



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 118 486.8**  
(22) Anmeldetag: **12.11.2011**  
(43) Offenlegungstag: **16.05.2013**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **22.08.2013**

(51) Int Cl.: **F02C 6/16 (2011.01)**

Innerhalb von drei 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.rer.nat., 66119, Saarbrücken, DE**

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

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE	26 15 439	A1
DE	10 2011 013 329	A1
DE	10 2011 105 307	A1
DE	20 2005 003 611	U1
DE	22 14 086	A
US	2009 / 0 021 012	A1
US	3 996 741	A
WO	2009/ 131 459	A2
WO	2011/ 112 561	A2

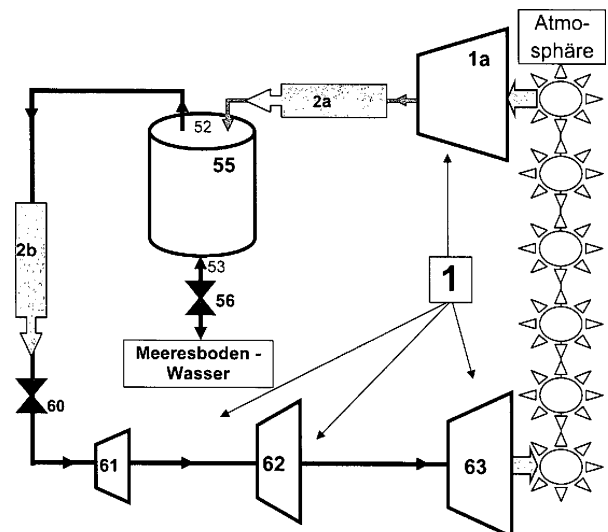
(54) Bezeichnung: **Druckluft-Speicherkraftwerk**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk vorgeschlagen, bei dem Druckluft in einem großvolumigen und massiven Hohlkörper 55 beispielsweise auf dem Meeresboden (analog wie in DE 10 2011.105307 beschrieben) gespeichert wird. Der Meeresdruck ( $p_M$ ) bewirkt dabei einen außen anliegenden Vordruck, so dass der Hohlkörper einen entsprechend überhöhten Innendruck aushält und die Druckluft bei einem Druck  $p_s$  gespeichert werden kann, der den Meeresdruck  $p_M$  um das 2 bis 3 fache oder mehr übersteigt.

Beim Einspeichern der Energie drückt ein Kompressor 1a Luft über einen Schnorchel 2a in den Druckbehälter 55 und lädt diesen bis zu dem maximalen Speicherdruck  $p_s$  auf. Beim Auspeichern wird die Druckluft über die auf einer Plattform 1 auf der Meeresoberfläche installierten Turbinen (61–63) entspannt und zwar zunächst in einem Speicherdruckbereich von  $p_s$  bis  $p_M$  im Gleitdruckbetrieb und dann nach Öffnung des Grundventiles 56 im Festdruckbetrieb bei  $p_M$  solange bis dass das Meeresboden-Wasser die Druckluft aus dem Speicher 55 verdrängt hat.

Durch die Aufladung wird über den Meeresdruck  $p_M$  hinaus erhöht sich die Menge an gespeicherter Luft entsprechend und ergibt dadurch selbst dann, wenn im Gleitdruckbereich oberhalb von  $p_M$  die Hochdruckturbinen 61 durch eine Drossel ersetzt wird und die Turbinen 62 und 63 dann nur bei festen Drücken betrieben werden, eine entsprechende Erhöhung der Speicherkapazität.

Weitere Verwendungen des Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerkes u. a. als Untertage-Speicherkraftwerk werden aufgezeigt.



## Beschreibung

### Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Druckluft-Speicherkraftwerk zum Speichern von Energie, insbesondere von zeitlich schwankend zur Verfügung stehender Elektrizität aus Windkraftanlagen und/oder Photovoltaikanlagen.

#### 1. Hintergrund der Erfindung und Stand der Technik

**[0002]** Es geht darum, die erwartete Ausweitung der Anteile fluktuierender Energiequellen wie Wind und Sonne an der Stromerzeugung durch Vorhaltung von Speicherkapazitäten abzufedern. Hierzu sind zunächst einige grundlegende Vorüberlegungen zum Einsatz und Anforderungen von Stromspeichern in einer durch fluktuierende Stromquellen dominierten Elektrizitätswirtschaft hilfreich.

##### 1.1 Speicheraufgaben

**[0003]** Zur kostengünstigen Ernte des Angebotes Erneuerbarer Energien müssen Speicher eingesetzt werden, die man in ihrer Funktion grob in drei verschiedene Gruppen einteilen kann:

###### (1.) Tagesspeicher

**[0004]** Tagesspeicher müssen die astronomisch bedingte tägliche Periodik der Sonneneinstrahlung abpuffern. Insbesondere PV-Anlagen brauchen leistungsfähige Tagesspeicher. Aber auch Windenergie-Anlagen können Speicheranlagen im Kurzzeitbereich zur Vergleichmäßigung ihrer Ausgangsleistung oder zur optimalen Nutzung von Leitungskapazität einsetzen.

###### (2.) Flautenspeicher

**[0005]** Es gibt Tage mit sehr geringem Windangebot. Dummerweise auch im Winter, wenn in höheren Breiten zum Ausgleich praktisch kein Solarstrom anfällt. Daher ergibt sich eine Nachfrage nach Speichern im Bereich von mehreren Tagen bis zu einer Woche, die wir als Wochen- oder Flautenspeicher bezeichnen.

###### (3.) Saisonspeicher

**[0006]** Im Winter gibt es etwas mehr Wind als im Sommer, dafür gibt es im Sommer deutlich mehr Solarstrom als im Winter. Es gibt im Sommerhalbjahr Zeiten, wo durch Kombination von Solar- und Windstrom ein beachtlicher Überschuss an Strom bereitsteht, der geradezu entsorgt werden muss und daher zu sehr günstigen Preisen verfügbar ist. Mit einem Saisonspeicher könnte man ihn nutzen.

#### 1.2 Die vier Phasen eines Speicherbetriebes

**[0007]** Jeder Speicherbetrieb besteht aus vier Phasen, die man in 2 Gruppen zusammenfassen kann: Einspeichern und Halten, Ausspeichern und Warten:

##### (1.) Einspeichern

**[0008]** Eine Vorrichtung, der Einspeicherer, muss mit dem ankommenden Strom aus einem energiearmen Material einen speicherfähigen Energieträger produzieren.

**[0009]** Einige Beispiele für Einspeicherer:

- die Pumpe in einem Pumpspeicherkraftwerk (PSKW), die Wasser aus dem Unterbecken in das Oberbecken hochpumpt und damit mit potentieller Energie belädt.
- der Kompressor in einem Luftdruckspeicherkraftwerk, der Außenluft verdichtet und in einem Speicherraum presst.
- die Elektroden und der Elektrolyt einer Batterie, die bei Stromfluss durch chemische Reaktion Material in eine chemisch energiereichere Form umwandeln

## (2.) Halten

**[0010]** Ein Speichergefäß muss den aufgeladenen Stoff oder räumlichen Zustand für eine bestimmte Zeitdauer mit möglichst geringen Verlusten aufbewahren.

**[0011]** Einige Beispiele für Speichergefäße:

- das obere Wasserreservoir und das funktionsmäßig dazu gehörige untere Reservoir.
- der Hohlkörper in einem Druckspeicherkraftwerk
- die gesamte Batterie, also Batteriegefäß, Elektroden und Elektrolyt

## (3.) Ausspeichern

**[0012]** Eine Vorrichtung, der Ausspeicherer, muss aus dem gespeicherten Energieträger wieder Strom für das Netz produzieren.

**[0013]** Einige Beispiele für Ausspeicherer:

- die Turbine des PSKW, die die potentielle Energie des Oberwassers wieder in Elektrizität zurück verwandelt.
- die Turbine des Druckspeicherkraftwerkes, die aus der Entspannung der Druckluft Energie gewinnt.
- die Elektroden und der Elektrolyt einer Batterie, die bei Stromentnahme durch chemische Reaktion Material in eine chemisch energieärmere Form umwandeln.

## (4.) Warten

**[0014]** Das energetisch „leere“ Speichergefäß muss warten bis wieder billiger Strom zur Verfügung steht, so dass Energie erneut eingespeichert werden kann. Ein Speichergefäß muss nach dem Ausspeichern noch nicht unbedingt in einem mechanischen oder thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung sein, so dass auch in der Wartezeit mit abklingender Intensität physikalische Ausgleichsvorgänge wie Druckverlust oder Wärmeübertragung stattfinden können. Die Wartephase ähnelt in vielem der „Halte“-Phase und kann in manchen Betrachtungen mit dieser als „Ruhezeit“, in der der Speicher gefüllt oder leer bleibt, zusammengezogen werden.

**[0015]** Ein Zyklus des Speicherbetriebes lässt sich entsprechend seiner vier Phasen durch vier Zeiten kennzeichnen:

$T_{\text{Lade}}$	= Ladezeit zur vollständigen Aufladung des Speichers
$T_{\text{Ruhe\_voll}}$	= Haltezeit, die Ruhezeit im energetisch beladenen Zustand,
$T_{\text{Entlade}}$	= Entladezeit, in der unter Voll-Last die gespeicherte Energie abgegeben wird.
$T_{\text{Ruhe\_leer}}$	= Wartezeit, die Ruhezeit im energetisch entladenen Zustand.

**[0016]** Die Haltezeit  $T_{\text{Ruhe\_voll}}$  und die Wartezeit  $T_{\text{Ruhe\_leer}}$  lassen sich zweckmäßig zu der gesamten Ruhezeit  $T_{\text{Ruhe}}$  zusammenfassen:

$$T_{\text{Ruhe}} = T_{\text{Ruhe\_voll}} + T_{\text{Ruhe\_leer}} = \text{Ruhezeit, in der der Speicher gefüllt oder leer bleibt}$$

**[0017]** Bei der theoretischen Untersuchung wird man die oben angegebenen Phasen in ihrer natürlichen Abfolge behandeln. Den Startpunkt kann man jedoch frei wählen und hier ist es zweckmäßig von einem physikalisch besonders einfach strukturierten Zustand auszugehen.

