15. Symposium Energieinnovation, 14. bis 16. Februar 2018, Technische Universität Graz, www.EnInnov.TUGraz.at
ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Buoyant Energy Storage „Light“ – Thermodynamische Analyse eines schwimmenden hydraulischen Energiespeichers

Bernd Steidl, Robert Klar, Markus Aufleger

Arbeitsbereich für Wasserbau, Institut für Infrastruktur/Universität Innsbruck, Technikerstrasse 13, t: +43 (0)512 507 62222, bernd.steidl@uibk.ac.at, www.uibk.ac.at/wasserbau/

Kurzfassung:

Traditionell verfügt Österreich über exzellente Kompetenzen für Wasserkraft- bzw. Pumpspeicheranlagen. Darauf aufbauend wurde die *„Buoyant ([ˈbɔɪənt] = schwimmend, lebhaft) Energy“* getaufte Idee – vorstellbar als eine Art *„schwimmendes Pumpspeicherkraftwerke“* – zur dezentralen Stromumwandlung und -speicherung mittels hydraulischer Offshore-Systeme von schwimmenden Reservoirs entwickelt und patentiert (EP2681445B1). Dieses Paper konzentriert sich auf die theoretische Untersuchung der sogenannten Buoyant Energy „light“ Variante (BEL). Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass der innere Wasserspiegel in BEL-Reservoirs stets oberhalb des umgebenden Gewässers (Meer, See, etc.) liegt. Aufgrund dieser Gegebenheit profitiert die Speicherlösung von einem möglichst geringen Eigengewicht. Eine aus mehreren Kammern bestehende Reservoirstruktur aus hochfestem Fasergewebe (Textilmembrane) könnte hier eine besonders vorteilhafte Ausführung ermöglichen.

In einem ersten Schritt werden die grundsätzlichen Technologieaspekte sowie die Rahmenbedingungen zur Optimierung der Speicherkapazität erläutert. Nachfolgend wird ein rechnerischer Ansatz zur thermodynamischen Analyse von BEL-Systemen in Kombination mit gleichzeitiger Druckluftspeicherung vorgestellt. Bei diesen Systemen ist die Reservoirhülle luftdicht ausgeführt, wodurch die Luft im Inneren des Reservoirs als Gasfeder wirkt und beim Füllvorgang komprimiert und beim Entleervorgang expandiert wird. Diese „Gasfeder“ kann sehr einfach „vorgespannt“ werden, indem ein Vielfaches des Umgebungsluftdrucks aufgebracht wird. Insgesamt ist so eine deutliche Steigerung der erzielbaren Speicherkapazität erreichbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Idee der Verwendung textiler Konstruktionsmaterialien als vielversprechend erweist und in weiterführenden Studien näher untersucht werden sollte.

Keywords: Offshore, Energiespeicher, Druckluft, Textil

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Der Bedarf an Energiespeicherlösungen zur Kompensation des unausgeglichenen Energieangebots in zukünftigen Stromnetzen mit hohem Anteil an erneuerbaren Energieerzeugern ist unbestritten. Es gibt unterschiedliche Arten von Energiespeichern (mechanisch, elektrisch, chemisch, etc.) wobei bei den einzelnen Kategorien wiederum an verschiedenen Systemen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

geforscht wird. Ebenso bei hydraulischen Speicherlösungen zu denen auch das Buoyant Energy Storage Konzept zählt und somit in Konkurrenz zu anderen, vielversprechenden Speicherlösungen steht. Diesbezüglich zu nennen sind die in Tension Leg Platforms (TLP) integrierten hydraulischen Akkumulatoren [1], die StEnSea Unterwasser Energiespeicher Technologie [2], Ocean Renewable Energy Storage [3], Energy Bags für Unterwasser Druckluftspeicherung (CAES) [4] und Druckluftspeicher mit konstantem Druck für Offshore Windturbinen [5].

Buoyant Energy (BE) [6] ist ein schwimmendes hydraulisches Energiespeichersystem. Im Grunde besteht es aus einem großen schwimmenden Reservoir und einem hydraulischen System aus Pumpe(n), Turbine(n), Motor und Generator zur Energieumwandlung. Während eines Lade-Entladezyklus wird elektrische in potentielle Energie und diese anschließend wieder in elektrische Energie umgewandelt. BE ist sowohl für den Einsatz in Offshore-Bereichen als auch in Küstennähe oder ruhenden Binnengewässern geeignet und nutzt die bereits erprobte und bekannte Technologie von Pumpspeicherkraftwerken (PSW).

Im Zuge des bereits abgeschlossenen Sondierungsprojekt „PrepareBE“ [7], [8] wurde die technische Machbarkeit und wirtschaftliche Durchführbarkeit dieses neuartigen Energiespeicherkonzepts geprüft. Zudem wurden die vielversprechendsten Anwendungsgebiete und die Entwicklungsziele mit den besten Erfolgsaussichten definiert.

Prinzipiell kann zwischen zwei Varianten des Energiespeichers unterschieden werden. Die „schwere“ und die „leichte“ Variante (BEL). Beide BE-Konzepte weisen sich durch eine nahezu unbegrenzte Anzahl an Ladezyklen, kurze Reaktionszeiten und den hohen Wirkungsgrad aus. Die schwere Variante bietet zusätzlich die Möglichkeit dass der Speicher / die Speicherplattform sowie Teile des inneren Reservoirs multifunktionell genutzt werden (z. B. durch soziale, industrielle oder gewerbliche Infrastruktur, Transport, Freizeitnutzung,…) wodurch sich das vorliegende Konzept deutlich von konkurrierenden Lösungen abhebt.

