



(10) **DE 10 2013 019 776 B3** 2015.01.29

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 019 776.7**
(22) Anmeldetag: **21.11.2013**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.01.2015**

(51) Int Cl.: **F03B 13/06 (2006.01)**
E02B 9/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Luther, Gerhard, Dr., 66119 Saarbrücken, DE

(72) Erfinder:
**Luther, Gerhard, Dr., 66119 Saarbrücken,
DE; Schmidt Böcking, Horst, Prof. Dr., 65779
Kelkheim, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE 10 2011 013 329 A1
DE 10 2011 105 307 A1
DE 10 2011 118 206 A1

**Gregory Martin, Dr. Frank Barnes: Aquifer
Underground Pumped Hydro. In: CERI Research
Report, University of Colorado, 30. June 2007, 1
bis 16.**

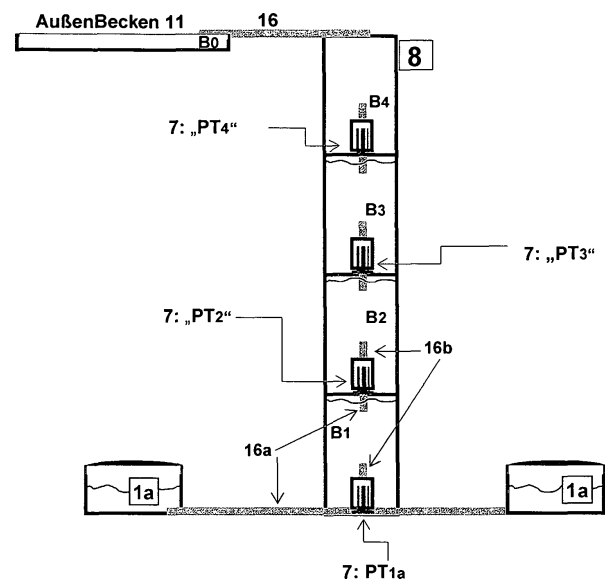
**R.D. Allen, T.J. Doherty, L.D. Kannenberg:
Underground pumped hydroelectric storage.
In: Report prepared for the U.S. Department of
Energy, July 1984, 1 bis 1.4, 2.1 bis 2.41, 3.1 bis
4.1.**

**W.F. Pickard: The History, Present State and
Future Prospects of Underground Pumped Hydro
for Massive Energy Storage. In: Proceedings of
the IEEE, Volume: 100 Issue: 2, 2012, 473 bis 483.**

(54) Bezeichnung: **Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS.PSKW)**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung beschreibt ein großes Pumpspeicherkraftwerk, dessen Oberbecken 11 vornehmlich ein natürliches Gewässer ist und dessen Unterbecken aus mehreren in großer Tiefe 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 B_N, 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 Tiefe und erlaubt den Einsatz standardisierter und optimierter Pumpturbinen.



Beschreibung

[0001] 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 A1 (/1/) dar.

1. Aufgabenstellung und Stand der Technik

[0002] 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. 42 GWh. Der weitere Ausbau ist in Deutschland durch einen Mangel an geeigneten Standorten nur sehr eingeschränkt möglich und wird überdies durch den erbiterten Widerstand in der betroffenen Bevölkerung gegen die massive, manchmal geradezu brutale Umgestaltung der Landschaft außerordentlich erschwert.

[0003] 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.

[0004] 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 Pumpenturbine 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.

[0005] 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):

[0006] 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 Stützfeilern geplant.

[0007] Untertage Pumpturbinen im Bereich der untersten Sohle („subterranean powerhouse“) und – optional bei großen Teufen – zusätzliche Pumpturbinen mit Kavernen zur Zwischenspeicherung auf halber Teufe.

[0008] 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.

[0009] 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 A1 (/1/) vorgeschlagen – ein natürliches Gewässer und zwar ein Fluss vorgesehen ist.

[0010] 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

[0011] In DE 10 2011 013 329 A1 (/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 A1 (/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.

[0012] In DE 10 2011 105 307 A1 (/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 B_1 bis B_N dienen. Alle Becken B_n 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 B_0 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 B_0 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 P_{\max} zu der mittleren Pumpenleistung P_m bezeichnet:

$$A = P_{\max}/P_m \quad (1)$$

- 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:

$$A = 1 + 1/N \quad (2)$$

[0013] 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 Was-

seraustausch mit externen Oberbecken durchgeführt wird.

[0014] 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 B_1 bis B_N und dem Oberbecken B_0 darstellt. Pumpturbinen drücken in allen Stockwerken das Speicherwasser in den Hydraulikschacht gegen den im jeweiligen Stockwerk n anstehenden hydraulischen Druck p_n (mit $n = 1..N$) der Wassersäule bzw. entnehmen das Turbinenwasser aus dem Hydraulikschacht unter dem Druck p_n . Wirksam ist dann jeweils der Druck p_n abzüglich des vom jeweiligen Pegelstand im Speicherbecken abhängigen Gegendrucks. Auch der Speicherschacht, bei dem ein vollständiger Wasseraustausch mit dem außenliegenden Oberbecken B_0 über einen gemeinsamen Hydraulikschacht führt, ist ein „offener“ Schacht im Sinne von /1/ und daher wird seine Aufwandszahl A ebenfalls durch Gl(2) beschrieben.

