. Davon wurden ca. 26.500 GWh durch Wasserkraft erzeugt (inkl. PSW mit und ohne natürlichem Zufluss).

Quelle: [Anderer et al., 2010]; eigene Datenbank

IEK-STE 2011

Planung und weiteres Potenzial

Heute sind an den meisten Standorten, die natürliche Gegebenheiten für PSW bieten und an denen diese leicht zu errichten sind, bereits PSW errichtet. Es gibt nur noch ein begrenztes Potenzial an neuen Standorten. Die Erweiterung vorhandener Standorte ist sehr begrenzt.

Derzeit sind nur 6 neue Projekte sowie eine Erweiterung mit einer Leistung von insgesamt 2.400 bis 2.700 MW geplant. Auf das PSW Atdorf (BW) entfallen alleine bis zu 1.400 MW. Die anderen Projekte liegen im 300 MW-Bereich.

Die meisten der in der Planung befindlichen Anlagen erfordern große Eingriffe in die natürliche Landschaft, so dass erhebliche Akzeptanzprobleme bestehen und eine Realisierung in einigen Fällen fraglich ist.

III Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke

Überlegungen zu unterflurigen Pumpspeicherkraftwerken existieren bereits seit einigen Jahrzehnten. Ihre Errichtung ist aber bislang nicht realisiert worden. Am weitesten fortgeschritten waren Planungen für ein derartiges PSW in Mt. Hope, New Jersey, USA, dessen Bau 1996 beginnen sollte, infolge der Veränderungen auf dem amerikanischen Energiemarkt aber verschoben wurde. Das Unterbecken sollte in einer in einem ehemaligen Erzbergwerk auszuhöhlenden Kaverne in 762 m Tiefe errichtet werden [Giesecke & Mosonyi, 2009].

Im folgenden Abschnitt werden die aktuell vorliegenden Konzeptideen zur möglichen Errichtung von Pumpspeicherkraftwerken in flachen Regionen Deutschlands beschrieben. Diese umfassen Untertage-, Tagebau- und Haldenkonzepte. Neben einer Kurzbeschreibung der drei Konzepte wird soweit möglich – auf Versorgungsaufgaben, Vor- und Nachteile sowie Potenziale eingegangen. Der Fokus liegt insbesondere auf dem Untertage-Konzept. Dessen Potenzial wird in [Beck et al., 2010] als bedeutend bezeichnet.

III.1 Untertagekonzept

Die – nicht ganz neue – Idee Pumpspeicherkraftwerke Untertage in stillgelegten Bergwerken zu errichten, wird derzeit vor allem in Deutschland vor dem Hintergrund des zunehmenden Bedarfs an Speicherkapazität neu aufgegriffen. Forschungsaktivitäten hierzu laufen an der Universität Duisburg/Essen und Bochum [Schreiber et al., 2010] sowie an der Technischen Universität Clausthal und dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) [Beck et al., 2010].

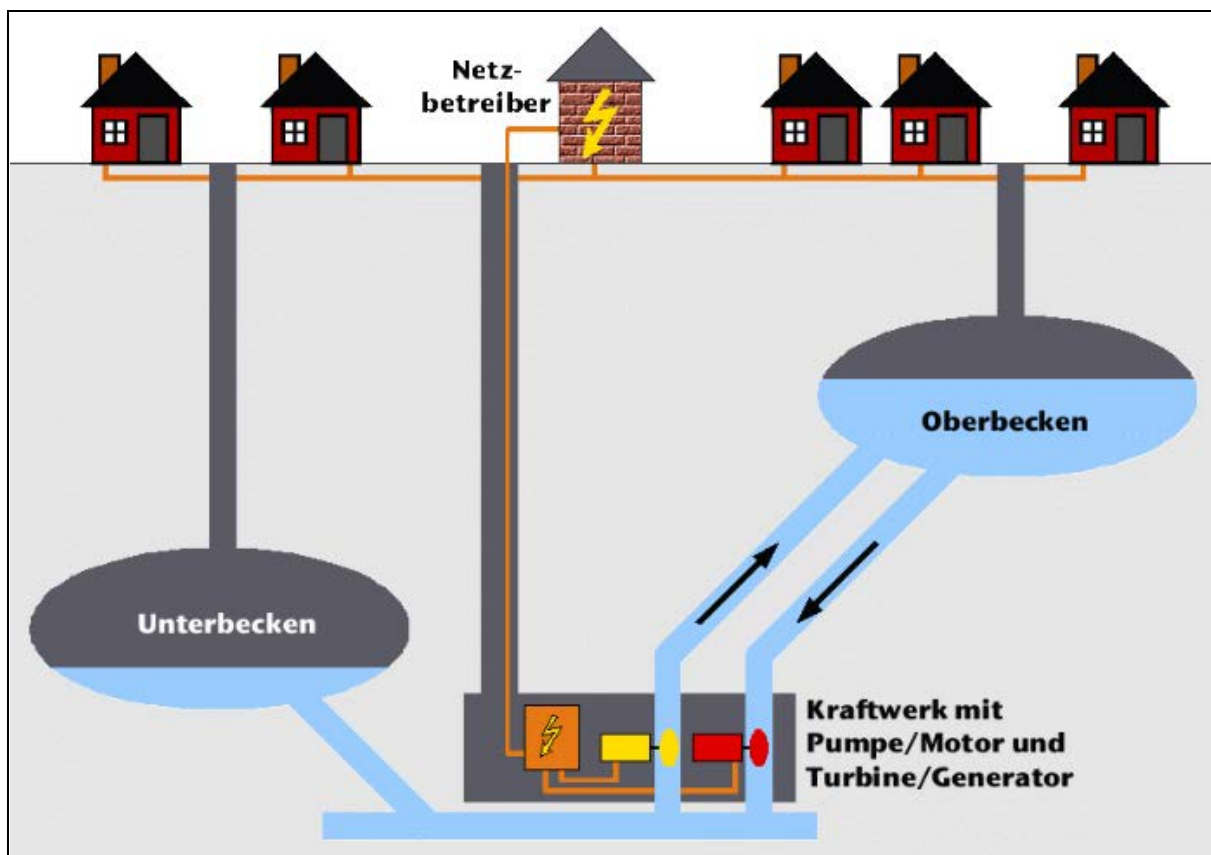
Hauptgegenstand der Forschungsaktivitäten ist die Untersuchung der Nutzungsmöglichkeit stillgelegter Bergwerke durch Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke. Weitere Optionen bilden die Tagebauvariante (Kapitel III.2) und die Küstenvariante (Kapitel III.3).

Das Untertagekonzept sieht vor, in ausgedienten Schachtanlagen Wasser aus einem Oberbecken über Schächte einer auf tiefer Sohle befindlichen Turbinen/Generatoranlage zuzuführen, um bei Bedarfsspitzen Strom zu produzieren. Das abströmende Wasser wird in einem Unterbecken aufgefangen. Die Rückförderung mittels Pumpe erfolgt zu Schwachlastzeiten. Abb. 3 zeigt ein Prinzipbild eines Pumpspeicherkraftwerks unter Tage.

Der Aufbau eines solchen Untertagesystems erfordert eine Auskleidung von Grubenschächten und -strecken mit einem Rohrsystem. Ober- und Unterbecken erfordern für die Bespeisung Entlüftungsschächte. Grubenstrecken z.B. in der obersten und untersten Sohle dienen zur Aufnahme der beiden Speicherbecken. Das offene oder gekapselte Oberbecken ist bei ausreichend vorhandener Geländefläche auch oberirdisch anlegbar. Das Unterbecken kann bei wasserdichten Gesteinsschichten direkt in der untersten Sohle angelegt werden. Das Wasser muss

dann ggfs. von Verunreinigungen gesäubert werden. Weitere Varianten sind miteinander verbundene Beton-, Metall- oder Kunststofftanks [Giebel, 2010] sowie verzweigte Rohrsysteme. Fall- und Füllleitungen sind Druckrohrleitungen. Die eigentlichen Kraftwerkskomponenten wie Turbine, Förderpumpen und Generator befinden sich in einer untertägigen Maschinenkaverne. Sie werden über den Zentralschacht eingebracht. [Beck et al., 2010, Schreiber et al., 2010].

Abb. 3: Prinzipbild eines Pumpspeicherkraftwerks unter Tage



Quelle: [Beck et al., 2010]

IEK-STE 2011

Potenzial

Nach Angaben in [Beck et al., 2010] sind in Deutschland durch untertägigen Bergbau etwa 150.000 Tagesöffnungen alter oder aktueller Bergwerke vorhanden, davon ca. 70.000 allein in Nordrhein-Westfalen (NRW). Die Zahl der zugehörigen Bergwerke wird auf etwa 40.000 geschätzt, die sich auf verschiedene Bergbauregionen mit z.T. verschiedenen Rohstofflagerstätten verteilen. Allerdings erfüllt nur ein kleiner Teil dieser Bergwerke die Anforderungen zur Errichtung eines PSW unter Tage.