1.2 Grundlegendes BEL Konzept

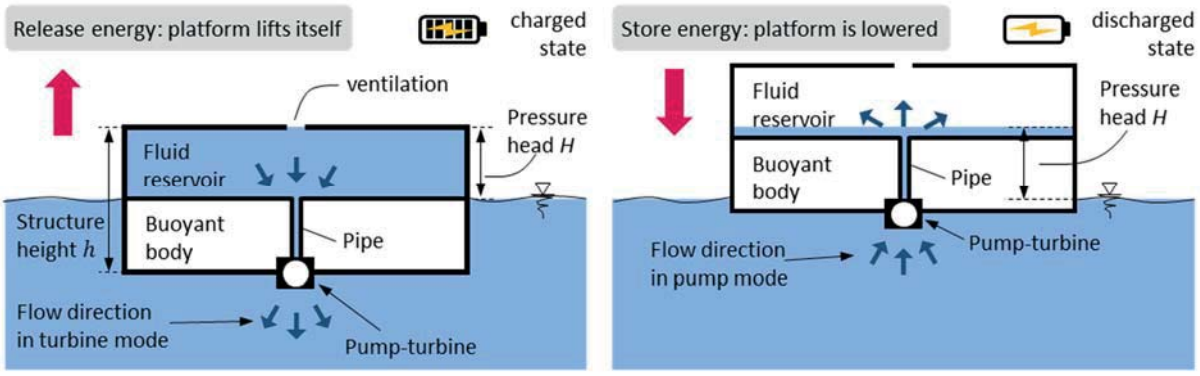

Abbildung 1: Schematische Darstellung der grundlegenden BEL-Version im geladenen (links) und entladenen (rechts) Zustand.

Der wesentliche Unterschied des BEL-Konzeptes, im Gegensatz zum schweren BE-Konzept [6], ist dadurch gegeben, dass der umgebende Wasserspiegel (Meer, See, etc.) unterhalb des inneren Wasserspiegels (Reservoir) des schwimmenden Energiespeichers situiert ist. Hierfür wurde das Wasserreservoir mit Schwimmkörpern, die unterhalb dessen situiert sind, ausgestattet (siehe Abbildung 1). Im Turbinenbetrieb und somit zur Stromproduktion wird das innere

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Reservoir entleert wodurch die gespeicherte potentielle Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Mit fortlaufender Entleerung des Reservoirs hebt sich der BEL-Energiespeicher aufgrund der Gewichtsreduktion des Gesamtsystems an. Während des Einspeicherprozesses wird mit Hilfe einer Pumpe das innere Reservoir wieder mit Wasser gefüllt, elektrische Energie wird in Form von potentieller Lageenergie gespeichert und der Speicher senkt sich ab.

1.3 Grundlegende Entwurfsregeln und Ermittlung der idealen Speicherkapazität

Die BEL-Version profitiert von einem möglichst geringen Konstruktionseigengewicht was eine erhebliche Kostenreduktion im Gegensatz zur schweren BE-Ausführung bedeuten könnte. Eine mögliche Option um dies zu erreichen stellt die Verwendung von flexiblen Textilmaterialien dar was in Kapitel 2 näher diskutiert wird.

Die Speicherkapazität des BEL-Systems hängt von der Form des inneren Reservoirs, dem Luftkörper und der Masse (Konstruktion, technisches Equipment) ab. Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge wird nachfolgend ein idealisiertes System (Abbildung 1 und 2) betrachtet. Das Flüssigkeitsreservoir sowie der Schwimmkörper des betrachteten Systems haben eine zylindrische Form und weisen dieselbe Grundfläche A auf. Zudem wird die Wandstärke t als unendlich dünn angesetzt. Abbildung 2 zeigt drei Ausführungen des BEL-Konzepts die sich lediglich im Volumen des Flüssigkeitsreservoirs $V_{A,i}$ und somit der Höhe $h_{A,i}$, dem Luftkörpervolumen $V_{B,i}$ und folglich der Höhe $h_{B,i}$ sowie der Druckhöhe H_i unterscheiden.

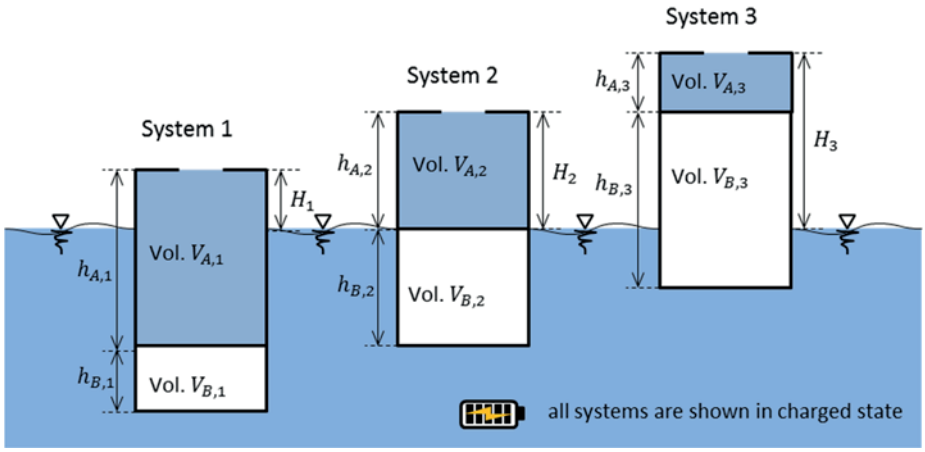

Abbildung 2: Schematische Darstellung von drei BEL-Systemen die dieselbe Strukturhöhe h und Grundfläche A, jedoch unterschiedliche Größen des Flüssigkeitsreservoirs und des Luftkörpers aufweisen.

Die Gleichungen 1 bis 5 beschreiben die Randbedingungen und die funktionelle Beziehung die ein solches ideales BEL-System charakterisieren. Die verwendeten Parameter sind die Dichte des Wassers ρ_w, die Erdbeschleunigung g, die Druckhöhe H, der Abfluss Q, die Füllzeit t_{max}, die Leistung P und die Speicherkapazität W.

$$A = const. \quad | \quad Q = const. \quad | \quad h = h_A + h_B = const. \tag{1}$$

$$V_A + V_B = A \cdot h = A \cdot (h_A + h_B) \qquad \text{mit: } V_A = A \cdot h_A \text{ and } V_B = A \cdot h_B \tag{2}$$

$$t_{max} = V_A / Q \quad | \quad H = h - h_A = h_B \tag{3}$$

$$P = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot Q \tag{4}$$

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

$$W(t_{max}) = P \cdot t_{max} = \rho_w \cdot g \cdot H \cdot V_A = \rho_w \cdot g \cdot (h - h_A) \cdot A \cdot h_A \quad (5)$$

Für jedes der in Abbildung 2 angeführten BEL-Systeme kann die spezifische Speicherkapazität mit Hilfe von Gleichung 5 berechnet werden. Die „optimale“ Höhe $h_{A,i}$ zum Erzielen der maximalen Speicherkapazität $W(t_{max})$ für eine vorgegebene Gesamtstrukturhöhe h und Grundfläche A kann aus nachfolgender Gleichung abgeleitet werden:

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}h_A = 0 \rightarrow h - 2 \cdot h_{A,opt.} = 0 \rightarrow h_{A,opt} = h/2 \quad (6)$$

Wie ersichtlich, erreicht man die maximale Speicherkapazität, wenn sich die Höhe des Flüssigkeitsreservoirs und des Luftköpers einander entsprechen und folglich jeweils die halbe Strukturhöhe h aufweisen. Die Druckhöhe H ergibt sich dann ebenfalls zu h wie durch Gleichung 7 veranschaulicht. Die optimale Speicherkapazität eines idealisierten BEL-Systems wird anhand Gleichung 8 beschreibt und in Abbildung 3, als Funktion der Strukturhöhe h und Grundfläche A, graphisch dargestellt.

$$h_A = h_B = h/2 = H \quad (7)$$

$$W_{opt}(t_{max}) = \rho_w \cdot g \cdot A \cdot h^2/4 = m \cdot g \cdot h/2 \quad (8)$$

Die volumetrische Energiedichte ρ_{vol} bezogen auf das verdrängte Wasservolumen in vollgeladenem Zustand ergibt sich zu:

$$\rho_{vol} = W_{opt}/V_B = W_{opt}/(A \cdot h_B) \quad (9)$$

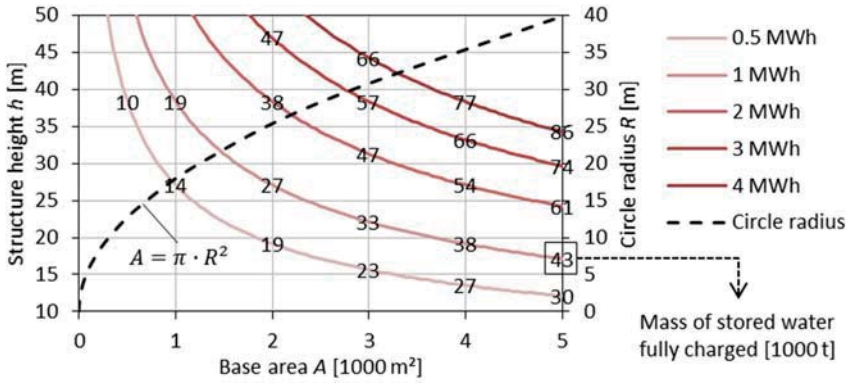

Abbildung 3: Optimale Energiespeicherkapazität des idealisierten BEL-Systems als Funktion der Höhe h und der Grundfläche A.

2 Rechnerischer Ansatz zur Steigerung der Energiespeicherkapazität

Der hier vorgestellte rechnerische Ansatz ist eine Erweiterung des grundsätzlichen BEL-Systems (Kapitel 1.2) in eine hydro-pneumatische Speicherlösung. Verglichen zum herkömmlichen BEL-Konzept wird dabei zusätzliche Energie während des Befüllens des Reservoirs, durch Luftkompression gespeichert. Eine sinnvolle konstruktive Maßnahme eines derartigen Systems stellt die schlauchförmige Verbindung beider Luftvolumen aus Kammer A und B (siehe Abbildung 4) zur Vergrößerung des komprimierbaren Luftvolumens und somit der Reduktion des Kompressionsgrades dar. Das Luftvolumen beider Kammern kann somit als ein Einzelvolumen betrachtet werden was zu einem deutlich geringeren Temperaturanstieg während des Kompressionsvorganges führt (Abbildung 7). Zur Ermöglichung der Luftkompression

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

müssen zudem die Kammerwände luftdicht ausgeführt sein. Folglich hängt bei diesem System die erzielbare Speicherkapazität, zusätzlich zu den in Kapitel 1.3 genannten Punkten, ebenso vom Vordruck p_{pre} in der Luftkammer ab. Durch den auf den Flüssigkeitskolben wirkenden Innendruck wird während des Befüllens des inneren Reservoirs zusätzliche die Energie der komprimierten Luft und ein Teil der dabei entstehenden Wärme, gespeichert. Beim Entladen wird diese Energie wieder freigegeben.