[0015] In DE 10 2011 105 307 A1 (/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.

[0016] Im Folgenden soll nun eine Weiterführung des Schacht-Pumpspeicherkraftwerkes behandelt werden. Ausgangspunkt ist die Kombination von tiefliegenden Speicherreservoirs, 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.

[0017] 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)

[0018] Das Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (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 B_0 , 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 B_1 etwa in der Teufe der unteren Sohle der Tiefspeicher **1a** liegt und sein oberstes Becken B_N durch einen Überlauf direkt mit dem Oberbecken B_0 verbunden ist.

3.0 Übersicht über die Zeichnungen

[0019] Ausgangslage, Konzeption und die weitere Ausgestaltung der Erfindung werden auch in Zeichnungen erläutert:

[0020] 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,

[0021] Bild 2: Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS-PSKW) mit Tiefspeichern **1a** und einem in $N = 4$ Stockwerke unterteilten Hydraulikschacht **8**. Im Pumpbetrieb drückt eine Pumpturbine **7** Wasser in das Becken B_j welches aus dem darunterliegenden Stockwerk B_{j-1} stammt; das unterste Becken B_1 wird über die Pumpturbine PT1a durch die Tiefspeicher **1a** gespeist und das Wasser des obersten Beckens B_N läuft durch den Überlauf **16** über in das Oberbecken B_0 . Der gleiche Massestrom in allen Pumpturbinen stellt sicher, dass alle Becken ihre Pegelhöhe einhalten.

[0022] Bild 3: Tiefschacht-Pumpspeicherkraftwerk (TS-PSKW) wie in Bild 2 jedoch mit Tiefspeichern **1a**, deren Höhe $B_{z_{Tief}}$ deutlich niedriger ist als die Beckenhöhe der Transportbecken im Hydraulikschacht **8**.

[0023] 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.

[0024] 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 Schachanlage ist ein Versorgungsschacht **9** vorgesehen, der bei der Erstellung und Erweiterung der Speicheranlage auch als Montageschacht genutzt werden kann.

[0025] Bild 6: Geschwindigkeit w_D des Wassers im Hydraulikschacht **8** als Funktion der elektrischen Gesamtleistung P der Pumpturbinen. Die Angaben gelten für einen Schachtdurchmesser $D_B = 8$ m bzw. $D_B = 12$ 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**

[0026] 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 B_j (mit $j = 1 \dots N$; der Index 1 bezeichnet das unterste und der Index N das oberste Becken) dienen. Die Beckentiefe B_{Tief} dieser gleichabständigen Transportbecken beträgt dann

$$B_{Tief} = L/N \quad (3)$$

- Alle Transportbecken B_j mit Ausnahme des obersten Beckens, also die B_j für $j = 1 \dots (N - 1)$, sind im Betriebsfalle (nahezu) vollständig mit Wasser gefüllt; allerdings verbleibt noch ein kleiner Freiraum, so dass sich in den B_j ein freier Wasserpegel ausbilden kann.

- Jedes Transportbecken B_j 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 und

im Falle $j = 1$ mit den Tiefspeichern **1a** verbunden.

- Das Oberbecken B_0 , das vornehmlich aus einem großen natürlichen Gewässer (z. B. Strom, Fluss, See) besteht, ist mit dem obersten Transportbecken B_N 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 B_j sich während des Betriebes nicht ändert.

- Oberhalb des untersten Becken B_1 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 B_1 arbeitet hingegen mit einem schwankenden Vordruck, der durch den sich verändernden Füllzustand der Tiefspeicher **1a** bedingt wird.

[0027] Die Funktionsweise lässt sich besonders einfach verstehen, wenn man sich klar macht, dass die Becken B (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 B herrscht – und nicht etwa derjenige, der der Teufe des Beckens im Schacht entspricht.

[0028] 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 immer in das aktuelle Becken B_j hinein, wobei als Besonderheit das unterste Becken B_1 sein Wasser aus den Tiefspeichern **1a** bezieht und beim obersten Becken B_N das Hineinpressen zu einem Überlauf in das Oberbecken B_0 führt.

[0029] Bei gleicher Höhe der Becken B_j 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.

[0030] Im untersten Becken B_1 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.

[0031] Im Turbinenbetrieb ist die zeitliche Abfolge genau umgekehrt: Zu Beginn kann das Wasser aus dem stets von oben nachgefüllten und daher stets vollen Becken B_1 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.

[0032] 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.

[0033] 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.

[0034] In Bild 2 sind die Pumpturbinen schematisch auf der Sohle eines Becken B_j 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 B_{j-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.

[0035] Der wesentliche Unterschied (Fortschritt) der erfindungsgemäßen Konzeption des Hydraulikschachtes **8** gegenüber dem in DE 10 2011 105 307 A1 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 A1 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**

[0036] Der Hydraulikschacht **8** wird durch eine Anzahl N_{Bz} zusätzlicher tiefliegender Blindschächte oder sonstiger Reservoirs, 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 Bz_{Tief} ; 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.