Für die Bewertung der vorhandenen Regionen wurden Kriterien wie Geologie, Alter der Bergwerke, Streckenquerschnitte, Möglichkeiten zur Erweiterung von Grubenhohlräumen, Gegebenheiten Übertage, berücksichtigt. Drei Regionen wurden

als besonders geeignet eingestuft (Erzgebirge, Harz, Siegerland/Lahn-Dill-Gebiet), drei weitere als bedingt geeignet (Thüringer Wald, Mansfelder Land und Schwarzwald). In den genannten Regionen werden/wurden Eisenerze und/oder sonstige Metallerze abgebaut.

Bei der Standortauswahl wurden folgende grundlegende Einschränkungen beachtet [Beck & Schmidt, 2011]:

- Schutz höffiger oder/und noch bauender Lagerstätten (BBergG).
- wasserempfindliches oder nicht standfestes Gebirge (z.B. Tonbergbau).
- Bereiche, die ein erhöhtes Umweltrisiko begründen (Untertagedeponien, ionisierende Strahlung, Verbindung zu großen Grundwasserleitern).
- Bergwerke mit potenziellen Fallhöhen kleiner als 250 m.

Nicht berücksichtigt wurden zudem Kavernen in Salzgesteinen, die aus gebirgsmechanischen Gründen nicht vollständig entleert werden dürfen (stützender Innendruck), sowie Bergwerke, bei denen nach der Stilllegung noch Methan auftritt (Kohlebergbau).

In die Kategorie der zurzeit nicht verfügbaren Regionen wurde u.a. das Ruhrgebiet eingestuft. Eine spezielle Begründung liegt hierfür nicht vor. Für das Ruhrgebiet könnte gelten, dass dort entweder noch Bergbau stattfindet, oder Lagerstätten noch höffig sind, oder/und die Gefahr von Methanaustritt besteht, die ggfs. einen Schlagwetterschutz für die Einrichtungen erfordern würde.

Nach einer ersten Schätzung von [Beck et al., 2010] lassen die oben genannten 6 Bergwerksregionen etwa 100 gut oder bedingt geeignete Standorte mit einer Mindestleistung von 100 MW_{el} und einer Volllastbetriebszeit von 2 h erwarten. Daraus resultiert eine Speicherleistung von insgesamt 10 GW und ein Speicherinhalt von 20 GWh.

Zum Vergleich: In Deutschland sind 32 herkömmliche Pumpspeicherkraftwerke mit einer kumulierten Leistung von 6,5 GW installiert. Die Speicherkapazität beträgt ca. 40 GWh (siehe Kapitel II).

Vorteile

In den vorliegenden Forschungs- und Konzeptstudien [Beck et al., 2010, Schreiber et al., 2010] werden für die Nutzung stillgelegter Bergwerke folgende Vorteile gegenüber Neustandorten über Tage genannt:

- Die Nutzung stillgelegter Bergwerke ermöglicht auch im Flachland Pumpspeicherkraftwerke mit großen Fallhöhen.
- Der Flächenverbrauch und die Auswirkungen auf die Umwelt beschränken sich auf ein Minimum. Selbst das Oberbecken lässt sich unterflurig errichten.

- Die Schächte und Hauptstrecken der Bergwerke wurden für die Rohstoffgewinnung auf längerfristige Nutzungsdauern ausgelegt. Der wirtschaftliche Aufwand für die Einbindung eines Unterflur-Pumpspeicherkraftwerks reduziert sich im Vergleich zu einem Neubau.
- Verglichen mit dem Abteufen eines neuen Schachtes, verringern sich bei der Nachnutzung die notwendigen Investitionen.
- Für die Wasserspeicherung können alte Grubenhohlräume nutzbar gemacht werden. Der Aufwand dafür ist gegenüber Neuauffahrungen in der Regel geringer. Die Kosten für das Neuauffahren eines unterflurigen Unterbeckens werden in [Tam et al., 1979] mit 30 % der Projektkosten veranschlagt.

Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke ermöglichen zudem die Nutzung geothermischer Energie. Die Wärme im Bergwerk beträgt in der Tiefe ca. 40 °C.

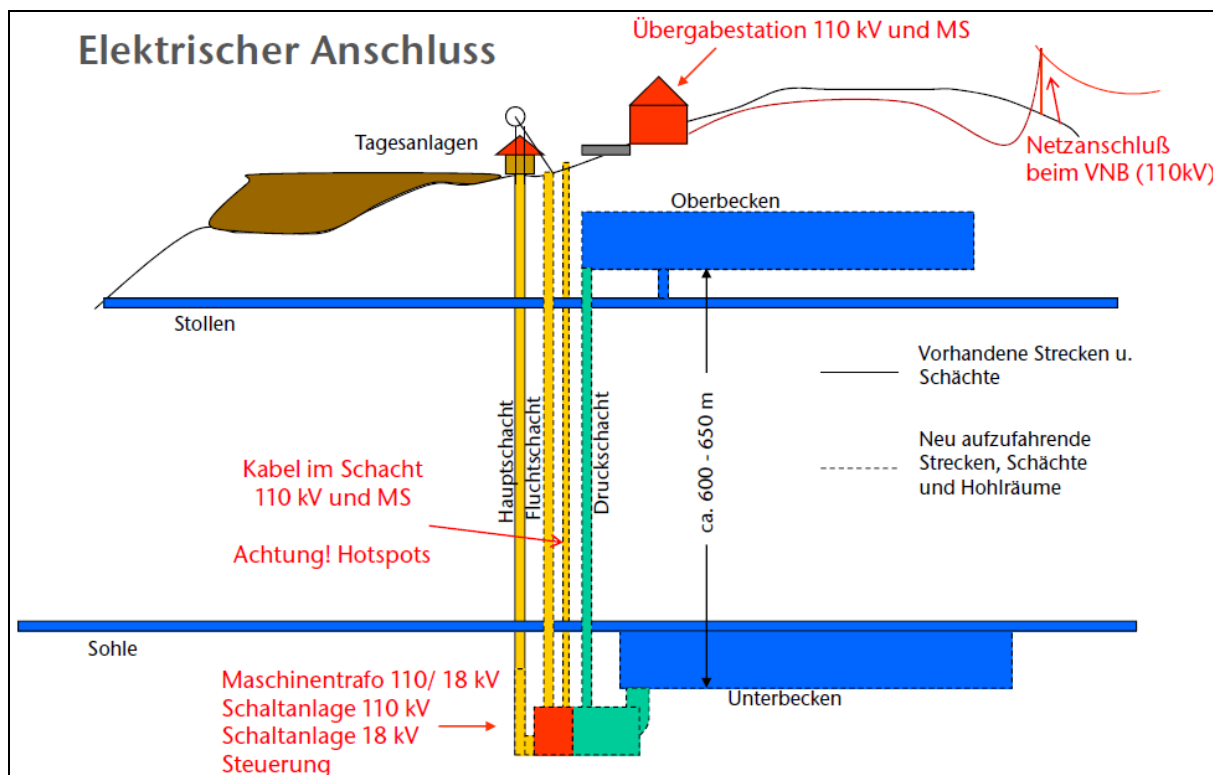
Nachteile bzw. Beschränkungen

Neben den Besonderheiten für die konstruktive Ausgestaltung der Gesamtanlage können sich insbesondere Nachteile bzw. besondere Anforderungen aus der unterflurig angeordneten Maschinenkaverne ergeben, beispielsweise im Zusammenhang mit dem Transport der Maschinenkomponenten (Turbine, Generator) über die zentrale Schachanlage, aber auch bei anderen Erfordernissen wie z.B. der Instandhaltung der Anlage. So liegt z.B. die Schachtweite für das in [Beck et al., 2010] betrachtete Modellkraftwerk bei 3,5 m. Der Durchmesser des benötigten Generators (90 MW) beträgt dagegen 4 m. Als mögliche Lösung wird ein untertägiger Zusammenbau genannt. Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung des Modellbergwerks. Für Steinkohlegruben des Ruhrgebiets finden sich in der Literatur Schachtweiten bis gut 7 m, die meisten liegen um die 5 m.

Die Zuverlässigkeit d.h. die Verfügbarkeit heutiger Pumpspeicherkraftwerke ist hoch. Allerdings wird in [Giesecke & Mosonyi, 2009] der Wartungs- bzw. Reparaturaufwand, insbesondere für den Maschinensatz, aber auch für Komponenten wie den Generatorleistungsschalter als groß bezeichnet. Dies wird mit Verschleißerscheinungen begründet, die sich infolge der hohen Anzahl von Betriebsartenwechsel (Wechsel zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb) und der resultierenden dynamischen, mechanischen sowie thermischen Belastungen ergeben. 2007 betrug die entsprechende Anzahl z.B. für das PSW Wehr 3.460, bei über 900 Betätigungen des Generatorleistungsschalters. Der Aufwand für die Durchführung von Wartungs- und Reparaturarbeiten ist für Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke wegen der im Vergleich zu herkömmlichen PSW ungünstigeren Arbeitsbedingungen und -verhältnisse vermutlich höher. Gegebenenfalls ist eine temporäre Entleerung der unterirdischen Systeme erforderlich [Schreiber et al., 2010].

Unterschiede gegenüber herkömmlichen PSW ergeben sich auch durch die vertikal anzuordnenden Fluchtstollen.

Abb. 4: Schematische Darstellung des Modellbergwerks aufgrund von realen Daten



Quelle: [Beck & Schmidt, 2011]

IEK-STE 2011

III.2 Tagebaukonzepte

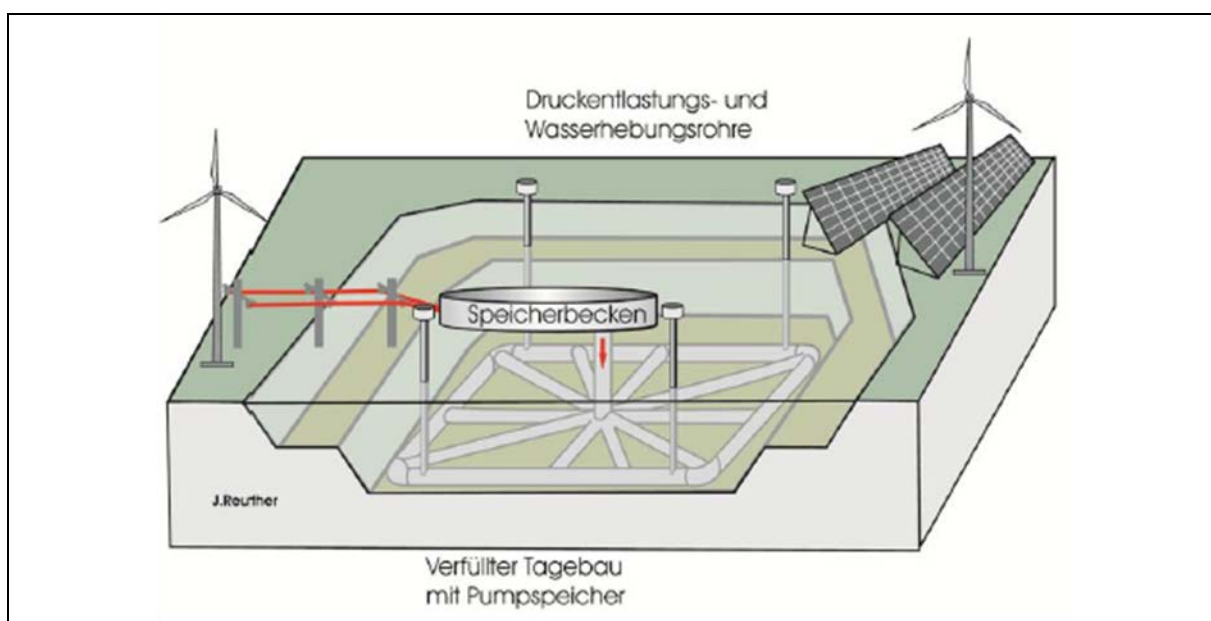
Eine weitere Möglichkeit PSW in flachen Geländeregionen zu errichten, ist die Nutzung offener Tagebaulöcher. Beim Tagebaukonzept werden zwei Varianten verfolgt, die Restlochnutzung bzw. die Nutzung eines laufenden Braunkohletagebaus (Unterflur-Konzept).

Die Idee der Nutzung offener Tagebaulöcher, wie sie vornehmlich bei der Förderung von Braunkohle anfallen wird u.a. in [Schreiber et al., 2010] und [Schulz, 2009b] verfolgt, wobei letzterer existierende Restlöcher, die vielfach bereits geflutet sind, nutzen möchte. Die konstruktive Gestaltung der Maschinengebäude in den geologisch instabilen Hangformationen von Tagebaurestlöchern wurde bereits zum Patent angemeldet [Schulz, 2009a].

Bei dem von [Schreiber et al., 2010] verfolgten unterflurigen Konzept, könnten bereits während der Abbauphase auf der untersten Sohle (bis zu 400 m unter Geländeoberkante) die benötigten Rohre verlegt, oder Hohlräume gebaut werden,

die vor der schrittweisen Abdeckung mit den Maschinenkomponenten bestückt werden. Abschließend erfolgt die vollständige Überdeckung mit Abraummaterial und an der Oberfläche die Errichtung des Oberbeckens (See). Abb. 5 zeigt das Schema eines Unterflur-Pumpspeicherkraftwerks in einem wiederverfüllten Tagebau, Abb. 6 zeigt das Konzept eines PSW in einem Tagebau-Restsee.

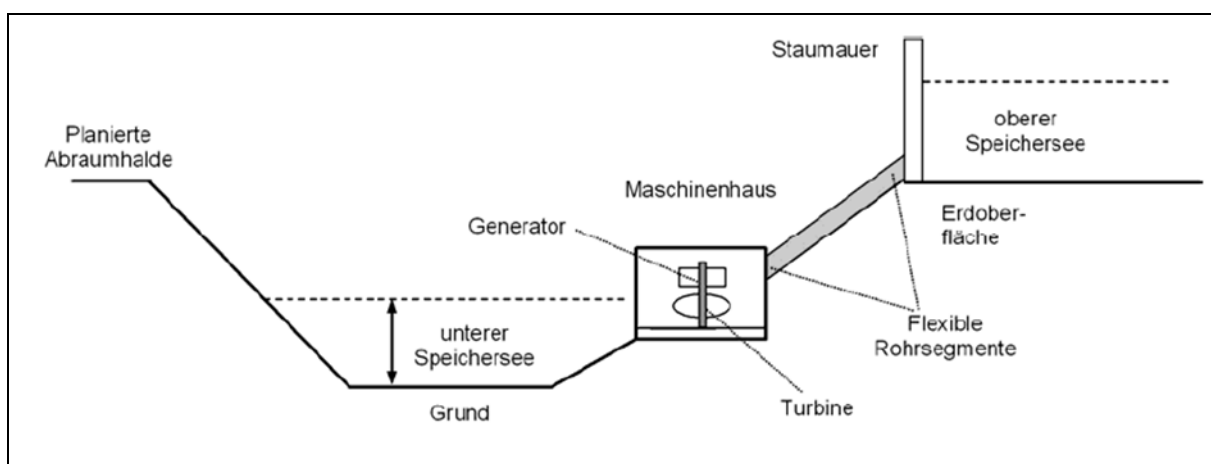
Abb. 5: Unterflur-Pumpspeicherkraftwerk in einem wiederverfüllten Tagebau



Quelle: [Schreiber et al., 2010]

IEK-STE 2011

Abb. 6: Pumpspeicherkraftwerk in einem Tagebau-Restsee



Quelle: [Schulz, 2009b]

IEK-STE 2011

Potenzial

In [Schulz, 2009b], wurde das Speicherpotenzial von Tagebaurestlöchern der ehemaligen Braunkohlereviere der Lausitz und der Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft abgeschätzt. Allein in diesen beiden Gebieten befinden sich 68 Restseen mit einer Gesamtfläche von ca. 26.500 ha und einem Volumen von gut 4.500 Mio. m³. Als Voraussetzungen für die Nutzung stillgelegter Tagebaue werden ein großes Speichervolumen, stabile geologische Bedingungen und Möglichkeiten für den Anschluss von einigen GW Leistung genannt.

Unter der Annahme, dass ein Zehntel der Tagebauseen für PSW geeignet sind, ergeben die Abschätzungen in [Schulz, 2009b] für eine durchschnittliche Fallhöhe von 80 m eine Speicherkapazität von 98 GWh.

Für die Variante, PSW in laufenden, d.h. noch offenen Tagebauen zu errichten, liegen bislang noch keine Potenzialabschätzungen vor. Ihr Potenzial dürfte aber im Hinblick auf die begrenzte Zahl bestehender Tagebaue niedriger liegen, allerdings lassen sich größere Fallhöhen (bis zu einigen 100 m im Rheinischen Revier) realisieren.

Vorteile

Die Errichtung von PSW in Tagebauen stellt für Regionen wie beispielsweise das Rheinland eine langfristige energiewirtschaftliche Nachnutzungsmöglichkeit dar, die auf Grund ihres Reliefs ansonsten nicht die erforderlichen Höhenunterschiede für die Errichtung herkömmlicher PSW aufweisen.

Ein weiterer Vorteil ist die in Tagebauregionen in aller Regel vorhandene sehr gute Anbindung an das Hochspannungsnetz, die den Bezug oder die Einspeisung der projektierten Leistung gewährleistet. Zudem werden von [Schulz, 2009b] verringerte Investitionskosten für die Tagebaurestlochvariante aufgrund der vorhandenen Restseen und evtl. ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren nach Bergrecht erwartet.