In der durchgeführten Untersuchung wurde dieser Prozess unter zwei thermodynamischen Extremwertbetrachtungen modelliert. Einmal als isotherme und ein weiteres Mal als adiabate Zustandsänderung. Der Unterschied liegt im Umgang mit der während der Luftkompression entstehenden Wärme. Bei der isothermen Zustandsänderung wird davon ausgegangen, dass die Temperatur aufgrund eines ausreichenden Wärmeaustauschs zwischen innen und außen während des gesamten Ein- und Ausspeicherzyklus konstant bleibt. Umgekehrt verhält es sich bei adiabater Betrachtung. Hier kann die Kompressionswärme nicht entweichen wodurch es zu einem Temperaturanstieg im System kommt.

Ziel dieser Untersuchungen ist eine erste Abschätzung der minimal bzw. maximal erzielbaren Speicherkapazität einer solchen Kombinationslösung. Zudem sollen die Auswirkungen auf die Pump- bzw. Turbinierhöhe H_{PT} und die Leistung P aufgezeigt werden. Letztere beide Parameter sind aufgrund der Kombination mit Druckluftspeicherung während des Arbeitszyklus nicht mehr konstant sondern weisen ein zeitabhängiges Verhalten auf.

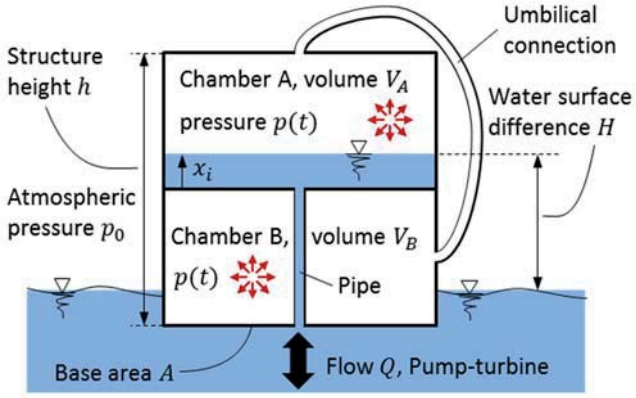

Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Luftdichten BEL-Systems mit einer Nabelverbindung zwischen beiden Kammern.

Nachfolgende werden erst die Modellgleichungen und Parameter für die isothermale Betrachtung angeführt. Folgenden Randbedingungen wurden dabei festgelegt:

$$H = h/2 = const. \quad | \quad Q = const. \quad | \quad V_A = V_B \quad | \quad Q \cdot t_{max} = V_A \quad | \quad x_i \cdot A = t \cdot Q \qquad (10)$$

Der zu Beginn herrschende Druck in den Kammern A und B soll p_{pre} betragen. Das ideale Gasgesetz für die getroffene Annahme der isothermen Zustandsänderung führt zu einem funktionellen Zusammenhang, mit dem der vorherrschende Luftdruck $p(t)$ in Abhängigkeit der Zeit ausgedrückt werden kann (Gleichung 11 und 12).

$$p_{pre} \cdot (V_A + V_B) = p(x_i) \cdot (V_A + V_B - x_i \cdot A_A) = p_{iso}(t) \cdot (V_A + V_B - t \cdot Q) \qquad (11)$$

$$p_{iso}(t) = p_{pre} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}} \right) = p_{pre} \cdot \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B} \right)^{-1} \qquad (12)$$

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Die Bernoulli Gleichung beschreibt wiederum die zeitabhängige Pump- bzw. Turbinierhöhe $H_{PT,iso}(t)$:

$$\frac{p_0}{\rho_w \cdot g} + H_{PT,iso} = H + \frac{p_{iso}(t)}{\rho_w \cdot g} \tag{13}$$

$$H_{PT,iso}(t) = H + \frac{1}{\rho_w \cdot g} \cdot \left[p_{pre} \cdot \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{-1} - p_0 \right] \tag{14}$$

Schlussendlich kann die Leistung $P_{iso}(t)$ und die Energiespeicherkapazität bzw. die Arbeit $W_{iso}(t)$ zu jedem beliebigen Zeitpunkt $0 \leq t \leq t_{max}$ und unter isothermen Verhältnissen wie folgt berechnet werden:

$$P_{iso}(t) = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H_{PT,iso}(t) = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot \left\{ H + \frac{1}{\rho_w \cdot g} \cdot \left[p_{pre} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}} \right) - p_0 \right] \right\} \tag{15}$$

$$W_{iso}(t) = \int_0^t P_{iso}(t)dt = \rho_w \cdot g \cdot \mathrm{t} \cdot \mathrm{Q} \cdot \mathrm{H} + \mathrm{p_{pre}}(V_A + V_B) \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}} \right) - t \cdot Q \cdot p_0 \tag{16}$$

Unter der Annahme einer adiabaten Zustandsänderung stehen der Druck p, die Temperatur T und das Volumen V in folgendem Zusammenhang zueinander:

$$\frac{T_{pre}}{T(t)} = \left(\frac{V(t)}{V(t=0)} \right)^{\kappa - 1} \quad | \quad \frac{T_{pre}}{T(t)} = \left(\frac{p_{pre}}{p_{adi}(t)} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \quad | \quad \left(\frac{p_{pre}}{p_{adi}(t)} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = \left(\frac{V(t)}{V(t=0)} \right)^{\kappa - 1} \tag{17}$$

