



15. Symposium Energieinnovation 2018

Wasserkraft I / Session C2

*Buoyant Energy „Light“ – Thermodynamische Analyse  
eines schwimmenden hydropneumatischen  
Energiespeichers*

*Bernd Steidl, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau*

### 1. Buoyant (=schwimmend, lebhaft) Energy Speicher

- *BE „schwer“ (BEQs) vs. BE „Leicht“ (BEL)*
- *Speicherkapazität BE-Konzept*

### 2. Hydropneumatischer BEL-Energiespeicher

- *Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität*
- *Textilmaterialien als Hüllkonstruktion*

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

### 1. Buoyant (=schwimmend, lebhaft) Energy Speicher

- *BE „schwer“ (BEQs) vs. BE „Leicht“ (BEL)*
- *Speicherkapazität BE-Konzept*

### 2. Hydropneumatischer BEL-Energiespeicher

- *Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität*
- *Textilmaterialien als Hüllkonstruktion*

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

### 1. Buoyant (=schwimmend, lebhaft) Energy Speicher

- *BE „schwer“ (BEQs) vs. BE „Leicht“ (BEL)*
- *Speicherkapazität BE-Konzept*

### 2. Hydropneumatischer BEL-Energiespeicher

- *Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität*
- *Textilmaterialien als Hüllkonstruktion*

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

„Buoyant Energy Quarters“ (kurz: BEQs, österreichisch: *schwimmende Energiegrätzel*)

Energieproduktion



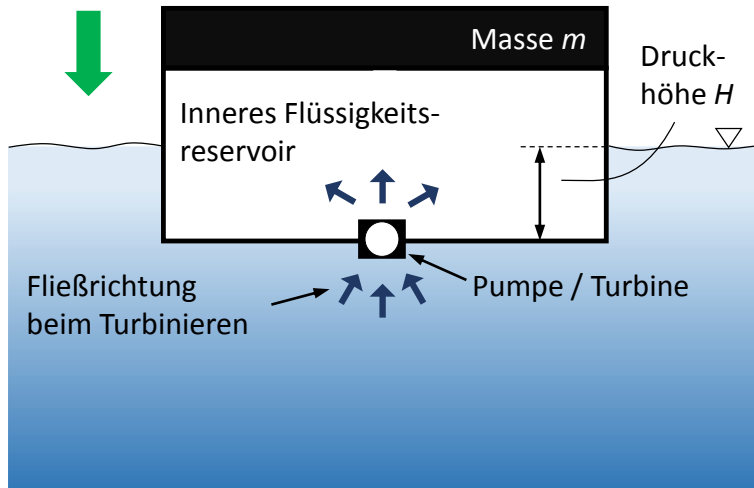
geladen

Energiespeicherung

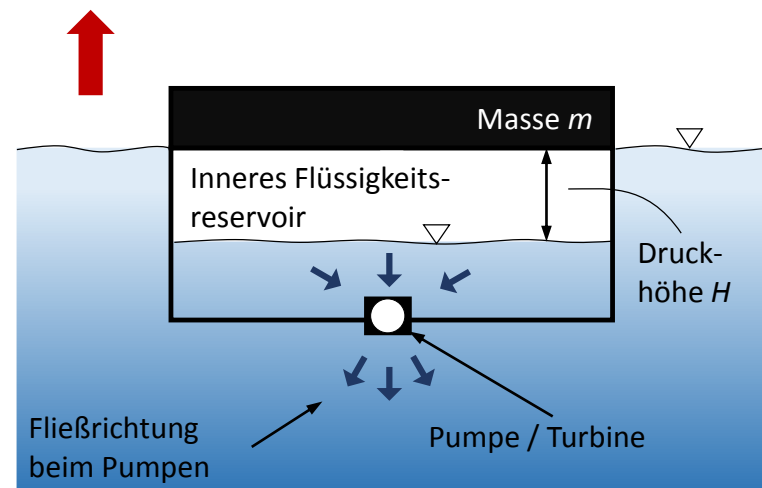


entladen

Plattform senkt sich



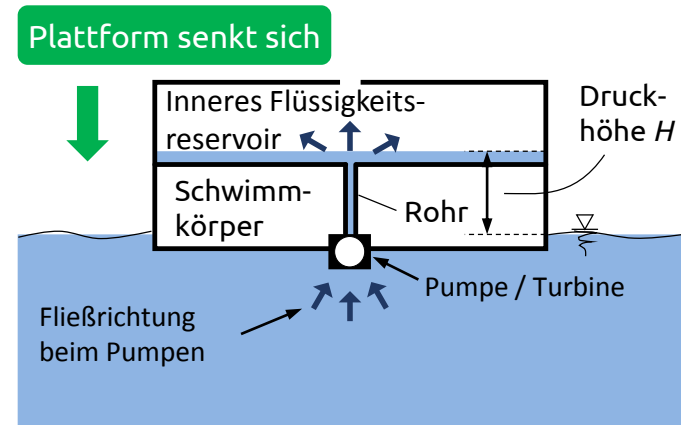
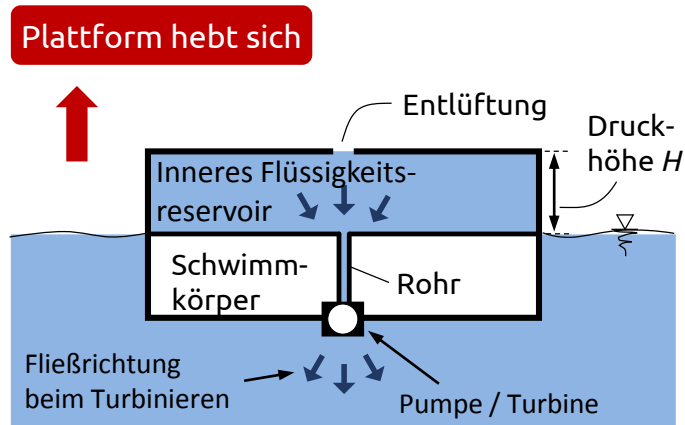
Plattform hebt sich



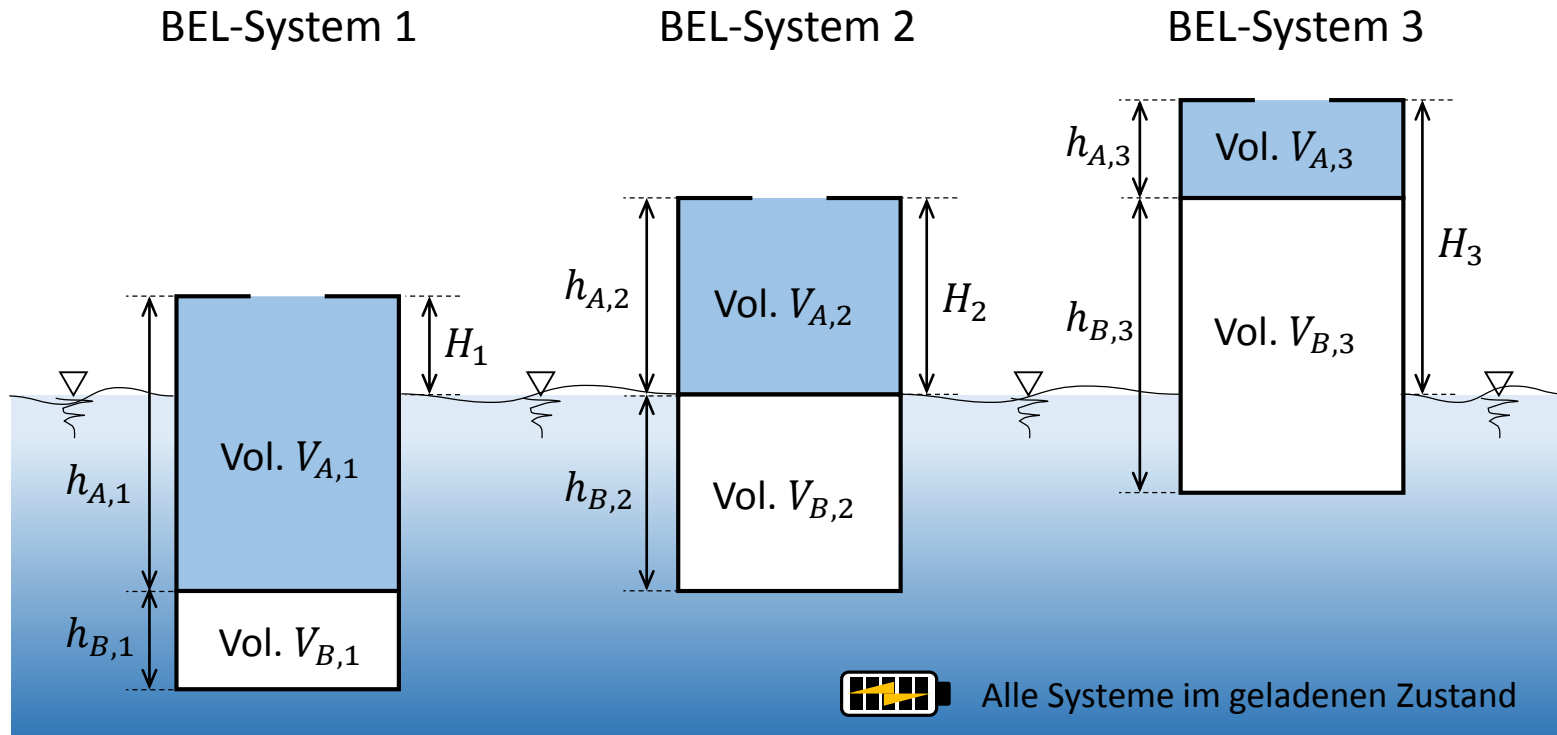
Energieproduktion



Energiespeicherung



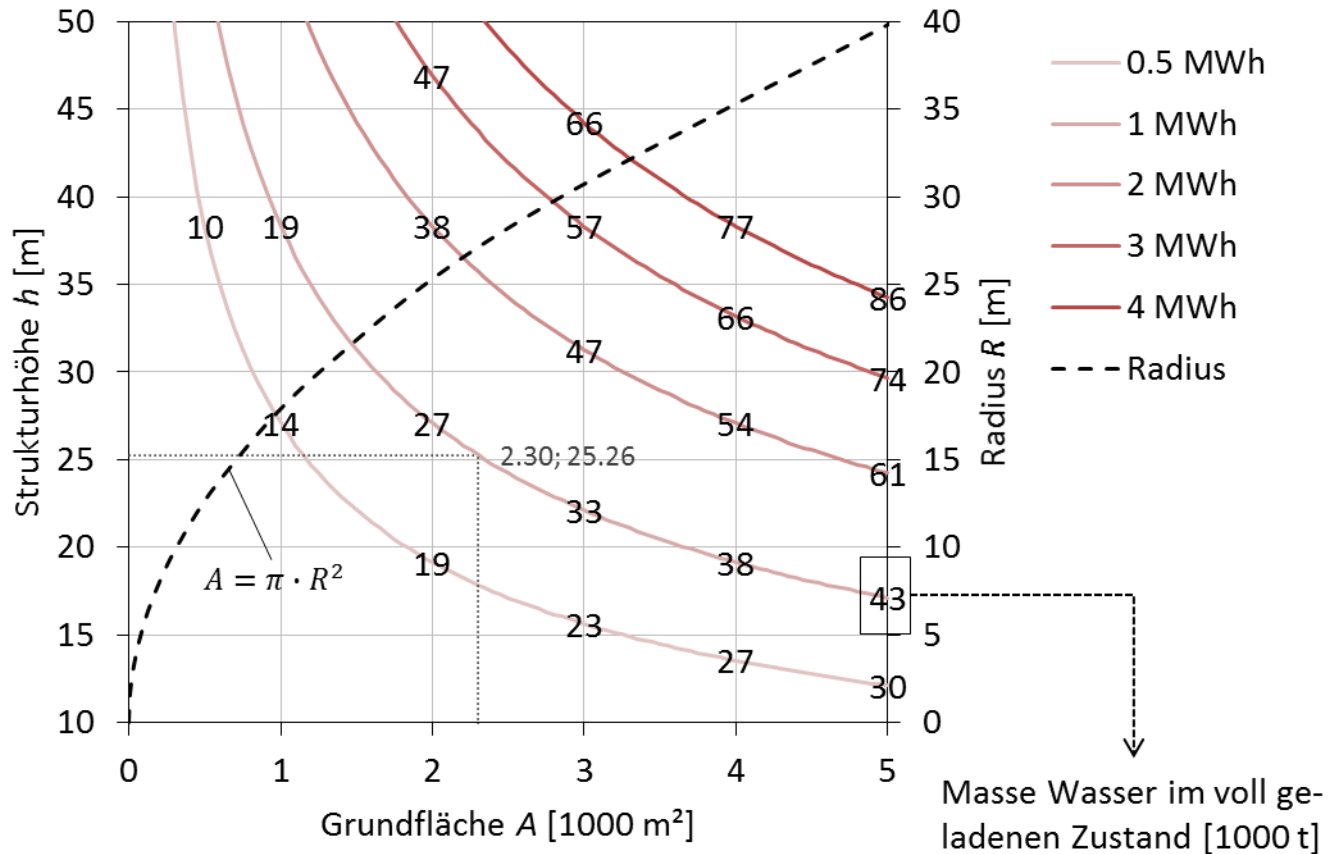
### Ideale Speicherkapazität



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

$$h_A = h_B = h / 2 = H$$

### Ideale Speicherkapazität





### 1. Buoyant (=schwimmend, lebhaft) Energy Speicher

- *BE „schwer“ (BEQs) vs. BE „Leicht“ (BEL)*
- *Speicherkapazität BE-Konzept*

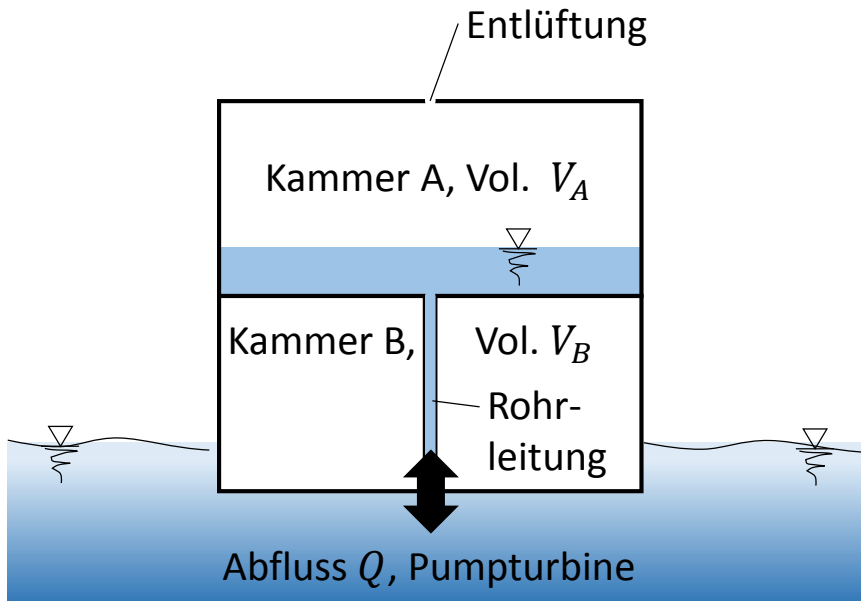
### 2. Hydropneumatischer BEL-Energiespeicher

- *Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität*
- *Textilmaterialien als Hüllkonstruktion*

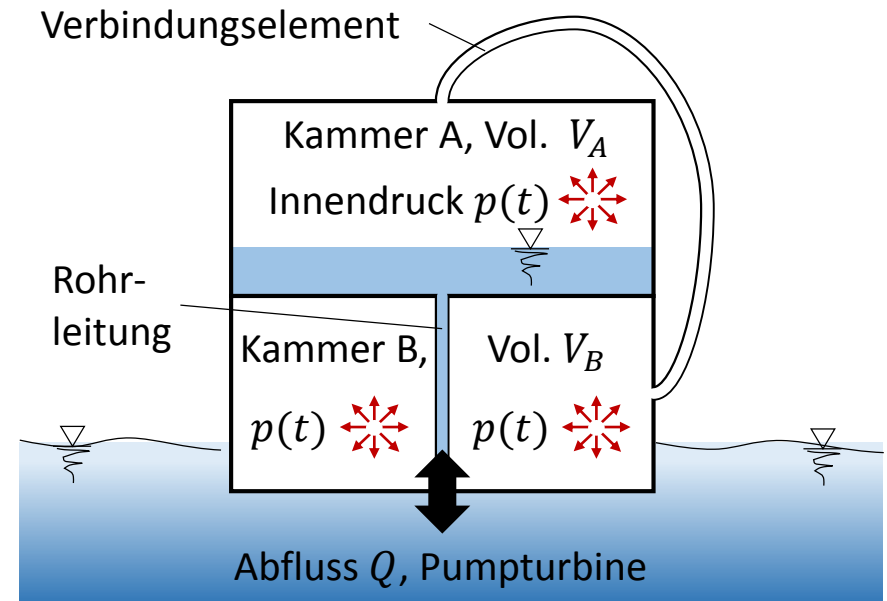
### 3. Zusammenfassung und Ausblick

### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

#### Grundsätzliches BEL-Konzept



#### BEL-Hydropneumatisch

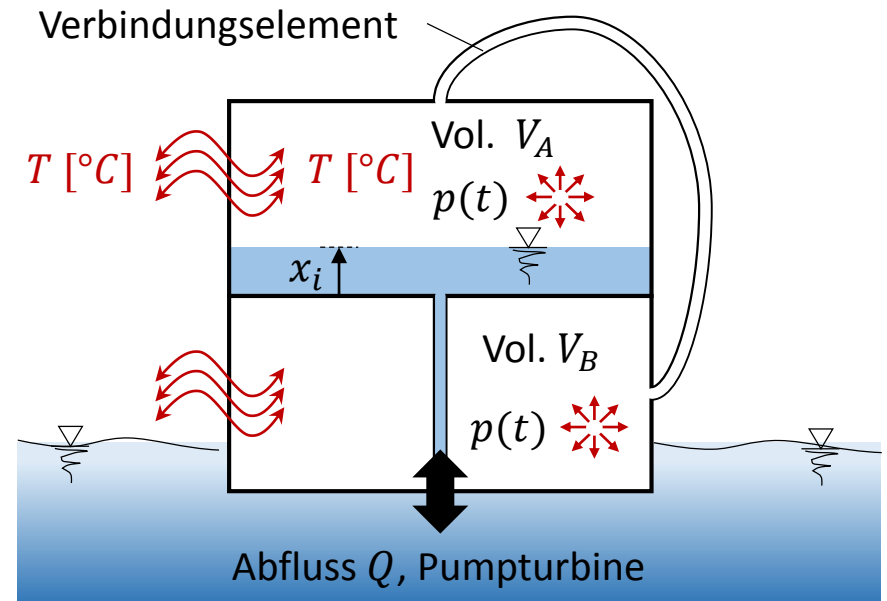


- Thermodynamische Extrembetrachtung
  - **Isotherme** und **Adiabate** Zustandsänderung.

### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Isotherme Zustandsänderung:  $pV = nRT = \text{const.}$

- Sehr langsamer Lade- und Entladevorgang.
- Idealer Wärmeaustausch mit der Umgebung.
- $T [^{\circ}\text{C}] = \text{const.}$



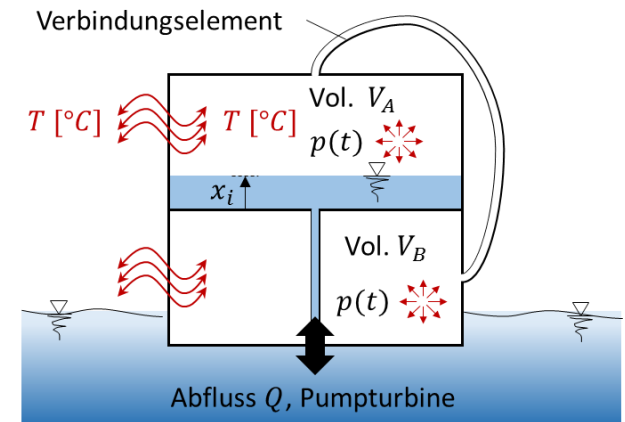
### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Isotherme Zustandsänderung:  $pV = nRT = \text{const.}$

- Annahmen:

$$H = h/2 = \text{const.} \quad | \quad Q = \text{const.}$$

$$V_A = V_B \quad | \quad Q \cdot t = V_A \quad | \quad x_i \cdot A_i = t \cdot Q$$



### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Isotherme Zustandsänderung:  $pV = nRT = \text{const.}$

- Annahmen:

$$H = h/2 = \text{const.} \quad | \quad Q = \text{const.}$$

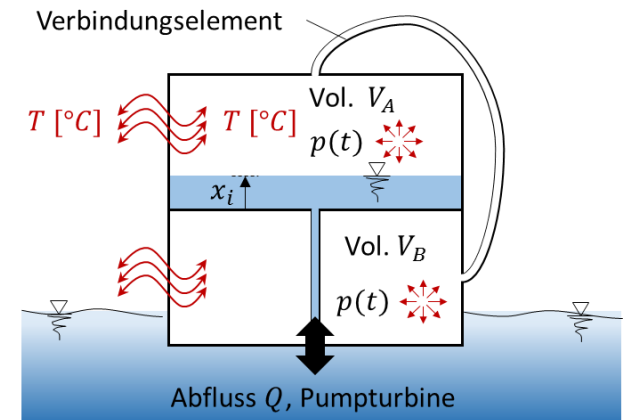
$$V_A = V_B \quad | \quad Q \cdot t = V_A \quad | \quad x_i \cdot A_i = t \cdot Q$$

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

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

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

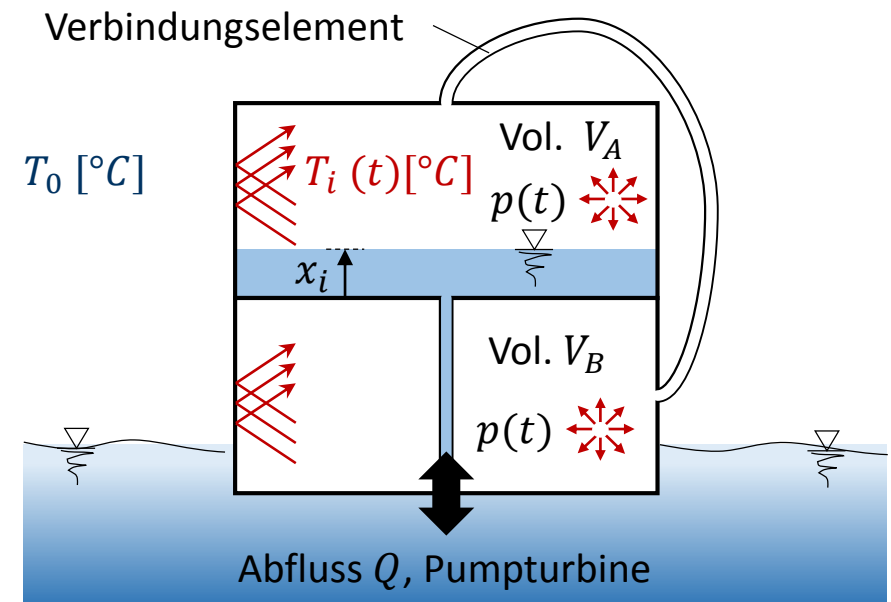
**Arbeit**  $W_{iso}(t) = \int_0^t P_{iso}(t) dt = \rho_w \cdot g \cdot t \cdot Q \cdot H + p_{pre} (V_A + V_B) \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B}} \right) - t \cdot Q \cdot p_0$



### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Adiabate Zustandsänderung:  $pV/(nT) = \text{const.}$

- Ideale Isolation der äußeren Hülle.
- Kein Wärmeaustausch mit der Umgebung.



### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Adiabate Zustandsänderung:  $pV/T = \text{const.}$

- Annahmen:

$$H = h/2 = \text{const.} \quad | \quad Q = \text{const.}$$

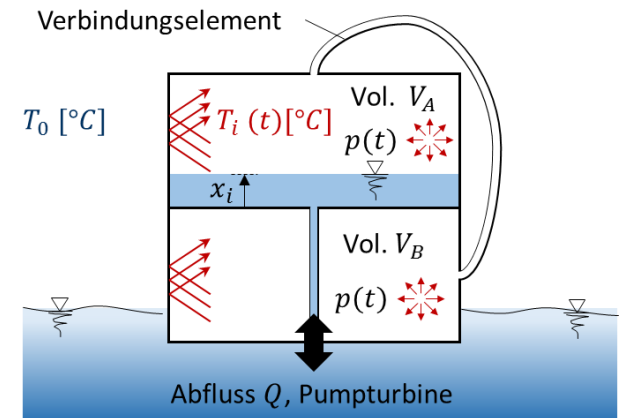
$$V_A = V_B \quad | \quad Q \cdot t = V_A \quad | \quad x_i \cdot A_i = t \cdot Q$$

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

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

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

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



**Adiabatenkoeffizient**  
 $k = c_p / c_V$

### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

Adiabate Zustandsänderung:  $pV/T = \text{const.}$

- Annahmen:

$$H = h/2 = \text{const.} \quad | \quad Q = \text{const.}$$

$$V_A = V_B \quad | \quad Q \cdot t = V_A \quad | \quad x_i \cdot A_i = t \cdot Q$$

Temperatur

$$p_{adi}(t) = p_{pre} \left( 1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B} \right)^{-\kappa} \quad | \quad T(t) = T_{pre} \left( 1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B} \right)^{1-\kappa}$$

Innendruck

Druckhöhe

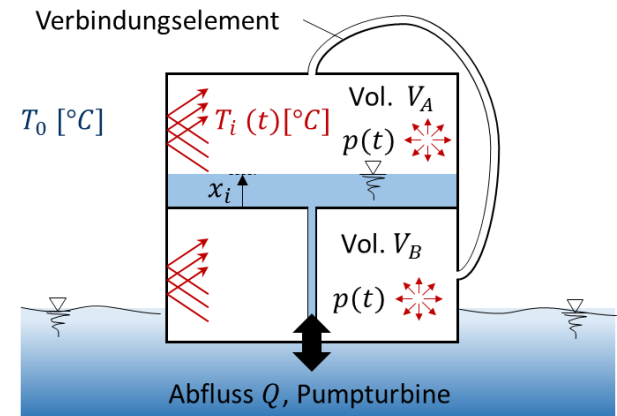
$$H_{PT,adi}(t) = H + \frac{1}{\rho_w \cdot g} \cdot \left[ p_{pre} \cdot \left( 1 - \frac{t \cdot Q}{V_A + V_B} \right)^{-\kappa} - p_0 \right]$$

Leistung

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

Arbeit

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



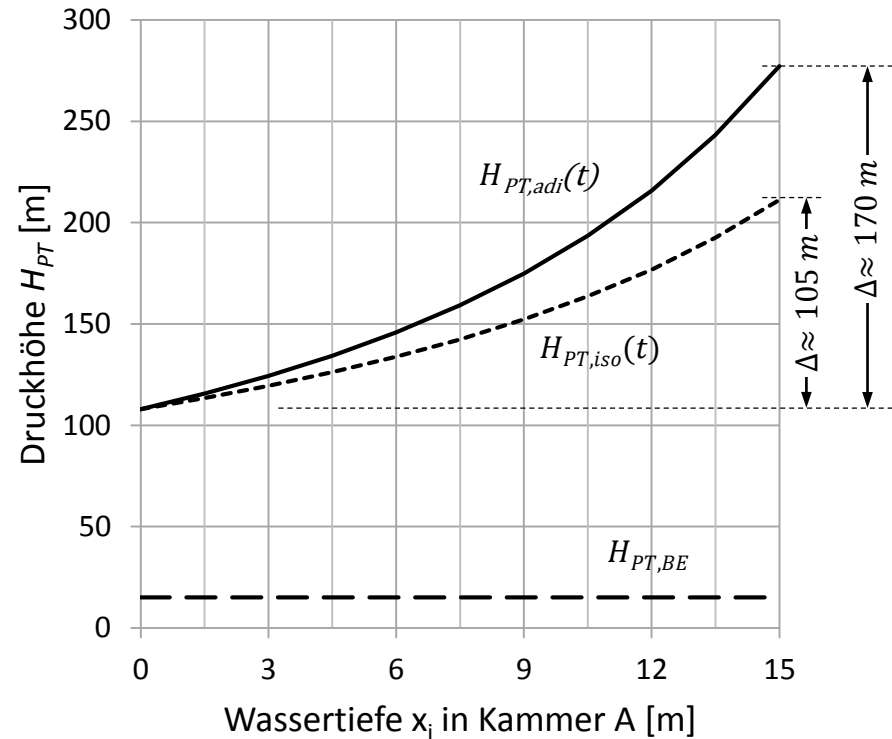
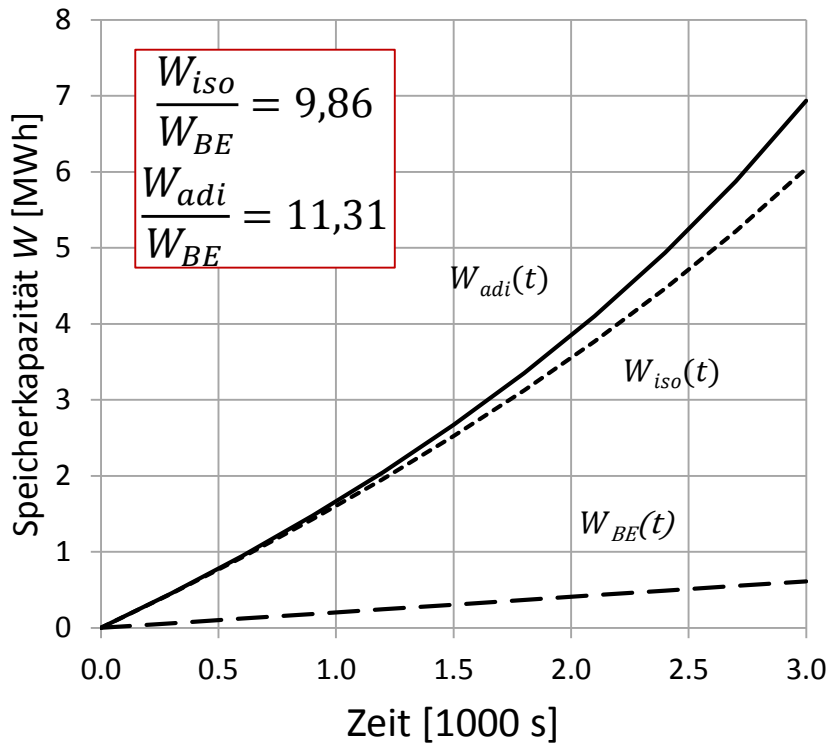
Adiabatenkoeffizient  
 $k = c_p/c_V$



### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

#### Ergebnis eines exemplarischen Hydropneumatischen BEL-Speichers

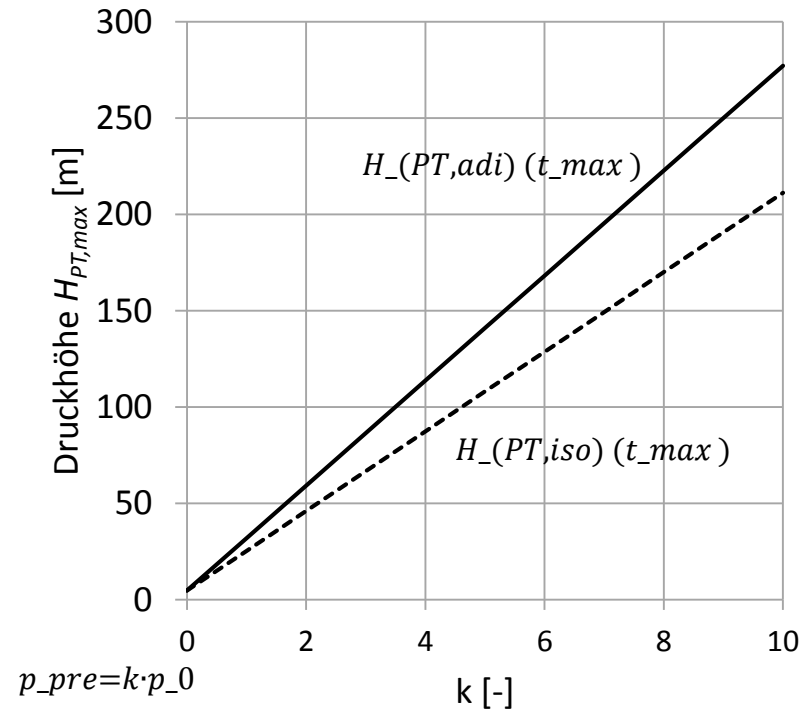
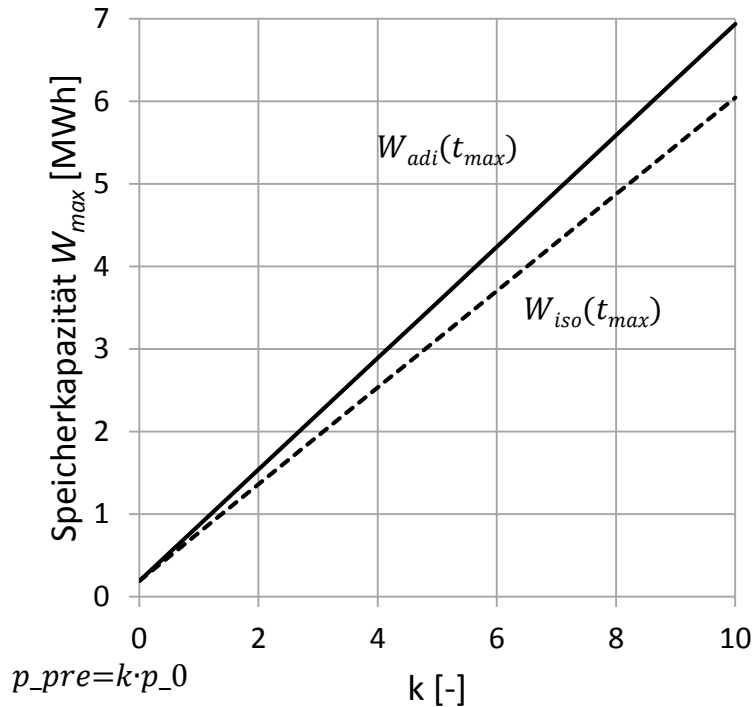
$h = 30 \text{ m}$     $A = 1000 \text{ m}^2$     $V = 30000 \text{ m}^3$     $p_{start} = 10,13 \text{ bar}$     $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$     $t_{max} = 3000 \text{ s}$     $k = 1,4$



## Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

### Ergebnis eines exemplarischen Hydropneumatischen BEL-Speichers

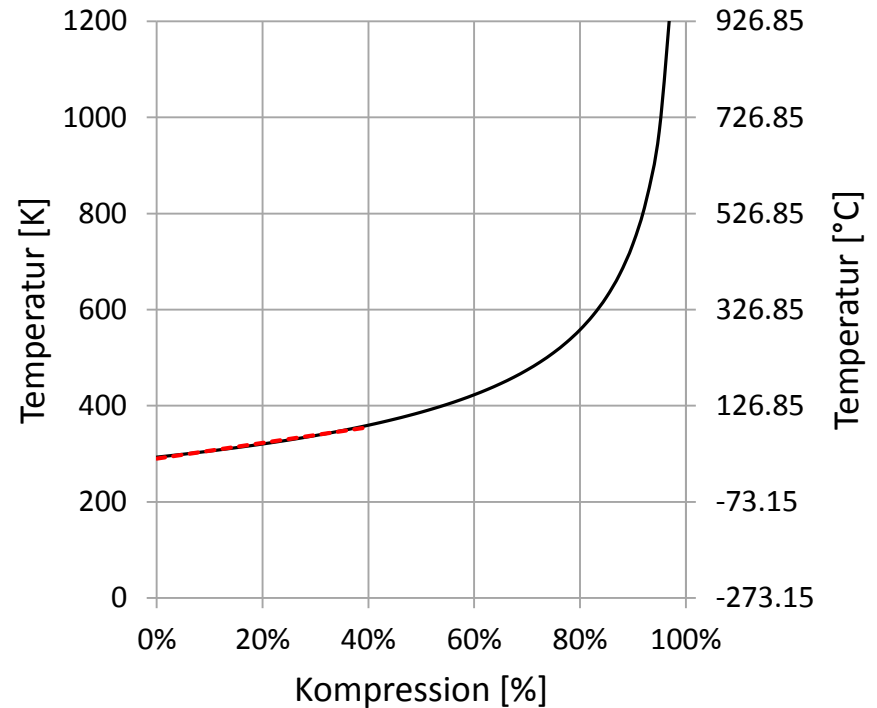
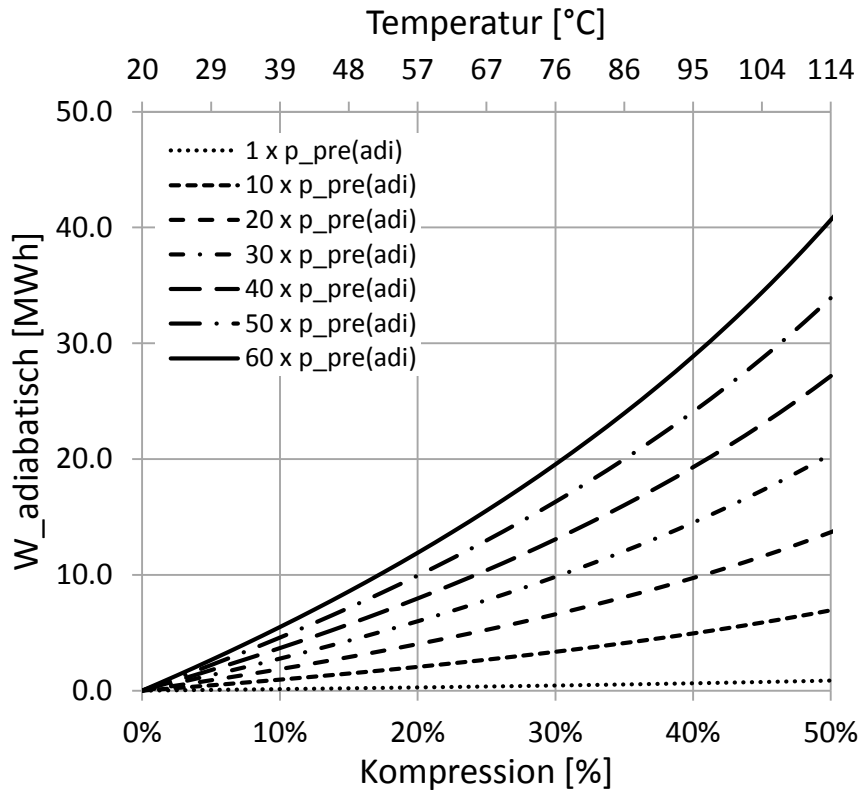
$$h = 30 \text{ m} \quad A = 1000 \text{ m}^2 \quad V = 30000 \text{ m}^3 \quad p_{start} = 10,13 \text{ bar} \quad Q = 5 \text{ m}^3/\text{s} \quad t_{max} = 3000 \text{ s} \quad k = 1,4$$



### Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität

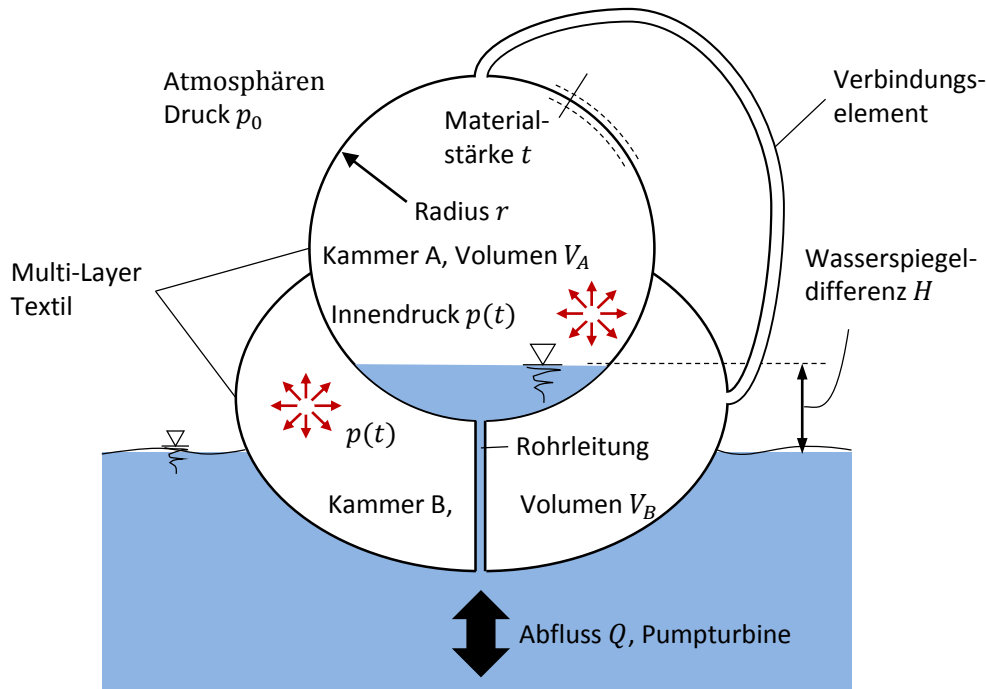
#### Ergebnis eines exemplarischen Hydropneumatischen BEL-Speichers

$h = 30 \text{ m}$     $A = 1000 \text{ m}^2$     $V = 30000 \text{ m}^3$     $p_{start} = 10,13 \text{ bar}$     $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$     $t_{max} = 3000 \text{ s}$     $k = 1,4$



### Textilmaterial als Hüllkonstruktion

#### Mögliche Ausführungsvariante



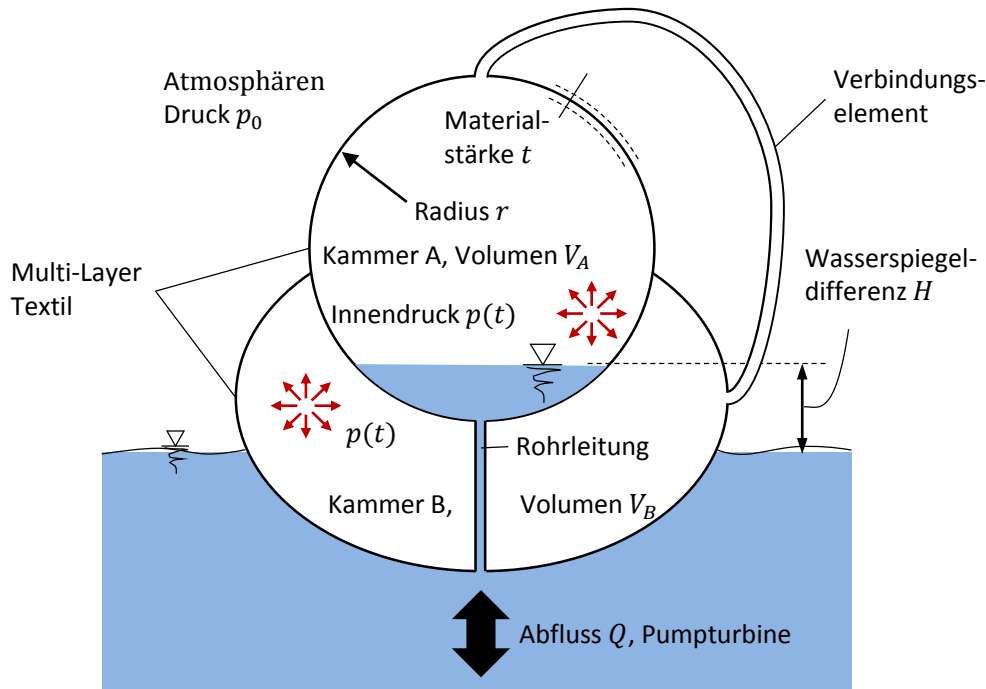
#### Vorteile

- Geringes Gewicht
- Leicht transportierbar
- Flexible Konstruktion (Wellenangriff)
- Multi-Layer-Textilen
- Ausführung als langgezogener Schlauch



## Textilmaterial als Hüllkonstruktion

### Mögliche Ausführungsvariante



### Anforderungen

- Hohe Belastbarkeit gegen äußere Einwirkungen.
- Hohe Dauerhaftigkeit
- Biologisch inert
- Luft- und Wasserdicht

| Material    | Längszugfestigkeit | Einheit |
|-------------|--------------------|---------|
| Vectran™ HT | 3,2                | GPa     |
| Glasfaser   | ~3,4               | GPa     |
| Carbonfaser | ~4,1               | GPa     |

### 1. Buoyant (=schwimmend, lebhaft) Energy Speicher

- *BE „schwer“ (BEQs) vs. BE „Leicht“ (BEL)*
- *Speicherkapazität BE-Konzept*

### 2. Hydropneumatischer BEL-Energiespeicher

- *Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität*
- *Textilmaterialien als Hüllkonstruktion*

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

- Deutliche Steigerung der Speicherkapazität durch Kombination des BEL-Systems mit Druckluft.
- Infolge der Luftkompression kommt es zu einer stark variierenden Druckhöhenänderung während dem Lade- und Entladezyklus.
- Geringes Gewicht, leichter Transport und Produktion in Österreich durch die Verwendung von Textil.
- Modulare Bauweise möglich.
- Pumpspeicher Know-how-Transfer in die Welt.

**FFG Sondierung Nr. 853662**  
**„Prepare BE“**

**Partner**

- IET TU-Wien
- UEDIN


**K-Regio (F&E)**  
**„BEQs“**

**Partner**

- Geppert, flussplan, UEDIN
- expArch (UIBK), Najjar & Najjar, ma.lo Architects


**Energieforschung**  
**5. Ausschreibung**  
**Sondierung BEL**

**Mögl. Partner**

- Materialtechn.
- IET TU-Wien
- Textile Competence Center Vorarlberg




**EXPO 2017**  
**Modellpräsentation**

**Partner**

- Najjar & Najjar Architects



**Energieforschung**  
**4. Ausschreibung (F&E)**  
**„BuoyantCity\_EStorage“**

**Partner**

- Geppert, IET TU-Wien, UEDIN
- expArch (UIBK), Najjar & Najjar, ma.lo Architects


**Patenterteilung**

- EU-Patent EP 2681445 B1
- US-Patent US 9617969 B2