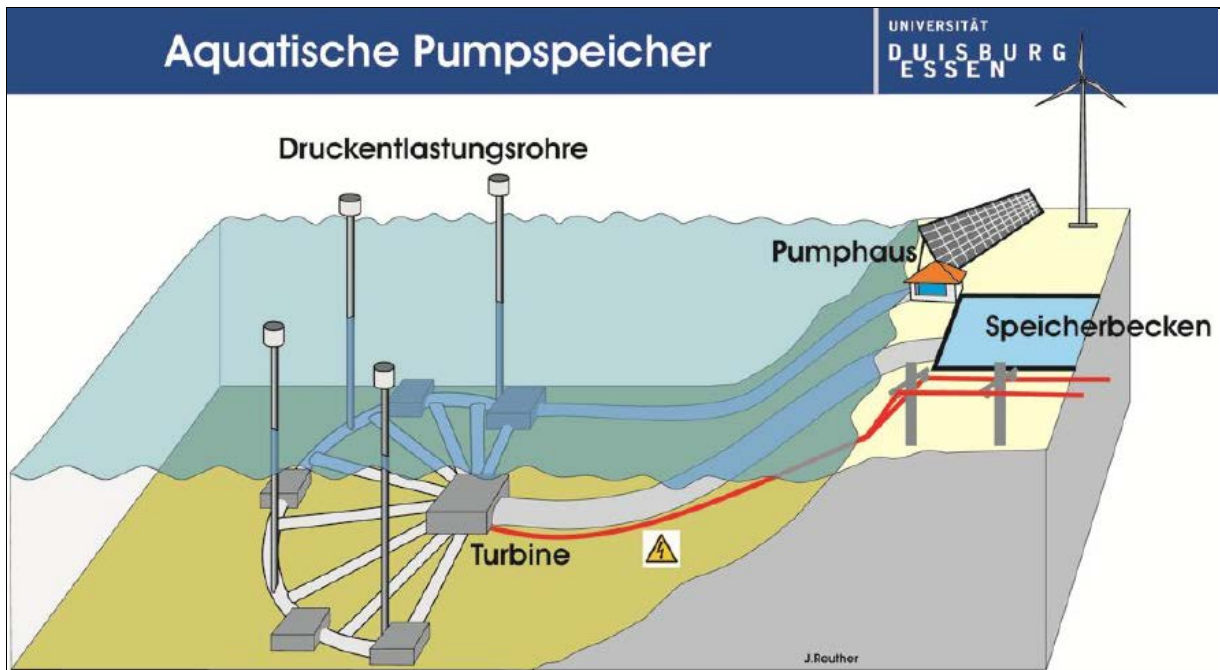
Aussagen zu **Nachteilen** der Tagebaukonzepte liegen bislang nicht vor. Allerdings wird in der Presse von einem zurückhaltenden Interesse der Energiekonzerne RWE und RAG berichtet. Dies wird damit begründet, dass beide Konzerne den Plan verfolgen, im Revier auf Abraumhalden Speicherbecken zu errichten (siehe Kapitel III.4). Angesprochen wird zudem ein möglicher Nutzungskonflikt, da Tagebaue nach der verpflichtenden Renaturierung als Freizeitlandschaft zur Verfügung stehen sollen und diese Nutzungsmöglichkeit mitunter eingeschränkt ist [Schramm, 2010].

III.3 Küstenkonzept

Eine für Deutschland wenig oder kaum geeignete Überlegung ist, auch in Küstenregionen mit einem steilen Relief zum Meeresbecken eine Art Unterflur-Pumpspeicherkraftwerk zu realisieren [Schreiber et al., 2010]. Das Unterbecken würde als fertiges Rohrsystem ausgeführt und in Küstennähe versenkt angeordnet

werden. Das Oberbecken würde als offenes Becken an Land errichtet werden. Abb. 7 zeigt ein Schema eines solchen Küsten-Pumpspeicherkraftwerks. Da dieses Konzept für Deutschland wegen der fehlenden Steilküsten nicht zum Tragen kommt, wird hierauf nicht weiter eingegangen.

Abb. 7: Schema eines Küsten-Pumpspeicherkraftwerks



Quelle: [Schreiber et al., 2010]

IEK-STE 2011

III.4 Sonstige Konzepte (nicht unterflurig)

Die nachfolgenden – nicht unterflurigen – PSW-Konzepte werden hier nur aufgeführt, da sie in Zusammenhang mit der Nachnutzung von Bergwerken (Abraumhalden) und Tagebauen gebracht werden können.

III.4.1 Haldenkonzept

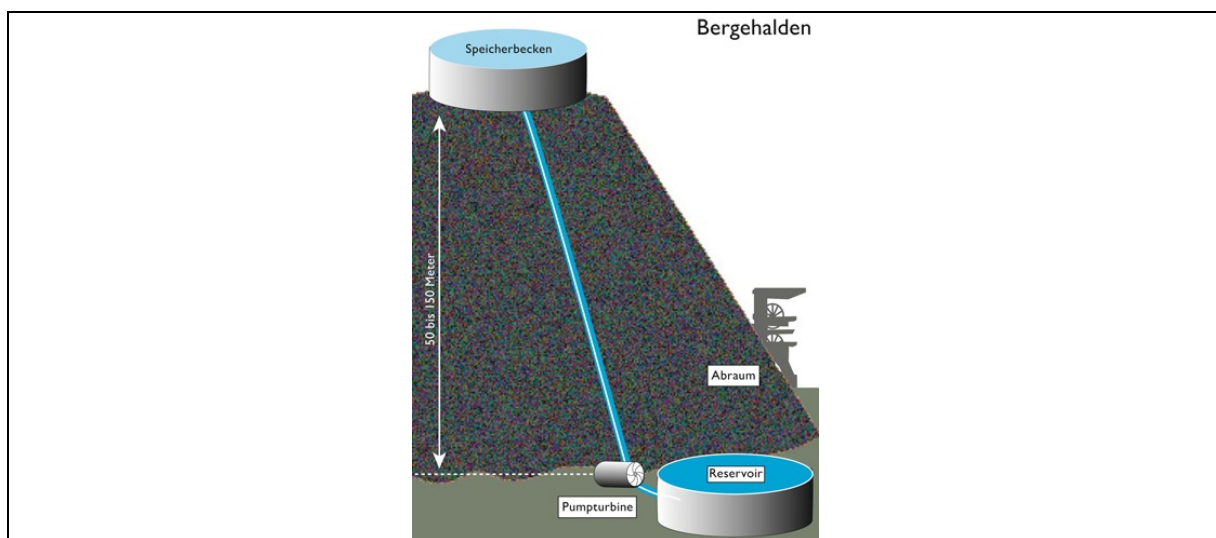
Eine dritte Variante der Errichtung von PSW in flachen Regionen ist die Nutzung von Abraumhalden z.B. im Ruhrgebiet. Pläne hierzu wurden von den Unternehmen RAG und RWE vorgestellt. Eine Pilotanlage soll auf der Halde Sundern in Hamm mit einer Höhe von 46 m errichtet werden. Nach positiven Testergebnissen wollen die beiden Konzerne in etwa fünf Jahren ein erstes Kraftwerk fertigstellen und ihre Idee in der Praxis erproben [Schramm, 2010]. Abb. 8 zeigt das Schema eines Halden-Pumpspeicherkraftwerks, dessen Funktion sich nicht von der eines üblichen PSW unterscheidet.

Mit einem auf der Halde Sundern errichteten Oberbeckenvolumen von 600.000 m^3 ließe sich eine Speicherleistung von 15 MW erzielen. Das insgesamt durch Halden-

nutzung im Ruhrgebiet bestehende Speicherpotenzial beträgt etwa 200 MW [Schramm, 2010]. Die mit den einzelnen Anlagen erreichbaren Leistungen (einige 10 MW) lassen sich vermutlich in die Niederspannungsnetze integrieren. Angaben zu Vollastbetriebszeiten und der daraus resultierenden Speicherkapazität liegen nicht vor.

Zu den **Vor- und Nachteilen** des Haldenkonzepts fehlen konkrete Aussagen. Die Verfechter der neuen Energiespeicherkonzepte führen allerdings an, nicht in eine natürliche Landschaft eingreifen zu müssen und hoffen deshalb auf weniger Widerstand in der Bevölkerung zu stoßen [Schramm, 2010].

Abb. 8: Schema eines Halden-Pumpspeicherkraftwerks



Quelle: [Schramm, 2010]

IEK-STE 2011

III.4.2 Speziell angelegte Reliefs (z.B. Ringwall)

In [Popp, 2010] wird ein Konzept vorgestellt, bei dem in flachen Regionen (z.B. mit großem Windenergieangebot) künstliche Landschaften in Form eines Walls mit zentralem Oberbecken und einer darum angeordneten Ringfläche als Unterbecken errichtet werden. Der Aushub für den äußeren Wasserring (Unterbecken) würde dafür verwendet, den Ringwall für das innenliegende Oberbecken auszubilden. Solche Ringwallspeicherkraftwerke ließen sich z.B. in Tagebaugruben verwirklichen. Beispielhaft wird ein Ringwallspeicherkraftwerk mit einer Kapazität von 30 Tagesverbräuchen bei einer Durchschnitts-Abgabeleistung von 10 GW skizziert. Das Volumen zur Schaffung des Wasserrings für das Unterbecken würde knapp 10 km^3 betragen, bei einem Austauschvolumen von 7 km^3 . Zum Vergleich: Der größte deutsche Tagebau Hambach, mit einer genehmigten Ausdehnung von 40 km^2 und einer Tiefe bis zu 400 m, ergibt ein Tagebauvolumen von 16 km^3 . Aufgrund des großen Flächenbedarfs dürfte diese Variante eher geringe Bedeutung besitzen.

IV Rechtliche Aspekte, Umweltauswirkungen

Die Errichtung komplett unterfluriger PSW ist in Deutschland bislang nicht realisiert worden. Daher wird in [Beck et al., 2010] u.a. geprüft, welche Rechtsgebiete berührt sind, inwieweit die Errichtung eines solchen PSW genehmigungsbedürftig ist, welche Genehmigungsanforderungen zu erfüllen sind und in welchen Verfahren (z.B. Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahren) die Genehmigung erfolgt.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass insbesondere wasserrechtliche und umweltrechtliche Fragestellungen zu beachten sind. Eine wasserrechtliche Erlaubnis oder Bewilligung ist insbesondere für das etwaige Aufstauen von Grundwasser zum Befüllen der unterflurigen Speicherbecken oder für das Einleiten von Wasser in ein oberirdisches Gewässer erforderlich. Das Bergrecht (BBergG) findet nur in sehr begrenztem Umfang Anwendung, z.B. beim Auffahren neuer Schächte.

Hinsichtlich des Naturschutzrechts sind Schutzgebiete zu beachten, die je nach Gegebenheiten Restriktionen bzw. einen Ausschluss des Projektes zur Folge haben können. Genehmigungsrechtliche Anforderungen ergeben sich auch für die Netzanbindung (110 bis 380 kV).

Die Genehmigung im Rahmen eines Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahrens liegt nahe, ist aber noch nicht gesichert. Bei größerem Oberflächenverbrauch könnte auch ein Raumordnungsverfahren erforderlich werden. Für den Bau und Betrieb der Anlage kommt zudem eine Umweltverträglichkeitsprüfung in Betracht.

Die relevanten Parameter bei der rechtlichen Prüfung eines PSW-Projektes sind nach [Beck et al., 2010]:

- die Nähe zu Schutzgebieten,
- die Existenz eines Bebauungsplans,
- die Dimensionierung der Anlage, insbesondere der Speicherbecken,
- die Notwendigkeit der erneuten Wasserhaltung,
- der Denkmalschutz alter Anlagen sowie
- etwaige bergbauliche Vorbelastungen des Wassers.

Umweltauswirkungen

Es besteht eine gesetzliche Verpflichtung, die möglichen Umweltauswirkungen aus dem Bau und dem Betrieb eines PSW zu prüfen. Im Allgemeinen ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, die im Ergebnis die Zulässigkeit der Anlage ohne Auflagen, mit Auflagen, oder die Unzulässigkeit feststellt. Ob sich ein Ausschluss oder eine Restriktion ergibt, hängt maßgeblich von den spezifischen Merkmalen des konkreten Standorts ab. Hierbei stehen u.a. Auswirkungen auf die

Trinkwasserförderung im Vordergrund, aber auch die möglichen Auswirkung auf die Habitate wildlebender Tier- und Pflanzenarten. So darf sich beispielsweise die Situation von Fledermäusen, die stillgelegte Stollen als Winterquartier nutzen könnten, nicht verschlechtern. Umweltgefahren können sich aus der Ansammlung von sauren oder z.B. mit Schwermetallen belasteten Grubenwässern ergeben, die für den Bau des PSW zu Tage gefördert werden müssen und ggfs. vor einer Einleitung in Oberflächengewässer zu behandeln sind [Beck et al., 2010].

V Energiewirtschaftliche Einordnung

Die vorherigen Ausführungen deuten darauf hin, dass der Betrieb und damit die Versorgungsaufgaben von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken sehr viele Analogien mit konventionellen Pumpspeicherkraftwerken aufweisen könnten. Aufgrund ihrer technischen Eigenschaften sowie der hohen Zuverlässigkeit werden heutige Pumpspeicherkraftwerke für unterschiedlichste Versorgungsaufgaben eingesetzt und lassen einen Einsatz am Spot- als auch Regelenergiemarkt zu. Versorgungsaufgaben nach [DENA, 2010a] sind:

Regelenergieversorgung

Pumpspeicherkraftwerke sind prinzipiell in der Lage sowohl zur Primärregelung (volle Leistungsverfügbarkeit innerhalb 30 s, abzudeckender Zeitraum bis 15 min), Sekundärregelung (volle Leistungsverfügbarkeit innerhalb von 5 min, abzudeckender Zeitraum 30s bis 60 min) als auch zur Tertiärregelung (volle Leistungsverfügbarkeit innerhalb von 15 min, 15 min bis mehrere Stunden) beitragen. Wesentliches Einsatzgebiet heutiger Pumpspeicherkraftwerke ist die Bereitstellung von Sekundärregelkapazität zur Leistungs-Frequenz-Regelung.

Über die zuvor vorgestellten Versorgungsaufgabe hinaus stellt sich die Frage nach Speichern, die für eine Überbrückung längerer Zeiträume (Wochen, Saison) genutzt werden können. Allerdings ist davon auszugehen, dass hierfür große Speicher (> 100 GWh) notwendig sind. Prinzipiell könnte bereits heute ein Teil der existierenden großen Pumpspeicherkraftwerke als Wochenspeicher eingesetzt werden. Allerdings wird zum einen aus wirtschaftlichen Gründen hiervon nicht Gebrauch gemacht, da sich eine Verlängerung der Speicherdauer eher negativ auf die Speicherkosten auswirkt. Zum anderen besteht unter den derzeitigen energiewirtschaftlichen Bedingungen (noch) nicht die Notwendigkeit von Wochen- oder Saisonspeichern.

Blindleistungsregelung

Die Stromerzeugung von Pumpspeicherkraftwerken ist meist über einen Synchrongenerator an das Netz gekoppelt, was eine besonders flexible Blindleistungseinspeisung ermöglicht. Eine weitere wesentliche Aufgabe stellt daher

die Blindleistungsregelung dar, was sowohl den Blindleistungsbezug als auch die Blindleistungseinspeisung umfasst.

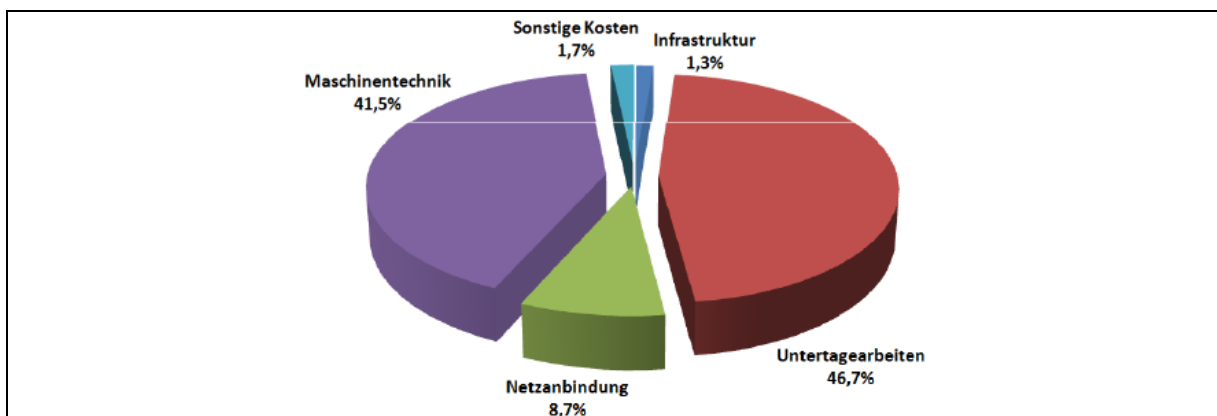
Schwarzstartfähigkeit

Für den Fall eines Blackout und des folgenden Netzwiederaufbaus stellt die Schwarzstartfähigkeit von Erzeugern ein wichtiges Kriterium dar. Da im Gegensatz zu vielen anderen Kraftwerksarten Pumpspeicherkraftwerke nicht auf eine externe Versorgung angewiesen sind, sind sie für einen sogenannten Schwarzstart sehr gut geeignet, wie in der Vergangenheit (z.B. Blackout im Emsland im Jahr 2006) zu beobachten war.