**[0018]** Bei der elektrochemischen Energiespeicherung lassen sich Einspeicherer, Speichergefäß und Ausspeicherer kostenmäßig nur undeutlich voneinander trennen. Hier überlappen sich die Vorrichtungen und Funktionen.

**[0019]** Anders sieht es bei den Pumpspeichern und Druckspeichern aus, die Elektrizität in potentielle mechanische Energie umwandeln. Hier ergeben sich drei genau abgegrenzte Kostenblöcke:

Pumpe bzw. Kompressor, Turbine, Speichergefäß,

wobei Pumpe bzw. Kompressor und Turbine im Normalfall nicht gleichzeitig in Betrieb sind, so dass sie bei einem Pumpspeicherkraftwerk auch zu einer „Pumpturbine“ zusammengefasst werden.

## 1.3 Ansätze zu einer großtechnischen Lösung des Speicherproblems

**[0020]** Für die großtechnische Lösung der Speicheraufgabe bei fluktuierender Stromeinspeisung aus regenerativen Energien gibt es zwei grundsätzliche Ansätze:

(1) die Entwicklung von preisgünstigen elektrochemischen Akkumulatoren, die zu großen stationären Einheiten zusammengefasst werden (z. B. große Lagergebäude mit Na<sub>2</sub>S-Batterien).

(2) die Weiterentwicklung von mechanischen Speichern, bei denen die Lageenergie oder der Druckzustand eines Fluids zur Energiespeicherung herangezogen wird. Zwei Archetypen dieser Speicherklasse sind das Pumpspeicherkraftwerk, dessen weitere Verbreitung jedoch an geographische Bedingungen gebunden ist, und das Druckluftspeicherkraftwerk, wie es als Prototyp etwa in Hunteburg/Deutschland verwirklicht wurde.

**[0021]** Die vorliegende Erfindung befasst sich mit der 2. Speicherklasse, also den großvolumigen mechanischen Speichern.

**[0022]** Die Aufgabenstellung lautet: Wie kann man in einem gegebenen Speichervolumen eine möglichst große Menge elektrischer Energie mechanisch speichern. Hierzu ist der Stand der Technik beispielsweise in / Sirseth 2009/ (WO2009/131459 A2) umfassend dargestellt worden.

**[0023]** Slocum et. al. (/Slocum2011/, Projekt ORES) und unabhängig von ihm aber etwas später Schmidt-Böcking und Luther (DE 102011.013329) haben vorgeschlagen, das Meer (oder ein sonstiges geeignetes Gewässer) als Oberbecken eines Wasser-Pumpspeicherkraftwerkes zu benutzen und als Unterbecken einen technisch hergestellten, druckfesten und wg. des Auftriebes ausreichend schweren Hohlkörper, der auf den Meeresgrund versenkt wird, einzusetzen. In dieser Konstellation ist es möglich, den hydrostatischen Druck  $p_M$  auf dem Meeresboden als zu überwindende bzw. als antreibende Kraft für die Abspeicherung bzw. die Rückgewinnung von Energie heranzuziehen. Wird das Wasser aus dem anfänglich vollständig gefüllten Hohlkörper in seine Meeresumgebung gepumpt, so wird (bei verlustfreien Aggregaten) die aufgewendete Pumpenergie in der potentiellen Energie des evakuierten Hohlkörpers gegenüber seiner hydrostatisch gespannten Umgebung gespeichert. Wird umgekehrt Wasser aus der Meeresumgebung über Turbinen in das Vakuum des Hohlkörpers geleitet, so kann diese potentielle Energie wieder als Turbinenstrom zurückgewonnen werden. Im verlustfreien Fall lassen sich in einem Volumen  $V$  auf dem Meeresgrund mit dem Druck  $p_M$  und dem auf dem Meer lastenden Atmosphärendruck  $p_L$  die Energie

$$W_M = (p_M + p_L) \cdot V \quad (1)$$

abspeichern. Bei größeren Meerestiefen kann in Gl. (1)  $p_L$  gegenüber  $p_M$  vernachlässigt werden.

**[0024]** Zur Abkürzung wollen wir eine derartige untermeerische Anordnung aus Speicherbehälter und Pump-turbine im Folgenden als „Meerei“ bezeichnen.

**[0025]** Auch der Gedanke, Druckluft in geeigneten Bauwerken isobar auf dem Meeresboden zu speichern ist naheliegend. Der große Vorteil einer isobaren Speicherung besteht darin, dass an das Speicherbauwerk keine besonderen baustatischen Anforderungen gestellt werden. Im Grunde genommen reicht eine „Blase“ oder ein „Gasometer“, da es keinen (nennenswerten) Druckunterschied über die Bauwerkswand gibt. Das nachdrückende Meerwasser ermöglicht zudem noch einen Festdruckbetrieb, bei dem also der Druckabfall über die Turbinen bis zur vollständigen Entleerung des Speichers unverändert bleibt. Andererseits muss bei derartigen Druckluftspeichern eine Luftverbindung zur Atmosphäre, ein Schnorchel, vorgesehen werden. Die Aggregate zur Kompression der Luft für die Aufladung des Speichers („Einspeichern“) und die Entspannung der Druckluft („Ausspeichern“) befinden sich auf einer Plattform an der Wasseroberfläche.

**[0026]** Die maximale Arbeit  $W_L$ , die man aus der Entspannung einer Druckluftmenge  $M_L$  vom Druck  $p_M$ , die das Volumen  $V$  ausfüllt, gegen den Atmosphärendruck  $p_L$  herausholen kann, wird dann gewonnen, wenn der Vorgang isotherm bei konstanter Temperatur  $T$  stattfindet. Wie in jedem Lehrbuch der Technischen Thermodynamik, e. g. /Hahne 2002/, hergeleitet wird, gilt:

$$W_L = M_L \cdot R_L \cdot T \cdot \ln(p_M/p_L) \quad (2)$$

wobei  $R_L$  die spezifische Gaskonstante für Luft ist, die bei Normalbedingungen etwa 0,28 [kJ/kg/K] beträgt. Bei der Gl. (2) und den folgenden Überlegungen wird zudem vorausgesetzt, dass man die Luft als ideales Gas behandeln kann. Die allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase lautet:

$$p_M \cdot V = M_L \cdot R_L \cdot T \quad (3)$$

woraus man einen Ausdruck für  $M_L \cdot R_L$  erhält:

$$M_L \cdot R_L = p_M \cdot V / T \quad (4)$$

**[0027]** Dies kann man in (2) einsetzen und erhält für die maximale Arbeit  $W_L$ , die man aus Druckluft in einem Volumen  $V$  unter dem Druck  $p_M$  durch isotherme Entspannung bei der Temperatur  $T$  gegen den Atmosphärendruck  $p_L$  herausholen kann:

$$W_L = p_M \cdot V \cdot \ln(p_M/p_L) \quad (5)$$

**[0028]** Aus Gl. (5) sieht man direkt, dass schon bei relativ harmlosen Drücken, nämlich etwa ab

$$p_M/p_L > e = 2,718 \dots,$$

in einem Druckluftspeicher grundsätzlich mehr Speicherenergie steckt als in einem äquivalenten hydrostatischen Speicher. Betrachten wir einen Speicher, der in ca. 700 m Meerestiefe in einer Umgebung mit einem hydrostatischen Druck von 70 bar steht, so gilt

$$\ln(p_M/p_L) = \ln(70) = 4,25 \quad (5a)$$

und der Vergleich mit Gl. (1) zeigt, dass in dieser Tiefe der isobare Druckluftspeicher bereits theoretisch etwas mehr als 4 mal so viel Energie wie das Meerei speichern kann.

**[0029]** Allerdings kann man eine isotherme Entspannung unter technischen Anforderungen nur schwer direkt realisieren. Durch eine Kaskade von adiabatischer Entspannung in einer Turbine und anschließender isobarer Wiederaufwärmung des abgekühlten Arbeitsgases kann man jedoch eine isotherme Entspannung annähern. Dennoch muss man in der Praxis davon ausgehen, dass Druckluftspeicher einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad als hydraulische Speicher besitzen. Man beachte jedoch: in einer Elektrizitätswirtschaft, die sich hauptsächlich aus fluktuierenden Quellen speist, wird der Einspeisestrom sehr billig sein, so dass es weniger auf den Gesamtwirkungsgrad und verstärkt auf den Wirkungsgrad des Energie-Ausspeicherns ankommt.

## 2. Allgemeine Beschreibung der Erfindung

### 2.1 Die Grundidee

**[0030]** Beim Meerei wird ein massiver Hohlkörper gebaut, der der Druckdifferenz zwischen dem inneren Vakuum und dem hydrostatischen Meeresdruck  $p_M$  standhalten muss. Zur Berechnung der Wanddicke von Druckbehältern wird normalerweise die „Kesselformel“ benutzt; diese unterscheidet aber nicht zwischen einer Druckanwendung im Innern des Kessels und einer von außen auf den Kessel wirkenden Druckkraft. Wird die Druckrichtung umgedreht, also das Meerei im Innern auf einen entsprechenden Überdruck gesetzt, so sollte ein Hohlkörper, der für den Außendruck  $p_M$  ausgelegt ist, im Innern statt eines Vakuums als Unterdruck  $-p_M$  in ebensolcher Weise auch einen Überdruck von  $p_M$  gegenüber der hydrostatischen Umgebung aushalten. Dies ergibt dann insgesamt einen Innendruck von  $2 \cdot p_M$ .

**[0031]** Anders ausgedrückt: Wenn man ein Meerei für einen äußeren hydrostatischen Druck  $p_M$  bauen kann, dann kann man dieses auch dazu verwenden, in der Meeresbodenumgebung Luft mit einem Druck von  $2 \cdot p_M$  in seinem Innern zu speichern. Wir betrachten also einen Hohlkörper am Meeresgrund, der nicht zur Umgebung isobare Druckluft, wie es dem Stand der Technik entspricht, sondern weiter aufgeladene Druckluft mit einem maximalen Speicherdruck  $p_S$  enthält, wobei  $p_S$  den Meeresdruck  $p_M$  um das doppelte und mehr übersteigt.