[0037] Die Höhe der Tiefspeicher **1a** beziehen wir auf die Teufe L der untersten Sohle und definieren daher in Analogie zur Anzahl N der Transportbecken B_n eine Zahl M durch

$$Bz_{Tief} = L/M \quad (4)$$

[0038] Die optimale Höhe Bz_{Tief} wird im Wesentlichen durch die spezifischen Baukosten und die Aufwandszahl A für die Pumpturbinen bestimmt. Wegen der großen Teufe könnte Bz_{Tief} durchaus – wie in Bild 2 dargestellt – in die Größenordnung der Stockwerkshöhe B_{Tief} 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 Bz_{Tief} (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 Ab-

bau von Gestein zur Erstellung von wasserdichten Hohlräumen, deren Standfestigkeit und Lebensdauer von wesentlicher Bedeutung sind.

[0039] 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.

[0040] 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 B_1 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

[0041] Das TS.PSKW ist auf eine bestimmte Lade- und Entladezeit t_L 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 Einsatzfall 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.

[0042] 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.

[0043] In Bild 5 ist in der Ebene der untersten Sohle die Draufsicht eines TS.PSKW mit zusätzlichen Reserve-Tiefspeichern **1b** gezeigt. Die für den regulä-

ren 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.

[0044] Die Verbindungsleitung **16a** zu den Pumpturbinen des Hydraulikschachtes **8** können bei größeren Anlagen die Form von Druckstollen annehmen und weit verzweigt sein.

[0045] Zur Wartung der Pumpturbinen und der Schachanlage 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**

[0046] 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

[0047] 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 B_{Tief} eines derartigen Einheitsbeckens beträgt dann, wie bereits eingangs in der Gl(3) erwähnt,

$$B_{Tief} = L/N \quad [(3)]$$

[0048] Auch die Beckenhöhe eines Tiefspeichers, Bz_{Tief} (der Index „z“ steht für „Zusatz“), haben wir im Maßstab von L angegeben, indem wir in Gl(4) eine Zahl M definiert haben mit:

$$Bz_{Tief} = L/M \quad [(4)]$$

[0049] Nun beziehen wir die Beckenhöhe der Speicherbecken **1a** auf diejenige der Transportbecken B_n und definieren einen „virtuelle Anzahl“ N_{virt_z} , die angibt, wie viele Beckenhöhen Bz_{Tief} eines Speicherbe-

ckens der Beckenhöhe B_{Tief} eines Transportbeckens B_n entsprechen würden:

$$N_{virt_z} = Bz_{Tief}/B_{Tief} = N/M \quad (5)$$

[0050] Grundsätzlich kann N_{virt_z} eine beliebige positive Zahl sein, sinnvollerweise wählt man jedoch N_{virt_z} nicht größer als 1, d. h. das Speicherbecken ist im Regelfall nicht höher als das Transportbecken.

[0051] 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 B_1 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 B_1 eine größere Höhe B_{Tief_1} zu wählen als für die Höhe B_{Tief} der sonstigen „regulären“ Transportbecken. Wir setzen daher für die Höhe von B_1 wieder eine Anzahl N_{virt} von „virtuellen“ Einheitsbecken an:

$$N_{virt} = B_{Tief_1}/B_{Tief} \quad (6)$$

[0052] Auch hier gilt wieder: Grundsätzlich kann N_{virt} eine beliebige positive Zahl sein, sinnvollerweise wählt man jedoch N_{virt} nicht kleiner als 1.

[0053] Nun berechnen wir die Aufwandszahl der Pumpturbine PT1a für das Leerpumpen der Tiefspeicher. Wird mit P_1 die Leistung für die effektive Förderhöhe B_{Tief} bezeichnet, so muss die Pumpturbine PT1a am Anfang die Leistung

$$P_{1min} = P_1 \cdot (N_{virt} - N_{virt_z}) \quad (7)$$

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

$$P_{1max} = P_1 \cdot N_{virt} \quad (8)$$

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

$$P_{1m} = P_1 \cdot (N_{virt} - \frac{1}{2} \cdot N_{virt_z}) \quad (9)$$

[0054] Die Aufwandszahl der Pumpe PT1a beträgt dann:

$$A_{virt} = P_{1max}/P_{1m} = N_{virt}/(N_{virt} - \frac{1}{2} \cdot N_{virt_z}) \quad (10)$$

[0055] Die Pumpturbinen aller regulären Transportbecken des Hydraulikschachtes, also der Becken B_j mit $j = N_{virt} + 1$ bis N , besitzen die Aufwandszahl $A_j = 1$, da ihre Leistung P_1 wg. des gleichmäßigen Masse-

stromes und der stets gleichen Förderhöhe B_{Tief} konstant bleibt.