VI Kosten, Wirtschaftlichkeit

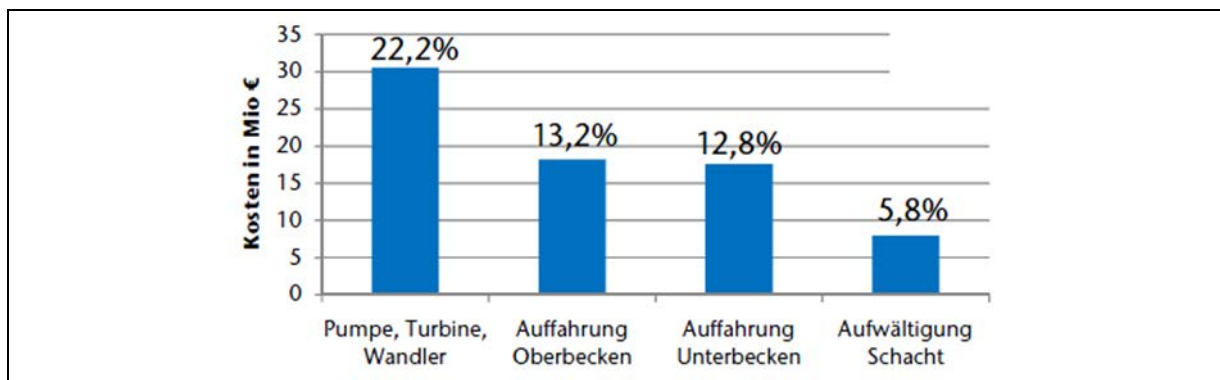
Für das in [Beck et al., 2010] betrachtete unterflurige PSW-Modellkraftwerk wurde u.a. auch eine Abschätzung der spezifischen Kosten vorgenommen. Abb. 9 zeigt die verschiedenen Kostengruppen und deren Anteile an den Gesamtkosten. Die Untertagearbeiten liefern mit einem Anteil von knapp 47 % den größten Beitrag. Aus der Abb. 10 geht hervor, dass bezüglich der Untertagearbeiten die Auffahrungen des Unter- und Oberbeckens mit Anteilen von jeweils etwa 13 % an den Gesamtkosten die größten Kostentreiber sind.

Abb. 9: Kostengruppen und –anteile an den Gesamtkosten



Quelle: [Beck & Schmidt, 2011]

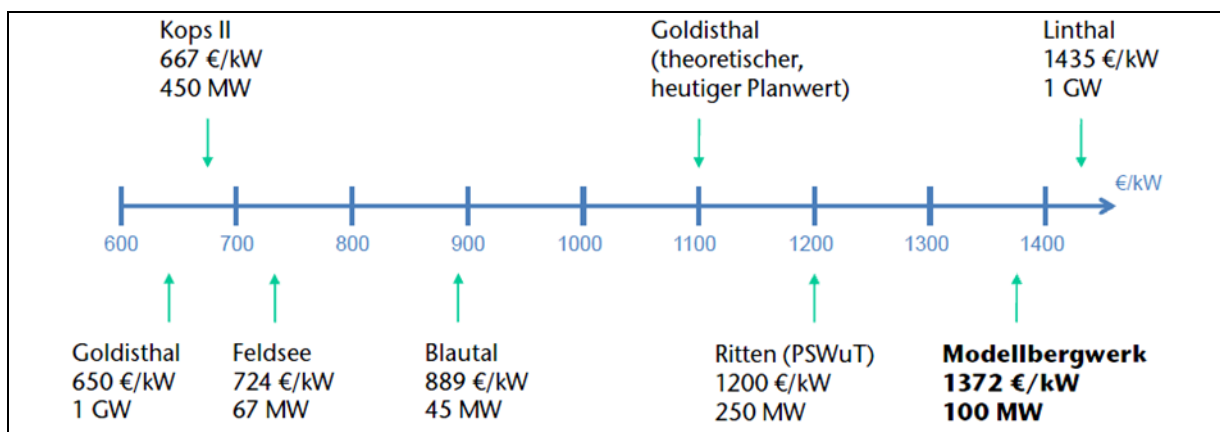
IEK-STE 2011

Abb. 10: Wesentliche Kostenfaktoren

Quelle: [Beck & Schmidt, 2011]

IEK-STE 2011

In Abb. 11 werden die spezifischen Leistungskosten herkömmlicher PSW (z.B. Goldisthal) den projektierten Kosten des unterflurigen 100 MW PSW-Modellkraftwerks gegenüber gestellt. Für letzteres werden Kosten von knapp 1400 €/kW ausgewiesen. Für neue PSW wird von einer deutlichen Verteuerung der Projekt- und Herstellungskosten ausgegangen. In Abb. 11 ist daher für Goldisthal ein heutiger, theoretischer Planwert angegeben, der deutlich über dem Istwert liegt. Die Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke könnten daher konkurrenzfähig zu neuen herkömmlichen PSW sein.

Abb. 11: Spezifische Leistungskosten von PSW

Quelle: [Beck & Schmidt, 2011]

IEK-STE 2011

VII Forschungsaktivitäten, Akteure und möglicher F&E-Bedarf

Laufende Forschungsarbeiten und Akteure

Forschungsaktivitäten zu Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken laufen derzeit an der Universität Duisburg/Essen und Bochum [Schreiber et al., 2010], an der Technischen Universität Clausthal und dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) [Beck et al., 2010] sowie an der Universität Hamburg [Schulz, 2009b].

Im Mittelpunkt einer von den Projektpartnern TU Clausthal (beteiligt sind verschiedene Fachbereiche¹) und dem EFZN (Federführung) zwischen 2009 und 2011 durchgeführten und vom BMU geförderten Studie steht die Bestimmung des Potenzials zur Nachnutzung von stillgelegten Bergwerken in Deutschland sowie die exemplarische Untersuchung der verschiedenen Aspekte eines Unterflur-Pumpspeicherkraftwerksprojekts aus berg- bzw. maschinenbaulicher, elektrotechnischer, ökonomischer, ökologischer und rechtlicher Sicht (siehe Kapitel III.1).

Ähnliche Ziele werden mit der inzwischen angelaufenen Studie der Projektpartner Uni Duisburg/Essen (Geologie, Geotechnik, Wasserbau und Wasserwirtschaft) und Bochum (Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft) verfolgt, die neben der Untertagebauvariante auch ein Tagebau- und Küstenkonzept betrachten (siehe Kapitel III.2 und III.3). Hierfür sollen auch die möglichen weltweiten Einsatzgebiete und Marktpotenziale abgeschätzt werden.

Die Forschungsaktivitäten an der Uni Hamburg beschränken sich auf die Untersuchung der Nutzungsmöglichkeit von Tagebaurestlöchern (siehe Kapitel III.2). Von den Energieversorgungsunternehmen RWE AG und RAG wird das Haldenkonzept verfolgt (siehe Kapitel III.4).

Für Bergbauregionen in Deutschland wie z.B. das Ruhrgebiet sind das Untertage-, Tagebau- und Haldenkonzept relevant. Ersteres beinhaltet den geringsten oberirdischen Flächenbedarf (unterfluriges Ober- und Unterbecken) und lässt sich daher auch in dichtbesiedelten Gebieten realisieren. Es besitzt von den drei Varianten vermutlich das größte Potenzial, aber auch die größten technischen Herausforderungen.

Möglicher F&E Bedarf

Derzeit existieren in Deutschland etwa 40.000 Bergwerke mit etwa 150.000 Tagesöffnungen. Wie aus den vorherigen Ausführungen hervorgeht, ist für die Nutzung als Unterflur-Pumpspeicherkraftwerk eine Vielzahl von Voraussetzungen notwendig. Die

¹ Beteiligt sind die Fakultäten Bergbau, Geotechnik und Marktscheidewesen, Maschinenwesen, Elektrische Energietechnik, deutsches und internationales Berg- und Energierecht, Wirtschaftswissenschaften)

Anzahl der Bergwerke, die diese Voraussetzungen erfüllen, dürfte weitaus geringer sein. Derzeitige Forschungsarbeiten konzentrieren sich im Wesentlichen auf die technische Machbarkeit und die Analyse von Randbedingungen. Welches technische und wirtschaftliche Potenzial besteht, ist derzeit nicht bekannt. Eine belastbare Aussage hierzu setzt eine Analyse der bestehenden einzelnen Bergwerke voraus, die sowohl die geologischen Voraussetzungen, die technische Machbarkeit als auch eine Kostenschätzung für die mögliche Erschließung in den Blick nimmt. Für NRW wäre insbesondere zu prüfen, welche der bestehenden noch in Betrieb befindlichen Steinkohlebergwerke, die in den kommenden Jahren stillgelegt werden sollen, für die PSW-Nutzung in Frage kommen, da eine endgültige Stilllegung die Nutzung als Pumpspeicherkraftwerk verhindern oder vielleicht wirtschaftlich unattraktiv machen könnte. In NRW existiert eine Vielzahl stillgelegter Bergwerke. Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung dürften ausreichende geologische Kenntnisse über die individuellen Bergwerke vorliegen, die eine belastbare Bewertung erlauben sollten.