**[0032]** Wir betrachten die Gl. (5) (für eine isotherme Entspannung und für ideale Gase) für den erhöhten Speicherdruck  $p_S$  und formen sie etwas um:

$$W_L = p_S \cdot V \cdot \{\ln(p_S/p_L)\}$$

$$W_L = [p_S/p_M] \cdot p_M \cdot V \cdot \{\ln(p_M/p_L) \cdot [\ln(p_S/p_M) / \ln(p_M/p_L) + 1]\} \quad (6)$$

und erkennen, was wir perspektivisch gewinnen können:

- Die Speicherenergie  $W_L$  wird zunächst alleine durch die größere Menge an Luft, die sich bei höherem Druck in einem vorgegebenen Volumen speichern lässt, um den Faktor  $[p_S/p_M]$ , den 1. Faktor in Gl. (6), größer.
- Für den Einsatz einer Hochdruckturbine zwischen  $p_S$  und  $p_M$  ergibt sich zusätzlich noch eine kleine Verbesserung durch den letzten Faktor in Gl. (6)

**[0033]** Ein Zahlenbeispiel illustriert die Verhältnisse. Gehen wir von  $p_S = 210$  bar und einer Meerestiefe von etwa 700 m mit  $p_M = 70$  bar aus, so ergibt der Mengenfaktor

$$[p_S/p_M] = 3.0 \quad (6a)$$

und der Hochdruckfaktor nur

$$[1 + \ln(p_S/p_M)/\ln(P_M/P_L)] = 1 + \ln(3)/\ln(70) = 1 + 1,1/4,25 = 1,26 \quad (6b)$$

**[0034]** Selbst wenn man den verfügbaren Hochdruck zur Arbeitsleistung gar nicht ausnutzt und die Rückgewinnung der Energie weiterhin nur mit dem auf den Meeresdruck  $p_M$  ausgelegten Turbinensatz betreibt, ergibt sich durch die Aufladung des Druckkörpers von  $p_M$  auf  $p_S$  eine Verdreifachung der Speicherkapazität. Im Vergleich zum Meerei-Betrieb nach Gl. (1) ergibt sich mit Gl. (5a) sogar ein Faktor 12.

**[0035]** Die Grundidee der Erfindung lautet daher – etwas grob aber kompakt formuliert:

Man nehme den Meerei-Hohlkörper, der druckstabil und zur Auftriebskompensation massiv genug ist, und betreibe ihn auf dem Meeresgrund als einen „aufgeladenen Druckluftspeicher“ unter einem Speicherdruck  $p_S$ , der um ein Mehrfaches über dem hydrostatischen Druck  $p_M$  der Meeresumgebung liegt.

**[0036]** Einzelheiten, Merkmale und Vorteile ergeben sich aus der Beschreibung mit Bezugnahme auf die zugehörigen Zeichnungen mit den nachfolgenden Bildunterschriften:

**[0037]** Bild 1: Beim Meeres-Überdruck Luftdruckspeicher-Kraftwerk wird der Luftspeicher auf dem Meeresgrund mit Überdruck gegenüber der Meeresumgebung aufgeladen. Alle Kompressions- und Expansions-Maschinen sowie das Steuerventil **60** befinden sich auf einer Technik-Plattform **1** an der Meeresoberfläche. Der Überdruckluftspeicher **55** steht über ein schaltbares Ventil **56** mit dem Umgebungswasser am Meeresboden in Verbindung. Bei (hier nicht eingetragenen) entsprechendem Schaltungsaufwand können die hier getrennt gezeichneten Schnorchel **2a** und **2b** zu einem einzigen Schnorchel **2** zusammengefasst werden.

**[0038]** Bild 2: Ein und Ausspeichern von Energie in einen Speicherkörper auf einer Meerestiefe mit dem hydrostatischen Druck  $p_M = 70$  [bar]. Die Einspeicherung der Druckluft erfolgt zunächst in einem offenen System unter Verdrängung des Wassers beim Festdruck  $p_M$ . Dann wird die Verbindung zum Meerwasser geschlossen und es erfolgt in einem nun nur noch einseitig offenen System die Druckerhöhung auf den Speicherdruck  $p_S = 200$  bar. Beim Ausspeichern der Energie wird zunächst in dem einseitig offenen System die Luft expandiert bis der Meeresdruck  $p_M$  wieder erreicht ist, dann schiebt das Meerwasser in einem nun beidseitig offenem System die Luft unter dem Festdruck  $p_M$  aus dem Speicherbehälter.

**[0039]** Bild 3: Wiedererwärmung des Arbeitsgases vor jeder Turbine durch Wärmetauscher **4** und Ausfrieren von Wasserdampf vor Eintritt in die erste Turbine durch einen Wärmetauscher **45** als Kältefalle.

**[0040]** Bild 4: Fester Eingangsdruck durch Vorschalten einer Drossel **61a**: die Druckluft wird isenthalp auf einen Arbeitsdruck entspannt, der etwa dem hydrostatischen Druck  $p_M$  entspricht. Danach kann die Expansionsanlage mit Festdruck betrieben werden.

**[0041]** Bild 5: Zentrale Verteilerstation **58**, die mehrere Speicherkörper **55** unten hydraulisch und oben pneumatisch mit einer zentralen Verteilerstation **58** zusammenführt und auch den Fußpunkt für den gemeinsamen Schnorchel **2** darstellt.

**[0042]** Bild 6: Massiver Luftdruckspeicher **55** im seichten Meer (z. B. Nordsee) mit aufgesetzter Technischer Plattform **1** und Windmühle **9**.

## 2.2 Das Meeres-Überdruck-Luftspeicher-Kraftwerk

**[0043]** Der mit Druckluft gefüllte massive und stabile Hohlkörper, das „Luftei“, soll mit Überdruck gegenüber seiner Meeresumgebung betrieben werden. Eine massive Ausführung ist ja sowieso unumgänglich, da im energetisch geladenen Zustand der Auftrieb der Druckluft durch das Gewicht des Lufteies kompensiert werden muss.

## 2.2.1 Die Grundschtaltung

**[0044]** Wir betrachten im groben Schema ein Meeres-Überdruck-Luftspeicher-Kraftwerk (M. ÜSKW) (Bild 1), bei dem Luft als Arbeitsmedium:

- auf einer Technikplattform **1**, einer Kraftwerksinsel an der Meeresoberfläche, angesaugt und durch einen (u. U. mehrstufigen) Kompressor **1a** verdichtet wird, und
- über ein Rohr („Schnorchel“ **2a**) auf den Meeresboden gedrückt wird, und dabei
- in einem zunächst isobar betriebenen Druckluftspeicher **55** bei geöffnetem Grundventil **56** das Meerwasser verdrängt und danach noch, bei geschlossenem Grundventil **56**, weiterhin bis zu einem End-Speicherdruck  $p_S$ , der deutlich über dem lokalem Meeresdruck  $p_M$  liegt, eingespeichert wird und dort für eine „Ruhezeit“ verbleibt, und danach
- zunächst im Gleitdruckbetrieb und danach bei geöffnetem Grundventil **56** im Festdruckbetrieb durch das isobar nachströmende Meerwasser über ein Rohr („Schnorchel“ **2b**) an die Oberfläche zurückgedrückt wird, und dort
- in einer mehrstufigen Expansionsmaschine (in Bild 1 angegeben als Hochdruckturbine **61**, Mitteldruckturbine **62** und Niederdruckturbine **63**) unter Gewinnung technischer Arbeit entspannt wird.

**[0045]** Die Verfahrensschritte zum Ein- und Ausspeichern der Energie sind in Bild 2 dargestellt. Der Übersichtlichkeit und Einfachheit halber wurde hierbei von isothermen Kompressions- und Expansionsvorgängen ausgegangen, so dass die Phasen des „Haltens“ der Speicherenergie und des „Wartens“ auf die neue Einspeicherung ohne physikalische Änderungen des Fluids verlaufen und daher in der Übersicht nicht berücksichtigt werden müssen.

**[0046]** Wir betrachten die Vorgänge in einem Speicherbehälter **55**, den wir auch mit unserem thermodynamischen System gleichsetzen.

## Einspeichern der Energie:

**[0047]** Startzustand (Bild. 2(a)): Wir gehen von dem Zustand ohne eingespeicherte Energie aus. Das System ist vollständig mit Meerwasser vom Druck  $p_M$  gefüllt; bei 700 m Meerestiefe wäre etwa  $p_M = 70$  bar.

**[0048]** Verdrängung mit Festdruck (Bild 2(b)): Von oben wird Druckluft mit einem Festdruck, der dem Meeresdruck  $p_M$  entspricht, dem System zugeführt und verdrängt das in die Meeresumgebung zurückfließende Wasser. Am Ende dieser „beidseitig offenen Füllung“ ist der Speicher vollständig mit Luft vom Druck  $p_M$  gefüllt.

**[0049]** Druckerhöhung mit Gleitdruck (Bild 2(c)): Danach wird das Grundventil **56**, das die Verbindung zum Meerwasser steuert, geschlossen. Bei stetig anwachsendem Druck wird zusätzlich Druckluft in den Speicherbehälter gepumpt, bis am Ende der „einseitig offenen Füllung“ der endgültige Speicherdruck  $p_S$  erreicht ist. Zur Veranschaulichung gehen wir beispielsweise von  $p_S = 200$  bar aus, was dem Arbeitsdruck der Rohre der Ostsee-Erdgas-Pipeline „Nord-Stream“ entspricht.

## Ausspeichern der Energie:

**[0050]** Expansion mit Gleitdruck (Bild 2(d)): Beim Ausspeichern expandiert die Luft aus dem Speicher in die Turbinen. Dies geschieht zunächst unter gleitendem Druck, bis der ursprüngliche Speicherdruck  $p_S$  bis auf den hydrostatischen Druck der Meeresumgebung,  $p_M$ , abgebaut ist.

**[0051]** Expansion mit Festdruck (Bild 2(e)): Dann wird das Grundventil **56** wieder geöffnet und das nachströmende Meerwasser drückt die Druckluft mit konstantem Druck  $p_M$  zu den Turbinen, in denen die Entspannung bis zum Umgebungsdruck  $p_L$  erfolgt.

## 2.2.2 Ergänzungen zur Betriebsweise und weitere Ausgestaltung

## 2.2.2.1 Der Turbinenbetrieb

**[0052]** Die Turbinen erzeugen aus der gespeicherten Druckluft den Strom dann, wenn er teuer ist, zur Hochpreis-Zeit. Es kommt also auf einen hohen Wirkungsgrad an.

**[0053]** Aus isobarer Druckluft kann man dann am meisten technische Arbeit gewinnen, wenn der Entspannungsprozess isotherm abläuft. Da Turbinen selbst jedoch eher adiabatisch arbeitende Maschinen sind, muss man zu mehreren Stufen mit Zwischenerwärmung übergehen.

**[0054]** In Bild 3 wird die Expansionsanlage etwas genauer betrachtet. Sie besteht zunächst aus drei hintereinander geschalteten Turbinen, in denen eine weitgehend adiabatische Entspannung der Druckluft stufenweise vorgenommen wird: zunächst in einer Hochdruckturbine **61**, anschließend in einer Mitteldruckturbine **62** und schließlich in einer Niederdruckturbine **63**. Nach jeder Druckstufe wird die Druckluft in einem Wärmetauscher **4** durch Umgebungswärme wieder aufgewärmt. Durch diese Kombination von adiabatischer Entspannung und anschließender isobarer Wiedererwärmung wird in bekannter Weise der thermodynamische Wirkungsgrad der Expansionsanlage verbessert.

**[0055]** Natürlich ist auch eine andere Zahl von Druckstufen möglich; bei einer geringeren bzw. größeren Anzahl von Druckstufen verschlechtert bzw. verbessert sich der Wirkungsgrad.

**[0056]** Bei einer festen Anzahl von Druckstufen ergibt sich dann der beste Gesamtwirkungsgrad, wenn das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsdruck an allen Turbinen gleich ist.

**[0057]** Im vorliegenden Fall, bei dem die Druckluft zunächst mit dem maximalen Speicherdruck  $p_S$  anfällt und dann langsam auf den Festdruck  $p_M$  heruntergleitet und dort bis zur Speicherentleerung verharrt, bietet sich jedoch auch eine andere Aufteilung an: Die Hochdruckturbine **61** deckt den gleitenden Druckbereich zwischen  $p_S$  und  $p_M$  ab, die restlichen Turbinen teilen sich dann die Ausnutzung des festen Druckbereiches von  $p_M$  bis zum Umgebungsdruck  $p_L$  auf.

**[0058]** In Bild 3 ist weiterhin eine Möglichkeit angegeben, wie man durch Ausnutzung sowieso vorhandener Gegebenheiten, eine Reinigung der Druckluft vom Wasserdampf und möglicher Eiskristalle zum Schutze der Turbinen vornehmen kann. Die Entspannung der Druckluft führt zu einer beträchtlichen Abkühlung. Dieses sehr niedrige Temperaturniveau hinter jeder Turbine kann dazu genutzt werden, um ein Kühlmittel **40** in einem eigenständigen Kühlkreis mit mehreren seriell durchlaufenen Wärmetauschern **41–43** so weit herunter zu kühlen, dass in einem Wärmetauscher **45**, welche wie eine Kältefall wirkt, der Wasserdampf aus der ankommenden Druckluft weitestgehend ausgefroren wird. Da das Speicherkraftwerk nicht durchgehend betrieben wird, kann in den Ruhezeiten das Eis in der Druckluftleitung wieder entfernt werden; Kühlwasser zum Aufwärmen steht ja in beliebiger Menge zur Verfügung. Beim Aufsteigen der Druckluft auf ihrem Weg vom Speicher **55** am Meeresgrund durch den Schnorchel **2** erfolgt bereits eine leichte Abkühlung. Durch die zusätzliche Kühlfalle **45** wird die Abkühlung noch weiter verstärkt. Daher sollte die Druckluft bereits vor Eintritt in die erste Turbine **61** durch einen Wärmetauscher **4** wieder aufgewärmt werden.

**[0059]** Der Speicherort liegt am Meeresgrund, bei einer Temperatur knapp über  $0^\circ\text{C}$ . Da die Druckluft längere Zeit lagert, muss man davon ausgehen, dass sie ebenfalls diese Temperatur annimmt. Je nach Standort ist das Meer an der Oberfläche um  $10\text{ [K]}$  bis fast  $30\text{ [K]}$  wärmer. Diese zusätzliche Temperaturerhöhung durch die Qualität der am Ort der Expansionsmaschine zur Verfügung stehenden Umgebungswärme ergibt eine durchaus merkliche Verbesserung des Wirkungsgrades.

**[0060]** Man kann sogar noch einen Schritt weiter gehen und sich überlegen, ob man mit technischen Mitteln nicht sogar zusätzliche Wärme einsetzen sollte. Bei Verfügbarkeit einer preisgünstigen (!) Wärmequelle (Solarenergie, elektrische Großwärmepumpe; Speicherwärme aus der Kompression beim Einspeichern) kann es nämlich lohnend sein, den Wärmeträger für die Wärmetauscher **4** vorzuwärmen und dadurch die Druckluft noch etwas weiter zu erwärmen. Der Effekt dieser zusätzlich eingesetzten Wärmemengen ist nur zu einem kleinen Teil auf die dadurch bewirkte „Wärmekraftmaschine“ zwischen den beiden Temperaturniveaus zurückzuführen, die ja nach Carnot nicht sehr effektiv sein kann. Darüber hinaus werden nämlich auch die thermodynamischen Verluste etwas verringert, die im Vergleich zum isothermen Idealprozess auch durch eine mehrstufige Kombination von adiabatischer Entspannung und isobarer Wiedererwärmung immer noch groß sind.



## 2.2.2.2 Drossel an Stelle der Hochdruckturbine

**[0061]** Der Haupteffekt des hohen Speicherdruckes  $p_S$  liegt in der größeren Menge an Druckluft, die in einem vorgegebenem Volumen  $V$  untergebracht werden kann. Die eigentliche Druckarbeit zwischen dem Speicherdruck  $p_S$  und dem hydrostatischem Druck  $p_M$  fällt hingegen weniger ins Gewicht (siehe Abschnitt 2.1). Daher erbringt es nur mäßige Einbußen im Wirkungsgrad, wenn die Hochdruckturbine **61** durch eine einfache Drossel **61a** (siehe Bild 4) zur bloßen Anpassung des Ausgangsdruckes aus dem Speicher **55** an einen festen Eingangsdruck für die Mitteldruckturbine **62** ersetzt wird.

## 2.2.2.3 Zentrale Anbindung

**[0062]** Bei unserer „Meerei-Patentanmeldung“, DE 102011.013329, haben wir eine hydraulische Zusammenschaltung von mehreren Speichereinheiten mit einer Anbindung an eine zentrale Pumpturbinen Einheit dargestellt. Bei der jetzigen Erfindung, dem „Luftel“, sind allerdings die entsprechenden Aggregate, Kompressoren und Turbinen, nicht auf dem technisch problematischen Meeresboden sondern bereits auf einer Kraftwerksinsel, der technischen Plattform **1**, angeordnet. Hier ist es dann auch mehr der aufwändige Schnorchel **2**, der den Gedanken nahe legt, mehrere Speichereinheiten **55** hydraulisch und pneumatisch mit einer einzigen zentralen untermeerische Verteilerstation **58** zusammenzuschalten (Bild 5). Der „pneumatische“ Anschluss erfolgt über eine oberhalb der Speicherkörper **55** verlaufenden enden Verbindung durch Druckluftrohre (**21** und **22**) zu einem zentralen Schnorchel **2**, der aus einem einzigen Rohr oder aber auch aus einem Rohrbündel bestehen kann. Auch das schaltbare hydraulische Grundventil **56**, das die Verbindung zwischen Speicherbehälter und Meeresbodenwasser steuert, kann in der zentralen Verteilerstation **58** angeordnet werden. Dies muss allerdings mit einer ansonsten verzichtbaren hydraulischen Verschaltung der Speicherbaukörper erkaufte werden, die dann anstelle einer elektrischen Anbindung der einzelnen Speicher durchgeführt werden muss. Die hydraulische Verschaltung über Rohre **57** erfolgt natürlich von den Fußpunkten **53** der Speicherkörper **55** aus.

**[0063]** Die hydraulischen Verbindungen **57** und die pneumatischen Verbindungen **21** und **22** erhöhen die mechanische Stabilität des gesamten Bauwerkes und gewährleisten eine feste Verankerung des Schnorchels **2** wie mit einem „Spreizfuß“.

## 2.3 Weitere Bemerkungen zu einzelnen Bauteilen

2.3.1 Grundventil **56**

**[0064]** Das Grundventil **56** verbindet den Überdruck-Luftdruckspeicher **55** in kontrollierter Form mit der Meeresumgebung. Dieser zusätzliche Aufwand auf dem Meeresgrund gegenüber einer (im Prinzip sehr einfachen) Taucherglocke, wie sie beispielsweise bei einem isobaren Betrieb des Luftspeichers als Festdruckspeicher eingesetzt werden könnte, wird durch mehrere Vorteile und Möglichkeiten gerechtfertigt:

- in einem vorgegebenen Volumen erhöht sich durch den höheren Speicherdruck entsprechend die gespeicherte Druckluftmenge. Dies ist der Hauptgrund für die größere Speicherkapazität!
- in der Gleitdruck-Betriebsphase, bei der sich der Druck im Luftspeicher oberhalb des Meeresdruckes  $p_M$  befindet, kann dieser Überdruck noch eine Hochdruckturbine antreiben. Bei geschickter Auslegung trägt dieser technisch wenig günstige Gleitdruckbetrieb der Hochdruckturbine jedoch nur einen kleinen Anteil zur Gesamtproduktion aller Turbinen bei.
- in den Ruhezeiten (also in der Halte- und in der Wartezeit) besitzt die Luft im Überdruckluftspeicher **55** keinen Kontakt zum Wasser, kann sich also auch nicht teilweise im Wasser lösen

**[0065]** Darüber hinaus wird das Grundventil **56** im Regelfall nicht unter Last geschaltet. In der Wartephase und beim Herausdrücken des Wassers zu Beginn des Einspeicherns der Energie bleibt das Grundventil **56** geöffnet. Sobald der Speicher vom Wasser leergepumpt ist, wird das Grundventil **56** drucklos geschlossen. Bei der weiteren Druckerhöhung bis zum Speicherenddruck  $p_S$ , in der Haltezeit und beim Ausspeichern der Energie unter Gleitdruck bleibt das Ventil geschlossen. Wenn der Gleitdruck dann den Meeresdruck von oben erreicht, wird das Grundventil **56** wiederum drucklos geöffnet.

**[0066]** Ein elektrisch angesteuertes Grundventil **56** wäre die einzige Komponente auf dem Meeresgrund, die eine elektrische Stromversorgung benötigt. Zwar ist die Stromversorgung wg. einer denkbaren Verlegung innerhalb des sowieso vorhandenen Schnorchels **2** kein besonders kritisches Problem, aber es wäre auf jeden Fall eleganter automatisch arbeitende Ventile zu benutzen.

**[0067]** Andererseits ist es jedoch auch möglich, dass man aus Überwachungs- und Betriebsgründen auf jeden Fall eine Stromversorgung verlegen will. Dann sollte man diese auch dazu benutzen, eine wirklich sichere und zuverlässige Steuerung des Grundventils **56** zu bewerkstelligen. Je nach Speicherkapazität können ja erhebliche Wasserströme zu schalten sein!

### 2.3.2 Der Schnorchel

Nur ein einziger Schnorchel:

**[0068]** Die Anlage wird in vier definierten Betriebszuständen (Einspeichern, Halten, Ausspeichern, Warten) gefahren, daher können die beiden in Bild 1 und in Bild 4 eingezeichneten Schnorchel nie gleichzeitig benutzt werden; man kann daher diese teuren Luftleitungen zu einem einzigen Schnorchel **2** zusammenfassen und die wahlweise An- und Abkopplung von Kompressor oder Turbine mit einem (hier nicht eingetragenen) entsprechenden Schaltungsaufwand bewerkstelligen. Die Inbetriebnahme des Schnorchels kann – unabhängig von der Fließrichtung der Druckluft- durch ein einziges Steuerventil **60** geschaltet werden. Dieser Schaltungsaufwand findet auf der gut zugänglichen Technischen Plattform **1** statt.

Schnorchel aus senkrechtem Pipelinerohr oder Förderrohr:

**[0069]** Der Schnorchel ist eine im Meer verlegte Leitung, in der Luft unter hohem Druck transportiert wird. Der grundsätzliche Unterschied zu einer Pipeline besteht -abgesehen vom Fluid Luft statt Erdgas- nur darin, dass die Leitung senkrecht vom Meeresboden nach oben geführt wird.

**[0070]** Andererseits erinnert der Schnorchel an eine Förderleitung zur Erdgasgewinnung auf hoher See. Es ist daher zu vermuten, dass aus dem Bereich der Offshore Erdgasgewinnung und des Erdgastransportes technische Lösungen übernommen oder angepasst werden können.

### 2.3.3 Der Kompressor

**[0071]** Die Kompression von Luft lässt sich am effektivsten mit einem mehrstufigen Kompressor durchführen. Man beachte aber: Der Kompressor **1a** wird mit billigem Überschuss-Strom betrieben. Es ist daher nicht so wichtig, ob sein Betrieb mit einem sehr hohen Wirkungsgrad erfolgt: hierbei vergeudete Strommengen kosten ja nicht viel, erhöhte Investitionen und Aufwendungen sind also schwerer wirtschaftlich zu begründen.

## 2.4 Übertragung auf andere Standorte

**[0072]** In DE 10 2011.105307 wurde der „Meerei“-Gedanke auf einen alten oder neu zu schaffenden Bergwerksstandort übertragen. Es zeigte sich, dass es durchaus interessant sein kann, im großen Stil Schächte und Blindschächte mit der ausschließlichen Zielsetzung „Schachtspeicher-Kraftwerk“ sogar neu zu errichten. Aus dem „Meerei“ wurde das „Bergei“.

**[0073]** Nun stellt sich die Frage: kann man auch das in der vorliegenden Schrift beschriebene „Luftel“ mit Mitteln der Bergbautechnik auf dem Festland realisieren? Für diese Übertragung kann man tatsächlich eine einfache Korrespondenzliste angeben:

- der Druckluftspeicher **55** entspricht einem Blindschacht im Berg, (in DE 10 2011.105307 dem dortigen Untertage-Blindschacht **1a**)
- der Schnorchel **2** entspricht einem Luftschaft oder Druckrohren in einem Schacht
- das „Meer als Druckgeber“, allgemein „das Gewässer“, entspricht einem ständig mit Wasser gefüllten Schacht (in DE 10 2011.105307 dem dortigen Hydraulischschacht **8** in Verbindung mit dem dortigen Oberbecken **11**)

**[0074]** Die Expansions- und Kompressionsmaschinen und alles was sonst noch auf der Technik-Plattform **1** installiert wurde kann völlig unkritisch in einer Übertagestation untergebracht werden.

**[0075]** Bei Luftdruck-Speicherkraftwerken, bei denen als Speicherraum teilweise ausgelaugte Salzstöcke benutzt werden, kann man natürlich kein Wasser für den Festdruckbetrieb in diese Salzhallen einleiten. Bei bergbaulich erstellten Hohlräumen in wasserunlöslichem Gestein ist dies jedoch möglich.

**[0076]** Man kann sich auch die Frage stellen, einen „Meerei“-Hohlkörper einfach an Land zu stellen und als normalen Luftdruckspeicher zu betreiben. Technisch ist dagegen nichts einzuwenden, allerdings dürften in der

Bevölkerung Ängste vor einem Platzen der Hochdruck-Großkörper aufkommen und die Auflagen der Behörden prohibitiv werden. Im Meer gibt es einfach mehr Platz für Meereier und keine Nachbarn.

**[0077]** Man kann aber einen „Meerei-Hohlkörper“ auch als normalen Luftdruckspeicher im seichten Gewässer, etwa in der Nordsee, ablegen und gleichzeitig noch als Fundament für eine darauf verankerte große Windenergieanlage **9** benutzen. Die Technische Plattform **1** kann direkt auf dem Druckkörper **55** aufsetzen. Diese etwas visionäre Vorstellung ist zur Anregung der Phantasie in Bild 6 skizziert.

**[0078]** Der Speicherbehälter **55** ersetzt in dieser Anordnung die bisher übliche Verankerung des Windrades auf dem Meeresboden über Rohrgerüste. Der Speicherbehälter **55** kann das aufsitzende Windrad **9** und darüber hinaus noch weitere Windmühlen eines Offshore Windparks elektritätswirtschaftlich abpuffern.

**[0079]** Eine oder mehrere benachbarte Speicherbehälter (**55**) können als „Trittsteine im Meer“ die Grundlage einer regelrechten künstlichen Insel dienen, die dann zusätzliche Einrichtungen für den gesamten Windpark wie Trafostation, Anbindung an das Stromnetz, Lager für Ersatzteile, Anlegestation etc. aufnimmt.

**[0080]** Der Einsatz des Luftei im seichten Gewässer verändert die Betriebsweise. Der Meeresdruck  $p_M$  spielt nun keine wichtige Rolle mehr; vielmehr bestimmen die zum Einsatz kommenden Turbinen, bis zu welchem unteren Betriebsdruck  $p_T$  der Druckluftspeicher **55** betrieben werden kann.

### 3. Vorteile der Erfindung

**[0081]** Das Schwergewicht einer Energiespeicheranlage im Rahmen einer auf fluktuierenden Stromquellen basierenden Energiewirtschaft liegt nicht so sehr auf einem hohen Gesamtwirkungsgrad zwischen Ausspeichern und Einspeichern sondern mehr auf einer hohen Speicherdichte und einer hohen Rückgewinnung der bereits eingespeicherten Energie. Daher ist die pro Volumen eingespeicherte Energiemenge eine wichtige Referenzgröße für ein Speichersystem.

**[0082]** Bei vorgegebenem Speichervolumen und fester Meerestiefe lässt sich in einem Druckluftspeicher mehr Energie als in einem hydrostatischen Speicher („Meerei“) speichern. Durch die Aufladung der Druckluft ergibt sich eine weitere Erhöhung der Speicherdichte. Auch wenn man den gegenüber einem „Meerei“ etwas schlechteren Wirkungsgrad des Ausspeicherns berücksichtigt, verbleibt für die vorliegende Erfindung immer noch etwa eine um eine Größenordnung höhere Speicherdichte (siehe Abschnitt 2.1).

**[0083]** Die Festigkeit gegen Innendruck eines gegebenen Speicherbehälters wird um den mit der Meerestiefe ansteigenden kompensatorischen Außendruck erhöht. Insofern ist ein Einsatz in größerer Tiefe durchaus vorteilhaft. Andererseits lassen sich jedoch in einer noch gut erschließbaren „mäßigen“ Tiefe von beispielsweise 700 m bereits hervorragende Speicherdichten erzielen.

**[0084]** Ein Flautenzyklus ist mit mäßigen Zusatzkosten möglich. Die leistungsabhängigen Elemente können in gleicher Weise im Tageszyklus wie im Flautenzyklus genutzt werden; für den Flautenzyklus sind also keine zusätzlichen leistungsabhängigen Investitionen erforderlich, er erfordert lediglich die Abdeckung der zusätzlichen speicherabhängigen Kosten

**[0085]** Alle wartungsanfälligen Maschinen stehen gut zugänglich auf der Technischen Plattform **1**, sind also ohne Tauchgänge zugänglich und können in angemessenen Zeiträumen erneuert oder ersetzt werden.

**[0086]** Auf der negativen Seite muss diesen Vorzügen die zwingende Installation des Schnorchels **2** gegenüber gestellt werden. Zwar sieht auch das Konzept „ORES“ (Ocean Renewable Energy Storage) von Alexander Slocum /Slocum 2011/ eine Luftverbindung zur Atmosphäre vor; aber beim Meerei könnte man den Schnorchel grundsätzlich durch aufwendige Hilfspumpen oder einen entsprechenden vertikalen Aufbau des Speicherkörpers zur Erzeugung des Vordruckes für die Hochdruckpumpen vermeiden.

### Literaturangaben:

**[0087]**

/Hahne 2002/ Erich Hahne: „Technische Thermodynamik“, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag (2000), München

/Luther-Schmidt-Böcking 2011/ DE 10 2011.105307

Gerhard Luther und Horst Schmidt-Böcking: „Schacht-Pumpspeicherkraftwerk“

/Schmidt-Böcking-Luther 2011/ DE 10 2011.013329  
 Horst Schmidt-Böcking und Gerhard Luther: „Pumpspeicherkraftwerk“  
 /Slocum 2011/ WO 2011/112561 A2,  
 Alexander Slocum, Gregory Fennell und Allison Greenlee:  
 "Offshore Energy Harvesting, Storage, and Power Generation System"  
 /Sirseth 2009/ WO 2009/131459 A2  
 Torbjorn Sirseth: „Energy Storage System“

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Technikplattform
<b>1a</b>	Kompressor
<b>2</b>	Schnorchel
<b>21, 22</b>	pneumatische Verbindungen
<b>4</b>	Wärmetauscher
<b>40</b>	Kühlmittel
<b>41–43</b>	seriell durchlaufene Wärmetauscher
<b>45</b>	Wärmetauscher, welche wie eine Kältefalle wirkt,
<b>52</b>	Luftöffnung
<b>53</b>	Wassereinlass bzw. -auslass
<b>55</b>	Druckluftspeicher
<b>56</b>	Grundventil
<b>57</b>	Rohre, hydraulischen Verbindungen
<b>58</b>	zentrale Verteilerstation
<b>60</b>	Steuerventil
<b>62</b>	Hochdruckturbine
<b>62</b>	Mitteldruckturbine
<b>63</b>	Niederdruckturbine <b>63)</b>
<b>9</b>	Windrad

#### Patentansprüche

1. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk zum temporären Zwischenspeichern von elektrischer Energie aus anderen Kraftwerken, insbesondere Windkraftanlagen und/oder Photovoltaikanlagen, umfassend eine Technik-Plattform (**1**) an der Wasseroberfläche, auf der vornehmlich Anlagen zur Erzeugung von Druckluft, beispielsweise mittels Kompressoren (**1a**), und zur Arbeitsgewinnung aus der Entspannung der Druckluft, beispielsweise mittels Turbinen (**61, 62, 63**), angeordnet sind, mindestens einen mit Druckluft befüllbaren Behälter zum Versenken auf den Grund eines Gewässers, beispielsweise auf den Meeresgrund, einen Schnorchel (**2**) als Luftleitung zwischen der Luftöffnung (**52**) des Behälters und der Technik-Plattform (**1**), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Behälter als ein großvolumiger und als ein derart druckfester Druckbehälter (**55**) ausgeführt wird, dass dieser einem inneren Speicherdruck ( $p_S$ ) standhalten kann, der den hydrostatischen Wasserdruck ( $p_M$ ) am Gewässergrund um das 2 bis 3 fache oder mehr übersteigt, wobei der Druckbehälter (**55**) einen Wassereinlass bzw. Wasserauslass (**53**) mit einem schaltbaren Grundventil (**56**) als Verbindung zum umgebenden Gewässer mit dem der Wassertiefe entsprechenden hydrostatischen Wasserdruck ( $p_M$ ) besitzt, welches beim Ausspeichern der Energie beim Übergang vom Gleitdruckbetrieb zum Festdruckbetrieb und beim Einspeichern der Energie nach dem Festdruckbetrieb beim Verdrängen des Wassers und Übergang zum Gleitdruckbetrieb beim hydrostatischen Wasserdruck am Gewässergrund ( $p_M$ ) drucklos geöffnet bzw. geschlossen wird.
2. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass sich auf dem Gewässergrund mehrere Druckbehälter (**55**) befinden, die über Luftleitungen (**21, 22**) und über Wasserleitungen (**57**) verbunden sind mit einer zentralen Verteilerstation (**58**), wobei die Luftleitungen (**21, 22**) über einen Schnorchel (**2**) mit der Technik-Plattform (**1**) in Verbindung stehen.
3. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk nach einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur weiteren Erwärmung des Arbeitsfluids in Wärmetauschern (**4**) vor einem Turbineneintritt eine zusätzliche Wärmequelle, beispielsweise solar oder durch eine Wärmepumpe erwärmtes Wasser, eingesetzt wird.

4. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das kalte Abgas der Turbinen (**61–63**) zur Abkühlung eines Kühlmittelstromes (**40**) dient und der kalte Kühlmittelstrom (**40**) über einen Wärmetauscher (**45**) den Wasserdampf, der in der über den Schnorchel (**2**) ankommenden Druckluft noch enthalten ist, zum Schutze des Turbinenbetriebes ausfriert.

5. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Wassereinlass bzw. Wasserauslass (**53**) des Druckbehälters (**55**) durch ein Grundventil (**56**) gesteuert wird, welches automatisch schließt bzw. öffnet, sobald der Druck im Druckbehälter (**55**) den hydrostatischen Wasserdruck am Gewässergrund ( $p_M$ ) erreicht.

6. Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerk nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Entspannung der Druckluft die Hochdruckturbine (**61**) durch eine Drossel (**61a**) ersetzt wird und die Mitteldruckturbine (**62**) so ausgelegt wird, dass ihr Eingangsdruck etwa dem hydrostatischen Wasserdruck am Gewässergrund ( $p_M$ ) entspricht und dadurch die Turbinen während der gesamten Speicherentladung bei festen Drücken arbeiten können.

7. Verwendung eines Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerks nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Technik-Plattform (**1**) nun an der Erdoberfläche liegt, die Speicherbehälter (**55**) als Hohlräume oder Blindschächte untertage ausgeführt sind, der Schnorchel (**2**) als Schacht oder Rohr in einem Schacht realisiert wird und der Druck ( $p_M$ ) der Wassersäule durch einen mit Wasser gefüllten Schacht, der vorzugsweise mit einem oberirdischen oder untertägigen Wasserreservoir verbunden ist, erzeugt wird.

8. Verwendung eines Unterwasser-Druckluft-Speicherkraftwerks nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Druckbehälter (**55**) als Puffer für Windenergieanlagen in einem seichten Gewässer wie beispielsweise der Nordsee installiert wird, wobei die Höhe des Druckbehälters (**55**) angenähert der lokalen Gewässertiefe entspricht, und die Technik-Plattform (**1**) direkt auf dem Druckbehälter (**55**) aufsitzt, und eine Windmühle (**9**) auf, an oder im Druckbehälter (**55**) befestigt wird.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

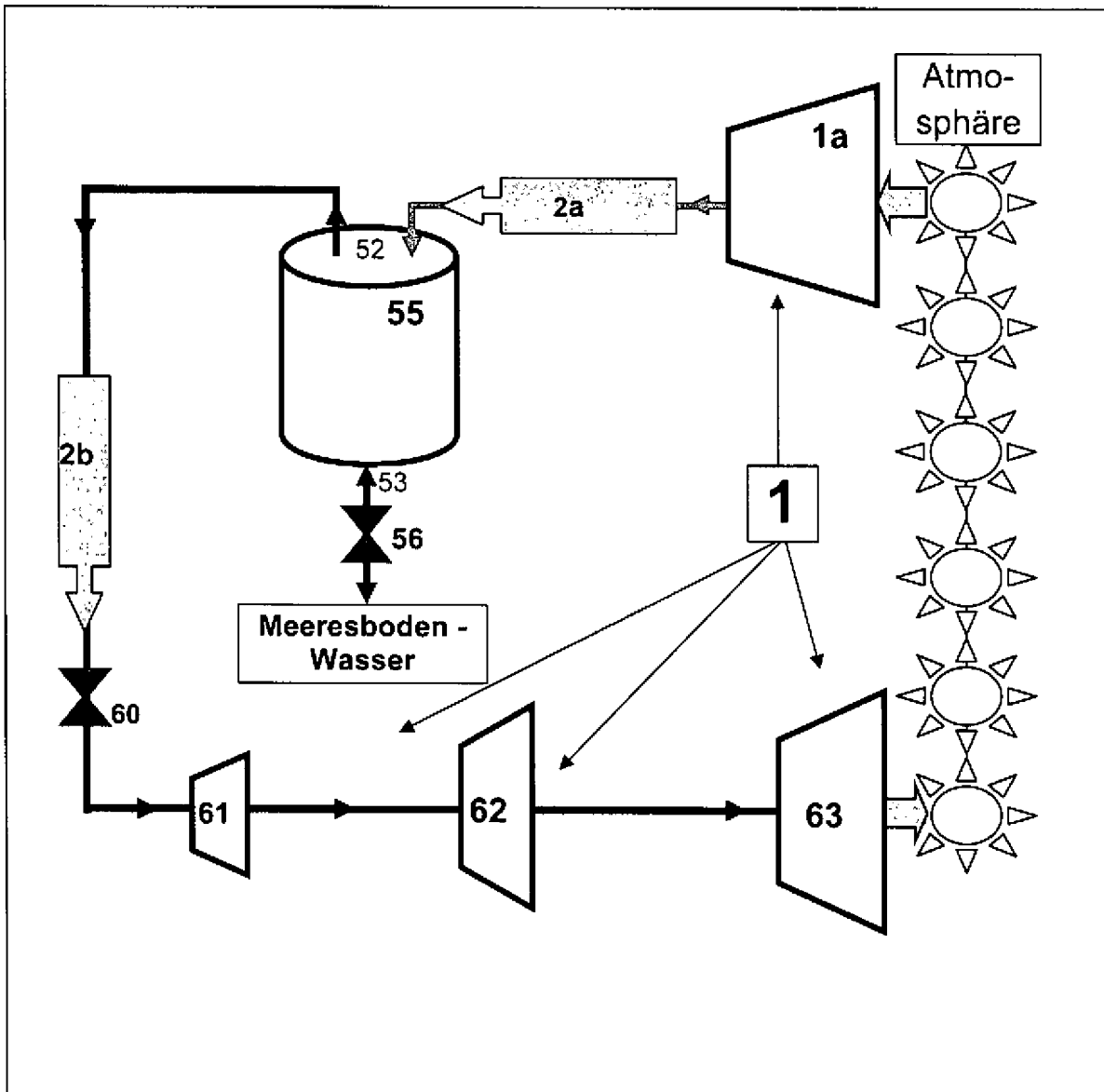


Bild 1:

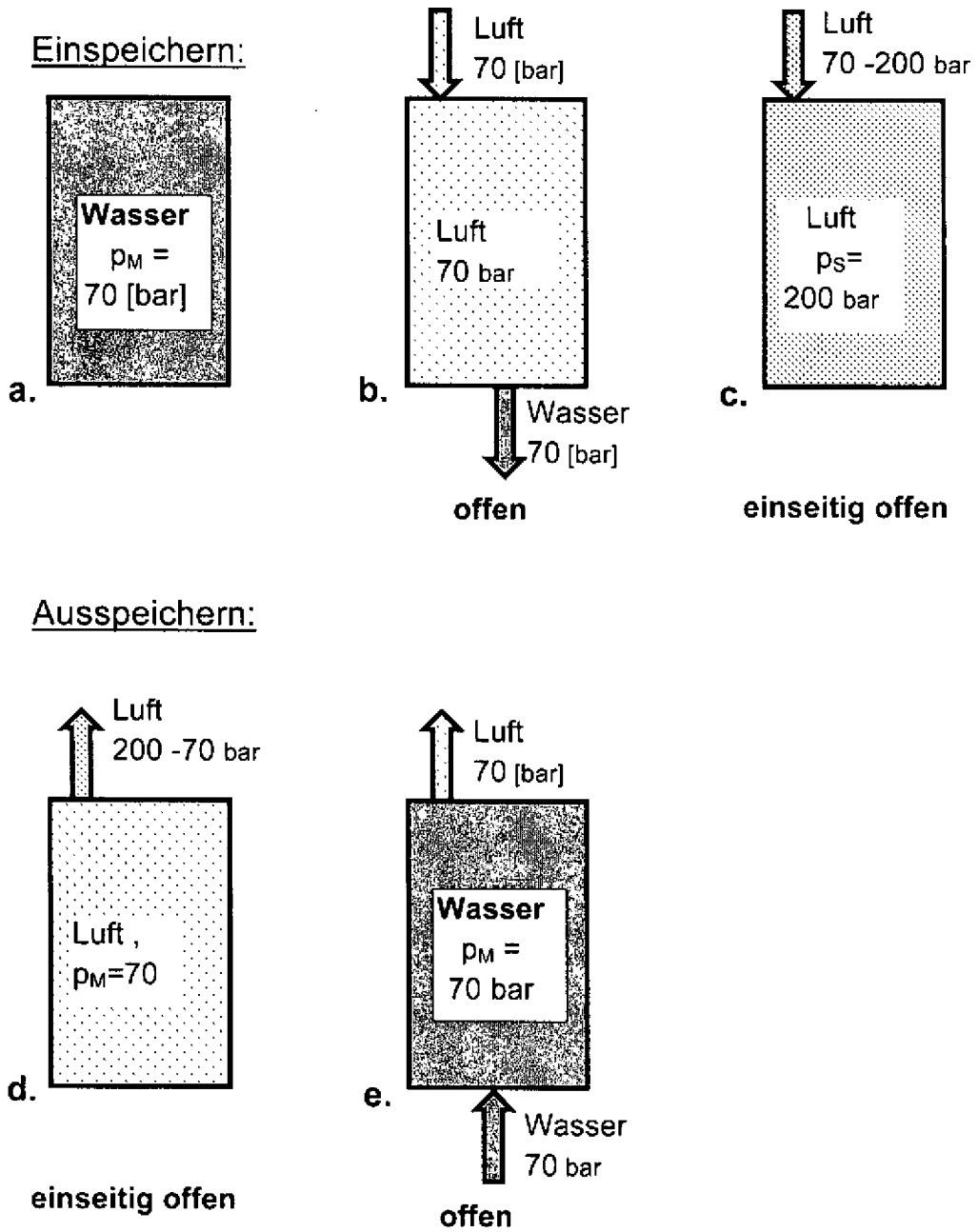


Bild 2:

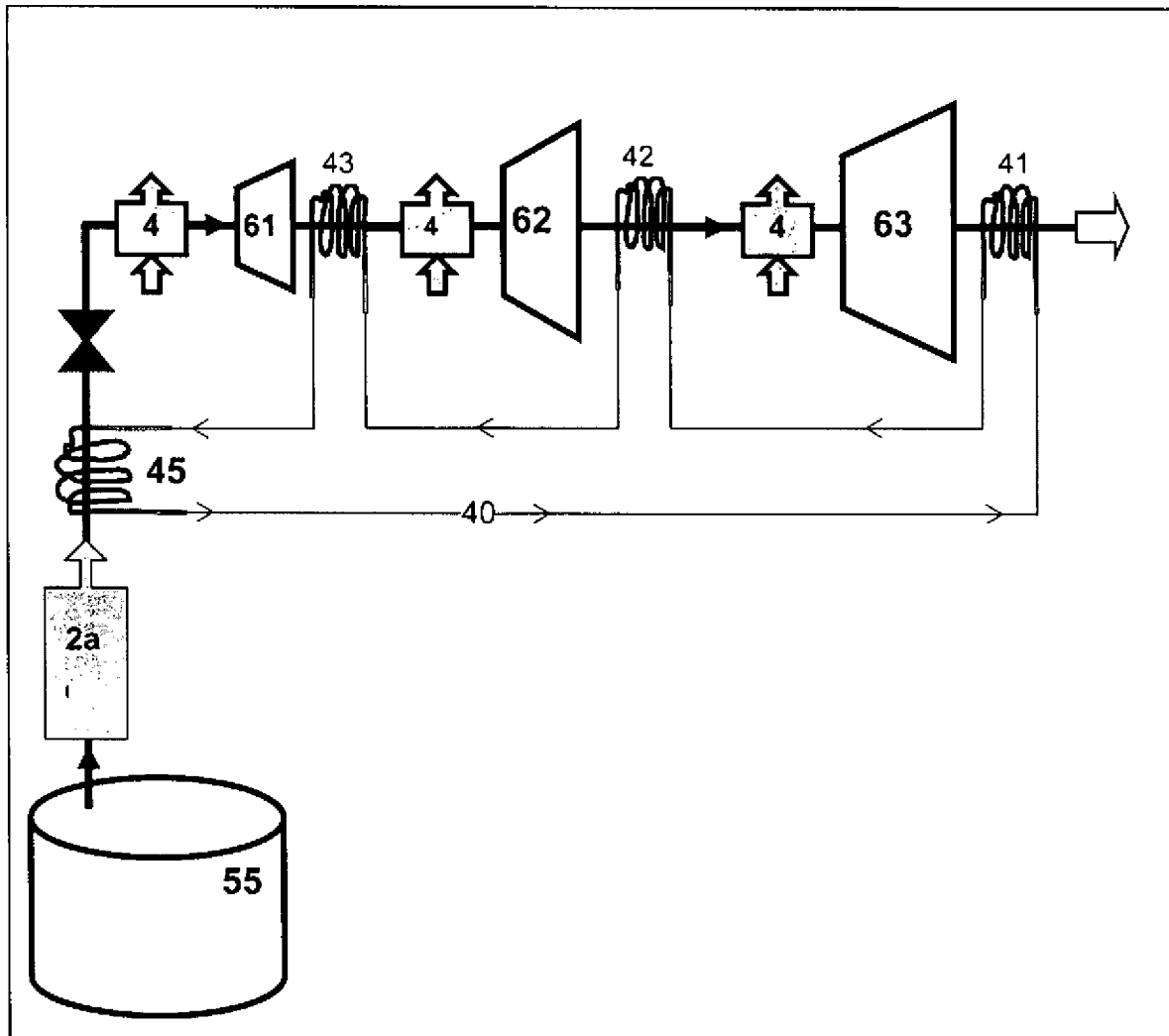


Bild 3



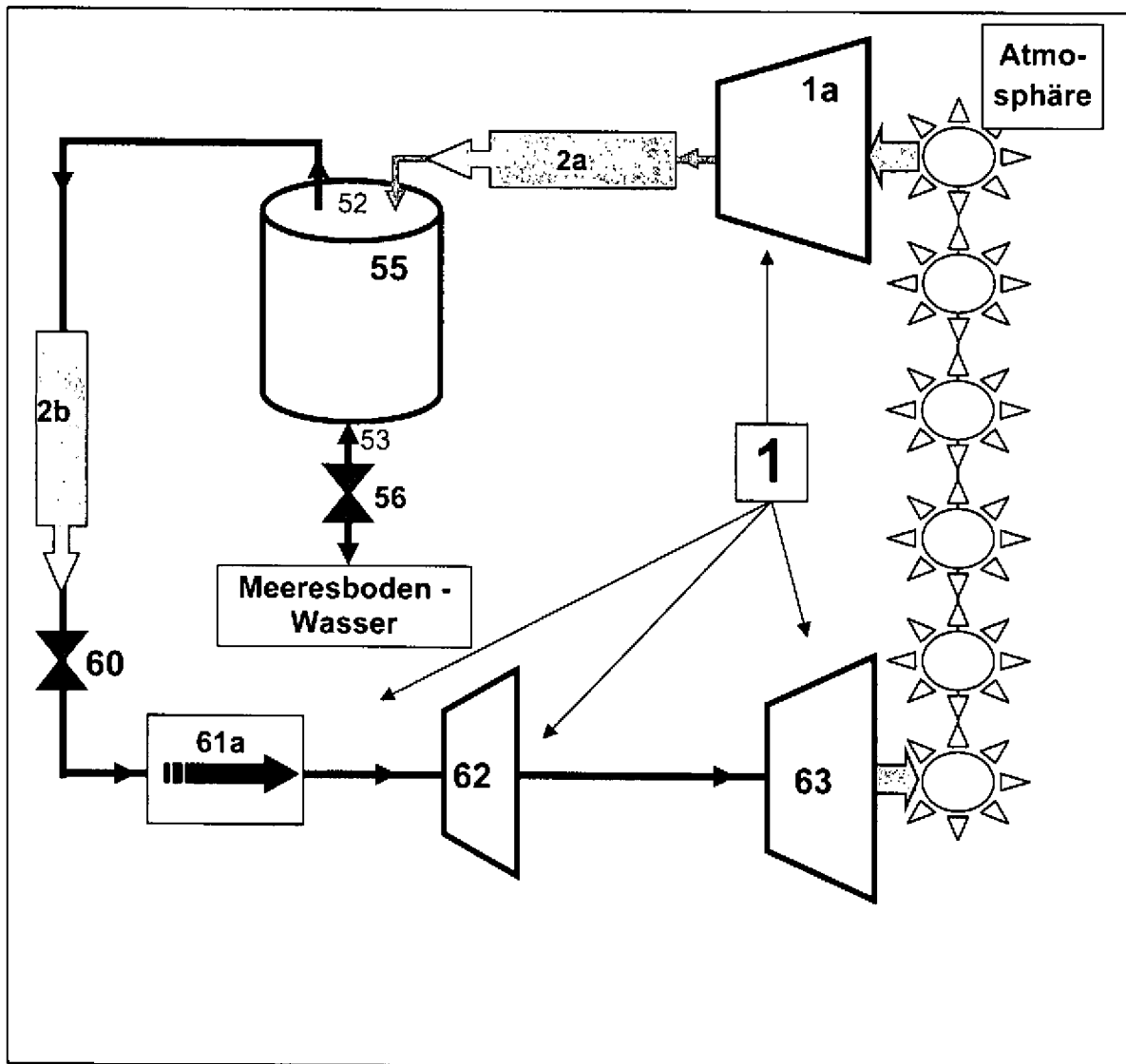


Bild 4:

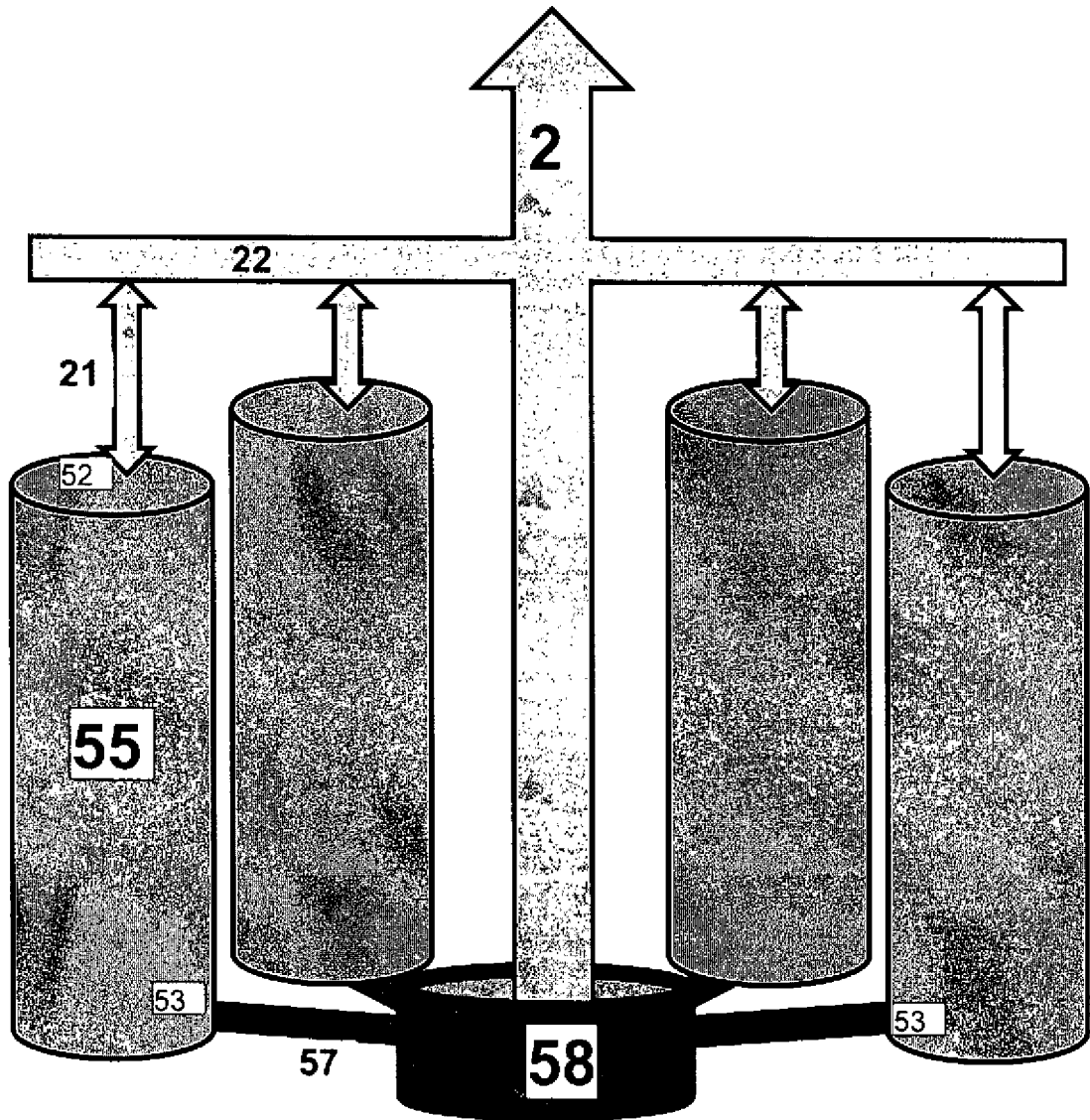


Bild 5

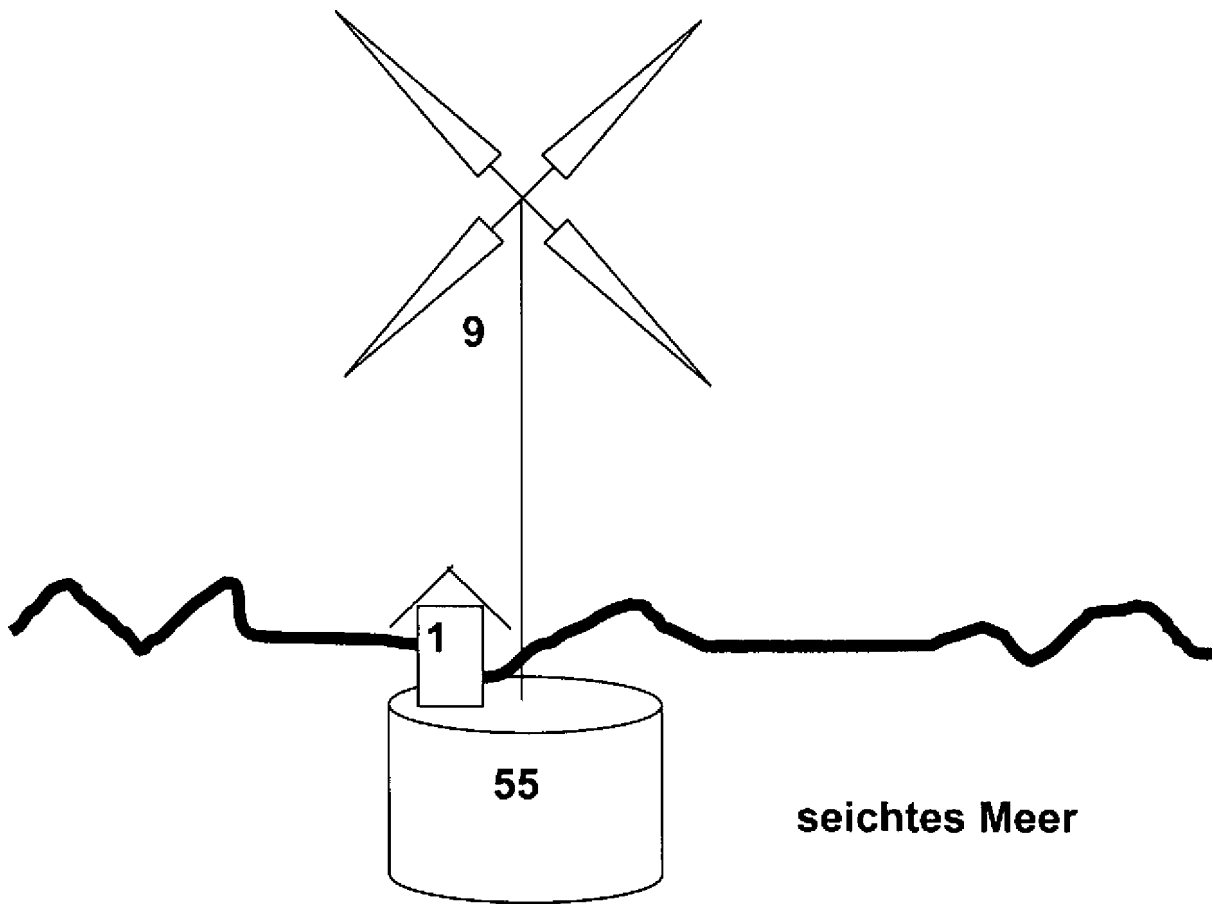


Bild 6: