**Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS.PSKW)**

Luther-SchmB2013.1120\_TS.PSKW\_final.doc 2013.1120,1030,25,.07-05,0906,0828,22-11,08,02,**07**31,30,25,21,

**DE 10 2013 019 776.7**

[**Suchliste**](#Suchliste)

**1. Aufgabenstellung und Stand der Technik**

**2. Ausgangspunkt und Idee der Erfindung**

**3 Tiefschacht –Pumpspeicherkraftwerk (TS-PSKW)**

3.0 Übersicht über die Zeichnungen

3.1 Der Hydraulikschacht 8

3.2 Die Tiefspeicher 1a

3.3 Reserve-Tiefspeicher 1b: -Blindschächte für etwas längere Speicherzeiten

3.4 Die Aufwandszahl des TS.PSKW

3.5 Zur Nutzung von Oberflächengewässern als Oberbecken

**4. Wertung: Mit den TS.PSKW das Speicherproblem lösen**

4.1 Vorteile des TS.PSKW mit Zusatzspeichern auf der untersten Sohle

4.2 Bergbau: vom Kohleabbau zum Untertage- Hohlraum

**5. Schrifttum**

Bezugszeichen-Verzeichnis, Zusammenfassung,

**6. Patentansprüche**

**Bildunterschriften und Bilder**

**Dr. Gerhard Luther Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking**

Universität des Saarlandes Universität Frankfurt

Experimentalphysik , Bau E26 Institut für Kernphysik

66123 Saarbrücken 60438 Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1

[luther.gerhard@ingenieur.de](mailto:luther.gerhard@ingenieur.de) [schmidtb@atom.uni-frankfurt.de](mailto:schmidtb@atom.uni-frankfurt.de)

Phon: 0681-302-2737(d) und 0681-56310(p) : 069-798 47002 und 06174-934099(p)

**Suchliste: TS.PSKW mit tiefliegenden Blindschächten als Unterbecken**

[Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS.PSKW) 2](#_Toc372718127)

[1. Aufgabenstellung und Stand der Technik 2](#_Toc372718128)

[2. Ausgangspunkt und Idee der Erfindung 4](#_Toc372718129)

[3. Tiefschacht –Pumpspeicherkraftwerk (TS-PSKW) 6](#_Toc372718130)

[3.0 Übersicht über die Zeichnungen 6](#_Toc372718131)

[3.1 Der Hydraulikschacht 8 7](#_Toc372718132)

[3.2 Die Tiefspeicher 1a 9](#_Toc372718133)

[3.3 Reserve-Tiefspeicher 1b: -Blindschächte für etwas längere Speicherzeiten 10](#_Toc372718134)

[- Der große Vorteil der Reservespeicher 1b 11](#_Toc372718135)

[3.4 Die Aufwandszahl des TS.PSKW 11](#_Toc372718136)

[Leistung der Pumptubinen und Hydraulikschacht 13](#_Toc372718137)

[3.5 Zur Nutzung von Oberflächengewässern als Oberbecken 13](#_Toc372718138)

[4. Wertung: Mit den TS.PSKW das Speicherproblem lösen 14](#_Toc372718139)

[4.1 Vorteile des TS.PSKW mit Zusatzspeichern auf der untersten Sohle 14](#_Toc372718140)

[4.2 Bergbau: vom Kohleabbau zum Untertage-Hohlraum 14](#_Toc372718141)

[5. Schrifttum 16](#_Toc372718142)

[6. Patentansprüche 18](#_Toc372718143)

[Bildunterschriften und Bilder 20](#_Toc372718144)

# Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS.PSKW)

Die Erfindung betrifft ein Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) zum Zwischenspeichern von elektrischer Energie, welches vornehmlich in einer neuen zum Zwecke der Energiespeicherung errichteten tiefen Untertage -Schachtanlage eingerichtet wird. Die Erfindung stellt eine Spezialisierung bzw. Weiterführung von **DE 10 2011 105 307** (/1/) dar.

# 1. Aufgabenstellung und Stand der Technik

**Pumpspeicherkraftwerke** (PSKW) bestehen aus einem Oberbecken und aus einem Unterbecken, zwischen denen Wasser im Pump- oder Turbinenbetrieb ausgetauscht wird. PSKW stellen derzeit die erprobten „Arbeitspferde“ der Stromspeicherung im großen Stil dar. Die in Deutschland installierten PSKW ergeben bei einer installierten Leistung von ca. 7 GW eine Speicherkapazität von ca. 42GWh. Der weitere Ausbau ist in Deutschland durch einen Mangel an geeigneten Standorten nur sehr eingeschränkt möglich und wird überdies durch den erbitterten Widerstand in der betroffenen Bevölkerung gegen die massive, manchmal geradezu brutale Umgestaltung der Landschaft außerordentlich erschwert.

Auch sind die Kosten in den letzten Jahren erheblich angestiegen. Insbesondere die bauliche Errichtung der Becken, die auf jeden geographischen Einzelfall hin aufwändig geplant werden müssen, wird immer teurer. Die zum Einsatz kommenden Pumpen und Turbinen müssen sich jeweils nach der vorgegebenen örtlichen Lage ausrichten, so dass eine Standardisierung erschwert wird.

Es ergeben sich die folgenden Ansatzpunkte für eine Verbesserung der gegenwärtigen PSKW:

* Grundlegende Verringerung der ökologischen Belastung der Landschaft
* Entkoppelung des PSKW von geographischen Voraussetzungen. Bau von PSKW in den Schwerpunkten der Stromerzeugung oder des Stromverbrauches
* Ausnutzung größerer Höhendifferenzen zwischen Ober- und Unterbecken.
* Wahlmöglichkeit der von einer einzelnen Pumpturbine zu überwindenden Höhendifferenz, was eine weitgehende Standardisierung der eingesetzten Pumpturbinen ermöglicht
* Standardisierung und technisch optimierte Betriebsführung ermöglicht eine Kostenreduktion bei dem schwerwiegendsten Kostenfaktor, der Pumpturbine.
* Nutzung eines natürlichen Gewässers als Oberbecken (Ober!-Becken)
* Unterirdische Unterbecken („Bergei“)

PSKW können auch mit Unterbecken betrieben werden, die nicht an der Erdoberfläche liegen.

In den 1970 und 1980 ‘er Jahren entstanden mehrere Studien, die PSKW mit einem Untertage Reservoir als Unterbecken propagierten. Diese als „Underground pumped hydroelectric storage“ (**UPHS**) bezeichneten Anlagen waren als eine Alternative zu oberirdischen PSKW gedacht, um die topographischen und geographischen Restriktionen der herkömmlichen PSKW zu vermeiden. Sie sollten gespeist werden aus in Grundlast betriebenen Kohle- oder Kernkraftwerken. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden 1984 für das DOE (US Department of Energy) in einem auswertenden Bericht des Battelle-Institutes übersichtlich zusammengefasst **/3/.**

Das UPHS Konzept umfasste (**Bild 1**):

**Untertage Speicherkavernen** in großer Tiefe; nach dem damaligen Stand der Technik wurden etwa 1500 m Teufe als ökonomisch optimal angesehen. Die Kavernen waren als eine horizontal ausgerichtete Batterie von Hohlräumen mit dazwischen liegenden Stützpfeilern geplant.

**Untertage Pumpturbinen** im Bereich der untersten Sohle („ subterranean powerhouse“) und –optional bei großen Teufen- **zusätzliche** Pumpturbinen mit Kavernen zur Zwischenspeicherung auf halber Teufe.

Eine typische Anlage war für eine Teufe von 1000 bis 2000 m konzipiert und wurde für einen Leistungsbereich von 1 bis 3 GW und einer Entladezeit von 8 bis 10 Stunden ausgelegt. Das ergibt eine Speicherkapazität in der Größenordnung von 20 GWh. Zum Vergleich: In der gesamten Bundesrepublik Deutschland sind heute (2013 AD) oberirdische Pumpspeicherkraftwerke mit einer Leistung von etwa 7 GW und eine Speicherkapazität von 42 GWh installiert. Die Studie /3/ zeigte auf, dass das UPHS Konzept technisch machbar und ökonomisch gangbar ist. Bisher wurde jedoch keine derartige Anlage in den USA gebaut. Die Erinnerung an die Pionierarbeit wird aber auch von späteren Autoren (/4/ und /5/) gepflegt.

Die Firma Riverbank verfolgt ein **Aquabank** genanntes Projekt (zitiert nach /5/), was sich dadurch auszeichnet, dass als Oberbecken – in gleicher Weise wie in **DE 10 2011 105 307** (/1/) vorgeschlagen – ein natürliches Gewässer und zwar ein Fluss vorgesehen ist.

Bereits durch frühere Patenanmeldungen der Verfasser (/1/, /2/) wurden entsprechende Vorschläge zur Weiterentwicklung der PSKW unterbreitet. Alle oben aufgeführten Verbesserungsansätze werden in der vorliegenden Erfindung weitergeführt.

# 2. Ausgangspunkt und Idee der Erfindung

In **DE 10 2011 013 329** (/2/) wurde vorgeschlagen, das Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerkes (PSKW) durch einen technisch erstellten Hohlkörper, der am Boden des Oberbeckens deponiert wird, zu ersetzen. Dieses Prinzip kann auf verschiedene natürliche oder künstliche Gewässer als Oberbecken, wie beispielsweise das Meer (insbesondere der tiefe Ozean) oder auch tiefe Binnenseen angewendet werden. In **DE 10 2011 105 307** (/1/) wird dieses Prinzip auf einen stillgelegten tiefen Bergwerksschacht oder auch auf einen tiefen Schacht, der von vorneherein zum Zwecke der Energiespeicherung errichtet wird, ausgeweitet. Diese Veröffentlichung ist der Ausgangspunkt der jetzigen Erfindung.

In **DE 10 2011 105 307 (/1/)** wurde ein Schacht-Pumpspeicherkraftwerk (**S.PSKW**) beschrieben, das u.a. die folgenden Eigenschaften besitzt.

* Ein offener homogener Schacht **1** der Teufe **L** ist in **N** gleichabständige Stockwerke unterteilt, die als Speicherbecken **B1** bis **BN** dienen. Alle Becken Bn besitzen dann die gleiche Höhe L/N.
* Jedes Becken ist an seiner Sohle mit einer oder mehreren Pumpen und Turbinen ausgestattet, die das Becken mit einem weiter oben liegenden Becken oder direkt mit dem Übertage- Oberbecken **B0** des Pumpspeicherkraftwerkes verbinden.
* Im Pumpbetrieb werden die Speicherbecken in einer Weise leer gepumpt, dass sich die Wasserpegel in den einzelnen Becken gleichförmig absenken und dadurch die Förderhöhe in allen Becken bis auf diejenigen, die direkt in das Oberbecken **B0** entwässern, zeitlich unverändert bleibt. Für den Turbinenbetrieb gilt eine analoge Aussage.
* Durch die Unterteilung des Schachtes in Becken ergibt sich eine günstigere Aufwandszahl der installierten Pumpturbinen. Hierbei wird als **Aufwandszahl A** das Verhältnis der beim Pumpbetrieb maximal erforderlichen Gesamtleistung **Pmax** zu der mittleren Pumpenleistung **Pm** bezeichnet:

**A**= Pmax / Pm (1)

* Für den Turbinenbetrieb gilt analog die gleiche Aufwandszahl.
* Die Aufwandszahl A ist unabhängig von der besonderen Konfiguration des Pumpturbinen-Betriebes zwischen den einzelnen Stockwerken. Sie hängt vielmehr nur von der Anzahl N der gleichabständigen Stockwerke ab und beträgt:

**A** = 1+1/**N** (2)

Die obige Gl(2) wurde in /1/ als Gl(49) im Kapitel „6 Offener Schacht mit mehreren Hohlkörpern“ allgemein hergeleitet, wobei ein Schacht als „offen“ bezeichnet wurde, wenn ein vollständiger Wasseraustausch mit externen Oberbecken durchgeführt wird.

Zusätzlich wurde in /1/ eine Ausführung mit einem gesonderten Hydraulikschacht 8 offenbart, der wie eine gemeinsame „Vor-und Zuflut“ eine durchgehende hydraulische Verbindung zwischen den Speicherbecken **B1** bis **BN** und dem Oberbecken **B0** darstellt. Pumpturbinen drücken in allen Stockwerken das Speicherwasser in den Hydraulikschacht gegen den im jeweiligen Stockwerk n anstehenden hydraulischen Druck **pn** (mit n=1..N) der Wassersäule bzw. entnehmen das Turbinenwasser aus dem Hydraulikschacht unter dem Druck **pn**. Wirksam ist dann jeweils der Druck **pn** abzüglich des vom jeweiligen Pegelstand im Speicherbecken abhängigen Gegendruckes. Auch der Speicherschacht, bei dem ein vollständiger Wasseraustausch mit dem außenliegenden Oberbecken **B0** über einen gemeinsamen Hydraulikschacht führt, ist ein „offener“ Schacht im Sinne von /1/ und daher wird seine Aufwandszahl **A** ebenfalls durch Gl(2) beschrieben.

In DE 10 2011 105 307 (/1/) wurden ausführlich mehrere Konfigurationen des Pumpturbinenbetriebes beispielhaft behandelt. Dabei stand jedoch die Vielfalt und Systematik der Konfigurationsmöglichkeiten und die Veranschaulichung der Gl(2) im Vordergrund der Beschreibung.

Im Folgenden soll nun eine Weiterführung des Schacht-Pumpspeicherkraftwerkes behandelt werden. Ausgangspunkt ist die Kombination von tiefliegenden Speicherreservoiren, z.B. Blindschächten, mit einem neuartigen Hydraulikschacht. Die zweckmäßigere Konzeption des Hydraulikschachtes **8** ergibt sich dadurch, dass dieser in einzelne hydraulisch voneinander getrennte Stockwerke unterteilt wird, an deren Beckenboden jeweils gleichartige Pumpturbinen für die Weiterleitung des Wasserstromes sorgen.

Die Erfindung ist für eine Anwendung im großen Stil geeignet und stellt als langfristige Investition eine grundsätzliche Lösung des Speicherproblems bei einer fluktuierenden Stromerzeugung aus Sonne und Wind in Aussicht. Es ergeben sich mehrere technisch und wirtschaftlich besonders günstige Anwendungs- und Optimierungsmöglichkeiten:

* Es können einheitliche Pumpturbinen aus dem wirtschaftlich günstigen „Standardprogramm“ eingesetzt werden.
* Die Pumpturbinen können in ihrem optimalen Betriebspunkt mit besonders günstigem Wirkungsgrad eingesetzt werden.
* Die reinen Schachtbaukosten pro gespeicherter kWh (nicht pro Speichervolumen) sind besonders niedrig.
* Zusätzliche „Reserve“- Energiespeicher, die gelegentlich in einer verlängerten Entladezeit (z.B. nach mehrtägiger Speicherzeit) zum Einsatz mit dem Pumpturbinen-Bestand und mit der sonstigen Infrastruktur kommen können, sind kostengünstig.

# 3. Tiefschacht –Pumpspeicherkraftwerk (TS-PSKW)

Das Tiefschacht- Pumpspeicher-Kraftwerk (TS.PSKW) (**Bild 2** oder **Bild 3**) besteht im Kern aus der Kombination von

* mehreren in großer Teufe liegenden **Tiefspeicher 1a**, die z.B. als parallel angeordnete Blindschächte realisiert sind und in ihrer Gesamtheit das untere Becken eines Pumpspeicherkraftwerkes darstellen, und
* einem Oberbecken **B0**, als welches vornehmlich ein Oberflächengewässer (z.B. ein Fluss oder See) genutzt wird, und
* einem in abgeschlossene Stockwerke aufgeteilten **Hydraulikschacht 8** zur hydraulischen Verbindung zwischen Unterbecken und Oberbecken, wobei die Sohle seines untersten Beckens **B1** etwa in der Teufe der unteren Sohle der Tiefspeicher **1a** liegt und sein oberstes Becken **BN** durch einen Überlauf direkt mit dem Oberbecken **B0** verbunden ist.