Es ist davon auszugehen, dass sich der Einsatzzweck von Unterflurspeicherkraftwerken nicht wesentlich von dem eines herkömmlichen Pumpspeicherkraftwerks unterscheiden wird. Die generelle Notwendigkeit und die Einbindung von Speichern sowie deren Versorgungsaufgabe innerhalb eines Stromversorgungssystems, das zukünftig durch den zunehmenden Einsatz fluktuierender Einspeisung geprägt ist, erfordert eine eingehende energiewirtschaftliche Analyse, die alle Speicherkonzepte erfassen sollte.

Die vorliegenden Studien beschreiben den technischen Bedarf (Technikkomponenten) für die Realisierung von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um etablierte Technik (z.B. Turbinen, Generator), die bereits heute kommerziell verfügbar ist. Auch die notwendige Bergwerktechnik (z.B. für den Aufschluss der Speicherbecken) ist vorhanden. Ein F&E Bedarf mit Grundlagenforschungscharakter lässt sich auf der Basis der vorliegenden Informationen nicht erkennen.

VIII Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz fluktuierender Einspeisung erneuerbarer Energien stellt netz- sowie erzeugungsseitig eine große Herausforderung für die künftige Stromversorgung dar. Vor diesem Hintergrund rückt der Einsatz von Speichern zunehmend in den Blickpunkt. Auch die Bundesregierung unterstreicht in ihrem Energiekonzept die Wichtigkeit von Konzepten zur Speicherung von Elektrizität. Eine Einordnung und Bewertung der jeweiligen Speichertypen ist immer in enger Verzahnung mit der Versorgungsaufgabe zu sehen. Diesbezüglich sind Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke in erster Nähe vergleichbar mit konventionellen Pumpspeicherkraftwerken, deren installierte Leistung heute ca. 6,5 GW bei einer maximalen Nutzungskapazität von ca. 40 GWh beträgt. Heutige Pumpspeicherkraftwerke werden z.B. für die Regelenergieversorgung (Leistungs-Frequenz-Regelung) sowie für den tagesspezifischen Lastausgleich eingesetzt. Weitere Vorteile sind die Blindleistungsregelung sowie die Schwarzstartfähigkeit für den Fall eines Netz-Blackouts.

Von den derzeit diskutierten Unterflur-Pumpspeicherkraftwerkskonzepten erscheint die Variante stillgelegte Bergwerke zu nutzen (Untertagekonzept) am vielversprechendsten. Aber auch die Tagebaukonzepte und das nicht unterflurige Haldenkonzept werden als mögliche Optionen genannt. Die Nutzung von Küsten für einen Pumpspeicherbetrieb scheidet hingegen aus, da die erforderlichen steilen Reliefs in Deutschland kaum zu finden sind. Pumpspeicherkraftwerke mit speziell dafür angelegten Reliefs dürften aus Gründen des enormen Oberflächenbedarfs ebenfalls eher weniger Relevanz besitzen. In Tab. 2 sind einige wesentliche charakteristische Merkmale für Pumpspeicherkraftwerke konventioneller und neuartiger Bauweise aufgeführt.

Aus heutiger Sicht wird die maximale Nutzungskapazität von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken der Untertagevariante auf etwa 20 GWh geschätzt bei einer installierten Leistung von 10 GW. Hierbei handelt es sich um erste grobe Abschätzungen. Die notwendigen Kosten für den Bau eines solchen Kraftwerks werden vor allem durch die Untertagearbeiten (Aufschluss für Ober- und Unterbecken etc.) dominiert. Allerdings dürften diese in einer großen Bandbreite liegen, die sich aus den individuellen lokalen und geologischen Randbedingungen ergibt. Hinsichtlich der rechtlichen Aspekte findet das Bergrecht (BBergG) nur in begrenztem Umfang Anwendung (z.B. beim Auffahren neuer Schächte). Von größerem Einfluss dürften jedoch wasserrechtliche Aspekte sein, da in den Grundwasserkreislauf eingegriffen wird. Da bislang kein Unterflur-Pumpspeicherkraftwerk realisiert wurde, ist derzeit ungeklärt, welche weiteren Rechtsgebiete noch betroffen sind.

Tab. 2: Charakteristiken von Pumpspeicherkraftwerken

PSW-Typ Kriterien	Konventionell	Untertage	Tagebau	Küsten	Halden	Speziell angelegte Reliefs
Variante existiert	Ja	Nein	Nein	Als offener Kreislauf	Nein	Nein
Oberbecken (OB) unterflurig	Nein	Konzept-abhängig	Nein	Konzept-abhängig	Nein	Nein
Unterbecken (UB) unterflurig	Nein	Ja	Konzept-abhängig	Unterwasser	Nein	Nein
Maschinenhaus unterflurig	Möglich	Ja	Konzept-abhängig	Ja, oder Unterwasser	Konzept-abhängig	Konzept-abhängig
Fallhöhe (Deutschland)	50-650 m	Bis ca. 1000 m	Bis ca. 400 m	D: ≠	Bis ca. 100 m	Bis ca. 400 m
Potenzial genannt	Geplant: 2,5 GW Heute: 6,5 GW	10 GW (2h)	100 GWh (Ost-D)	-	0,2 GW (NRW)	Groß
Oberflächenbedarf	<u>Groß</u>	<u>Klein:</u> OB&UB unterfl. <u>bis Mittel:</u> OB oberflurig	<u>Mittel:</u> OB oberflurig <u>bis Groß:</u> OB&UB oberfl.	<u>Mittel</u>	<u>Groß</u>	<u>Groß</u>

Quelle: IEK-STE 2011

IEK-STE 2011

Welche technische und vor allem wirtschaftliche Potenziale Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke besitzen, ist derzeit nicht bekannt. Eine belastbare Aussage hierzu setzt eine standortspezifische Analyse voraus, die sowohl die geologischen Voraussetzungen als auch eine Kostenabschätzung für die mögliche Erschließung in den Blick nimmt. Insbesondere für NRW wäre zu prüfen, welche der bestehenden noch in Betrieb befindlichen Steinkohlenbergwerke für eine PSW-Nutzung geeignet sind, bevor Maßnahmen für eine endgültige Stilllegung ergriffen werden, die eine Nachnutzung unmöglich oder vielleicht unwirtschaftlich machen.

Ein besonderes Problem kann sich für während des laufenden Tagebaubetriebs errichtete Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke einstellen, da deren Nutzung unter Umständen erst bei endgültiger Stilllegung der Kohlenförderung (d.h. nach Jahrzehnten) möglich ist. Die Bereitschaft der Industrie zu Investitionen in beträchtlicher Höhe über einen derart langen Zeitraum dürfte nur sehr begrenzt sein.

Die vorliegenden Studien beschreiben den technischen Bedarf für die Realisierung von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um etablierte Technik, die bereits heute kommerziell verfügbar ist. Auch die erforderliche

Bergwerktechnik ist vorhanden. Der notwendige F&E Bedarf hat daher starken Anwendungscharakter.

Die Einbindung von Speichern sowie deren mögliche energiewirtschaftliche Bedeutung erfordert eine umfassende Analyse eines zukünftigen Stromversorgungssystems. Hierbei sind sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte zu betrachten. Darüber hinaus sind entsprechende Anreizsysteme zu konzipieren, die eine Motivation für den Bau von Speichern darstellen könnten. Insofern stellen Unterflur-Pumpspeicherkraftwerke nur eine Technik unter vielen anderen Speicherkonzepten dar, die es in einem breiteren Zusammenhang zu untersuchen gilt.

Aktuelle energiewirtschaftliche Analysen zeigen, dass für den massiven Ausbau von erneuerbaren Energien der zügige Ausbau von Speicherkapazität und insbesondere Pumpspeicherkapazität notwendig ist. Allerdings ist auch offensichtlich, dass dieser Speicherbedarf deutlich über die zuvor genannten Potenziale hinausgeht. Daher sollte der Einsatz von Unterflur-Pumpspeicherkraftwerken nicht überbewertet werden.