Durch Umformen des dritten Therms von Gleichung 17 ergibt sich der aktuell vorherrschende Druck für einen beliebigen Zeitpunkt t gemäß Gleichung 18 und die Zeitabhängige Temperatur aus erstem Term von Gleichung 17 gemäß Gleichung 20 zu:

$$\frac{p_{pre}}{p_{adi}(t)} = \left(\frac{V(t)}{V(t=0)} \right)^{\kappa} = \left(\frac{V_A + V_B - t \cdot Q}{V_A + V_B} \right)^{\kappa} = \left(\frac{1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}}{1} \right)^{\kappa} \quad \text{mit:} \quad \kappa = \frac{c_p}{c_V} = 1.4 \tag{18}$$

$$p_{adi}(t) = p_{pre} \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{-\kappa} \tag{19}$$

$$T(t) = T_{pre} \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{1 - \kappa} \tag{20}$$

Die Zeitabhängige Pump- bzw. Turbinierhöhe $H_{PT,adi}(t)$ kann wiederum mit Hilfe der Bernoulligleichung (siehe Gleichung 13) bestimmt werden, wobei $p_{iso}(t)$ durch $p_{adi}(t)$ ersetzt werden muss:

$$H_{PT,adi}(t) = H + \frac{1}{\rho_w \cdot g} \cdot \left[p_{pre} \cdot \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{-\kappa} - p_0 \right] \tag{21}$$

Anhand Gleichung 22 kann somit die Leistung $P_{adi}(t)$ und die Energiespeicherkapazität bzw. die Arbeit $W_{adi}(t)$ unter der Annahme einer adiabater Zustandsänderung zu jedem beliebigen Zeitpunkt $0 \leq t \leq t_{max}$ bestimmt werden:

$$P_{adi}(t) = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H + Q \cdot p_{pre} \cdot \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{-\kappa} - Q \cdot p_0 \tag{22}$$

$$W_{adi}(t) = \int_0^t P(t)\, dt = \rho_w \cdot g \cdot t \cdot Q \cdot H + p_{pre} \frac{V_A + V_B}{(1 - \kappa)} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}\right)^{1 - \kappa} \right] - t \cdot Q \cdot p_0 \tag{23}$$

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse von Gleichung 12 bis 23 an einer BEL-Struktur mit exemplarisch gewählten Parametern aufgelistet.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Das Verhältnis $W_{iso}(t_{max})/W_{BE}(t_{max}) = 9{,}86$ bzw. $W_{adi}(t_{max})/W_{BE}(t_{max}) = 11{,}31$ beschreibt den Nutzen der Kombination des hydraulischen Energiespeichers mit der Druckluftspeicherung unter isothermer als auch adiabater Betrachtung. Die tatsächliche Speicherkapazität liegt dazwischen, da weder eine ideale Kopplung mit einem Wärmebad noch eine ideale Isolation erreicht werden kann. Wie aus Abbildung 5 (links) ersichtlich ist kommt es in beiden Fällen zu einer deutlichen Steigerung der Speicherkapazität. Einher geht dieser Gewinn jedoch mit einer stark variierenden Drückhöhe $H_{PT}(t)$ während des Speicherzyklus (siehe Abbildung 5, rechts). Konnte diese bei der Betrachtung von BEL als rein hydraulischer Energiespeicher als nahezu konstant angenommen werden, ist dies im Falle der Kombination mit CAES nicht mehr zutreffend. Für die Pump-Turbine könnte jedoch ein reversibles, mehrstufiges und drehzahlvariables System verwendet werden das durch die Kombination der individuellen Komponenten an die gegebenen Randbedingungen angepasst werden kann und somit den benötigten Anwendungsbereich (200 – 1000 m Förderhöhe bei 1 – 2,5 m³/s Durchfluss [9]) abdeckt.

Tabelle 1: Parameter und Berechnungsergebnisse für ein exemplarisches luftdichtes BEL-System in Kombination mit Druckluftspeicherung bei miteinander verbundenen Kammern (Kammer A und B).

Parameter	Wert	SI-Einheit
Wasserspiegeldifferenz H	15	m
Strukturhöhe h	30	m
Grundfläche A	1000	m²
Volume $V_A = V_B = H \cdot A$	15000	m³
Atmosphärendruck p_0	1,01	bar
Startdruck p_{start}	10,13	bar
Abfluss der Pump-Turbine Q	5	m³/s
Maximale Füllzeit t_{max}	3000	s
Druck $p(t=0) \mid p_{iso}(t_{\max}) \mid p_{adi}(t_{max})$	10,13 | 20,27 | 26,74	bar
Druckhöhe Pump-Turbine $H_{PT}(t=0) \mid H_{PT,iso}(t_{max}) \mid H_{PT,adi}(t_{max})$	108 | 211,2 | 277,2	m
Leistung der Pump-Turbine $P(t=0) \mid P_{iso}(t_{max}) \mid P_{adi}(t_{max})$	5,29 | 10,36 | 13,60	MW
Speicherkapazität mit Luftkompression $W_{iso}(t_{max}) \mid W_{adi}(t_{max})$	6,044 | 6,935	MWh
Speicherkapazität ohne Luftkompression $W(t_{max})_{BE}$	0,613	MWh

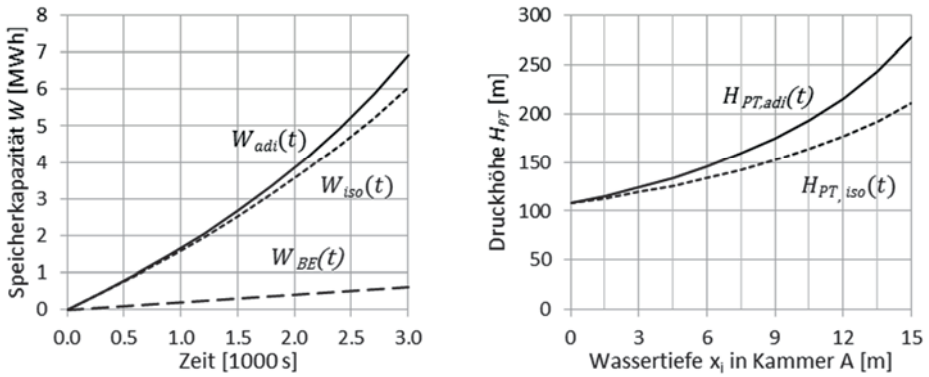

Abbildung 5: Ergebnis für ein exemplarisches BEL-System gemäß Tabelle 1. Zeitlicher Verlauf der Speicherkapazität ohne CAES, unter adiabater bzw. isothermer Zustandsänderung (links).

Wie aus Abbildung 6 (links) ersichtlich, liegt ein linearer Zusammenhang zwischen dem gewählten Vordruck p_{pre} und der maximalen Speicherkapazität W vor. Ebenso verhält es sich mit der Druckhöhe H_{PT} (siehe Abbildung 6 rechts). Anzumerken ist, dass der gewählte Vordruck p_{pre} keinen Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat. Unter der zuvor getroffenen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Annahme einer adiabaten Zustandsänderung ist diese lediglich vom Kompressionsgrad abhängig (siehe Abbildung 7). Je größer dieser ist, desto höher die Temperaturentwicklung im Speicher.

Zwei Faktoren sind jedoch mit steigendem Innendruck zu berücksichtigen. Als erstes ist der verstärkte Gaseintrag aus der Luft in das Wasser mit steigendem Innendruck im Reservoir zu nennen. Als Folge davon kann es beim Entleeren deutlich schneller zur ungewollten und schädigenden Kavitationsbildung an der Turbine kommen. Durch das Anbringen einer horizontalverlaufenden, flexiblen und luftdichten Trennebene aus Textil, die das innerer Reservoir in zwei Kammern teilt und somit den Luft- vom Wasserbereich trennt, könnte bereits der vermehrte Gaseintrag in das Wasser unterbunden werden. Eine genaue Untersuchung über den tatsächlichen Gasaustausch bzw. die Kavitationsbildung an der Turbine wurde jedoch nicht durchgeführt.

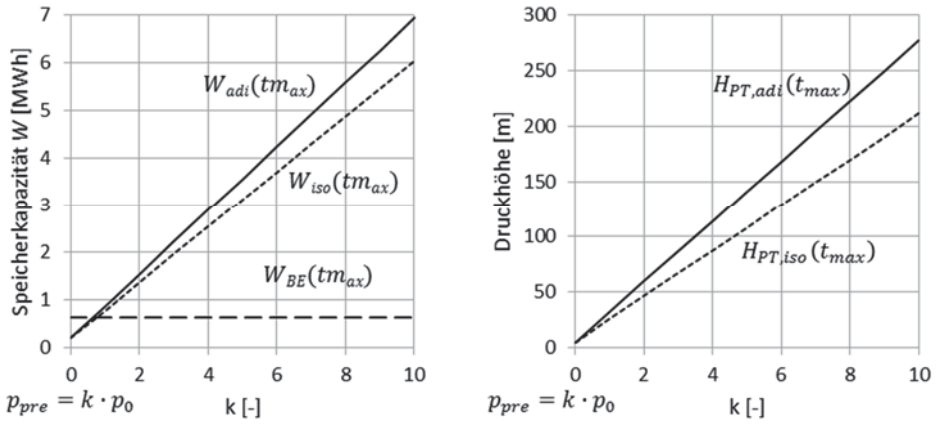

Abbildung 6: Einfluss des Vordrucks p_{pre} auf die Speicherkapazität (links) und die Druckhöhe (rechts).

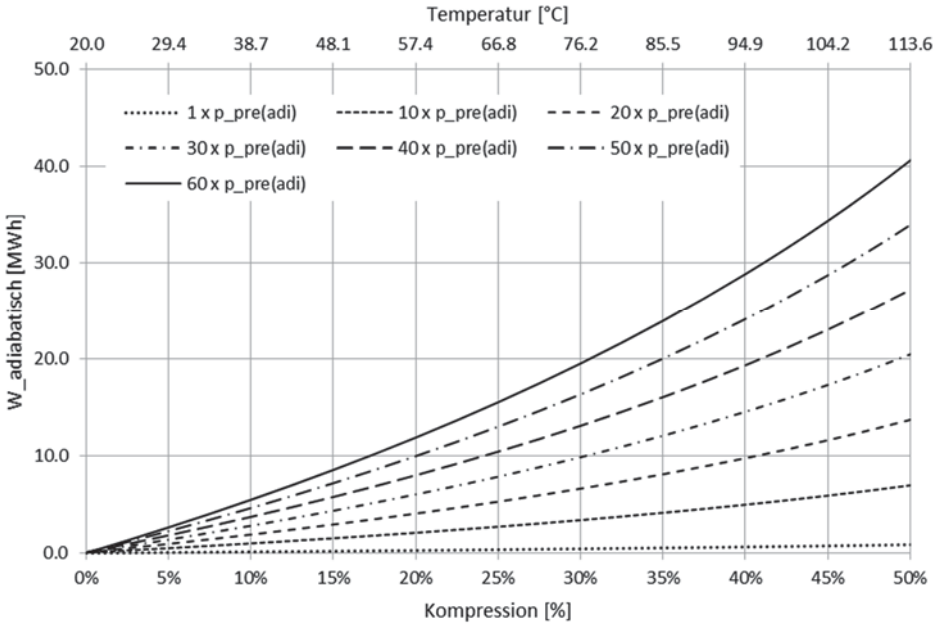

Abbildung 7: Speicherkapazität in Abhängigkeit des Kompressionsgrades sowie Temperaturentwicklung unter Annahme einer adiabaten Zustandsänderung.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Angesichts der Tatsache, dass beim BEL-Konzept das Eigengewicht des Speichers möglichst gering sein sollte, stellt der Einsatz von Textilen Multi-Layer-Material eine interessante Option dar. Neben relevanten Aspekten wie der Herstellung, der Transportfähigkeit, der Dauerhaftigkeit, etc. stellt sich auch, in Anbetracht des vorgesehenen Überdrucks im inneren des Reservoirs, die Frage der ausreichenden Materialfestigkeit.

Abbildung 8 zeigt schemenhaft den Querschnitt einer mögliche Ausführung des BEL-Speichers in Textil. Bei einer angenommenen geradlinigen Ausdehnung in axialer Richtung ergibt sich die, auf die Textilberandung von Kammer A wirkende Längszugspannung σ_x sowie die Umfangsspannung σ_ϑ überschlagsmäßig zu:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{p \cdot r^2 \cdot \pi}{2 \cdot r \cdot \pi \cdot t} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} \tag{24}$$

$$\sigma_\vartheta = \frac{p \cdot r}{t} \tag{25}$$

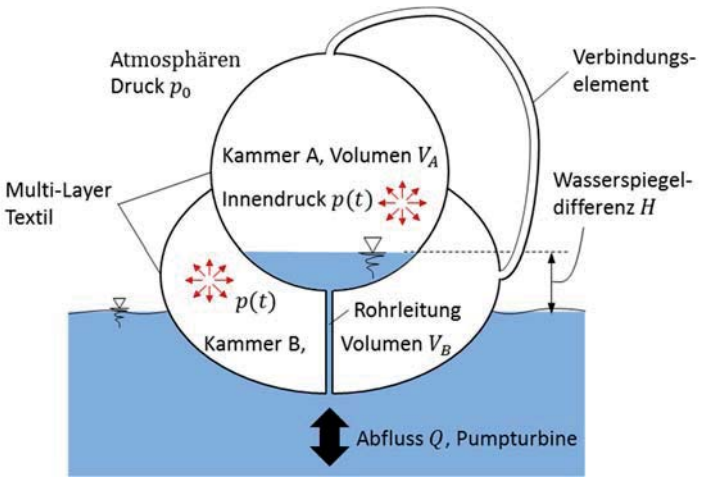

Abbildung 8: Schematische Darstellung des BEL-Konzepts in textil und kombiniert mit CAES.

In Tabelle 2 sind die Parameter sowie die Berechnungsergebnisse einer exemplarischen BEL-Variante angeführt. Pimm et al. [4] haben für ihr Prototypendesign des Energy Bag 420d polyurethanbeschichtetes Nylon für die Membran und Vectran™ für die Spannglieder verwendet. In Tabelle 3 sind ein paar geeignete Materialien in Bezug auf die maximale Längszugfestigkeit aufgelistet.

Tabelle 2: Parameter und Ergebnisse zur überschlagsmäßigen Berechnung der Längszug- und Umfangsspannungen einer BEL Ausführung mit Textil in Kombination mit CAES.

Parameter	Wert	SI-Einheit
Radius r der Kammer A	5 | 7,5 | 10	m
Textilstärke t	0,01	m
Vordruck p_{pre}	10,13	bar
Innendruck p_{max}	20,27	bar
Längszugspannung σ_x	0,507 | 0,760 | 1,013	GPa
Umfangsspannung σ_ϑ	1,013 | 1,520 | 2,027	GPa

Tabelle 3: Maximale Längszugfestigkeit ausgewählter Materialien.

Material	Längszugfest	SI-Einheit
Vectran™ HT	3,2	GPa
Glasfaser	~3,4	GPa
Carbonfaser	~4,1	GPa

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Eine sehr gute Übersicht über die Anwendung aufblasbarer Strukturen und damit verbundener Technologien gibt Veldman [10], [11]. Generell bieten aufblasbare Strukturen einige Vorteile wie z. B. das geringe Gewicht und das einfache Aufstellen. Zudem können sie einfach verpackt und somit effizient und einfach transportiert werden. Die genannten Vorteile weisen viele, bereits existierende Anwendungen wie z.B. luftgestützte oder mit Luft aufgeblasene Strukturen, Doppelwandstrukturen oder aufblasbare Träger auf.

Wie erwähnt sind die Anforderungen an ein derartiges Material im Offshore-Einsatz wie es beim BEL-Konzept der Fall sein würde sind sehr hoch. Es müsste nicht nur den auftretenden Kräften infolge äußerer Belastung, sondern ebenso der Einwirkung durch Salzwasser und Sonne dauerhaft standhalten. Pimm et al. [4] hat einige Anforderungen definiert die sie für ihre Energy Bag Technologie [4] berücksichtigen müssen. Im Wesentlichen könne diese Anforderungen ebenso für das BEL-Konzept herangezogen werden. Folglich muss ein BEL-Speicher aus Textil:

- Strukturell festgelegt und eine bestimmte Leistung aufweisen.
- Ausreichend belastbar sein sodass die mechanischen Eigenschaften infolge der Herstellung, dem Verpacken, dem Verschiffen, dem Errichten, der Wartung und der beabsichtigten Langzeitnutzung mit ständigen Lade- und Entladezyklen nicht gemindert werden.
- Ausreichend hohe spezifische Festigkeit aufweisen um allen einwirkenden Kräften und unter Einhaltung der geforderten Sicherheitsreserven unbeschadet standhalten kann.
- Während der geplanten Lebensdauer biologisch inaktiv sein.
- Dauerhaft Wasser- und Luftdicht sein.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Trotz des frühen Entwicklungsstadiums der BEL-Variante zeigen sich die hier präsentierten Ergebnisse – die Kombination des grundlegenden, hydraulischen BE-Konzeptes mit Druckluftspeicherung sowie die textile Ausführung des Speichers – als vielversprechend. Wie aus den in Kapitel 2 angeführten rechnerischen Ansätzen ersichtlich, ist die Speicherkapazität des hydro-pneumatischen Ansatzes deutlich größer als die der rein hydraulischen Lösung. Die beiden untersuchten Modelle, isotherme und adiabatsiche Zustandsänderung, stellen die extremalen Bedingungen und somit die minimal (isotherm) und die maximal (adiabat) erzielbare Steigerung der Speicherkapazität des Kombinationskonzeptes dar. Eine genaue Berechnung wurde im Zuge dieser ersten Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt. Das Ergebnis befindet sich jedoch zwischen beiden Extrema und stellt somit eine deutliche Verbesserung dar. Der Einsatz textiler Materialien führt zudem zu einer deutlichen Gewichtsreduktion im Vergleich zum Grundlegenden BEL-Konzept, bei dem hochfester Leichtbeton als Konstruktionsmaterial angedacht war.

Ein weiterer Vorteil von Textil zeigt sich in der Möglichkeit der Sandwichbauweise (Multi-Layer-Textil). Diese ermöglicht eine zielgerichtete und den gegebenen Anforderungen entsprechende Anpassung des Konstruktionsmaterials an die vorliegenden Bedingungen. Vor allem für den geplanten Offshore-Einsatz, bei dem das Material extremen äußeren Belastungen ausgesetzt ist kann davon ausgegangen werden, dass sich die dadurch ergebende Flexibilität, sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht als Vorteil erweist.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Die gute Transportmöglichkeit und der leichte Aufbau der textilen Speicherlösung stellen einen weiteren Vorteil dar. Auch ist hervorzuheben, dass dies die Produktion der Hüllstruktur in heimischen Firmen als durchaus möglich erscheinen lässt.

Inwieweit sich die ersten vielversprechenden Ergebnisse bestätigen ist in weiterführenden und detaillierteren Untersuchungen zu prüfen. Neben den thermodynamischen und den maschinentechnischen Aspekten sind insbesondere auch auf materialtechnischer Seite viele wesentliche Fragen noch ungeklärt. Schwimmstabilitätsuntersuchungen, Lösungsansätze zur Verankerung sowie der Umgang mit den dynamischen Einwirkungen aus äußeren Belastungen stellen ebenso zukünftige Forschungsfragen in diesem Bereich dar.

[1] D. Buhagiar, T. Sant, Modelling of a novel hydro-pneumatic accumulator for large-scale offshore energy storage applications, Journal of Energy Storage (2017).
[2] H. Henning, D. Hau, C. Dick, M. Puchta. Techno-economic assessment of a subsea energy storage technology for power balancing services, Energy (2017).
[3] H. Slocum, G. E. Fennell, G. Dundar, B. G. Hodder, J. D. Meredith, M.A. Sager, Ocean Renewable Energy Storage (ORES) System: Analysis of an Undersea Energy Storage Concept, Proceedings of the IEEE 101 No. 4, 2013, pp. 906-924.
[4] J. Pimm, S. D. Garvey, M. de Jong, Design and testing of Energy Bags for underwater compressed air energy storage, Energy 66, no. 1 (2014) 496-508.
[5] M. Saadat, P. Y. Li, Modeling and Control of a Novel Compressed Air Energy Storage System for Offshore Wind Turbine, American Control Conference, 2012, pp. 3032-3037.
[6] R. Klar, M. Aufleger, T. Sant, V. Neisch, R. Farrugia, Buoyant Energy – balancing wind power and other renewables in Europe's oceans, Proceedings of Offshore Energy and Storage Symposium (OSES), 2015.
[7] University of Innsbruck, Unit for Hydraulic Engineering, Prepare Buoyant Energy – Entwicklung innovativer Konzepte zur hydraulischen Offshore Energiespeicherung mittels schwimmender Reservoirs (Proposal), Energieforschungsprogramm 2. Ausschreibung Sondierung; Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), 2015.
[8] R. Klar, M. Aufleger, G. Scheide, V. Neisch, PrepareBE (Buoyant Energy) – exploratory project presentation, Proceedings of Offshore Energy and Storage Symposium (OSES), 2016.
[9] Ch. Bauer: Hydmod – Entwicklung einer modularen, kompakten Pumpturbine für die dezentrale Energiespeicherung. https://www.energieforschung.at/projekte/633/hydmod-entwicklung-einer-modularen-kompakten-pumpturbine-fuer-die-dezentrale-energiespeicherung, 02.02.2017.
[10] S. L. Veldman, Design and Analysis Methodologies for Inflated Beams, Doctoral thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2005.
[11] S.L. Veldman, O.K. Bergsma, A. Beukers, Bending of anisotropic inflated cylindrical beams, Thin-Walled Structures 43 No. 3 (2005) 461-475.