## 3.0 Übersicht über die Zeichnungen

Ausgangslage, Konzeption und die weitere Ausgestaltung der Erfindung werden auch in Zeichnungen erläutert:

**Bild 1: Konzept der UPHS nach /3/ als Stand der Technik am Ende der 1. Entwicklungsperiode 1984.**

**Originallegende: Figure 2:** Three-Dimensional Conception of UPHS Plant (adapted from Allen et al. 1980) , wobei als Zitat genannt wurde:

Allen, R. D., C. A. Blomquist, G. C. Chang, A. Ferreira and P. A. Thompson. 1980.

„Pumped Storage Hydroelectric Plants with Underground Lower Reservoirs“ .

In Proceedings of the International Symposium on Subsurface Space, Rockstore 80, Vol. 2, pp. 579-585. Pergamon Press, New York,

**Bild 2**: **Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk** (TS.PSKW) mit Tiefspeichern **1a**  und einem in N=4 Stockwerke unterteilten Hydraulikschacht **8**. Im Pumpbetrieb drückt eine Pumpturbine **7** Wasser in das Becken **Bj** welches aus dem darunterliegenden Stockwerk **Bj-1**  stammt; das unterste Becken **B1** wird über die Pumpturbine **PT1a** durch die Tiefspeicher **1a** gespeist und das Wasser des obersten Becken **BN** läuft durch den Überlauf **16** über in das Oberbecken **B0**. Der gleiche Massestrom in allen Pumpturbinen stellt sicher, dass alle Becken ihre Pegelhöhe einhalten.

**Bild 3: Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk** (TS.PSKW) wie in Bild 2 jedoch mit Tiefspeichern 1a, deren Höhe **BzTief** deutlich niedriger ist als die Beckenhöhe der Transportbecken im Hydraulikschacht **8**.

**Bild 4:** Draufsicht auf die unterste Sohle eines Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerkes (TS.PSKW) bestehend aus einem Hydraulikschacht- **8** und sechs Tiefspeichern **1a , die sich als zusätzliche Untertage- Blindschächten** alle auf der untersten Sohle befinden und dort mit dem Hydraulikschacht 8 über hydraulische Verbindungsleitungen **16a** verbunden sind..

**Bild 5:** **Reserve –Tiefspeicher 1b** für ein TS.PSKW, die nur dann zum Einsatz kommen, wenn die im Routinespeicherbetrieb eingesetzten Tiefspeicher **1a** energetisch leer sind und weiterhin eine starke Stromnachfrage herrscht. Alle Speicherschächte sind über Verbindungsstollen **16a** mit dem zentral liegenden Hydraulikschacht **8** verbunden. Zur Wartung der Pumpturbinen und der Schachtanlage ist ein Versorgungsschacht **9** vorgesehen, der bei der Erstellung und Erweiterung der Speicheranlage auch als Montageschacht genutzt werden kann.

**Bild 6**: **Geschwindigkeit** **wD** **des Wassers im Hydraulikschacht** **8** als Funktion der elektrischen Gesamtleistung **P** der Pumpturbinen. Die Angaben gelten für einen Schachtdurchmesser DB= 8 m bzw. DB= 12 m, der jeweils als Index in der Legende vermerkt ist, und beziehen sich auf eine mittlere Teufe der Tiefspeicher von 1750 m (gestrichelte Linien) bzw. 2750 m (durchgezogenen Linien.

## 3.1 Der Hydraulikschacht 8

Der **Hydraulikschacht 8** besteht aus der folgenden Anordnung (**Bild 2**):

* Ein homogener Schacht der Teufe **L**, der in **N** nicht notwendigerweise aber vorzugsweise gleichabständige Stockwerke unterteilt ist, die als Transportbecken **Bj (**mit j= 1…N; der Index 1 bezeichnet das unterste und der Index N das oberste Becken) dienen. Die Beckentiefe BTief dieser gleichabständigen Transportbecken beträgt dann

**B**Tief= **L** / **N** (3)

* Alle Transportbecken **Bj** mit Ausnahme des obersten Becken, also die **Bj** für   
  j = 1..(N-1), sind im Betriebsfalle (nahezu) vollständig mit Wasser gefüllt; allerdings verbleibt noch ein kleiner Freiraum, so dass sich in den **Bj** ein freier Wasserpegel ausbilden kann.
* Jedes Transportbecken **Bj** ist im Bereich seiner Sohle mit einer Pumpturbine **7** ausgestattet, mit der es über eine Verbindungsleitung **16b** direkt verbunden ist. Die Pumpturbine **7** ist auf der anderen Seite über eine Verbindungsleitung **16a**

im Falle j = 2..N mit dem darunter liegenden Becken **Bj-1** und   
 im Falle j = 1 mit den Tiefspeichern **1a**   
verbunden.

* Das Oberbecken **B0**, das vornehmlich aus einem großen natürlichen Gewässer (z.B. Strom, Fluss, See) besteht, ist mit dem obersten Transportbecken **BN** über den Überlauf **16** verbunden.
* Alle Pumpturbinen **7** arbeiten mit dem gleichen Wasser -Massenstrom, so dass - bis auf kleine kurzzeitige Schwankungen - der Wasserpegel in allen Transportbecken **Bj** sich während des Betriebes nicht ändert.
* Oberhalb des untersten Becken **B1** können daher alle Pumpturbinen 7 mit konstanter Leistung arbeiten und es können dort – sofern diese Becken die gleiche Höhe besitzen- gleichartige Pumpen eingesetzt werden.
* Die Pumpturbine PT1a im untersten Becken **B1** arbeitet hingegen mit einem schwankenden Vordruck, der durch den sich verändernden Füllzustand der Tiefspeicher **1a** bedingt wird.

Die Funktionsweise lässt sich besonders einfach verstehen, wenn man sich klar macht, dass die Becken **Bj** (mit j =1..(N-1) ) des Hydraulikschachtes nur fast vollständig mit Wasser gefüllt sind; dies wird auch in Bild 2 hervorgehoben. Der freie Pegel sorgt dann dafür, dass in den Becken nur der hydraulische Druck des Wassers im örtlichen Beckens **Bj** herrscht – und nicht etwa derjenige, der der Teufe des Beckens im Schacht entspricht.

Das Wasser wird also von Becken zu Becken wie in einer „Eimerkette“ transportiert und die Pumpturbinen drücken das Wasser im Pumpbetrieb aus dem darunterliegenden Becken **Bj-1** immer in das aktuelle Becken **Bj** hinein, wobei als Besonderheit das unterste Becken **B1** sein Wasser aus den Tiefspeichern **1a** bezieht und beim obersten Becken **BN** das Hineinpressen zu einem Überlauf in das Oberbecken **B0** führt.

Bei gleicher Höhe der Becken **Bj**für j=2..N herrschen in allen Becken während des gesamten Betriebes die gleichen Druckverhältnisse, da die Becken stets (fast) vollständig gefüllt bleiben. Es können also überall die gleichen Pumpturbinen benutzt werden.

Im untersten Becken **B1** sind die Druckverhältnisse jedoch nicht konstant. Hier herrscht ein durch den Pegelstand des Wassers in den Tiefspeichern **1a** bedingter Vordruck. Daher muss die dortige Pumpturbine PT1a erst gegen Ende des Pumpbetriebes die volle Beckenhöhe überwinden, da dann der Wasserpegel in den Tiefspeichern **1a** abgesunken ist und keinen nennenswerten Vordruck mehr liefert.

Im Turbinenbetrieb ist die zeitliche Abfolge genau umgekehrt: Zu Beginn kann das Wasser aus dem stets von oben nachgefüllten und daher stets vollen Becken **B1** in die vollständig entleerten Speicherbecken 1a strömen; danach muss die Turbine PT1a gegen den wachsenden Gegendruck des Wasserpegels in den Tiefspeichern 1a arbeiten, der zum Ende des Füllvorganges seinen Maximalwert erreicht.

Nur die Tiefspeicherbecken 1a auf der untersten Sohle ändern also während des Betriebes ihre Pegelhöhe. Daher sind in **Bild 2** alle oberen Pumpturbinen PT2 bis PT4 identisch und nur die Pumpturbine **PT1a** im untersten Becken muss mit der schwankenden Pegelhöhe fertig werden.

Jede Pumpturbine **7** muss dafür sorgen, dass das im Pumpbetrieb von unten gelieferte Wasser sofort wieder weiter befördert wird, d.h. der Massenstrom der Pumpturbinen in allen Stockwerken muss gleich sein. Die individuelle Höhe der Becken kann aber im Prinzip beliebig sein. Es ist zwar naheliegend, dass man aus praktischen Gründen der Beschaffung, der Wartung und des Betriebes überall die gleichen Pumpen einsetzt; falls man aber aus irgendwelchen örtlichen Gründen (z.B. der Geologie oder vorhandener Strukturen) hiervon abweichen will, so kann man dies tun.

In Bild 2 sind die Pumpturbinen schematisch auf der Sohle eines Becken **Bj** eingezeichnet. Bei einer technischen Verwirklichung wird man sie wohl in einem besonderen Maschinenhaus, das seitlich vom Schacht angeordnet ist und wegen des notwendigen Vordruckes etwas unterhalb des freien Pegels des unteren Beckens **Bj-1** liegt, unterbringen. Zur Verringerung der Pegelschwankungen kann man den Schachtdurchmesser im oberen Bereich der Becken erhöhen. Sofern dies nicht ausreicht, müsste man dort auf zusätzliche Pufferspeicher zurückgreifen; wir hoffen aber, dass man durch Schachtverbreiterung und exzellente elektronische Steuerung diese Zusatzkosten vermeiden kann.

Der wesentliche Unterschied (Fortschritt) der erfindungsgemäßen Konzeption des Hydraulikschachtes 8 gegenüber dem in  **DE 10 2011 105 307** mitgeteilten Stand der Technik besteht darin, dass der Hydraulikschacht nun in Stockwerke unterteilt ist, in denen nur noch der hydrostatische Druck der weitgehend konstant gehaltenen Wassersäule in diesem Stockwerk ansteht. Durch diese Veränderung können nun in allen Stockwerken gleiche Pumpturbinen eingesetzt werden.

Der Hydraulikschacht 8 der aktuellen Erfindung entspricht daher von der baulichen Konstruktion her eher dem Speicherschacht “1“ aus **DE 10 2011 105 307** als dem dortigen Hydraulikschacht. Daher kann auch auf die Bemerkungen in /1/ zur Ausführung der dort „Zwischenboden 2“ genannten Unterteilung des Schachtes zur Bildung von Becken hingewiesen werden (dortiger Abschnitt „Zum Zwischenboden 2“ im Kapitel „2 Der Lösungsansatz“).

Darüber hinaus ist insbesondere bei sehr großen Teufen L zu erwägen, statt der Zwischenböden in einem Einzelschacht, den Hydraulikschacht 8 in versetzten Teilstücken zu erstellen.

## 3.2 Die Tiefspeicher 1a

Der Hydraulikschacht **8** wird durch eine Anzahl **N\_Bz** zusätzlichertiefliegender **Blindschächte** oder sonstiger Reservoire, die wir als **Tiefspeicher 1a** bezeichnen**,** ergänzt (**Bild 4**). Die Tiefspeicher **1a** erstrecken sich von der untersten Sohle, der wir hier den Index m=1 geben, aus nach oben zu einer weiteren Sohle (Index m=2) und besitzen die Höhe **BzTief;** sie dienen als das Unterbecken eines PSKW zum Speichern von Wasser im Pumpturbinenbetrieb. Der Index „z“ im Namen steht für „Zusatz“ und soll zeigen, dass diese Speicherbecken zusätzlich zum Hydraulikschacht errichtet werden. Je nach Betrachtungsweise (bzw. „Betrachtungsort“) ist es manchmal anschaulicher von der „Höhe“ und manchmal von der „Tiefe“ eines Beckens zu sprechen; gemeint ist aber immer die gleiche physikalische Größe, für die wir bei den Variablennamen durchweg den Index „Tief“ benutzen.

Die Höhe der Tiefspeicher 1a beziehen wir auf die Teufe **L** der untersten Sohle und definieren daher in Analogie zur Anzahl N der Transportbecken **Bn** eine Zahl M durch

**BzTief = L/M** (4)

Die optimale Höhe **BzTief** wird im Wesentlichen durch die spezifischen Baukosten und die Aufwandszahl A für die Pumpturbinen bestimmt. Wegen der großen Teufe könnte **BzTief** durchaus –wie in **Bild 2** dargestellt- in die Größenordnung der Stockwerkshöhe **BTief** des Hydraulikschachtes kommen, um die Vorteile einer maschinellen automatisierten Schachtbauweise mit Abtransport des Abraumes nach oben im Schacht selbst auszunutzen (e.g. /6/). Andererseits kann man die Speicherbehälter auch in mehr konventioneller Bauweise zwischen zwei Sohlen (m= 2 und m=1) mit Vorloch und Aufbrechen des Schachtes und Abtransport des Abraumes von der unteren Sohle (m=1) her, erstellen; dann wird man jedoch mit einer kleineren Höhe **BzTief** (wie in **Bild 3** veranschaulicht) und einer größeren Anzahl von Speicherschächten arbeiten. Im Grunde genommen ist es auch gleichgültig, wie man die Tiefspeicher **1b** erstellt. Man wähle die kostengünstigste der vielen Methoden, wie sie beispielsweise in dem Standardlehrbuch der Bergbaukunde von **Reuther (/7/)** dargestellt sind. Es handelt sich im Gegensatz zum bisherigen Bergbau nun allerdings um einen Bergbau zum Abbau von Gestein zur Erstellung von wasserdichten Hohlräumen, deren Standfestigkeit und Lebensdauer von wesentlicher Bedeutung sind.

In der Praxis wird man vielleicht aus Kostengründen anstreben, die Tiefspeicher **1a** mit einem größeren Durchmesser zu bauen als bisher im Schachtbau üblich ist. Für unsere Betrachtung ist dies jedoch unerheblich, da größeren Durchmessern der parallel betriebenen zusätzlichen Becken formal auch durch eine höhere Anzahl N\_Bz von Standardbecken entsprochen werden kann.

**Bild 4** zeigt eine Draufsicht auf die Speicheranlage. In der Mitte der Anlagen steht der Hydraulikschacht **8**. Zwischen dessen untersten und beispielsweise der zweit untersten Sohle sind die Tiefspeicher **1a** als Blindschächte parallel zum untersten Becken **B1** des Hydraulikschachtes **8** angeordnet, mit dem sie über Verbindungsleitungen **16a** verbunden sind. Die elektrischen Zuleitungen sind entweder im Hydraulikschacht **8** selbst oder aber in einem gesonderten Versorgungsschacht **9** installiert.

## 3.3 Reserve-Tiefspeicher 1b: -Blindschächte für etwas längere Speicherzeiten

Das TS.PSKW ist auf eine bestimmte Lade- und Entladezeit **tL** ausgelegt und ökonomisch für einen erwarteten Lade- und Entladezyklus - z.B. als Tagesspeicher- konzipiert. Nun sind aber bei weiterem Ausbau der Stromquellen aus regenerativen Energien (RE) auch Deckungsdefizite mit einer im Mittel längeren Zykluszeit zu erwarten. Hierfür können als **Reservespeicher** **1b** (**Bild 5**) weitere Speicherbecken von der Art der Tiefspeicher 1a vorgesehen werden. Diese Reservespeicher **1b** kommen nur dann zum Einsatz, wenn die regulären Tiefspeicher 1a wg. einer anhaltenden Flaute brachliegen. Daher braucht man für die Reservespeicher **1b** keine eigenen Pumpturbinen vorzusehen; in ihrem seltenen Einsatzfalle stehen der Hydraulikschacht 8 und die dortigen Turbinen ohnehin zu ihrer Verfügung. Ebenso kann man sie in ihrer langen Ruhezeit außerhalb der normalen Betriebszeit der Tagesspeicherung energetisch wieder aufladen – also leerpumpen.

Die Reservebecken **1b** sind also Zusatzbecken ohne eigenständige Pumpturbinen - Ausrüstung, die aber im Einsatzfall maximal mit der für den Regelfall installierten Leistung der vorhandenen Pumpturbinen betrieben werden können. Durch diese Besonderheit fallen bei der Installation nur die reinen Baukosten für die Reservebecken **1b** und ihre hydraulische Anbindung an den Hydraulikschacht 8 an.

In **Bild 5** ist in der Ebene der untersten Sohle die Draufsicht eines TS.PSKW mit zusätzlichen Reserve-Tiefspeichern **1b** gezeigt. Die für den regulären Speicherbetrieb vorgesehenen Tiefspeicher **1a** liegen praktischer Weise näher am Hydraulikschacht **8,** ansonsten unterscheiden sie sich baulich nicht von den Reservespeichern. Welche der errichteten Tiefspeicher als reguläre Tiefspeicher 1a oder als Reserve- Tiefspeicher **1b** genutzt werden, kann auch im Laufe der Betriebsjahre ohne weiteres verändert werden.

Die Verbindungsleitung **16a** zu den Pumpturbinen des Hydraulikschachtes **8** können bei größeren Anlagen die Form von Druckstollen annehmen und weit verzweigt sein.

Zur Wartung der Pumpturbinen und der Schachtanlage ist in **Bild 5** ein **Versorgungsschacht** **9** vorgesehen, der bei der Erstellung und späteren Erweiterungen der Speicheranlage als Montage- und Förderschacht genutzt werden kann.

### - Der große Vorteil der Reservespeicher 1b

Wir erlauben uns, noch einmal besonders hervorzuheben, dass für den seltener auftretenden Flautenbetrieb keine zusätzlichen Einrichtungen zur Umwandlung der gespeicherten Lageenergie in elektrischen Strom bereitgestellt werden müssen. Dies ist bei vielen Langzeitspeichern eben gerade nicht der Fall. So nutzt beispielsweise die gute Lagerfähigkeit von Biomasse nicht viel, wenn das dazu gehörige aufwendige Kraftwerk in der Nichtreservezeit ungenutzt herumsteht.

## 3.4 Die Aufwandszahl des TS.PSKW

Um eine Einsicht in die Kostenstruktur zu erhalten betrachten wir ein etwas vereinfachtes theoretisches Modell des TS.PSKW. Insbesondere gehen wir dabei von einer übersichtlichen Skalierung aus, die vor allem darin besteht, dass wir den Hydraulikschacht 8 mit seiner Teufe **L** unterteilen in eine ganze Zahl **N** von „Einheitsbecken“. (Zur Verdeutlichung nennen wir **N** manchmal auch **NN\_B**). Die Beckentiefe **BTief** eines derartigen Einheitsbeckens beträgt dann, wie bereits eingangs in der Gl(3) erwähnt,

**BTief** = L **/** N [(3)}

Auch die Beckenhöhe eines Tiefspeichers, **BzTief** (der Index „z“ steht für „Zusatz“), haben wir im Maßstab von **L** angegeben, indem wir in Gl(4) eine Zahl **M**  definiert haben mit:

**BzTief** = L **/** M [(4)}

Nun beziehen wir die Beckenhöhe der Speicherbecken 1a auf diejenige der Transportbecken Bn und definieren einen „virtuelle Anzahl“ **Nvirt\_z,** die angibt, wie viele Beckenhöhen **BzTief** eines Speicherbeckens der Beckenhöhe **BTief** eines Transportbeckens **Bn** entsprechen würden:

**Nvirt\_z** = **BzTief** / **BTief** = N / M (5)

Grundsätzlich kann **Nvirt\_z** eine beliebige positive Zahl sein, sinnvollerweise wählt man jedoch **Nvirt\_z** nicht größer als 1, d.h. das Speicherbecken ist im Regelfall nicht höher als das Transportbecken.

Es ist praktisch, in der Transportkette im Hydraulikschacht in allen Stockwerken mit gleichartiger Funktion den gleichen Typ der Pumpturbine einzusetzen. An die Pumpturbine **PT1a** des untersten Becken **B1** werden jedoch andere Anforderungen gestellt, da **PT1a** an seinem „unteren“ Anschluss hydraulisch mit den Tiefspeichern mit ihrem schwankenden Wasserpegel verbunden ist. Daher könnte es für die Auswahl der Pumpturbine PT1a sinnvoll sein, für dieses Becken **B1** eine größere Höhe **BTief\_1** zu wählen als für die Höhe **BTief** der sonstigen „regulären“ Transportbecken. Wir setzen daher für die Höhe von **B1** wieder eine Anzahl **Nvirt** von „virtuellen“ Einheitsbecken an:

,

**Nvirt** = **BTief\_1** / **BTief** (6)

Auch hier gilt wieder: Grundsätzlich kann **Nvirt**  eine beliebige positive Zahl sein, sinnvollerweise wählt man jedoch **Nvirt** nicht kleiner als 1.

Nun berechnen wir die Aufwandszahl **Avirt** der Pumpturbine **PT1a** für das Leerpumpen der Tiefspeicher. Wird mit **P1** die Leistung für die effektive Förderhöhe **BTief** bezeichnet, so muss die Pumpturbine PT1a am Anfang die Leistung

P1min = P1 \* (**Nvirt** - **Nvirt\_z**) (7)

und am Ende, wenn der Pegel in den Tiefspeichern fast die unterste Sohle erreicht, die maximale Leistung

P1max = P1 \* **Nvirt** (8)

aufbringen. Wegen des vorausgesetzten gleichmäßigen Massenstromes ergibt das eine mittlere Leistung von

P1m = P1 \* (**Nvirt** - ½\* **Nvirt\_z**) (9)

Die Aufwandszahl der Pumpe PT1a beträgt dann:

**Avirt** = P1max / P1m = **Nvirt** / (**Nvirt** **-** ½\* **Nvirt\_z**) (10)

Die Pumpturbinen aller regulären Transportbecken des Hydraulikschachtes, also der Becken **Bj** mit j = Nvirt +1 bis N, besitzen die Aufwandszahl **A**j =1, da ihre Leistung P1 wg. des gleichmäßigen Massestromes und der stets gleichen Förderhöhe **BTief** konstant bleibt.

Die gesamte mittlere Leistung der Gesamtheit aller Pumpturbinen beträgt daher bei Gültigkeit von Gl(9):

Pm = P1 \* [ (N- Nvirt) + (**Nvirt** - ½\***Nvirt\_z**) ] = P1 \*[ N – ½ \* **Nvirt\_z** ]

Und die maximal erforderliche Leistung wg. Gl.(8)

Pmax = P1 \* [ (N- Nvirt) + **Nvirt** ] = P1 \* N

Daraus ergibt sich die Aufwandszahl **A** der Gesamtheit aller Pumpturbinen zu

**A** = Pmax **/** Pm = N **/** (N – ½ \* Nvirt\_z ) (10)

In der Regel ist - wie oben bemerkt - Nvirt\_z  kleiner als 1 und für den extremen Fall **Nvirt\_z** = 1, also wenn die Speicherbecken 1a genauso hoch wären wie die Transportbecken; nimmt die Aufwandszahl **A** einen maximalen Wert an:

**A** = Pmax **/** Pm = N **/** (N – ½) (10a)

Man sieht, dass **A** nicht mehr von der Beckenhöhe **Nvirt** \* **BTie**f des untersten Beckens abhängt. Die Aufwandszahl **A** ist also völlig unabhängig von der Konfiguration der einzelnen Beckenhöhen im Hydraulikschacht **8** und hängt nur von N, also von der Teufe der Gesamtanlage, **Teuf**= **N** \* **BTief**, und der  Höhe **Nvirt\_z** \* **BTief**der auf der untersten Sohle errichteten Tiefspeicher ab. Man kann also die Pumpturbine PT1a so wählen, dass ein guter Kompromiss zwischen maximaler Pumphöhe und Abdeckung des Leistungsbereiches erreicht wird.

Bei einer gegebenen Teufe **L** wird der Wert von **N** im Wesentlichen durch die optimale Förderhöhe L/N der Pumpturbine bestimmt. Die davon zunächst unabhängige Optimierung der Höhe **BzTief** der Speicherbecken 1a wird durch ihre auf das Volumen bezogenen Baukosten bestimmt.

### Leistung der Pumptubinen und Hydraulikschacht

Das Gesamtvolumen der Tiefspeicher **1a** und der Durchmesser **DB** des Hydraulikschachtes müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass die Fließgeschwindigkeit **wD** im Hydraulikschacht eine maximale Geschwindigkeit **wsoll,** für die auch die Pumpturbinen ausgelegt sind, nicht anhaltend überschreitet. Maßgebend für die Geschwindigkeit **wD** sind letztlich nur der Schachtdurchmesser  **DB** und –bei gegebener Teufe der Tiefspeicher- die Gesamtleistung **P** der Pumpturbinen.