IX Literatur

- ANDERER, P., DUMONT, U., RUPRECHT, A., WOLF-SCHUMANN, U. & HEIMERL, S. (2010) *Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BECK, H.-P. & SCHMIDT, M. (2011) Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke - Ein Energiekonzept für den Westharz - Stand April 2011. Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN).
- BECK, H.-P., et al. (2010) *Windenergieeinspeisung durch Nutzung stillgelegter Bergwerke*. Studie im Rahmen des Förderprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu Forschung und Entwicklung im Bereich Netzintegration.
- BKG (2010) Verwaltungsgebiete. *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*. Frankfurt am Main, Deutschland.
- BMWi (2011) Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi (Stand 22.06.2011). *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie*. Berlin, Deutschland. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/gesamtausgabe.html>.
- DENA (2010a) *Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien*. Studie im Auftrag der Schluchseewerk AG. Hg.: Deutsche Energie-Agentur, Berlin, Deutschland.
- DENA (2010b) *Pumpspeicherwerke und ihr Beitrag zum Ausbau erneuerbarer Energien. Zentrale Ergebnisse des energiewirtschaftlichen Gutachtens zum Neubauvorhaben Pumpspeicherwerk Atdorf*. Studie im Auftrag der Schluchseewerk AG. Hg.: Deutsche Energie-Agentur, Berlin, Deutschland.
- GIEBEL, C. (2010) *Perspektiven der stationären elektrischen Energiespeicherung für stark fluktuierende Erneuerbare Energiequellen im Netzverbund*. Hochschule Mannheim, Mannheim, Deutschland.
- GIESECKE, J. & MOSONYI, E. (2009) *Pumpspeicherkraftwerke. Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb*. 5 ed., 675-704, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- POPP, M. (2010) *Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer.
- SCHRAMM, S. (2010) Pumpspeicherkraftwerk - Speicherplatz für Ökostrom. *Zeit Online - Umwelt*. <http://www.zeit.de/2010/48/Pumpspeicherkraftwerk>.
- SCHREIBER, U., PERAU, E., NIEMANN, A. & WAGNER, H.-J. (2010) *Unterflur-Pumpspeicherwerke - Konzepte für regionale Speicher regenerativer Energien. Ideenpapier für eine Forschungsstudie*. <http://www.uni-due.de/geotechnik/forschung/upw.shtml>.
- SCHULZ, D. (2009a) Gebäude, insbesondere konstruktive Gestaltung von Gebäuden für Pumpspeicherwerke in geologisch instabilen Formationen zur energetischen Nutzung von Tagebaurestlöchern aus dem Kohle- und Erzabbau - Patent DE102008002801A1 17.09.2009.

- SCHULZ, D. (2009b) *Speicherpotenziale von Pumpspeicherwerken in Tagebaurestlöchern ehemaliger Braunkohlereviere*. Forum Netzintegration, Deutsche Umwelthilfe - 30.09.2009, Berlin, Deutschland, http://www.forum-netzintegration.de/uploads/media/DUH_Schulz_300909_01.pdf.
- TAM, S. W., BLOMQUIST, C. A. & KARTSOUNES, G. T. (1979) Underground Pumped Hydro Storage - An Overview. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 4:4, 329 - 351.

Preprints 2011

- 01/2011 Baufumé, Sylvestre, Hake, Jürgen-Friedrich, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter: Infrastrukturanalyse einer möglichen wasserstoffbasierten Stromerzeugung unter Berücksichtigung von Kohlendioxidabtrennung, -transport und –speicherung.
- 02/2011 Hennings, Wilfried, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter, Vögele, Stefan: Energie-transport und –verteilung.
- 03/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: Measuring Income and energy distribution in Germany with the Atkinson Index.
- 04/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: The History of sustainability and the impact of the energy system.
- 05/2011 Baufumé, Sylvestre, Hake, Jürgen-Friedrich, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter: Carbon capture and storage: a possible bridge to a future hydrogen infrastructure for Germany?
- 06/2011 Hennings, Wilfried, Linssen, Jochen, Markewitz, Peter, Vögele, Stefan: Energiespeicher.
- 07/2011 Geske, Joachim, Kuckshinrichs, Wilhelm, Kronenberg, Tobias: Analysing the impact of demographic development on sustainability via grid-bound infrastructures.
- 08/2011 Kronenberg, Tobias: Effekte des demografischen Wandels in einem Input-Output-Modell mit differenziertem Haushaltssektor.
- 09/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: Measuring sustainability in the energy sector.
- 10/2011 Fuchs, Gerhard, Wassermann, Sandra, Weimer-Jehle, Wolfgang, Vögele, Stefan: Entwicklung und Verbreitung neuer Kraftwerkstechnologien im Kontext dynamischer (Nationaler-) Innovationssysteme.
- 11/2011 Hake, Jürgen-Friedrich, Markewitz, Peter, Martinsen, Dag, Pesch, Timo: Comparison of model based energy scenarios for Germany - Cost efficient solutions vs. policy maker viewpoints?
- 12/2011 Riedle, Klaus, Hake, Jürgen-Friedrich, Martinsen, Dag, Hencke, Ernst-Günter: Vergleich von Energieszenarien für das Jahr 2050.
- 13/2011 Markewitz, Peter, Bongartz, Richard, Birnbaum, Ulf, Linssen, Jochen, Vögele, Stefan: Energy Technologies 2050: R&D priority setting of coal fired power plants in Germany.
- 14/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: Sustainability: the third law of cultural development.
- 15/2011 Hansen, Patrick: Auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand in Europa bis 2050: Entwicklung der Energienachfrage.
- 16/2011 Rübbelke, Dirk, Vögele, Stefan: Distributional Consequences of Climate Change Impacts on the Power Sector: Who Gains and Who Loses?
- 17/2011 Kronenberg, Tobias: On The Intertemporal Stability of Bridge Matrix Coefficients.
- 18/2011 Kronenberg, Tobias: Public revenue and carbon dioxide emissions: an AGE analysis for Germany.
- 19/2011 Schlör, Holger, Fischer, Wolfgang, Hake, Jürgen-Friedrich: ISD – A new methodological approach for measuring the sustainability of the German energy system.
- 20/2011 Bickert, Stefan, Kuckshinrichs, Wilhelm: Market integration of electric mobility: Analysing economic efficiency and costs for consumers.
- 21/2011 Bickert, Stefan, Kuckshinrichs, Wilhelm: Electromobility as a technical concept in an ecological mobility sector? An analysis of costs.

- 22/2011 Koch, H., Vögele, S., Kaltofen, M., Grünwald, U.: Trends in water demand and water availability for power plants – scenario analyses for the German capital Berlin.
- 23/2011 Kronenberg, T.: Regional input-output models and the treatment of imports in the European System of Accounts (ESA).

Research Reports 2011

- 01/2011 Kuckshinrichs, W., Bickert, S.: Country profiles for UK, the Netherlands, Germany and Norway as further contribution to the 'Comparison of R&D Programs for Carbon Abatement Technologies'.
- 02/2011 Bickert, S., Kuckshinrichs, W., Sage P.: Strategy and action plan for the implementation of multi-national programs on clean fossil energy.
- 03/2011 Hansen, P., Schulze, P.: The Effects of Climate Change on the Energy Industry in Germany.
- 04/2011 Vögele, S., Hake, J.-Fr., Kuckshinrichs, W., Markewitz, P.: Analyse der spezifischen Wettbewerbssituation des Clusters Kraftwerkstechnik Rhein/Ruhr-Region und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung des Clusters.
- 05/2011 Schumann, D., Tvedt, S. D., Torvatn, H. Y.: How do knowledge, trust and perceptions of risks and benefits influence the stability of initial perceptions of CO2 Capture and Storage (CCS)? A comparative structural equation modelling analysis of data from representative surveys in Germany and Norway.
- 06/2011 Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Hake, J.-Fr., Fischer, W., Bongartz, R., Martinsen, D., Pesch, T., Vögele, S.: Transformation des Elektrizitätserzeugungssystems mit forciertem Ausstieg aus der Kernenergie - Ein Beitrag zur Diskussion nachhaltiger Energiesysteme nach dem Reaktorunfall in Fukushima.
- 07/2011 Trudewind, C.A., Schreiber, A.: Ecological effects of power generation and methanol production by using separated CO2 from coal power plants.

Systems Analysis and Technology Evaluation at the Research Centre Jülich

Many of the issues at the centre of public attention can only be dealt with by an interdisciplinary energy systems analysis. Technical, economic and ecological subsystems which interact with each other often have to be investigated simultaneously. The group Systems Analysis and Technology Evaluation (STE) takes up this challenge focusing on the long-term supply- and demand-side characteristics of energy systems. It follows, in particular, the idea of a holistic, interdisciplinary approach taking an inter-linkage of technical systems with economics, environment and society into account and thus looking at the security of supply, economic efficiency and environmental protection. This triple strategy is oriented here to societal/political guiding principles such as sustainable development. In these fields, STE analyses the consequences of technical developments and provides scientific aids to decision making for politics and industry. This work is based on the further methodological development of systems analysis tools and their application as well as cooperation between scientists from different institutions.

Leitung/Head: Prof. Jürgen-Friedrich Hake
Forschungszentrum Jülich
Institute of Energy and Climate Research
IEK-STE: Systems Analysis and Technology Evaluation
52428 Jülich
Germany
Tel.: +49-2461-61-6363
Fax: +49-2461-61-2540,
Email: preprint-ste@fz-juelich.de
Web: www.fz-juelich.de/ste