[0056] Die gesamte mittlere Leistung der Gesamtheit aller Pumpturbinen beträgt daher bei Gültigkeit von Gl(9):

$$P_m = P1 \cdot [(N - N_{\text{virt}}) + (N_{\text{virt}} - \frac{1}{2} \cdot N_{\text{virt}_z})] = P1 \cdot [N - \frac{1}{2} \cdot N_{\text{virt}_z}]$$

[0057] Und die maximal erforderliche Leistung wg. Gl.(8)

$$P_{\text{max}} = P1 \cdot [(N - N_{\text{virt}}) + N_{\text{virt}}] = P1 \cdot N$$

[0058] Daraus ergibt sich die Aufwandszahl A der Gesamtheit aller Pumpturbinen zu

$$A = P_{\text{max}}/P_m = N/(N - \frac{1}{2} \cdot N_{\text{virt}_z}) \quad (10)$$

[0059] In der Regel ist – wie oben bemerkt – N_{virt_z} kleiner als 1 und für den extremen Fall $N_{\text{virt}_z} = 1$, also wenn die Speicherbecken **1a** genauso hoch wären wie die Transportbecken; nimmt die Aufwandszahl A einen maximalen Wert an:

$$A = P_{\text{max}}/P_m = N/(N - \frac{1}{2}) \quad (10a)$$

[0060] Man sieht, dass A nicht mehr von der Beckenhöhe $N_{\text{virt}} \cdot B_{\text{Tief}}$ des untersten Beckens abhängt. Die Aufwandszahl A ist also völlig unabhängig von der Konfiguration der einzelnen Beckenhöhen im Hydraulischsacht **8** und hängt nur von N, also von der Teufe der Gesamtanlage, $\text{Teuf} = N \cdot B_{\text{Tief}}$, und der Höhe $N_{\text{virt}_z} \cdot B_{\text{Tief}}$ 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.

[0061] 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 B_{Tief} der Speicherbecken **1a** wird durch ihre auf das Volumen bezogenen Baukosten bestimmt.

Leistung der Pumptubinen und Hydraulischsacht

[0062] Das Gesamtvolumen der Tiefspeicher **1a** und der Durchmesser D_B des Hydraulischsachtes müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass die Fließgeschwindigkeit w_D im Hydraulischsacht eine maximale Geschwindigkeit w_{soll} , für die auch die Pumpturbinen ausgelegt sind, nicht anhaltend überschreitet. Maßgebend für die Geschwindigkeit w_D sind letztlich nur der Schachtdurchmesser D_B und – bei gegebener Teufe der Tiefspeicher – die Gesamtleistung P der Pumpturbinen.

[0063] Wir betrachten in Bild 6 die Leistungsfähigkeit des Hydraulischsachtes für zwei verschiedene Durchmesser ($D_B = 8$ 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 w_D unter 5 m/s bleiben kann. Es soll hier keine maximal zulässige Geschwindigkeit w_{soll} festgelegt werden; die „schonende“ Strömung in einem dicken senkrechten Schacht ohne Kurven und Hindernisse spricht jedoch für einen unüblich hohen Wert von w_{soll} .

3.5 Zur Nutzung von Oberflächengewässern als Oberbecken

[0064] 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 „verkräftet“ 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

[0065] 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 Hydraulischschacht 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

[0066] 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 $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. 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 Technik-kultur betreibt.

[0067] Nun ist Kohle ein sehr weiches Gestein, und auch die umgebenden Berge sind meist noch „Hobel- und Schräg-“ 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.

[0068] 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.

[0069] 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 HYDROELECTRIC 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>
- /4/ Gregory Martin und Dr. Frank Barnes (2007): „Aquifer Underground Pumped Hydro“ CERl Research Report, University of Colorado. Verfügbar über:
[http://www.colorado.edu/engineering/energystorage/files/Aquifer UPHS Report 2007-06-30.pdf](http://www.colorado.edu/engineering/energystorage/files/Aquifer%20UPHS%20Report%202007-06-30.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, Schwannau:

<http://www.herrenknecht.com/de/home.html> und Themenseite:

"Mining-Maschinelles 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

Bezugszeichenliste

1	Schacht
1a	Tiefspeicher, ein Untertage-Reservoir, z. B. ein Speicher-Blindschacht
1b	Tiefspeicher als Reservespeicher
11	Außenbecken, auch als Becken B_0 bezeichnet
16	Überlauf zwischen Schacht und Außenbecken
16a	Verbindungsleitung
16b	Verbindungsleitung
7	Pumpturbineneinheit (PT-Einheit);
PT_j	Pumpturbine in Höhe der Sohle des Becken B_j im Hydraulischschacht 8
8	Hydraulischschacht
9	Versorgungschacht
B₀	Außenbecken als Oberbecken eines Pumpspeicher-Kraftwerkes. Auch ein natürliches Gewässer kann als „Oberbecken B_0 “ genutzt werden.
B_j mit j = 1..N	Becken im Stockwerk j des Hydraulischschachtes. B_1 bezeichnet das unterste Becken, B_N das oberste Becken

Patentansprüche

1. Erweitertes Schacht-Pumpspeicherkraftwerk zum Speichern von elektrischer Energie durch einen Pumperturbinen-Betrieb von Wasser zwischen einem