Wir betrachten in **Bild 6** die Leistungsfähigkeit des Hydraulikschachtes für zwei verschiedene Durchmesser (**DB** = 8 bzw. 12 m) und für Tiefspeicher in der mittleren Teufe von 1750 m bzw. in 2750 m. Es zeigt sich, dass bei Leistungen im einstelligen Gigawatt – Bereich mit derzeit üblichen Schachtdurchmessern die Fließgeschwindigkeit **wD** unter 5 m/s bleiben kann. Es soll hier keine maximal zulässige Geschwindigkeit **wsoll** festgelegt werden; die „schonende“ Strömung in einem dicken senkrechten Schacht ohne Kurven und Hindernisse spricht jedoch für einen unüblich hohen Wert von **wsoll**.

## 3.5 Zur Nutzung von Oberflächengewässern als Oberbecken

Bei PSKW auf der Erdoberfläche kommt es gelegentlich vor, dass natürliche Gewässer als Unterbecken genutzt werden können. Beim TS.PSKW sind natürliche Gewässer, wie große Ströme, Flüsse, Seen, u.U. auch das Meer, jedoch geradezu prädestiniert als Oberbecken zu dienen. Wegen der großen Pumphöhe fließen nur relativ kleine Wasserströme, die von großen Gewässern als kaum bemerkbare und wenig störende Pegeländerung „verkraftet“ werden können. Auf die Möglichkeit zur Nutzung von Oberflächengewässern wurde bereits in /1/ und /5/ hingewiesen.

# 4. Wertung: Mit den TS.PSKW das Speicherproblem lösen

## 4.1 Vorteile des TS.PSKW mit Zusatzspeichern auf der untersten Sohle

Die Gesamtkosten eines Tiefschacht Pumpspeicher-Kraftwerk (TS.PSKW) werden nach entsprechendem Forschungs- und Entwicklungsaufwand vermutlich mit denen eines Pumpspeicher-Kraftwerkes (PSKW) vergleichbar sein. Gegenüber dem klassischen PSKW ergeben sich für das TS.PSKW jedoch bedeutende Vorteile:

* Es ergibt sich keine schwerwiegende Beeinträchtigung des **Landschaftsbildes**.
* Es gibt **keine** schwerwiegenden **geographischen Restriktionen**, da TS.PSKW überall errichtet werden können, wo große Gewässer (Strom, Fluss, See) als Oberbecken zur Verfügung stehen. Daher können TS.PSKW in den Brennpunkten des Stromverbrauches oder der Stromerzeugung errichtet werden.

* TS.PSKW können ohne spürbare Umwelt –Beeinträchtigung **zu Anlagen sehr großer Kapazität** ausgebaut werden, sofern als Oberbecken ein entsprechend leistungsfähiges natürliches Gewässer (z.B. ein Strom wie der Rhein, großer See etc.) zur Verfügung steht.
* TS.PSKW können wg. des großen Pegelhubes mit künstlichen Oberbecken (Stausee) in einem mehrfach größeren Leistungsbereich oder mit geringerer Pegelschwankung als herkömmliche PSKW betrieben werden.
* Es bestehen große Freiheiten bei der Auslegung der Anlagen, so dass **bei Bau und Betrieb Standort übergreifend einheitliche Maschinen** eingesetzt werden können.
* Insbesondere können Pumpturbinen, die eine Großteil der Kosten ausmachen, aus dem technisch -wirtschaftlich günstigen „Standardprogramm“ eingesetzt werden, da der Hydraulikschacht gemäß den Erfordernissen eines **optimalen Pumpturbinenbetriebes** ausgelegt werden kann.

* Die reinen Schachtbaukosten pro gespeicherter kWh (nicht pro Speichervolumen) sind besonders niedrig.
* **Zusätzliche „Reserve“- Energiespeicher**, die gelegentlich in einer verlängerten Entladezeit (z.B. nach mehrtägiger Speicherzeit) zum Einsatz mit dem Pumpturbinen-Bestand und mit der sonstigen Infrastruktur kommen, können preisgünstig errichtet und nachgerüstet werden.

## 4.2 Bergbau: vom Kohleabbau zum Untertage-Hohlraum

In Deutschland gibt es eine etwa halbtausendjährige Bergbau Tradition. Zuletzt war es der nun eingestellte Kohleabbau, der den technischen Menschen („homo technicus“) dazu trieb, bis auf eine Teufe von im Saarland fast 2000 m herabzusteigen und im großen Stil Kohle und die dazugehörigen Berge ans Tageslicht zu fördern. Aus dem im Jahre 2012 aufgegebenem Bergwerk Saar (/8/) wurden in guten Zeiten auf diese Weise jährlich etwa 3,5 Mt Kohle gefördert und zwar zu einem Preis von etwa **150 €/t**. Rechnet man die mitgeförderten Berge ein, dann entspricht dies etwa einem Volumen von mindestens ebenso vielen Kubikmetern, also einem Loch von rund 4 \*106 m3. Löcher in fast 2000 m Tiefe zu produzieren ist also erstaunlich preiswert - nur **150 €/m3**. wenn man es im großen Stil, unter optimierter Infrastruktur und in einer hoch entwickelten Technikkultur betreibt.

Nun ist Kohle ein sehr weiches Gestein, und auch die umgebenden Berge sind meist noch „Hobel- und Schräm-“ freundlich. Baut man Schächte in großer Tiefe an einem von der Elektrizitätswirtschaft gewünschtem Platz, dann ist vieles ganz anders: Man muss mit härterem Gestein rechnen und es liegen auch sonst Verhältnisse und Bedingungen vor, auf die der Steinkohlebergbau bisher noch nicht gezwungen war sich einzustellen; daher hat er hierfür auch noch keine kostengünstige Lösungen erfunden und eingeführt. Schächte werden im Bergbau heute von mobilen Spezialfirmen als Fremdgewerk errichtet: mit hohen Einrichtungskosten und hohen Anpassungskosten an die jeweilige Aufgabe. Daher sind die Schachtbaukosten pro m3 “Loch“ bisher auch 3 bis 5 mal so hoch wie die Volumenkosten im eigentlichen Bergbaubetrieb.

**Mit etwas Zukunftsmut stellen wir uns nun folgendes vor**: Es gibt ein gut ausgebautes TS.PSKW mit angeschlossenem Bergbaubetrieb. Aufgabe der Bergleute ist es, kostengünstig und nach und nach neue Reserve-Blindschächte **1b** (siehe Abschnitt „**3.3“**) auf der untersten Sohle zu produzieren.

Ein Speicherschacht in einer mittleren **Teufe von** **4000 m** besitzt eine potentielle Energie von ca. 11 kWh/m3; beachtet man die Turbinenverluste so kann man etwa mit 10 kWh Strom pro m3 rechnen. Aus 1 t Kohle kann man abzüglich des Förderaufwandes und der Kraftwerksverluste vielleicht 3000 kWh Elektrizität gewinnen. Bei 300 Einsätzen würde das „Loch“ also ebenso viel Strom liefern wie wenn man Kohle daraus gewonnen hätte. Bei einer technischen Lebensdauer der Schachtanlage von 50 Jahren und mehr reicht es also aus, wenn die Reserven in der Größenordnung von 6 mal pro Jahr benötigt werden; dies kann jedoch deutlich herabsinken, wenn man berücksichtigt, dass die Stromreserven zu deutlich höherem Preis abgerufen werden. Daher scheint es uns gerechtfertigt, diese bisher grobe Vision eines Langzeitspeichers in höherem Detail weiter zu verfolgen. Bei einem vollständigen Übergang zu RE wird man auch in 100 Jahren und darüber hinaus Energiespeicher brauchen; dann darf man sich aber vor teureren Langzeit Investitionen nicht abschrecken lassen.

# 5. Schrifttum

/1/ **DE 10 2011 105 307 A1 :** G. **Luther** und H. **Schmidt-Boecking**: „Schacht Pumpspeicherkraftwerk“ vom 17.6.2011

/2/ **DE 10 2011 013 329** **A1 :** H. **Schmidt-Boecking** und G. **Luther**: „ Pumpspeicherkraftwerk“ , vom 8.3.2011; und

**DE 10 2011 118 206 A1 :** H. **Schmidt-Boecking** und G. **Luther**: „ Pumpspeicherkraftwerk“ , vom 11.11.2011

/3/ R. D. **Allen**, T. J. **Doherty** und L. D. ***Kannberg*:   
 “**UNDERGROUND PUMPED HYOROELECTRIC STORAGE” (1984),   
 Report prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-ACD6-76RLO 1830, Battelle Institute, Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington 99352, USA

Verfügbar über: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/6517343/6517343.pdf>

/3a/ **Allen**, R. D., C. A. **Blomquist**, G. C. **Chang**, A. **Ferreira** and P. A. **Thompson**. 1980.

„Pumped Storage Hydroelectric Plants with Underground Lower Reservoirs“.

In: Proceedings of the International Symposium on Subsurface Space, Rockstore 80, Vol. 2, pp. 579-585. Pergamon Press, New York,

/4/ Gregory **Martin** und Dr. Frank **Barnes** (2007): „Aquifer Underground Pumped Hydro“

CERI Research Report, University of Colorado. Verfügbar über: <http://www.colorado.edu/engineering/energystorage/files/Aquifer_UPHS_Report_2007-06-30.pdf>

/5/ W. F**. Pickard** : “The History, Present State, and Future Prospects of Underground Pumped Hydro for Massive Energy Storage”

Proceedings of the IEEE, Volume:100 Issue:2 , (2012), p.473-483,

/6/ Website der Firma **Herrenknecht AG**, Schwanau: <http://www.herrenknecht.com/de/home.html> und Themenseite:   
“Mining - Maschineller Schachtbau für eine wirtschaftliche Zukunft im Bergbau” <http://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/mining.html>

/7/ **Reuther, E. U**: “Lehrbuch der Bergbaukunde”, 12. Auflage (2010), Essen, BGE Verlag GmbH, ISBN= 978-3-86797-076-1.

/8/ **wikipedia**: Artikel “Bergwerk Saar” (abgerufen am 19. 11.2013)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bergwerk_Saar>

**Zusammenfassung (wird nachgereicht)**

**Bilder und Bildunterschriften (siehe Extradatei bzw. Anhang)**

**Bezeichnungen**

1 = Schacht

1a = Tiefspeicher, ein Untertage- Reservoir, z.B. ein Speicher-Blindschacht

1b = Tiefspeicher als Reservespeicher

11 = Außenbecken, auch als Becken **B0** bezeichnet

16 = Überlauf zwischen Schacht und Außenbecken

16a = Verbindungsleitung

16b = Verbindungsleitung

7 = Pumpturbineneinheit (PT –Einheit);  
 **PTj** = Pumpturbine in Höhe der Sohle des Becken **Bj** im Hydraulikschacht 8

8 = Hydraulikschacht

9 =Versorgungschacht

**B0** = Außenbecken als Oberbecken eines Pumpspeicher-Kraftwerkes. Auch ein natürliches Gewässer kann als „Oberbecken **B0**“ genutzt werden.

**Bj** mit j=1..N = Becken im Stockwerk j des Hydraulikschachtes. **B1** bezeichnet das unterste Becken, **BN** das oberste Becken

# 6. Patentansprüche

**1.** Erweitertes Schacht-Pumpspeicherkraftwerk zum Speichern von elektrischer Energie durch einen Pumpturbinen –Betrieb von Wasser zwischen einem Oberbecken und unterirdischen Speicherbecken bestehend aus

* einem oberirdischen Speicherbecken **B0  als Oberbecken**, das vornehmlich aus einem großen natürlichen Gewässer wie beispielsweise einem Strom, einem Fluss oder einem See besteht,
* mehreren Tiefspeichern **1a** in Gestalt von in großer Teufe (ab etwa 1500 m) parallel angeordneten Reservoiren, vornehmlich in Form von Blindschächten gleicher Höhe und gleicher Tiefenlage, die so ausgeführt sind, dass sie zum zeitweisen Speichern von Wasser geeignet sind, als Unterbecken
* einem Hydraulikschacht **8**, der in eine Anzahl N von vornehmlich gleichabständigen Stockwerken unterteilt ist, die jeweils aus einem im Betriebsfall nahezu vollständig mit Wasser gefüllten Becken **Bj** (mit j= 1..N, wobei j=1 das unterste Stockwerk und j=N das oberste Stockwerk bezeichnen) bestehen,  
  wobei am Fußpunkt jedes Becken **Bj** eine Pumpturbine **7** installiert ist,  
   die im Pumpbetrieb

im Falle j=1 das Wasser aus den Tiefspeichern **1a** aufnimmt und in das tiefste Becken **B1** herein drückt, und die

für j= 2..(N-1) das Wasser aus dem unter **Bj** liegenden Becken **Bj-1** aufnimmt und in das besagte Becken **Bj** hineindrückt, und die

im Falle j=N das Wasser aus dem zweitobersten Becken **BN-1** aufnimmt und in das oberste Becken B**N** hineinpumpt so dass dieses überläuft und das überlaufende Wasser in das Oberbecken **B0** abfließt , und

die im Turbinenbetrieb das Wasser in der umgekehrten Richtung vom Oberbecken  
 **B0** in die anfangs leergepumpten Tiefbecken **1a** hineinlaufen lässt,

wobei alle Pumpturbinen 7 so betrieben werden, dass durch alle Stockwerke der gleiche Massenstrom fließt.

**2.** Tiefschacht-Speicherkraftwerk (TS.PSKW) nach **Anspruch 1** dadurch gekennzeichnet, dass

zusätzlich zu den erwähnten Tiefspeichern **1a** weitere Reservoire als **Reservespeicher** **1b** angelegt sind, die in der Beckenhöhe und in der Höhenlage den im Anspruch 1 erwähnten Tiefspeichern **1a** entsprechen aber nur zu solchen Zeiten gefüllt oder entleert werden, in denen die Tiefspeicher **1a** sich in einem Ruhezustand befinden, so dass für die Reservespeicher **1b** keine eigene Kapazität an Pumpturbinen vorgehalten werden muss.

**3.** Tiefschacht-Speicherkraftwerk (TS.PSKW) nach **Anspruch 1 oder 2** dadurch gekennzeichnet, dass

die Höhe des tiefsten Beckens B1 des Hydraulikschachtes 8 größer ist als die Höhe der sonstigen Becken des Hydraulikschachtes.

**4.** Tiefschacht-Speicherkraftwerk (TS.PSKW) nach einem oder mehreren der **Ansprüche 1 bis 3** dadurch gekennzeichnet, dass aufgrund örtlicher Besonderheiten die Höhen von mehreren Stockwerken des Hydraulikschachtes 8 unterschiedlich sind.

**5**. Hydraulikschacht nach nach einem oder mehreren der **Ansprüche 1 bis 4**  dadurch gekennzeichnet, dass zur Verringerung der Pegelschwankungen während des Betriebes der Schachtdurchmesser im oberen Bereich vergrößert ist.

# Bildunterschriften und Bilder

**Bild 1: Konzept der UPHS nach /3/ als Stand der Technik am Ende der 1. Entwicklungsperiode 1984.**

**Original- Legende: „Figure 2:** Three-Dimensional Conception of UPHS Plant (adapted from Allen et al. 1980)“, wobei der Hinweis sich auf unser Zitat /3a/ bezog.

**Bild 2:** **Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk** (TS.PSKW) mit Tiefspeichern **1a**  und einem in N=4 Stockwerke unterteilten Hydraulikschacht **8**. Im Pumpbetrieb drückt eine Pumpturbine **7** Wasser in das Becken **Bj** welches aus dem darunterliegenden Stockwerk **Bj-1**  stammt; das unterste Becken **B1** wird über die Pumpturbine **PT1a** durch die Tiefspeicher **1a** gespeist und das Wasser des obersten Becken **BN** läuft durch den Überlauf **16** über in das Oberbecken **B0**. Der gleiche Massestrom in allen Pumpturbinen stellt sicher, dass alle Becken ihre Pegelhöhe einhalten.

**Bild 3:** Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk (TS.PSKW) wie in Bild 2 jedoch mit Tiefspeichern 1a, deren Höhe BzTief deutlich niedriger ist als die Beckenhöhe der Transportbecken im Hydraulikschacht 8.

**Bild 4:** Draufsicht auf die unterste Sohle eines Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerkes (TS.PSKW), bestehend aus einem Hydraulikschacht- **8** und **sechs Tiefspeichern 1a , die sich als zusätzlichen Untertage- Blindschächten** oder sonstige Reservoire alle auf der untersten Sohle befinden und dort mit dem Hydraulikschacht 8 über hydraulische Verbindungsleitungen **16a** verbunden sind..

**Bild 5:** **Reserve –Tiefspeicher 1b** für ein TS.PSKW, die nur dann zum Einsatz kommen, wenn die im Routinespeicherbetrieb eingesetzten Tiefspeicher **1a** energetisch leer sind und weiterhin eine starke Stromnachfrage herrscht. Alle Speicherschächte sind über Verbindungsstollen **16a** mit dem zentral liegenden Hydraulikschacht **8** verbunden. Zur Wartung der Pumpturbinen und der Schachtanlage ist ein Versorgungsschacht **9** vorgesehen, der bei der Erstellung und Erweiterung der Speicheranlage auch als Montageschacht genutzt werden kann.

**Bild 6**: **Geschwindigkeit** **wD** **des Wassers im Hydraulikschacht** **8** als Funktion der elektrischen Gesamtleistung **P** der Pumpturbinen. Die Angaben gelten für einen Schachtdurchmesser DB= 8 m bzw. DB= 12m, der jeweils als Index in der Legende vermerkt ist, und beziehen sich auf eine mittlere Teufe der Tiefspeicher von 1750 m (gestrichelte Linien) bzw. 2750 m (durchgezogenen Linien.

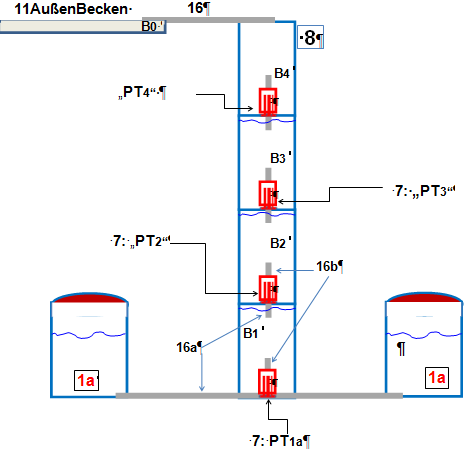
Speicher: Bergei-TS.PSKW\_GrobKalkulation.xlsm!D1\_TS Kapitel 1.1



**Bild 1:**

**Bild 1: Konzept der UPHS nach /3/ als Stand der Technik am Ende der 1. Entwicklungsperiode 1984.**

**Original- Legende: „Figure 2:** Three-Dimensional Conception of UPHS Plant (adapted from Allen et al. 1980)“, wobei der Hinweis sich auf unser Zitat /3a/ bezog.



**Bild 2**:

**Bild 2**: **Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk** (TS.PSKW) mit Tiefspeichern **1a**  und einem in N=4 Stockwerke unterteilten Hydraulikschacht **8**. Im Pumpbetrieb drückt eine Pumpturbine **7** Wasser in das Becken **Bj** welches aus dem darunterliegenden Stockwerk **Bj-1**  stammt; das unterste Becken **B1** wird über die Pumpturbine **PT1a** durch die Tiefspeicher **1a** gespeist und das Wasser des obersten Becken **BN** läuft durch den Überlauf **16** über in das Oberbecken **B0**. Der gleiche Massestrom in allen Pumpturbinen stellt sicher, dass alle Becken ihre Pegelhöhe einhalten.

**B1**

**B4**

**B3**

**B2**

**7: „PT3“**

**7:** „**PT2“**

**7:** **PT1a**

**16**

**8**

**16b**

**16a**



**1a**

**Bild 3:**

**Bild 3:**Tiefschacht –Pumpspeicher-Kraftwerk (TS.PSKW) wie in Bild 2 jedoch mit Tiefspeichern 1a, deren Höhe BzTief deutlich niedriger ist als die Beckenhöhe der Transportbecken im Hydraulikschacht 8.

ca. 250 m

**1a**

**1a**

16a

**Bild 4:**

**Bild 4:** Draufsicht auf die unterste Sohle eines Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerkes (TS.PSKW), bestehend aus einem Hydraulikschacht- **8** und **sechs Tiefspeichern 1a , die sich als zusätzlichen Untertage- Blindschächten** oder sonstige Reservoire alle auf der untersten Sohle befinden und dort mit dem Hydraulikschacht 8 über hydraulische Verbindungsleitungen **16a** verbunden sind..

1

**9**

16a

1a

1a

1a

1a

1a

1a

**8**

1a

1a

1a

1a

1a

1a

1a

1a

**1b**

**1b**

**1b**

**1b**

16a

16a

**Bild 5:**

**Bild 5:** **Reserve –Tiefspeicher 1b** für ein TS.PSKW, die nur dann zum Einsatz kommen, wenn die im Routinespeicherbetrieb eingesetzten Tiefspeicher **1a** energetisch leer sind und weiterhin eine starke Stromnachfrage herrscht. Alle Speicherschächte sind über Verbindungsstollen **16a** mit dem zentral liegenden Hydraulikschacht **8** verbunden. Zur Wartung der Pumpturbinen und der Schachtanlage ist ein Versorgungsschacht **9** vorgesehen, der bei der Erstellung und Erweiterung der Speicheranlage auch als Montageschacht genutzt werden kann.



**Bild 6:**

**Bild 6:**  **Geschwindigkeit** **wD** **des Wassers im Hydraulikschacht** **8** als Funktion der elektrischen Gesamtleistung **P** der Pumpturbinen. Die Angaben gelten für einen Schachtdurchmesser DB= 8 m bzw. DB= 12m, der jeweils als Index in der Legende vermerkt ist, und beziehen sich auf eine mittlere Teufe der Tiefspeicher von 1750 m (gestrichelte Linien) bzw. 2750 m (durchgezogenen Linien.

Speicher: Bergei-TS.PSKW\_GrobKalkulation.xlsm!D1\_TS Kapitel 1.1

**Zusammenfassung**

Bild 3

1a 1a 1a

**AußenBecken 11AußenBecken 11AußenBecken 11**

**B1**

**B0** **B0** **B0**

**B4**

**B3**

**B2**

**7:** „**PT4“ 7:** „**PT4“ 7:** „**PT4“**

**7: „PT3“**

**7:** „**PT2“**

**7:** **PT1a**

**16**

**8**

**16b**

**16a**



**1a 1a 1a**

**1a**

Die Erfindung beschreibt ein großes Pumpspeicherkraftwerk, dessen Oberbecken **11** vornehmlich ein natürliches Gewässer ist und dessen Unterbecken aus mehreren in großer Teufe liegenden Tiefspeichern **1a** besteht. Die Verbindung erfolgt durch einen Hydraulikschacht **8**, der in mehrere (im Bild sind es vier) Stockwerke unterteilt ist. An der Sohle der dadurch entstehenden Becken **B1** bis **BN**, die noch einen freien Wasserpegel besitzen, da sie nur fast vollständig mit Wasser gefüllt sind, werden Pumpturbinen **7** installiert, die bei weitgehend konstanten Pegeln das Wasser im Pumpbetrieb aus dem unterhalb liegenden Becken entnehmen und in das aktuelle Becken hineinpumpen. Die Pumpturbine „**PT4**“ im obersten Becken **B4** erzeugt dadurch ein Überlaufen des Beckens **B4** über den Überlauf **16** in das Außenbecken **11**, und die Pumpturbine **PT1a** im untersten Becken **B1** entnimmt das Wasser den Tiefspeichern **1a**. Nur diese Pumpturbine **PT1a** im untersten Becken **B1** muss mit einem zeitlich abnehmenden Gegendruck, nämlich demjenigen der sich leerenden Tiefspeicher 1a arbeiten; die übrigen Pumpturbinen arbeiten hingegen immer zwischen – bis auf Fluktuationen- konstanten Pegelhöhen. Der Turbinenbetrieb erfolgt mit gleichen Pegelverhältnissen in umgekehrter Richtung.

Die Erfindung zielt auf einen Speicherbetrieb in großer Teufe und erlaubt den Einsatz standardisierter und optimierter Pumpturbinen.

3