Oberbecken und unterirdischen Speicherbecken bestehend aus

- einem oberirdischen Speicherbecken B_0 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 Tiefe (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 Hydraulischschacht **8**, der in eine Anzahl N von vornehmlich gleichabständigen Stockwerken unterteilt ist, die jeweils aus einem im Betriebsfall nahezu vollständig mit Wasser gefüllten Becken B_j (mit $j = 1..N$, wobei $j = 1$ das unterste Stockwerk und $j = N$ das oberste Stockwerk bezeichnen) bestehen, wobei am Fußpunkt jedes Becken B_j eine Pumperturbine **7** installiert ist, die im Pumpbetrieb

im Falle $j = 1$ das Wasser aus den Tiefspeichern **1a** aufnimmt und in das tiefste Becken B_1 herein drückt, und die

für $j = 2..(N - 1)$ das Wasser aus dem unter B_j liegenden Becken B_{j-1} aufnimmt und in das besagte Becken B_j hineindrückt, und die

im Falle $j = N$ das Wasser aus dem zweitobersten Becken B_{N-1} aufnimmt und in das oberste Becken B_N hineinpumpt so dass dieses überläuft und das überlaufende Wasser in das Oberbecken B_0 abfließt, und die im Turbinenbetrieb das Wasser in der umgekehrten Richtung vom Oberbecken B_0 in die anfangs leergepumpten Tiefbecken **1a** hineinlaufen lässt, wobei alle Pumperturbinen **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 Reservoirs 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 Pumperturbinen vorgehalten werden muss.

3. Tiefschacht-Speicherkraftwerk (TS.PSKW) nach Anspruch 1 oder 2 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Höhe des tiefsten Beckens B_1 des Hydraulischschachtes **8** größer ist als die Höhe der sonstigen Becken des Hydraulischschachtes.

4. Tiefschacht-Speicherkraftwerk (TS.PSKW) nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 **dadurch gekennzeichnet**, dass aufgrund örtlicher Besonder-

heiten die Höhen von mehreren Stockwerken des Hydraulischschachtes **8** unterschiedlich sind.

5. Hydraulischsacht 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.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

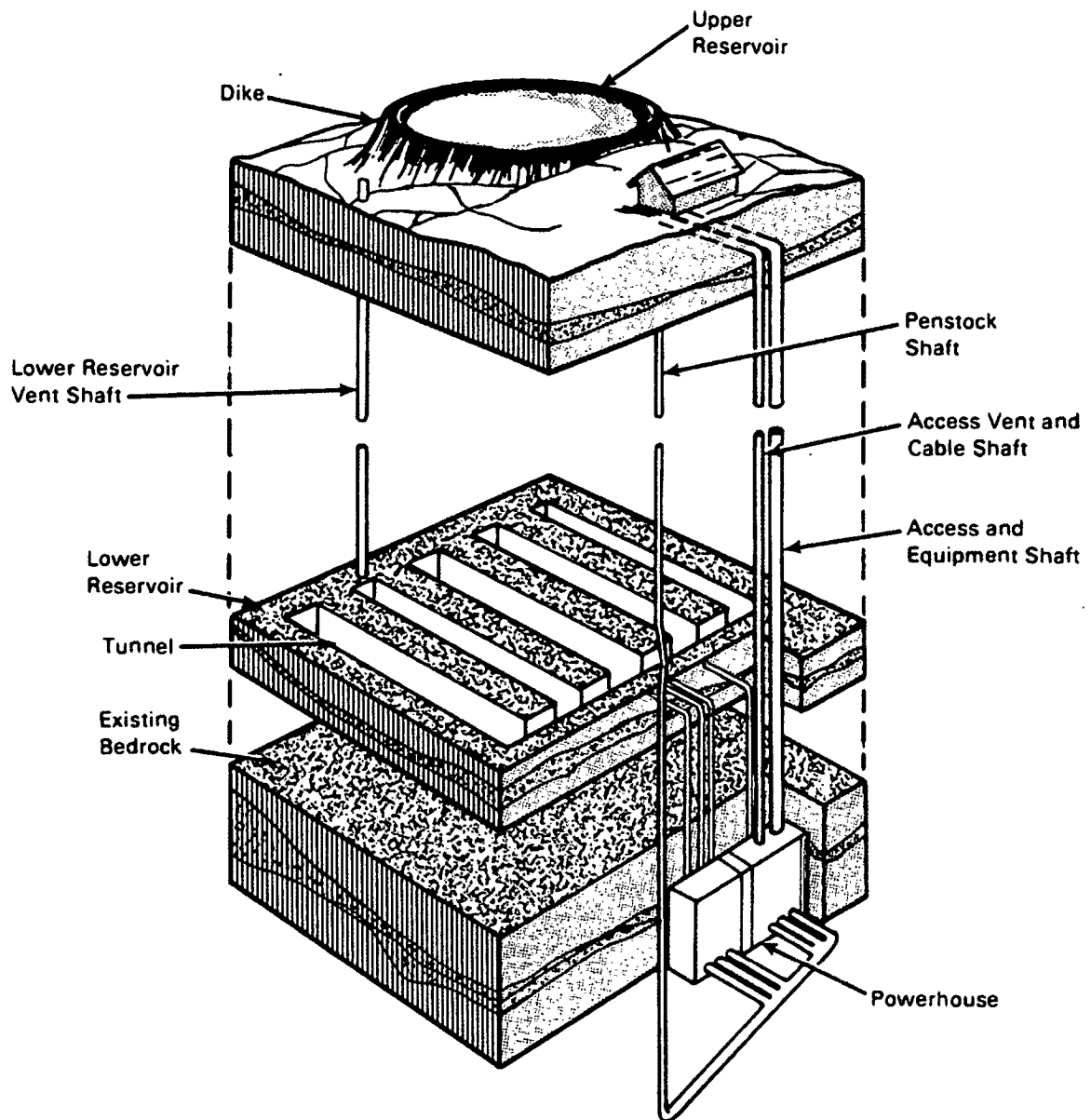


Bild 1:

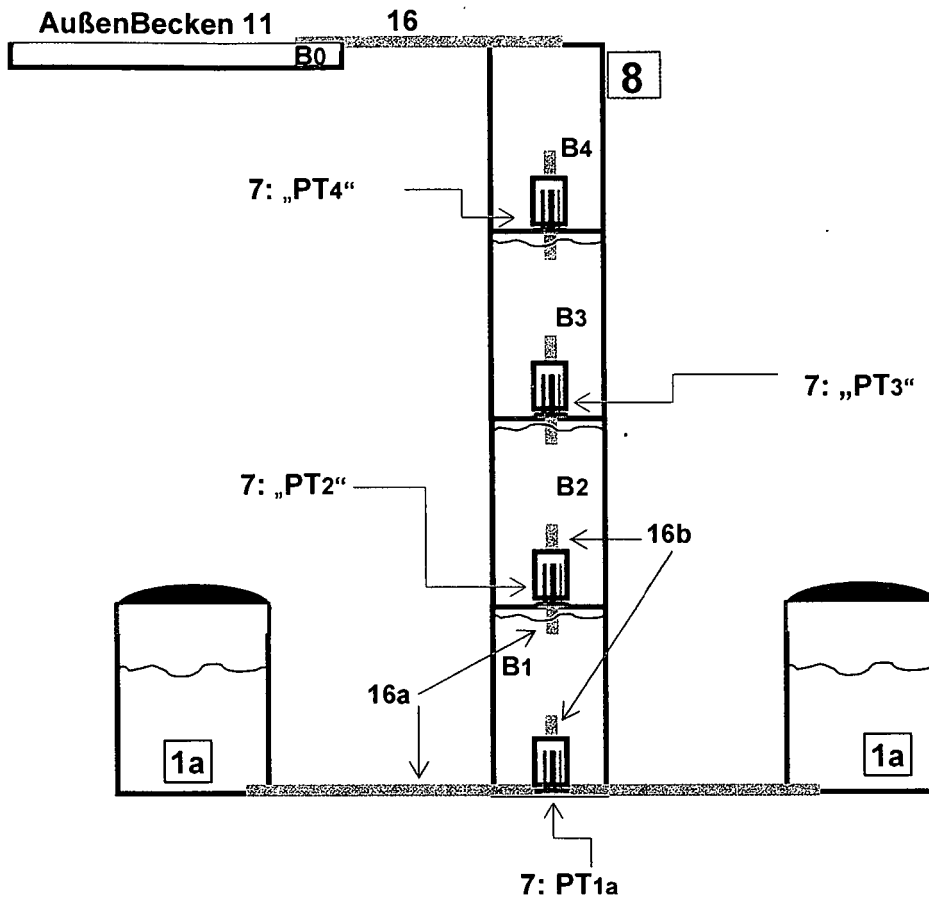


Bild 2:

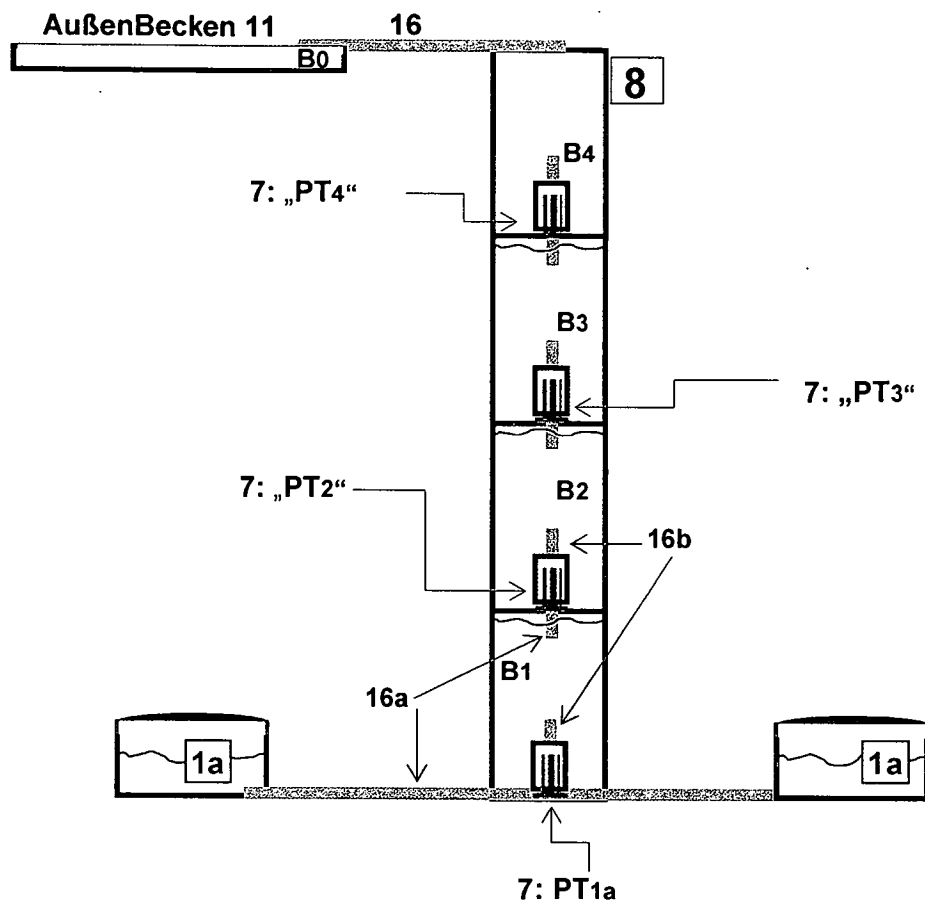


Bild 3:

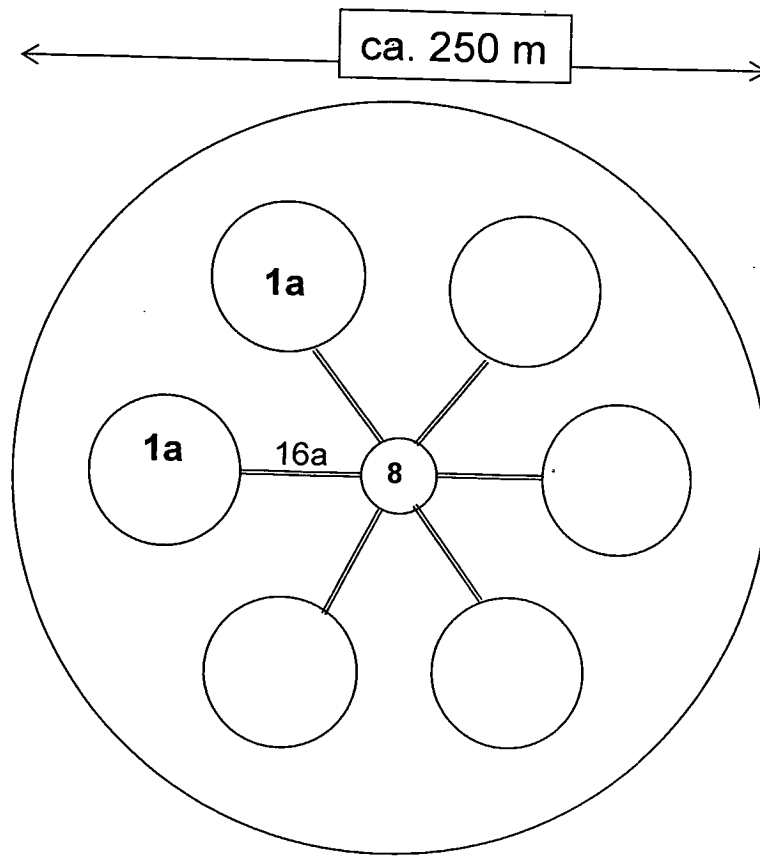


Bild 4:

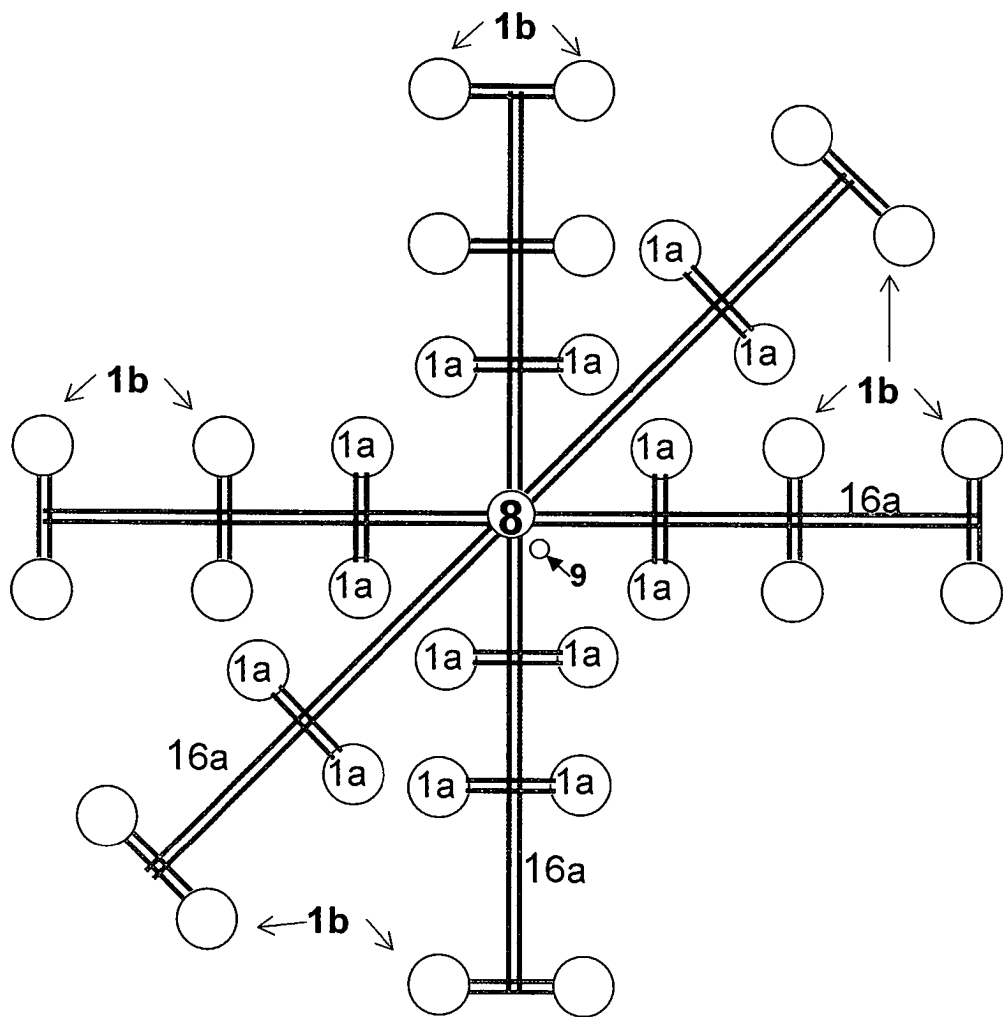


Bild 5:

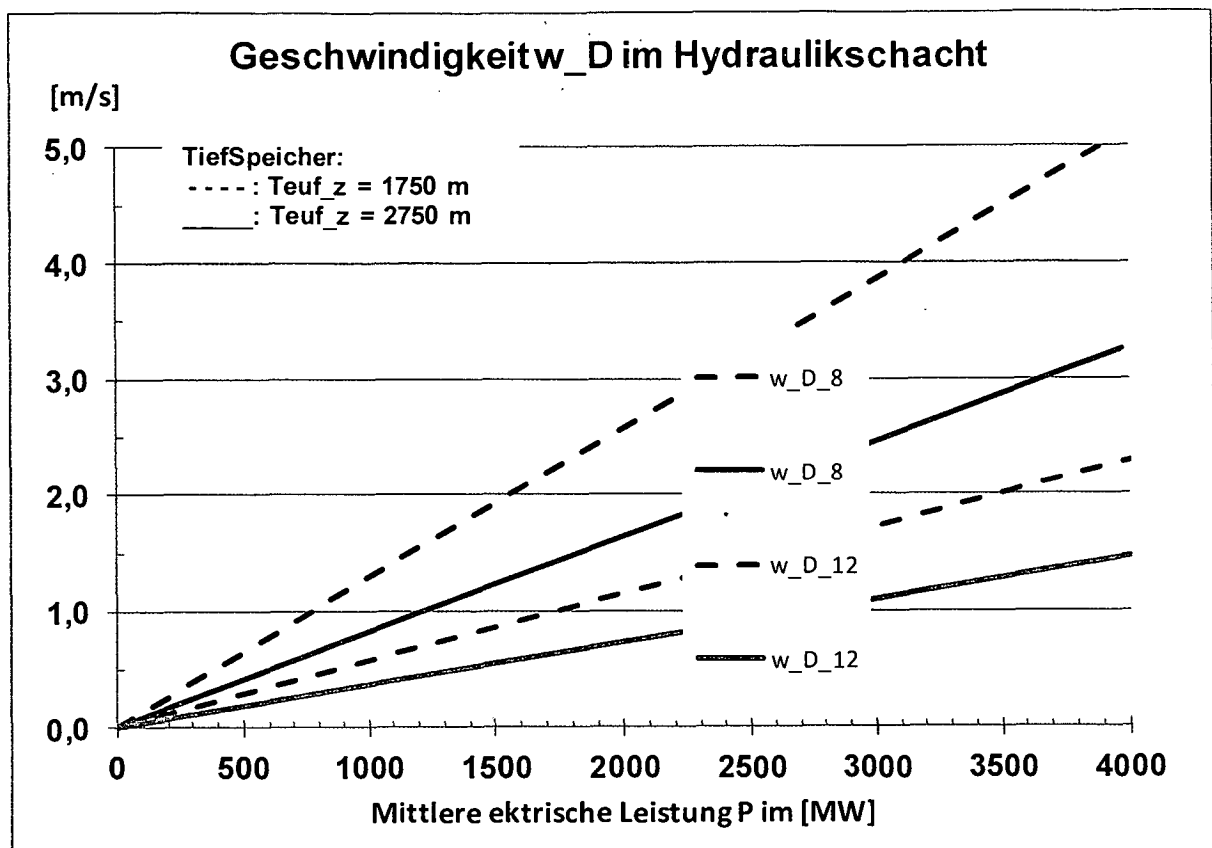


Bild 6: