

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

06/04/2014

**Projekttitlel:**

**Sublake Electrical Energy Storage (SEES)**

Projektnummer: 834566

Ausschreibung	5. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/03/2012
Projektende	31/08/2013
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	18 Monate
Projektnehmer (Institution)	Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien
Ansprechpartner	Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider
Postadresse	Getreidemarkt 9, 1060 Wien
Telefon	+43/1/58801302301
Fax	
E-mail	Markus.haider@tuwien.ac.at
Website	<a href="http://www.iet.tuwien.ac.at/">http://www.iet.tuwien.ac.at/</a>

## Projekttitle (

# Sublake Electrical Energy Storage (SEES)

### Autoren:

**Markus Haider (TU Wien)**  
**Karl Schwaiger (TU Wien)**  
**Martin Hämmerle (TU Wien)**  
**Pouya Ghaffari (TU Wien)**  
**Roland Eisl (ENRAG)**  
**Karl Schenzl (ENRAG)**  
**Alexander Schuster (STRABAG)**  
**Mario Bachhiesl (ÖBF)**

## 1 Inhaltsverzeichnis

**Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!**

1	Inhaltsverzeichnis .....	3
2	Einleitung .....	4
•	AP Nr. 1 Projektmanagement.....	4
•	AP Nr. 2 SANDTES-Wärmespeicher.....	4
•	AP Nr. 3 Unterwasser-Luftbehälter.....	4
•	AP Nr. 4 Gesamtanlagenkonzept: Integration von Turbosatz, Wärmespeicher und Luftspeicher .....	4
•	AP Nr. 5 Umweltverträglichkeit und.....	4
•	AP Nr. 6. Behörden-Engineering.....	4
•	AP Nr. 7 Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	4
3	Inhaltliche Darstellung.....	5
3.1.1	Ausgangssituation/Motivation des Projektes .....	5
3.1.2	Zielsetzungen des Projektes .....	5
3.1.3	Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik .....	5
	Arbeitspaket Nr. 1: Projektmanagement.....	5
	Arbeitspaket Nr. 2: SANDTES-Wärmespeicher.....	6
	AP2 Düsenboden .....	6
	AP2 Langzeitversuche zur Untersuchung von Verschmutzungstendenzen.....	7
	AP2 Versuche zur Wirbelschichtstabilisierung bei Betthöhendifferenzen .....	8
	AP2 Generalprobe .....	9
	Arbeitspaket Nr. 3: Unterwasser-Luftbehälter.....	12
	Arbeitspaket Nr. 4: Gesamtanlagenkonzept:	
	Arbeitspaket Nr. 5: Umweltverträglichkeit.....	15
	Arbeitspaket Nr. 6: Behörden-Engineering .....	17
	Arbeitspaket Nr. 7: Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	17
3.1.4	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine.....	18
3.1.5	Beschreibung der „Highlights“ des Projektes .....	25
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	25
	Nächste Schritte:.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
5	Ausblick und Empfehlungen.....	26
6	Literaturverzeichnis .....	27
7	Anhang .....	27
8	Kontaktdaten.....	27

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 10 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung

Die Abkürzung „SEES“ (Sublake Electrical Energy Storage) steht für eine neue Form von adiabater Druckluft-Speicherung zur Speicherung von elektrischer Energie. Die adiabate Druckluftspeicherung verspricht Stromspeicherung bei Wirkungsgraden in der Größenordnung von 70%. Ein flexibler, isobar betriebener Druckluft-Speicher wird am Grund eines genügend tiefen Sees positioniert. Als Wärmespeicher kommt das von den Projektpartnern patentierte SAND-Wärmespeichersystem zum Einsatz. Die Fragestellung war, ob SEES-Anlagen im Kapazitätsbereich 1-20MW<sub>el</sub> in Österreich realisierbar, zu genehmigen und wirtschaftlich darstellbar sind.

### Schwerpunkte des Projektes

Projekt-Ziel war die Entwicklung einer Stromspeichertechnologie, die als Ergänzung zu Pumpspeichieranlagen und zu Kavernen-basierten Druckluftspeichieranlagen das Stromspeicherpotential sowohl hinsichtlich Speicher-Leistung als auch -Energie erhöhen kann. Hierzu wurden folgende Detailpunkte bearbeitet:

- Klärung von technischen Detailfragen in der Auslegung von Einzelkomponenten (Turbomaschinen, Wärmespeicher, Rohrleitungen, Positionierung sowie Verankerung und Konzeption flexibler Druckluftspeicher)
- Klärung der Verfügbarkeit kommerziell erhältlicher Turbomaschinen
- Systemauslegung für mindestens eine Leistungsklasse
- Klärung von genehmigungsrechtlichen Fragen
- Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Hauptfrage war, ob SEES-Anlagen im Kapazitätsbereich 1-20MW<sub>el</sub> in Österreich realisierbar, zu genehmigen und wirtschaftlich darstellbar sind.

### Verwendete Methoden

Folgende Arbeitspakete wurden definiert:

- AP Nr. 1 Projektmanagement
- AP Nr. 2 SANDTES-Wärmespeicher
- AP Nr. 3 Unterwasser-Luftbehälter
- AP Nr. 4 Gesamtanlagenkonzept: Integration von Turbosatz, Wärmespeicher und Luftspeicher
- AP Nr. 5 Umweltverträglichkeit und
- AP Nr. 6. Behörden-Engineering
- AP Nr. 7 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Projektverlauf stellte sich nach einigen Monaten Projektlaufzeit heraus, dass im Design des Sand-Wärmespeichers einerseits noch einige grundlegende technische Fragen geklärt werden mussten, und das andererseits das Projektbudget für die Finanzierung einer heißen Pilotanlage bei Weitem nicht ausreichte. Aus diesem Grund wurde die Entscheidung getroffen, anstatt einer großen, heiß-gehenden Pilotanlage viele kleinere Kalt-Versuchsreihen im Labormaßstab durchzuführen und einige Fragen zum Heiß-Betrieb in einer kostengünstigeren Anlage ohne Feststoff-Transport zu klären.

Es wurde um eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate angesucht, und diese Verlängerung wurde seitens der FFG auch bewilligt. Gleichzeitig gelang es im Rahmen des COMET Projektes „GSG“ und des KliEN-Projektes „ScAcaes“ eine Weiterführung der Arbeiten zum Projekt SEES zu finanzieren. Die Validierung des Wärmespeichers für großtechnische Anwendungen ist somit sichergestellt.

## 3 Inhaltliche Darstellung

### 3.1.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Solange der schwankende Anteil aus erneuerbaren Energiesystemen in das elektrische Netz unter 15% bis 20% bleibt, kann dies vom derzeitig installierten Netz kompensiert werden. In Ländern in denen jeweils größere Kapazitäten an Wind- und Photovoltaik-Anlagen installiert sind, wird dieser Anteil bereits zeitweise überschritten. Energiespeichertechnologien werden daher in naher Zukunft steigende Bedeutung haben. In Anbetracht der in der EU verfügbaren Speicherkapazität von nur 5% der derzeitig installierten Energieversorgungsleistung, besteht ein großer Bedarf an neuen Speicherkapazitäten und Speichertechnologien.

### 3.1.2 Zielsetzungen des Projektes

Projekt-Ziel war die Entwicklung einer Stromspeichertechnologie, die als Ergänzung zu Pumpspeichieranlagen das Stromspeicherpotential sowohl hinsichtlich Speicher-Leistung als auch -Energie erhöhen kann. Gesucht wurde eine wirtschaftliche und ressourceneffiziente Lösung, die unter Minimierung des Eingriffs in das umgebende Ökosystem volle Funktionstauglichkeit uneingeschränkt gewährleistet.

### 3.1.3 Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik

#### Arbeitspaket Nr. 1: Projektmanagement

Das Projekt SEES wurde intensiv koordiniert. Es gab wöchentliche Fortschritts-Meetings am Institut für Energietechnik und Thermodynamik. In diese Meetings war die Firma ENRAG in ziemlich regelmäßigen mehrwöchigen Intervallen eingebunden. Die Firmenpartner Bundesforste und SET waren zu Beginn nur in den Konsortialmeetings eingebunden. In der zweiten Projekthälfte brachte sich die Firma Strabag Energietechnik sehr gewinnbringend im Bereich Kosten-Kalkulation ein. Nur durch die sehr effiziente Mitarbeit der Firma Strabag war es letztendlich möglich, für alle relevanten Anlagenkomponenten Kostenangebote einzuholen, bzw. Eigenkonstruktionen wie z.B. den Sand-Wärmetauscher die Kosten in einer industriell erprobten und dem Markt entsprechenden Weise zu kalkulieren. Der Projekt-Beitrag der

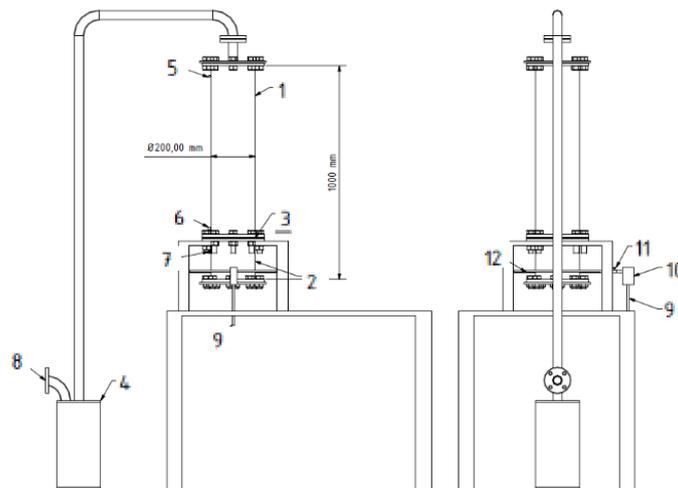
Firma Bundesforste ergab sich vor allem im Bereich Behörden-Engineering und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

## Arbeitspaket Nr. 2: SANDTES-Wärmespeicher

Das sandTES-Prinzip ist ein aktives Wärmespeicherkonzept (d.h.: das Wärmespeichermedium Sand wird durch den Wärmetauscher bewegt). Da großtechnische Energiespeicherkonzepte zurzeit mit einer höheren Flexibilisierung der bestehenden Kraftwerksinfrastruktur konkurrieren, ist es für Energiespeicherkonzepte im Industriellen Maßstab generell gesehen umso wichtiger diese so effizient wie möglich zu gestalten, sowohl unter physikalisch-technischen als auch oder wahrscheinlich sogar noch viel mehr unter wirtschaftlich-ökonomischen Aspekten. Der „competitive advantage“ des sandTES-Konzepts liegt in der Verwendung eines günstigen Wärmespeichermediums Sand, das nebenbei ein weltweit leicht verfügbares Naturprodukt ist. Bei großtechnischen Energiespeichern ist das Speichermaterial für die Hauptkosten verantwortlich. Der Nachteil ist, dass der Sand fluidisiert werden muss, um ihn durch den Wärmetauscher zu transportieren. Aber dies ist mit vertretbarem Aufwand möglich. Andere Wärmespeichermaterialien (wie z.B. Flüssigsalz oder Thermo-Öl) können zwar mit einem geringfügig kleineren Aufwand in einem aktiven Konzept verwendet werden, aber deren Kosten sind um ein vielfaches höher als von Sand. Die Entwicklung erfolgte auf drei parallelen Schienen: 1.) Entwicklung eines selbststabilisierenden Düsenbodenkonzepts, 2.) Verbesserung der Sandströmung durch den Wärmetauscher und 3.) Untersuchung des Wärmeübergangs einer feinen Partikelsuspension

### AP2 Düsenboden

Wie bereits erwähnt, bedarf das aktive Wärmespeicherkonzept des sandTES-Wärmetauschers entsprechender Investitionen in der Anschaffung und im Betrieb der Anlage. Die nötige Fluidisierung des Wärmespeichermediums durch Druckluft bedeutet den Einsatz einer kostenintensiven Ressource. Von Beginn an war es deshalb ein grundlegendes Ziel, die nötige Fluidisierungs-Hilfsleistung des sandTES-Konzeptes zu minimieren und somit Ziel, die Wirbelschicht möglichst nahe am „Minimal-Fluidisierungspunkt“ zu betreiben. Die Herausforderung eine Wirbelschicht in der Nähe des Fluidisierungspunktes zu betreiben, besteht darin eine stabile und homogene Fluidisierung bei minimalem Druckluftaufwand zu gewährleisten. Neben den Eigenschaften des Speichermediums und eventuellen Einbauten im Bettbereich, hat der Düsenboden den größten Einfluss auf die Stabilität und die Homogenität einer Wirbelschicht. Der Düsenboden wird von der Fluidisierungsluft durchströmt. Er hat den Zweck die Fluidisierungsluft gleichmäßig über die Bettquerschnittsfläche zu verteilen. Der dabei auftretende Druckverlust gewährleistet die Stabilität der Fluidisierung über die Bettquerschnittsfläche und kann nicht beliebig reduziert werden. Im Hinblick auf die gezielte Minimierung des Druckluftaufwandes, muss deshalb eine geeignete Bauweise nach Anwendungsfall experimentell gefunden werden. Zu diesem Zweck wurde ein Versuchsstand entworfen und gebaut (Abb. 2.1).



**Abb. 3.1: Planungsskizze des Düsenboden-Versuchsstandes.** 1. Wirbelschicht, 2. Windbox, 3. Düsenboden, 4. Wasserfilter, 5,6,7. Druckmessstutzen, 8. Saugstutzen, 9. Luftzufuhr, 10. Volumenstromsensor, 11. Ventil, 12. Luftzufuhr-Ringleitung

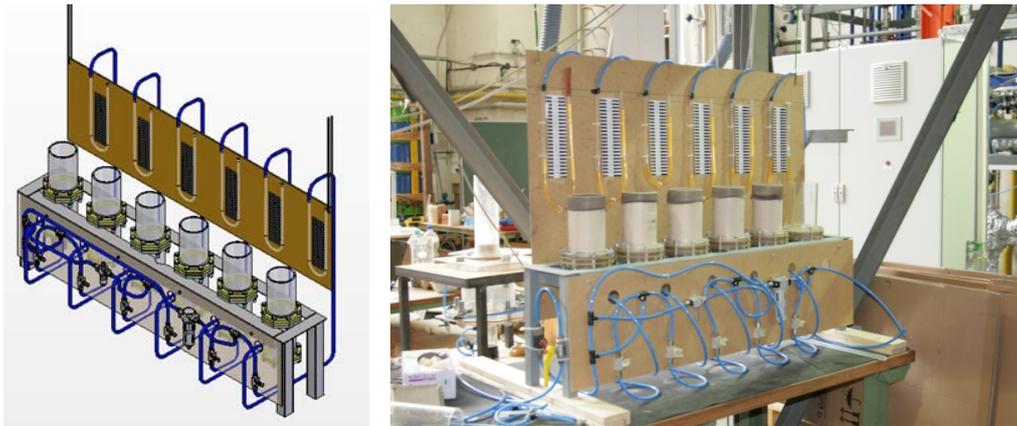
Messtechnik Zur Messung des Fluidisierungsluft-Volumenstroms, wurde ein SFAB-Sensor der Firma FESTO verwendet. Der Druckabfall der verschiedenen Gasverteilerplatten sowie der Bettdruckverlust wurden über HONEYWELL-Differenzdrucksensoren und über U-Rohr-Manometer gemessen und aufgenommen.

### AP2 Langzeitversuche zur Untersuchung von Verschmutzungstendenzen

Nachdem die Eigenschaften poröser Sintermetallplatten als Gasverteiler experimentell bestätigt werden konnten, stellte sich noch die Frage der Einsatzfähigkeit bei längerer Betriebszeit.

Durch wechselnde Betriebszustände von Festbett zu Wirbelschicht, sind Verstopfungstendenzen der Sinterplatten nicht auszuschließen. Auch Verunreinigungen über die Luftleitungen können zum Verstopfen der Sintermetallplatten führen, so sind zum Beispiel Lager-Öl der Druckluftkompressoren oder Staub aus der Umgebung mögliche Verschmutzungsursachen.

Der Düsenboden gewährleistet die Fluidisierung und damit die Fließfähigkeit des Speichermaterials. Verstopfte Gasverteilerplatten würden damit das aktive Konzept des sandTES-Gegenstromwärmetauschers verhindern und müssten zwangsweise ausgewechselt werden. Der ökonomische Nachteil der durch diese Instandhaltungsarbeiten entstehen würde, ist nicht akzeptabel und muss daher von vornherein ausgeschlossen werden können. Um die Verlässlichkeit der Sinterplatten als Gasverteiler über längere Laufzeit zu prüfen, wurde ein weiterer Versuchsstand konzipiert und gebaut (Abb. 3.2)



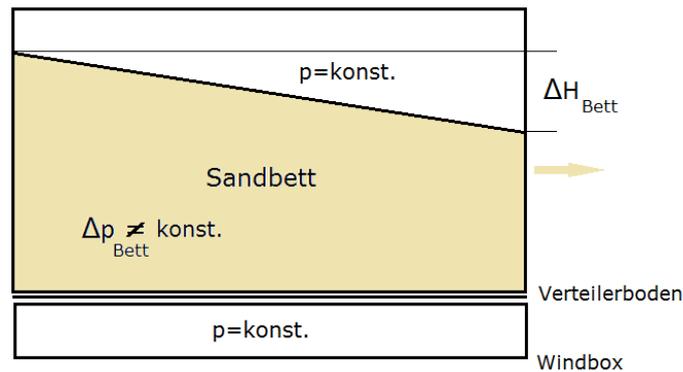
**Abb. 3.2: Visualisierung und Umsetzung des Langzeitversuchs im Labor**

Untersucht wurden Sinterplatten mit  $20\mu\text{m}$  und  $40\mu\text{m}$  Porengröße. Über den aufgezeichneten Druckverlust der Sinterproben während der Versuchslaufzeit wurde auf die Verunreinigung bzw. auf die Verstopfungstendenz zurückgeschlossen. Drei unterschiedliche Fluidisierungsluftvarianten wurden getestet: 1.) unaufbereitete Fluidisierungsluft aus der staubbeladenen Laborumgebung, 2.) gefilterte Fluidisierungsluft mit einer Filtereinheit von  $1\mu\text{m}$ , 3.) in den Vorlauf der Fluidisierungsluft geschalteter Öler, 4.)  $20\mu\text{m}$ -Sinter mit Sand und ohne Sand. Um den wechselnden Betriebsfall zu simulieren, wurde der Versuchsstand tagsüber von 7 Uhr bis 19 Uhr durchgehend fluidisiert, über die Nacht wurde die Versorgung mit Druckluft zwischen 19 Uhr und 7 Uhr unterbrochen.

Messtechnik Der Volumenstrom wurde wieder über einen SFAB-Sensor der Firma FESTO gemessen und über fixierte Drosseleinstellungen konstant gehalten. Der Druckverlust der einzelnen Gasverteilerplatten konnte über die gesamte Versuchslaufzeit an U-Rohr-Manometern abgelesen werden. In unregelmäßigen Abständen wurden die Proben auch ausgebaut um mit einem Differenzdrucksensor der Firma MERIAM genaue Druckverlust-Kennlinien aufzunehmen.

### AP2 Versuche zur Wirbelschichtstabilisierung bei Bett Höhendifferenzen

Abb.3.3 illustriert die Anforderungen an den Gasverteilerboden über einen Abschnitt des Wärmetauschers. Sowohl der Druck innerhalb einer Windbox, welche die Wirbelschicht mit Druckluft versorgt, als auch der Druck im Bereich oberhalb des fluidisierten Bettes sind konstant. Der Druckverlust durch die Wirbelschicht ist jedoch abhängig vom zurückgelegten Weg der Fluidisierungsluft durch das Schüttgut. Der Bettdruckverlust nimmt damit monoton in Richtung des Wärmetauscher-Austritts ab und ist nicht konstant. Wird der Unterschied des Bettdruckverlustes im gemeinsamen Versorgungsbereich einer Windbox zu groß, verliert die Wirbelschicht an Stabilität und fällt im Bereich des höheren Bettdruckverlustes in sich zusammen, die Fließfähigkeit des Speichermaterials geht verloren. Um das aktive Verhalten des Wärmetauschers gewährleisten zu können, bedarf es eines „selbststabilisierenden Düsenbodens“ welcher den variierenden Bettdruckverlust kompensiert und den Gesamtdruckverlust entlang einer Windbox so konstant wie möglich hält.



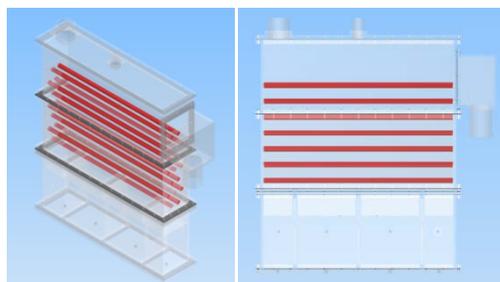
**Abb. 3.3: Anforderungen an den Gasverteilerboden**

Die Funktionsfähigkeit eines solchen selbststabilisierenden Düsenbodens wurde an einem weiteren Versuchsstand getestet. Der Betthöhenunterschied wurde über die unterschiedlichen Füllstände zweier Plexiglas-Zylinder gewährleistet wobei beide Zylinder von einer gemeinsamen Windbox mit Druckluft versorgt wurden. Zusätzlich zum Versuchsstand wurde auch ein MatLAB-Tool entwickelt um die mögliche Betthöhendifferenz bei gleichzeitig stabiler Wirbelschicht abschätzen zu können. Aufbauend auf den Arbeiten am Projekt SEES wurde ein innovatives Konzept entwickelt, welches zum Patent eingereicht wird (April 2014).

## AP2 Generalprobe

In diesem Versuchsstand wurden 90 [cm] der Pilotanlage (Planungstand Februar 2013) als Kaltmodell realisiert. Auch das selbststabilisierende Düsenbodenkonzept wurde hier angewendet. Ziel der Generalprobe ist es, das Fließverhalten eines sandTES-Wärmetauschers zu untersuchen. Der Aufbau (Abb. 3.4) ist flexibel in Form von Baugruppen gestaltet um ein hohes Maß an Parameter Variationen durchführen zu können.

Messtechnik Druckverluste der Düsen, Verteilerböden und des Bettes wurden über U-Rohr-Manometer gemessen. Der Fluidisierungsmassenstrom wurde über Festo-Massenstromgeber gemessen und über eine Drossel geregelt und der Sandmassenstrom wurde über den mit der Zeit differenzierten Gewichtsverlauf der Brückenwaage bestimmt. Die Messprinzipien sind aus Kostengründen sehr einfach gehalten, aber für die durchgeführten Untersuchungen hinreichend genau.



**Abb. 3.4: Visualisierung des Plexiglas-Versuchsstands Generalprobe**

Versuche Der Zusammenbau und vor allem die Durchführung der Versuche erfolgte innerhalb mehrerer Bachelorarbeiten, da vor allem die Rüstzeiten für einen Versuchsaufbau sehr zeitaufwändig sind. Auch

auf Grund der doch groben Messtechnik und begrenzten Fein-Regelbarkeit der Generalprobe, waren mehrere Versuchsläufe per Versuch nötig.

### Maximal freifließender Sandmassenstrom

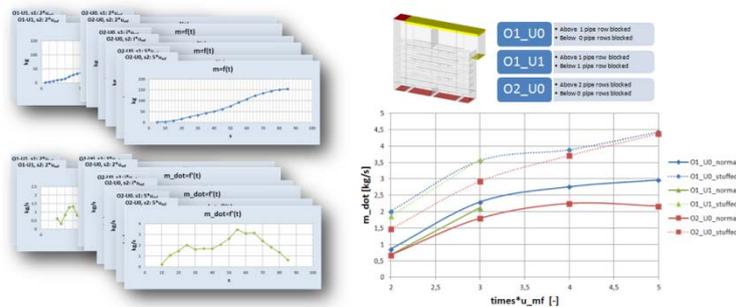
Eine der wichtigsten Fragestellungen ist wie viel Sand frei (ohne zusätzliche Krafteinwirkung) durch den Wärmetauscher fließt. Oder etwas präziser formuliert wie viel Sand durch eine gegebene Wärmetauscher- bzw. Rohrbündelkonfiguration fließt.

Denn für eine effiziente Funktionalität eines Gegenstromwärmetauschers müssen die beiden Wärmekapazitätsströme im Mittel gleich sein. Diese Bedingung definiert nun das Verhältnis der beiden Massenströme, (z.B.: von Sand und von Öl im Hintergrund der Pilotanlage, bzw. sand und Luft in SEES Konzepten), und bei bekannter gewünschter Leistung sind beide Massenströme eindeutig definiert. Damit die beiden Massenflüsse aber auch praktisch realisiert werden können, muss der nötige Platz eingeräumt werden. Dies ist vor allem für die Sandströmung von hoher Bedeutung.

Durch die Vergrößerung der Teilung des Rohrbündels wird auch dem Sand mehr Strömungsquerschnitt zu Verfügung gestellt. Als Haupt-Freiheitsgrad bleibt die Variation der vertikalen Teilung. Im Lauf der Versuchsdurchführung hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Versuche in zwei Teilversuche aufzuteilen:

- „Normal“: der Sandmassenstrom wird so geregelt, sodass die Niveaustufe, die sich vor dem Baffle ausbilden wird, nicht ungemein groß ist
- „Gestopft (stuffed)“: der Sandmassenstrom wird so geregelt, sodass die Niveaustufe maximal ist, also sodass die gesamte verfügbare Höhe ausgenutzt wird.

Nomenklatur: O1: oben, ein baffle zeigt eine Rohrreihe ins Rohrbündel hinein, U0: unten, baffle zeigt null rohrr Reihen ins Rohrbündel hinein:



**Abb. 3.5: Versuchsreihen zum maximal freifließenden Sandmassenstrom**

### Farbversuche

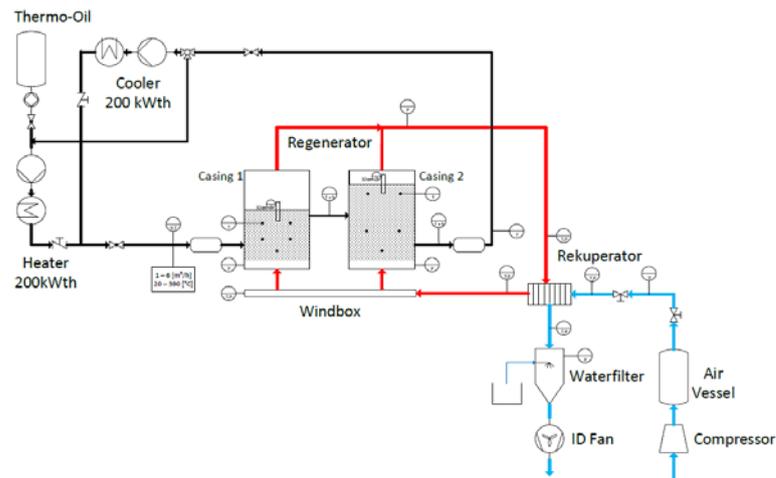
Für einen effizienten Betrieb des Wärmetauschers ist es wichtig, dass jedes Rohr mit der gleichen Leistung beaufschlagt wird. Die Konsequenz davon ist, dass die Sandströmung im Idealfall sich wie ein Pfropfen durch den Wärmetauscher bewegt, also dass das vertikale Strömungsprofil gleichverteilt im Bereich des Rohrbündels ist und darüber und darunter null, um den Bypassseffekt zu vermeiden. Die einzige Möglichkeit die Strömungsverhältnisse mittels einfachster Mittel sichtbar zu machen ist die Verwendung von buntem Sand. Dazu wurde die Generalprobe mit braunem Kontrastsand gefüllt und im Betrieb mit rotem Sand gespeist. Nach Erreichen eines quasistationären Zustandes wurde die Sandzufuhr und Fluidisierung gestoppt und das in der Generalprobe verbleibende Inventar wurde Schicht für Schicht von oben abgetragen. Das primäre Ziel war das Vorhandensein einer Pfropfenströmung experimentell nachzuweisen. Die Schwierigkeit bei Versuchen im Labormaßstab ist immer die Skalierbarkeit und speziell im Fall der Generalprobe die Randeinflüsse.

## AP2 Erste thermische Untersuchungen des Wärmeübergangs am Regenerator

Ein weiterer Schritt zur Erfahrungssammlung im Hinblick auf die Auslegung einer sandTES-Pilotanlage, sowie zur Validierung bisheriger Software-Tools, war die Planung und Ausführung eines bis 380 [°C] beheizten Wirbelschicht-Versuchsstandes als Regenerator.

Der Regenerator besteht aus zwei getrennten Wirbelschichtkammern. In jeder Kammer befindet sich ein Rohrbündel wobei die Rohre dieselben geometrischen Dimensionen und Rohrteilungen aufweisen die in der späteren sandTES-Pilotanlage geplant sind. Im Ladeprozess wird über eine 200kW<sub>th</sub>-Heizungsanlage erhitztes Thermo-Öl (Therminol-VP1) durch das Rohrbündel gepumpt. Der fluidisierte Sand wird dabei von den Rohren erwärmt und die steigenden Sandtemperaturen können über insgesamt 54 vorhandene Messstutzen aufgezeichnet werden.

Wie am bereits vorgestellten Versuchsstand aus Plexiglas, können über die voneinander getrennten Wirbelschicht-Kammern unterschiedliche Betthöhen eingestellt werden. Das Stabilitätsverhalten der Wirbelschicht kann dabei durch Schaugläser und über insgesamt zehn installierte Drucksensoren überwacht werden. Das R&I-Schema in Abb. (2.6) zeigt zusätzlich die geplante Rekuperation der Fluidisierungsluft über einen Luft/Luft-Plattenwärmetauscher/Rekuperator und die Filterung der Abluft wie sie auch später in der sandTES-Pilotanlage zum Einsatz kommen soll.



**Abb.3.6: R&I-Schema des Regenerator-Versuchsstandes. Blau:** Fluidisierungsluft <50°C, **Rot:** Fluidisierungsluft >50°C, **Schwarz:** Thermo-Öl bis 380°C.

Messtechnik Zur Temperaturüberwachung am Regenerator-Versuchsstand kamen Einschraub-Thermoelemente der Firma WIKA vom Typ TC10-C mit mehrteiligem Schutzrohr zum Einsatz. Die Drucksensoren sind ebenfalls von der Firma WIKA. Unter Einsatz von zusätzlichen Wassersackrohren können mit dem verwendeten Typ A-10 auch Drücke bei Mediums-Temperaturen bis zu 400°C gemessen werden.

Insgesamt wurden, wie im R&I-Schema dargestellt, zehn Drucksensoren und 27 Temperatursensoren verbaut um die Fluidisierungsluft, das Thermo-Öl und die Sandbett-Parameter an allen relevanten Stellen mitzuschreiben und zu überwachen.

Die Regelung des Fluidisierungsluft-Volumenstroms kann in Abhängigkeit der Temperatur beliebig Nahe am Minimal-Fluidisierungspunkt eingestellt werden. Das dazu verwendete Regelventil Flowtronic D der Firma ASCO-NUMATICS wurde dafür in das eigens entwickelte LabVIEW-Programm integriert.

Erster Versuch Beim ersten Versuch wurde das Thermo-Öl bei maximalem Ölmassenstrom von ca. 2,5 [kg/sec] und maximaler Heizleistung von 200 [kW<sub>th</sub>] auf 255 [°C] erhitzt und geregelt. Nach Erreichen der vorgegebenen Temperatur, wurden über den Regler Öl-Vorlauf-Temperaturschwankungen vorgegeben um die Trägheit des Regenerators zu prüfen.

Über die gesamte Rohrbündel-Oberfläche je Regenerator-Kammer von ca. 2 [m<sup>2</sup>] kann mit der pro Kammer gemittelten Sand-Temperatur auf einen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  geschlossen werden.



**Abb. 3.7: Umsetzung des Zwei-Kammer-Regenerators im Labor der TU-Wien**

### Arbeitspaket Nr. 3: Unterwasser-Luftbehälter

#### Konzeptentwurf – Hauptanforderungen an den Behälter

Ein Behälter aus flexiblem, biegeelastischem Material erlaubt einen isobaren Entspannungs- und Verdichtungsprozess, wodurch der Wirkungsgrad der Druckluftspeicheranlage erheblich gesteigert wird. Der konstante Betriebsdruck wird dabei hydrostatisch vom Wasser bewerkstelligt und wird in seiner Größe von der Wassertiefe bestimmt, in welcher der Behälter platziert ist. Weiter wirkt aufgrund des großen Dichteunterschiedes zwischen Wasser und Luft eine hohe spezifische Auftriebskraft, gegen die die Konstruktion gesichert werden muss. Ebenso muss der Ballon vollkommen luftdicht gegen das umgebende Wasser gesichert sein.

Festigkeitsberechnung mithilfe analytischer Berechnungsmethoden Die lineare Membrantheorie wurde als Grundlage für qualitative Auslegungsabschätzungen herangezogen. Der große Nachteil dieser Methode besteht darin, dass dabei Dehnungen vollständig vernachlässigt werden und es ebenfalls nicht möglich ist Elemente wie beispielsweise Seile und Verbindungskanäle in die Berechnung mit einzubeziehen.

FE – Simulation Aufgrund der großen Nachteile der analytischen Methode wurden genauere computerunterstützte Berechnungen durchgeführt, sobald Form und Größe des Behälters größtenteils bestimmt waren. Dies wurde mit Hilfe der Finite-Elemente Software „SolidWorks-Simulation“ durchgeführt.

Folie Beim Membranmaterial handelt sich dabei um ein PVC beschichtetes Polyestergewebe der Firma Sattler (Graz), welches derzeit z.B. bei Biogastanks zum Einsatz kommt. Für jenes Material Namens Sattler 631 Polyplan Architecture Type V wird vom Hersteller eine maximale Zugspannung von 190 N/mm<sup>2</sup> angegeben.

Absicherung gegen Auftrieb – Verankerung Grundsätzlich wurden 2 Möglichkeiten zur Abspannung des Ballons verfolgt. Einerseits durch Setzen einer großen Anzahl von **Verpressankern**, andererseits durch Auftriebssicherung mittels **sandgefüllten Verankerungsbehältern**.

Verpressanker Diese vorgespannten Anker übertragen die aufgebrachten Zugkräfte auf eine tragfähige Schicht im Grund. Das stählerne Zugglied (Ankerseil) wird dabei im Bohrloch durch eingepressten Zementmörtel, den eigentlichen Verpresskörper, verankert. Haupteinsatzgebiete dieser Verankerungstechnologie sind Felssicherung und Spezialtiefbau. Nach Angaben des Institutes für Geotechnik an der TU-Wien können je nach Bodenbeschaffenheit des Untergrundes 50-100kN pro Laufmeter verankert werden, wobei jener Wert bei größer werdender Verpressstrecke abnimmt. Nur in Sonderfällen kommen Verpressstrecken von mehr als 10m zum Einsatz.

Alternativkonzept - Sicherung durch Sandbehälter Eine andere Möglichkeit das dem Auftrieb entgegenwirkende Gewicht bereitzustellen besteht darin, mit Sand- oder Schotter gefüllte Behälter anstatt der Verpressanker am Ende der Abspannseile anzubringen.

Behälter Die Eigenschaft, das Hohlraumvolumen des Sandes sowohl mit Wasser als auch mit Luft befüllen zu können, ermöglicht es, das Gewicht der Behälter zu variieren. Demnach lässt sich steuern ob das Gesamtgewicht der Konstruktion leichter, oder schwerer als das verdrängte Wasser ist. Pumpt man Luft in die Behälter so lässt sich die gesamte Konstruktion an die Oberfläche heben, füllt jedoch Wasser die Hohlräume, so sichern die Behälter die Konstruktion gegen Auftrieb.

Es ist von großem Vorteil wenn jegliche Arbeiten an der Konstruktion an der Oberfläche durchgeführt werden können. Denn somit vereinfachen sich Montage, Inspektion und Instandhaltung enorm, was sich wiederum positiv auf die Betriebssicherheit, die Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer der Anlage auswirkt.

### Arbeitspaket Nr. 4: Gesamtanlagenkonzept: Integration von Turbosatz, Wärmespeicher und Luftspeicher

Bei den Auslegungsüberlegungen wurden zwei unterschiedliche Leistungsklassen herangezogen. Die Unterscheidung erfolgte aufgrund der Verdichtermassenströme. Hierbei handelt es sich um eine kleine Leistungsklasse mit einem Verdichtermassenstrom von 4,2 kg/s sowie eine große Leistungsklasse mit einem Verdichtermassenstrom von 20 kg/s. Aus der Überlegung, dass sich aufgrund der auftretenden Verluste beim Ein- sowie Ausspeichern nicht die gleichen Leistungen bei gleich bleibenden Massenströmen ergeben würden, ergibt sich die Frage nach einem geeigneten Auslegungskonzept. Dies bezieht sich auf die Frage ob gleiche Massenströme oder Leistungen beim Ladungs- bzw. Entladungsprozess herangezogen werden. In vorliegendem Fall wurde das Konzept gleicher Leistung in Betracht gezogen. Somit ergeben sich für den Ladungs- bzw. Entladungsprozess unterschiedliche Massenströme. Im Sinne der Auslegungsberechnungen wurden folgende Randbedingungen für die Umgebungsluft herangezogen: Temperatur: 15°C, Druck: 1,013 bar, relative Luftfeuchtigkeit: 60%. Mit Hilfe des Matlabtools (Stand Frühjahr 2013) wurde dann der Prozess ausgelegt.

Kompressordaten Basierend auf den genannten Randbedingungen sowie gestellten Anforderungen wurden für beide Leistungsklassen Entsprechende Verdichter gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Angebot der Firma MAN mit folgenden Spezifikationen:

1. Stufe	
Austrittstemperatur [°C]:	127,3
Austrittsdruck [bar]:	2,6
Isentroper Wirkungsgrad [%]	80,1
2. Stufe	
Eintrittstemperatur [°C]	89,3
Austrittstemperatur [°C]	192,6
Austrittsdruck [bar]:	5,1
Isentroper Wirkungsgrad [%]	83,18
3. Stufe	
Eintrittstemperatur [°C]	192,6
Austrittstemperatur [°C]	403
Austrittsdruck [bar]:	15
Isentroper Wirkungsgrad [%]	76,25
Gesamtsystem	
Leistung [MW]	1,928
Drehzahl [U/min]	10355

Tabelle 1. kleine Leistungsklasse

1. Stufe	
Austrittstemperatur [°C]:	238
Austrittsdruck [bar]:	5,2
Isentroper Wirkungsgrad [%]	76,72
2. Stufe	
Eintrittstemperatur [°C]	198,1
Austrittstemperatur [°C]	403
Austrittsdruck [bar]:	15
Isentroper Wirkungsgrad [%]	80,86
Gesamtsystem	
Leistung [MW]	9,12
Drehzahl [U/min]	6615

Tabelle 2. Spezifikationen des Verdichters für die große Leistungsklasse

Expander Die in dem Gegenstromwärmetauscher vorgewärmte Luft aus dem Unterwasserspeicher wird in einem Expander auf den Umgebungsdruck expandiert. Wie bereits erwähnt ergeben sich aufgrund auftretender Verluste im System unterschiedliche Massenströme für die Expander als für die Verdichter. Die Expandermassenströme belaufen sich je nach Leistungsklasse auf 6,75 kg/s bzw. 32 kg/s. Die entsprechenden Betriebs- sowie Leistungsdaten der Expander beider Leistungsklassen sind in der angeführten Tabelle zusammengefasst.

Eintrittsdruck [bar]	14
Eintrittstemperatur [°C]	355
Austrittstemperatur [°C]	63
Stufenzahl	12
Kupplungsleistung [MW]	9,524
Isentroper Wirkungsgrad [%]	88
Drehzahl [U/min]	5500

Tabelle 3. Technische Daten des Expanders für die große Leistungsklasse

Eintrittsdruck [bar]	14
Eintrittstemperatur [°C]	355
Austrittstemperatur [°C]	73
Stufenzahl	12
Kupplungsleistung [MW]	1,915
Isentroper Wirkungsgrad [%]	84
Drehzahl [U/min]	10000

Tabelle 4. Technische Daten des Expanders für die kleine Leistungsklasse

### Bilanzierung des Gesamtsystems

Da für die Auslegung der Anlagen das Konzept gleicher Leistungen beim Ein- und Ausspeichern gewählt wurde, spielen die Ein- sowie Ausspeicherungszeiten für die Gesamtbilanzierung des Systems eine wichtige Rolle. Diese ergeben sich direkt aus der Überlegung, dass sich der Speicher bei jedem Zyklus vollständig entleert. Somit kann man für den Zusammenhang zwischen der Ein- sowie Ausspeicherungszeit folgendes angeben:

$$t_{Ein} \cdot \dot{m}_{Ein} = t_{Aus} \cdot \dot{m}_{Aus}$$

Diese Zeitdauern gehen anschließend in die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades des Systems ein, sodass man schreiben kann:

$$\eta_{gesamt} = \frac{P_{Expander} \cdot t_{Aus} - t_{Ein} \cdot (P_{Conveyor} + P_{Blower})_{Laden} - t_{Aus} \cdot (P_{Conveyor} + P_{Blower})_{Entladen}}{P_{Kompressor} \cdot t_{Ein}}$$

Mit dem Zeitverhältnis  $\tau$  ergibt sich:

$$\tau = \frac{t_{Aus}}{t_{Ein}} = \frac{\dot{m}_{Ein}}{\dot{m}_{Aus}}$$

$$\eta_{gesamt} = \frac{P_{Expander} \cdot \tau - (P_{Conveyor} + P_{Blower})_{Laden} - \tau \cdot (P_{Conveyor} + P_{Blower})_{Entladen}}{P_{Kompressor}}$$

Hiermit lassen sich für beide Leistungsklassen die Gesamtwirkungsgrade berechnen. Bei der Berechnung des Gesamtwirkungsgrades wurden die die elektrischen Verluste am Motor bzw. Generator nicht berücksichtigt. Die größten Verluste werden durch die nicht idealen Turbomaschinensätze verursacht, wobei der mit Abstand größte Anteil durch die Zwischenkühlung entsteht. Diese ist nötig, sodass eine Verdichteraustrittstemperatur von 400 [°C] nicht weit überschritten wird, um keine Probleme auf Grund veränderlicher Spiele von rotierenden Teilen verursacht durch Wärmespannungen zu haben. Der in der Zwischenkühlung freiwerdende Wärmestrom kann nicht sinnvoll im Prozess genutzt werden und muss deshalb als Verluststrom an die Umgebung abgegeben werden.

Die Verluste des Wärmetauschers sind gering und setzen sich aus den Verlusten durch eine nicht ideale Isolierung und durch den mit der Abluft (Fluidisierung) transportierten Wärmestroms zusammen. Natürlich müssen die Fluidisierung und die Förderung des Sandes zu und von den Silos als zusätzlicher Aufwand verbucht werden.

Da Sand per se eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, bildet sich im heißen Silo am Rand eine Grenzschicht aus, die zusätzlich zur inneren und äußeren Isolation den Verlustwärmestrom über die Silowände minimiert. Ebenfalls begünstigt ein großes Volumen zur Oberflächenverhältnis großer Silos einen guten Speicherwirkungsgrad und ergo zu geringen Speicherverlusten.

## Arbeitspaket Nr. 5: Umweltverträglichkeit

Berechnung des Wärmeeintrages - instationäre CFD-Simulation Die Umweltverträglichkeit ist neben Kosten und Effizienz der Anlage eine jener Zielgrößen die es beim Entwurfsprozess zu Optimieren gibt, damit das Projekt tatsächlich in der Realität umgesetzt werden kann. Wesentliche Eingriffe in das umgebende Ökosystem könnten hier entweder durch Undichtheiten der Behälterfolie oder durch zu große Wärmeabgabe an das umgebende Wasser entstehen.

Im Folgenden beschäftigt man sich mit Letzterem. Es wurde eine instationäre 3D-CFD Simulation durchgeführt. Umso besser die Qualität von Rand- und Anfangsbedingungen, desto genauer können die Auswirkungen eines SEES-Druckluftbehälters auf das Gewässer vorausgesagt werden. Darum bedurfte es einigen Aufwandes um eine Ausgangssituation für die Simulation schaffen zu können die der Realität mit großer Genauigkeit entspricht. Diese Vorarbeiten beinhalteten unter anderem eine Recherche über die Wasserbeschaffenheit von Süßwasserseen und die Entwicklung eines MATLAB-Tools zur Berechnung der Temperaturverteilung über die Folie.

Grundlegendes zu Wasserschichten im Ökosystem See Das Wasser der Süßwasserseen der gemäßigten Klimazone lässt sich nach Temperatur und biologischer Aktivität in drei Wasserschichten einteilen:

Trophogene Zone (Nährschicht): Die Temperatur unterliegt relativ großen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen zwischen 4 °C und über 30 °C. Durch Wind und Wellen angeregt ist der Durchmischungsgrad ebenfalls sehr hoch.

Kompensationsebene: Die Kompensationsebene bildet die Grenze zwischen der trophogenen und der tropholytischen Zone. Rasche Temperaturabnahme auf 4°C (Dichteanomalie des Wassers).

Tropholytische Zone (Zehrschicht): In dieser Schicht herrscht eine tages- und jahreszeitlich unabhängige, mehrheitlich konstante Temperatur von 4 °C. Um das Energiespeichervolumen zu maximieren ist man darum bemüht den Druckluftbehälter in größtmöglicher Tiefe unterzubringen, also in der tropholytischen Zone, die durch sehr geringe biologische Aktivität geprägt ist. Da die Temperatur der Luft im Behälter (35°) wesentlich höher ist, als die des umgebenden Wassers, ist mit einer Wärmeabgabe an den See zu rechnen. Dadurch entstehen wärmebedingte Auftriebs- bzw. Zirkulationsströmungen. Solange die künstlich erzeugten Strömungen zu keiner Durchmischung der tropholytischen Zone über Kompensationsebene hinweg führen, kann man den Eingriff in das Gewässer als tolerierbar einschätzen, da die von Lebewesen bewohnten Schichten dann keiner Veränderung ausgesetzt sind.

### Anfangsbedingungen - Temperatur- und Schichtprofil des Traunsees

Wie oben erklärt lassen sich Süßwasserseen in das beschriebene Temperatur- und Schichtprofil einteilen, jedoch gibt es große Unterschiede in der Ausprägung der verschiedenen Zonen zwischen einzelnen Seen. Für die Strömungssimulation wurde der Traunsee als Beispiel herangezogen. Die dazu benötigten Daten wurden einem Bericht des Bundesamtes für Wasserschutz entnommen: „Die Wassergüte ausgewählter Seen des oberösterreichischen und steirischen Salzkammergutes 2001-2005“. Kennzeichnend für den Traunsee ist sein relativ hoher Chloridgehalt, was ein spezielles Dichteprofil für die Simulation vorgibt. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Verteilung von Temperatur und Chloriden an seiner tiefsten Stelle. Anhand dieser beiden Grafiken wurden Dichte und Temperaturverteilung als Anfangsbedingung implementiert (Zeitpunkt: Kalenderwoche 25). Der Chloridgehalt im Traunsee ist um ein vielfaches höher als die Konzentration anderer Elemente wie Sauerstoff, Phosphor oder Nitrat. Dies ist deshalb für die Strömungssimulation relevant, da sich dadurch ein spezielles Dichteprofil ergibt, ein nicht zu vernachlässigender Effekt bei der Berechnung von Konvektionsströmungen mit derart geringen Geschwindigkeiten, wie sie hier in Erscheinung treten. Mittels folgender Beziehung lässt sich die resultierende Flüssigkeitsdichte in Abhängigkeit der Chloridkonzentration berechnen.

### Randbedingungen - Berechnung der äußeren Oberflächentemperatur der Folie

Auf die Oberfläche des Behälters, undurchlässig für Fluide, wurde eine konstante Wandtemperatur von 7°C aufgebracht. Diese Folienußentemperatur wurde zuerst, ebenfalls numerisch berechnet. Das Programm, ermittelt das Temperaturprofil um die Folie für einen frei wählbaren Zeitpunkt nach dem Befüllen des Behälters. Ebenfalls lassen sich folgend Wärmestromdichten und Gesamtwärmeverlust zu berechnen.

Berechnungszeit Da es im Vorhinein weitgehend unklar war, wie lange es dauert bis sich ein annähernd stationärer Zustand einstellt wurden die Veränderungen zwischen verschiedenen Zeitschritten während der Simulation laufend beobachtet. Schlussendlich wurden die Veränderungen nach 120 physikalisch simulierten Minuten als zufriedenstellend klein beurteilt, sodass dies den Endzustand repräsentiert.

## Arbeitspaket Nr. 6: Behörden-Engineering

Zur Beantwortung mehrerer Fragen im Hinblick auf ein Genehmigungsverfahren einer SEES-Pilotanlage am Traunsee, wurde mit mehreren Vertretern der Oberösterreichischen Landesregierung ein Gespräch geführt.

### Die gestellten Fragen waren

- 1.) Welche Bewilligungen sind einzuholen und welche Schritte sind dafür erforderlich?/
- 2.) Ist für das Projekt SEES ein UVP-Verfahren erforderlich?/
- 3.) Welche grundsätzlichen Bedenken bestehen gegen das Forschungsprojekt SEES seitens der Amtssachverständigen der OÖ-Umweltanwaltschaft und des Wasserwirtschaftlichen Planungsorgans?

## Arbeitspaket Nr. 7: Wirtschaftlichkeitsanalyse

Grundsätzlich kommen für den Betrieb der Anlage folgende Erlösquellen in Frage:

- Kauf und Verkauf von Base- und Peak Spots über die zuständige Strombörse:

Hierbei werden einen Tag im Voraus jeweils die für die Einspeicherung notwendigen Strommengen eingekauft, sowie die daraus produzierten Strommengen wieder (zu einem anderen Lieferzeitraum) verkauft. Damit ist der Betrieb der Anlage jeweils einen Tag im Voraus geplant. Nachteil dieser Erlösquelle ist die geringe Differenz zwischen Base- und Peakpreisen.

- Teilnahme am Regelenergiemarkt:

Zur Sicherstellung der genauen Betriebsparameter existiert ein sog. Regelenergiemarkt mit einem beschränkten Kreis an qualifizierten Teilnehmern. Diese liefern, abgestuft in Primärregelenergie / -leistung Sekundärregelenergie / -leistung und Tertiärenergie /-leistung (Minutenreserve) verschiedene Produkte die zum sicheren Betrieb eines Stromnetzes notwendig sind. Die Bereitstellung der Produkte erfordert verschiedene technische Rahmenbedingungen der Anlage. So kann eine in SEES angedachte Anlage sicher keine Primärregelung übernehmen. Die Sekundärregelung wäre grundsätzlich wie die Tertiärregelung (Minutenreserve) möglich. Fraglich ist allerdings beim aktuellen Stand der Entwicklung ob die Anlage in der geforderten Zeitspanne von Anforderung bis Volllast betriebsbereit ist. Dies betrifft insbesondere die Sekundärregelung.

## Berechnung der Deckungsbeiträge auf Basis Peak-Base Betrieb

Ausgehend von einem Wirkungsgrad von 70% (Elektrischer Eingang bis elektrischer Ausgang) wurden auf Basis von historischen Daten die möglichen Erlöse wie folgt berechnet. Es wurde jeweils der niedrigste stundenweise Spotpreis mit dem höchsten gegenübergestellt, der zweithöchste mit dem zweitniedrigsten, usw. Unter der Annahme, dass pro eingespeicherter MWh nur 0,7 MWh zurück ins Netz gespeist werden. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Einspeicherungsdauer gleich der Ausspeicherungsdauer ist und die Leistung zwischen Ein- und Ausspeicherung variiert. Diese Randbedingung dient für eine gute Abschätzung, auch wenn in Wirklichkeit die Anlagenleistung zur Ein- und Ausspeicherung gleich ist, d.h.: die Ausspeicherungsdauer geringer ist als die Einspeicherungsdauer.

### 3.1.4 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

#### AP2, Düsenboden, Meilensteine: Proof of Concept, Aussagen über die Dauerstandfestigkeit

Mehrere Materialien und Bauweisen wurden untersucht. Die einfachste und kostengünstigste Variante, Lochbleche als Gasverteiler einzusetzen, hat sich als unbrauchbar erwiesen. Die Lochbleche verstopfen entweder über einen längeren Zeitraum, oder der Sand fällt im Stillstand durch die Löcher in die darunterliegende Windbox. Stanzbleche als Gasverteiler würden gewährleisten, dass Schüttgut im Stillstand nicht verloren geht, können aber durch zu geringen Druckverlust keine Stabilität über größere Bettflächen liefern. Als ideales Material für den Düsenboden hat sich poröses Sintermetall in Plattenform erwiesen. Der mit der Durchströmungsgeschwindigkeit linear ansteigende Druckverlust der Platten ist durch die Parameter Porosität und Plattendicke beliebig anpassbar. Das Schüttgut rieselt nicht durch die Platten hindurch. Die Fluidisierung ist sehr gleichmäßig und stabil. Das Material ist durch herkömmliche Bearbeitungsweisen wie bohren, fräsen und schweißen einfach in der Handhabung. Sintermetalle sind zudem Hochtemperaturbeständig, eine für das sandTES-Konzept unverzichtbare Eigenschaft. Der Langzeitversuch war über 300 Tage in Betrieb (Abb. 2.2). Der Fluidisierungsluft-Volumenstrom wurde dabei in allen sechs Zylindern auf den gleichen Wert gedrosselt und über die Versuchszeit konstant gehalten. Es konnte keine Erhöhung der Druckverluste gemessen werden die auf eine zunehmende Verunreinigung hindeuten würden. Somit wird auch die Verlässlichkeit der Sintermetallplatten als robuster Gasverteiler angenommen.

Der Vergleich des programmierten Tools mit den experimentell erhaltenen Ergebnissen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Somit ist ein wesentliches Verhalten der Wirbelschicht innerhalb des sandTES-Wärmetauschers auch über Simulationen gut abzubilden und im Hinblick auf die Auslegung einer sandTES-Pilotanlage gut kalkulierbar. Auf dieser Basis wurde das mittlerweile zum Patent eingereichte Konzept eines selbststabilisierenden Düsenbodens entwickelt. Die Einsatzbereiche des Konzeptes konnten experimentell nachgewiesen werden und sind nun rechnerisch gut abzuschätzen.

#### AP2, Generalprobe, Meilenstein: Proof of Concept

Die Versuche haben gezeigt, dass es im für das Projekt interessanten Betriebsbereich (2-5 fache Minimumfluidisierungsgeschwindigkeit) bei den „normal“-Versuchen zu einem Sättigungsverhalten kommt. Wird die Fluidisierungs-Geschwindigkeit weiter gesteigert, so ändert sich der Sandfluss nur geringfügig. Dieses Ergebnis bestätigt auch die Wahl des sinnvollen Betriebsbereiches um die dreifache Minimumfluidisierungsgeschwindigkeit.

Es stellte sich im Lauf der Experimente heraus, dass die Einlauf- und Auslaufgebiete zu klein sind und die Sandströmung keinen Platz hat, sich zu einer Pfropfenströmung zu formieren. Simulationen zeigen, dass dafür in etwa 3-4 Meter nötig sind. Eine 3-4 Meter lange Versuchsanlage ist nicht mehr allzu klein und war mit dem vorhanden Zeit- und Kostenbudget nicht zu realisieren.

Wenn es aber gelingt zu zeigen, dass die mit dem cpfd-Softwarepaket Barracuda durchgeführten Simulationen, fundiert sind, also denen in jeglicher Hinsicht zu vertrauen ist, wäre das Ziel ebenfalls erreicht. Deshalb wurden die durchgeführten Farbversuche auch mit Barracuda nachsimuliert und Experiment mit Simulation verglichen. Diese passten zwar nicht exakt zusammen, es war aber jeder maßgebende Effekt in der Simulation zu sehen und passte trendmäßig mit dem Experiment zusammen.

## AP2, Erste thermische Untersuchungen des Wärmeübergangs, Meilenstein: Proof of Concept

Im stationären Bereich der Vorlauftemperatur, 255 [°C] können erreichte Wärmestromwerte von ca. 25 [kW] beobachtet werden. In diesem Bereich sinkt die Öltemperatur zwischen Ein- und Austritt einer jeweiligen Kammer um ca. 5 [°C].

Die gemessenen Werte entsprechen den Erwartungen für einen k-Wert im Bereich von 300 bis 600 [W/(m<sup>2</sup>\*K)]. Zur genaueren Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten sind bereits weitere Versuche geplant.

Mit dem Versuchsstand konnten viele konstruktive Elemente und Konzepte erprobt und untersucht werden: 1.) die neue Bauweise der Druckluftversorgung unterteilt in Windboxen, Blenden und Düsenboxen, 2.) das Verhalten des selbststabilisierenden Düsenbodenkonzeptes bei höheren Temperaturen 3.) die Ausführung und der Einbau des aus Sinterplatten geschweißten Gasverteilerbodens 4.) die Fluidisierungsstabilität bei verwendetem Düsenbodenkonzept/ Gasverteiler/Einbauten unter höheren Temperaturen 4.) die Gestaltung und Abdichtung der Flansche um eine Instandhaltung gewährleisten zu können 5.) die Umsetzung der versteiften Ummantelung der Wirbelschicht inklusive dem Einbau von Schaugläsern 6.) der Anschluss an die Thermo-Öl Heizung 7.) die Bedienung und Regelung der Thermo-Öl Heizung 8.) die Gestaltung der thermischen Isolierung sowie die Auswahl an Isoliermaterial 9.) die Auswahl, die Installation sowie das Einlesen der Messtechnik (Luftvolumenstrom-, Temperatur-, Druck- und Betthöhenmessung) 10.) das programmieren der nötigen Messtechnik-Software (LabVIEW) zur Messung und Regelung 11.) die Umsetzung der in der Generalprobe entwickelten Einbauten zur Optimierung der Fluidisierung und der Dispersion 12.) erste Messungen eines globalen Wärmeübergangs im fluidisierten Speichermaterial 13.) der Einfluss der Speichermaterial-Eigenschaften auf den Wärmeübergang 14.) der Zusammenhang von Dispersion und Fluidisierungsgeschwindigkeit

All diese Erfahrungen konnten zu einem Preis finanziellem Risiko erworben werden, die trotz Budget-Sprengung im Rahmen des Projektes SEES gerade noch dargestellt werden konnten.

## AP3 Unterwasser-Luftbehälter, Meilensteine: Konzept zur Verankerung, Konzept des flexiblen Luftspeichers, Sicherheitskonzept, Störfallanalyse

Aufgrund **der direkt proportionalen Abhängigkeit der Membranspannungen von Druckdifferenz und Krümmungsradius** ist **beides durch konstruktive Maßnahmen zu minimieren** ohne dabei große Einbußen hinsichtlich Speichervolumen in Kauf nehmen zu müssen. Das Konzept mehrerer konzentrisch angeordneter Toren stellt eine optimale Kombination dessen dar. Ebenso **vereinfacht diese Form das Anbringen der Seile zur Absicherung gegen Auftrieb**. Der Luftbehälter wurde für eine **Standardgröße** mit Volumen  $V=8800\text{m}^3$  und Oberfläche  $A=5040\text{ m}^2$ , ausgelegt.

Konzept zur Absicherung gegen Auftrieb Aufgrund der Schwierigkeiten bei den Ankerbohrungen stellt die direkte Verankerung im Seeboden ein sehr aufwendiges und teures Unterfangen dar. Nicht zuletzt aufgrund dessen ist hier das Alternativkonzept der **Abspannung durch Schotterbehälter** anzustreben.

Ergebnisse der FE – Simulation Die durchgeführten Studien zeigen ausreichende Sicherheit gegen Rissbildung. Es handelt es sich um statische Studien, für einmalige statische Belastung. An den kritischen Stellen treten maximale Zugspannungen von 100 N/mm<sup>2</sup> auf, womit eine Sicherheit von  $S=1,9$

besteht. Hier sind weder dynamische Ermüdungseffekte noch Auswirkungen durch Knickungen in teilgefülltem Zustand die einmal pro Ladezyklus auftreten berücksichtigt. Auf dynamische Untersuchungen musste im Rahmen des Sondierungsprojektes verzichtet werden.

In Bezug auf die Störfallanalyse wurde auf Basis der erarbeiteten technologischen Lösungen ein Katalog an möglichen Störfällen ausgearbeitet. Auf Basis dieses Katalogs, der alle relevanten Störfälle enthält wurden Maßnahmen entwickelt die die Auswirkungen auf die Umwelt verhindern bzw. minimieren.

## Lösungsansätze für kritische Störfälle:

### Bauteilversagen der Membranen Außenstruktur:

**Problem:** Kommt es zu einem Riss in der Membranhülle des Speichers so tritt Luft aus und steigt an die Oberfläche. Kritisch hieran ist die Menge an Luft die austritt denn diese kann an der Wasseroberfläche im Bereich des Austritts zu einem verringerten Auftrieb führen und eventuell schwimmende Objekte zum Kentern bzw. zum Sinken bewegen. **Lösung:** a) Die Folien bestehen aus einem rissfesten Material, dass ein Voranschreiten von Rissen und damit ein Aufplatzen verhindert. Eventuell auftretende Löcher und Risse werden also nicht weiter wachsen. b) Zusätzlich wurde ein Sicherheitskonzept entwickelt, worin bei Austritt einer geringen Teil-Luftmenge die Rest-Luft kontrolliert über die Wasser-Oberfläche gebracht wird. Kommt es im Behälter zu einem Verlust an Luft und damit einhergehend zu einer nicht geplanten Änderung des unteren Niveaus, dann wird die gesamte im Behälter vorhandene Luft über die Anschlussleitung und ein Notventil über der Wasseroberfläche abgeblasen.

### Versagen eines Tragseils:

**Problem:** Versagt ein Tragseil, so ist der Behälter in diesem Bericht nicht mehr ordnungsgemäß mit den Gewichten verbunden. **Lösung:** Die Dimensionierung der Tragseile ist mit großer Sicherheit geplant, stoßartige Belastungen kommen nicht vor. Diese Punkte minimieren das Risiko eines Seilversagens. Kommt es trotzdem zu einem Seilversagen, dann wird sofort über die Anschlussleitung und ein Notventil über der Wasseroberfläche die Luft aus dem Behälter abgeblasen.

### AP4: Gesamtanlagenkonzept, Integration Turbosatz, Wärmespeicher und Luftspeicher SandTES-Wärmespeicher, Meilensteine: Festlegung Kombination, Leistungsklassen, Wirkungsgrade, Umsetzbares Gesamtkonzept

Das nächste wichtigste Glied nach dem Verdichter ist der Wärmespeicher. Hierbei handelt es sich prinzipiell um einen Luft/Sand-Gegenstromwärmetauscher mit folgenden technischen Spezifikationen.

<b>WÄRMESPEICHER</b>	
<b>Aufladen</b>	
Eintrittstemperatur der Luft [°C]	403,0
Austrittstemperatur der Luft [°C]	41,5
Eintrittstemperatur des Sandes [°C]	12,0
Austrittstemperatur des Sandes [°C]	374,8
<b>Entladen</b>	
Eintrittstemperatur der Luft [°C]	4
Austrittstemperatur der Luft [°C]	355
Eintrittstemperatur des Sandes [°C]	369,8

<b>WÄRMESPEICHER</b>	
<b>Aufladen</b>	
Eintrittstemperatur der Luft [°C]	403,0
Austrittstemperatur der Luft [°C]	41,9
Eintrittstemperatur des Sandes [°C]	12
Austrittstemperatur des Sandes [°C]	374,2
<b>Entladen</b>	
Eintrittstemperatur der Luft [°C]	4
Austrittstemperatur der Luft [°C]	355
Eintrittstemperatur des Sandes [°C]	369,2

Austrittstemperatur des Sandes [°C] | 12,0 |

**Tabelle 5.** Technische Daten des Wärmetauschers für die große Leistungsklasse

Austrittstemperatur des Sandes [°C] | 12,7 |

**Tabelle 6.** Technische Daten des Wärmetauschers für die kleine Leistungsklasse

Unterwasser-Druckluftspeicher Im Unterwasserluftspeicher sinkt die Temperatur der gespeicherten Luft aufgrund tiefer Temperaturen ab. Als ein Richtwert wurde bei den Auslegungsberechnungen einen Wert von 4 °C als Austrittstemperatur aus dem Luftspeicher herangezogen.

Hilfsaggregate Da für die Leistungsbilanzierung des Gesamtsystems die Leistungen der am System beteiligten Hilfsaggregate auch eine Rolle spielen, sind diese in Tabelle zusammengefasst.

Leistung des Conveyors [kW] Laden/Entladen	2,69/4,23
Leistung des Blowers [kW] Laden/Entladen	88,19/93,95

**Tabelle 7.** Hilfsaggregate große Leistungsklasse

Leistung des Conveyors [kW] Laden/Entladen	0,45/0,71
Leistung des Blowers [kW] Laden/Entladen	22,46/23,74

**Tabelle 8.** Hilfsaggregate kleine Leistungsklasse

Verluste Abgesehen von den Turbomaschinenkomponenten bestehen die weiteren Verluste im System aus dem Druckverlust in den Rohrleitungen sowie den Wärmeverlusten an die Umgebung während der Speicherzeit:

Druckverlust	
Druckverlust beim Aufladen [bar]	0,243
Druckverlust beim Entladen [bar]	0,55
Wärmeverlust	
Temperaturabfall während der Speicherzeit [°C]	5

**Tabelle 9.** Verluste in Rohrleitungen sowie dem Sandspeicher für die große Leistungsklasse

Druckverlust	
Druckverlust beim Aufladen [bar]	0,243
Druckverlust beim Entladen [bar]	0,55
Wärmeverlust	
Temperaturabfall während der Speicherzeit [°C]	5

**Tabelle 10.** Verluste in Rohrleitungen sowie dem Sandspeicher für die kleine Leistungsklasse

Bilanzierung des Gesamtsystems Bei der Berechnung des Gesamtwirkungsgrades wurden die die elektrischen Verluste am Motor bzw. Generator nicht berücksichtigt.

Gesamtwirkungsgrad [%]	
kleine Leistungsklasse 2MWeI	große Leistungsklasse 10MWeI
<b>59,83%</b>	<b>63,31%</b>

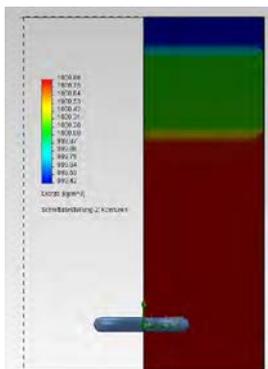
Tabelle 11. Gesamtwirkungsgrad der einzelnen Anlagen

Im Rahmen des SEES-Projektes hat man sich darauf fokussiert die Leistungsklasse von 2 MWeI und 10 MWeI zu untersuchen, um aber das Konzept wirtschaftlich gestalten zu können wird man sich aber eher in der Leistungsklasse ab ca. 100 [MWeI] bewegen müssen.

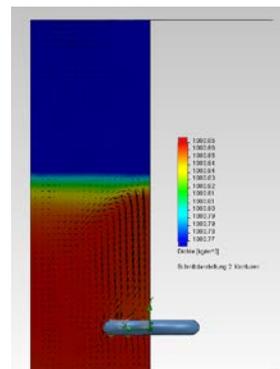
### AP 5: Umweltverträglichkeit, Meilenstein: Sicher gestellte Umweltverträglichkeit

In Abbildung 3.8 (Temperatur) und Abbildung 3.9 (Dichte) ist die Schichtstruktur am Beginn der Simulation gezeigt. Ziel der Simulation ist es, zu überprüfen ob und in welchem Ausmaß sich die einzelnen Schichten vermischen. Die einzige Wärmequelle stellt die Oberfläche des Behälters dar, was eine Auftriebsströmung (freie Konvektion) des so erwärmten Wassers im Bereich senkrecht seiner Oberseite erwarten lässt, da es durch seine höhere Temperatur geringere Dichte aufweist. Dieses

Wasser steigt solange auf, bis es erstmals auf eine Schicht trifft, deren Dichte geringer ist. In diesem Fall bedeutet dies konkret, dass die grüne Schicht die aus der blauen Schicht kommende Auftriebsströmung von ihrem weiteren Aufstieg hindern muss, da es anderenfalls zu einer künstlichen Mischung der Wasserschichten von unzulässigem Ausmaß kommen würde. Ab einer Tiefe von ca. 60 Metern beträgt die Temperatur einheitlich 4°C, was auch bedeutet, dass man sich hier definitiv in der tropholytischen Zone befindet, wo künstlich angeregte Strömungen und Zirkulationen zulässig angesehen werden. Anhand der Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9, die die Dichteprofile zu Beginn und am Ende zeigen, kann man gut erkennen, welches Ausmaß die erzeugten Zirkulationsströmungen aufweisen und dass Sie eindeutig ausschließlich in der tropholytischen Zone auftreten. Die vom Behälter in einer Tiefe von 150 Metern ausgehende Auftriebsströmung ragt bis in eine Tiefe von ca. 80 Meter herauf, wo sie durch eine Schicht geringerer Dichte umgelenkt wird. Dies wird durch die Geschwindigkeitsvektoren, die in Abbildung 22 ebenfalls zu sehen sind bestätigt. In jener „Umlenktiefe“ weist das Wasser eine Dichte von 1000,77 kg/m<sup>3</sup> bei einer Temperatur von 277,76 K auf. Die größte auftretende Geschwindigkeit beträgt 0,087 m/s, was sowohl in Relation zu Größe des Berechnungsgebietes als auch verglichen mit durch Wind oder Wellen angeregten Zirkulationsströmungen in Oberflächennähe als vernachlässigbar klein angesehen werden kann. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Konfiguration mit den verschiedenen vorzufindenden Medien aus Luft, Folie und Wasser. Bekanntlich sind Wasser und Luft eher schlechte Wärmeleiter, aber auch die Folie selbst leistet einen entscheidenden Beitrag: Die in der Folie verarbeiteten Kunststoffe wie PVC und Polyester werden auch als Wärmedämmstoffe eingesetzt und haben für die Anwendung hier also einen äußerst positiven Nebeneffekt. Ebenso kann das umgebende Wasser die Wärme problemlos in den ganzen See abführen, der durch seine Größe auch als annähernd unendlich großer Wärmespeicher angesehen werden kann er stellt für das Kontrollvolumen eine ideale Umgebung dar.



**Abb. 3.8: Anfängliche Dichteverteilung**



**Abb.3.9: Dichteprofil Ende der Simulation**

Entgegen des ursprünglichen (im Antrag geplanten) Konzepts verzichtet das aktuelle Konzept, wie oben dargestellt, auf eine Verankerung des Behälters im Boden. Dies wäre aus vielen im Projekt zu Tage gebrachten Punkten aufwändig. Daher wurde wie schon dargestellt ein System entwickelt, welches mittels einer porösen Schüttung es ermöglicht, dass der gesamte Behälter an der Wasseroberfläche installiert werden kann und dann langsam abgesenkt wird (indem die Luft aus dem Zwischenräumen der porösen Schüttung abgelassen wird und Wasser eindringt). Damit ist aber auch ein Wiederauftauchen des Systems kein Problem. Die bis an die Wasseroberfläche reichenden Luftanschlüsse für die Gewichte ermöglichen ein kontinuierliches Füllen der porösen Hohlräume mit Luft und damit ein kontrolliertes Auftauchen des gesamten Systems. Aus diesem System ergibt sich kein Einfluss auf die

Umwelt durch Verankerung am Grund eines Gewässers. Zusätzlich ist am Grund von österreichischen Gewässern kein Leben vorhanden da kein Sauerstoff in diese Tiefe transportiert wird. Es kann sein, dass durch das Absetzen geringe Mengen an Sedimenten aufgewirbelt werden. Diese setzen sich aber wieder schnell. Zusätzliche Einflüsse durch die Gewichte sind nicht zu erwarten.

### AP 6: Behörden-Engineering, Meilenstein: Genehmigungs-Roadmap

Aufgrund der Neuheit der Technologie haben die Vertreter der oberösterreichischen Behörden keine über das vorliegende Protokoll hinausgehenden Aussagen treffen können. Der Konsensus bei innerhalb der Experten der Behörde ist der Standpunkt, dass nur eine Einreichung eines entsprechenden Projektes bei der Behörde die Prüfung und damit einhergehend die entsprechende Genehmigungsroadmap auslösen kann.

Es war nicht möglich über das Protokoll und die in darin vermerkten Aussagen hinausgehende stichhaltige Aussagen von den zuständigen Behörden zu erhalten. Aus den persönlichen Gesprächen kann interpretiert werden, dass eine Demonstration der Technologie in kleinem Maßstab der Behörde entgegenkommen würde, da speziell hinsichtlich der Ökologie seitens der Behörde große Unsicherheit bezüglich der Einschätzung der Effekte bestehen.

### AP 7: Wirtschaftlichkeitsanalyse, Meilensteine: wirtschaftliches Umsetzungspotential, Vergleich zu anderen Speichertechnologien, Kosten der Errichtung und des Betriebs, technisch und wirtschaftlich beste Lösung

Deckungsbeiträge sind die Erlöse für den Stromverkauf abzüglich der Kosten für den Stromeinkauf ohne weitere Entgelte und Abgaben sowie ohne interne Kosten.

Auf Basis der Marktdaten von 2012 ergibt sich bei dem oben beschriebenen Betriebsszenario folgende Kosten / Umsatz Situation:

- Umsatzerlöse Stromverkauf: 838.022,- EUR
- Kosten für Stromeinkauf: 608.503,- EUR
- Deckungsbeitrag: 229.519,- EUR

Auf Basis der aus diesen Daten errechneten möglichen Betriebsstunden, Stundenkombinationen mit positiven Deckungsbeiträgen ergeben sich für 2011 beispielsweise 1750 Stunden Ladebetrieb.

**Der Betrieb der Anlage auf Basis der Base- Peak Spot Preise keine Kostendeckung der Anlage kann also nicht sicherstellt werden.**

Der Bericht AMIRIS zur Untersuchung des Akteursverhaltens sieht die Grenzleistungspreise für positive Minutenreserve so nahe bei null, dass eine ökonomische Verwertung wenig sinnvoll erscheint. Nur ein kleinerer Teil der festgesetzten Grenzleistungspreise für positive Minutenreserve liegt deutlich über null. Negative Minutenreserve ist ökonomisch sinnvoller zu nutzen.

Sowohl die Teilnahme zur Bereitstellung von Minutenreserve als auch Sekundärregelenergie erfordern technische Minimalanforderungen hinsichtlich Start-up. Diese sind für Sekundär-Regelenergie hinsichtlich technischer Machbarkeit noch genau zu prüfen. Eine Aussage über die Höhe der Erlöse aus der Teilnahme am Regelenergiemarkt ist mit einfachen Mitteln nicht möglich. Fest steht, dass die Erlöse aus der Bereitstellung von Minutenreserve jedenfalls auf Basis der historischen Daten gering ausfallen wird.

Die Wirtschaftlichkeit von (A)CAES Anlagen ist von mehreren Randbedingungen abhängig. Dies sind zum einen die Spreads zwischen Stromein- und –verkauf, sowie zum anderen die lokalen Gegebenheiten bezüglich eventuell bereits vorhandener Speicherstätten. Zusätzlich ist die Prognose von Kosten für ACAES Anlagen schwierig da hierzu noch keine Referenzen existieren. Tabelle 12 gibt einen kleinen Überblick über die geschätzten Kosten von Druckluftspeicheranlagen mit Kavernen. Diese Angaben schwanken zwischen 600 und 2000€/kW und somit um mehr als den Faktor 3. Dies ist, wegen des Fehlens von aktuellen Demoprojekten durchaus verständlich.

Tabelle 12: Vergleich von spezifischen Kosten aus verschiedenen Literaturquellen

		(Kloess)[7]	(Fertig & Apt, 2011) [5]	(Drury, Denholm, & Sioshansi, 2011) [4]		(Madlener & Latz, 2011) [8]	
		AA-CAES	CAES	CAES	AA-CAES	CAES	AA-CAES
Investkosten	Leistungsbezogen [€/kW]	600	1700-2000	749	1031	1063	1445,2
	Energiebezogen [€/kWh]	70					
O&M Kosten	€/kW/Jahr	4				9	10

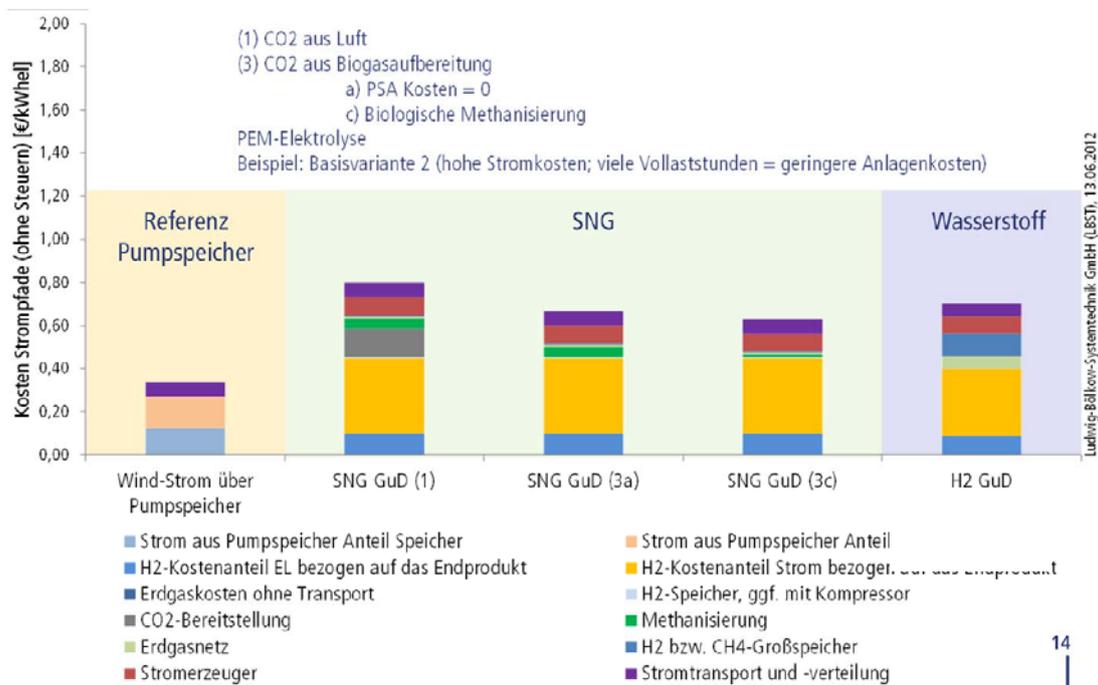


Abbildung 3.10: Kostenvergleich Pumpspeicher P2G; (Albrecht, Landinger, & Weindorf, 2012 [3])

Die Analyse der Kosten gestaltet sich bei Anlagen im Entwicklungs- bis Demostadium schwierig. Abbildung zeigt einen Vergleich der Stromkosten von Pumpspeichern mit Methan- und Wasserstoffspeicherung. Es ist ersichtlich, dass die Bereitstellung des notwendigen CO2 einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Kosten des gespeicherten Stroms liegen hier deutlich über den Kosten für

Speicher in Form von Pumpspeichern. (Hartmann , Eltrop, Bauer, Salzer, Schwarz, & Schmidt, 2012 [6]) geben spezifische Speicherkosten von 28 bis 29€/kWh unter den Annahmen: 900€/kW Investkosten Power to Gas Anlage; 700€/kW Investkosten Rückverstromung und 36% Wirkungsgrad der Power to Gas Anlage an. Die Nutzungsdauer wurde hierbei mit 30 Jahren angesetzt.

### 3.1.5 Beschreibung der „Highlights“ des Projektes

Das Projekt hatte mehrere Highlights:

- 1) Zu Beginn des Projektes war eine der ungewissen Fragestellungen, ob es möglich ist, am heutigen Markt Turbomaschinen zu finden, die man im angepeilten Leistungsbereich und mit den gewünschten Leistungsdaten für SEES-Anlagen einsetzen kann. Das Richtpreisangebot der Fa. MAN brachte eine Bestätigung und große Erleichterung für das Projektteam.
- 2) Beim sandTES-Wärmespeicher war zu Projektbeginn noch ungewiss, ob es wirklich möglich sein wird, in einer stationären Wirbelschicht eine Pfropfen-Strömung zu erzielen. Der Versuch mit färbigem Sand hat hier eine Bestätigung gebracht.
- 3) Auch die Befestigung der flexiblen Unterwasserbehälter war zu Projektbeginn noch nicht klar untersucht. Eine Verankerung von Zugseilen im Seegrund hätte wahrscheinlich zu unüberwindlichen Machbarkeits- und Risiko-Fragen geführt. Die Lösung mit der innovativen Abspannung mit Schottersäcken war hier wirklich ein enormer Fortschritt.
- 4) Auch der unverhofft positive Verlauf der Gespräche mit den Behörden war aus Projekt-Sicht ein wirklicher Durchbruch.

Angesichts der vier genannten Punkte wird offensichtlich, wie riskant das vorliegende Sondierungs-Projekt eigentlich war und wie positiv die vier genannten Highlights zu bewerten sind.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die im Sondierungsprojekt „SEES“ durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass die in der Antragsphase ermittelten „Round-Trip“-Wirkungsgrade im Bereich 60% bis 70% auch auf Basis realer Detail-Auslegungen und Angeboten von Sublieferanten bestätigt werden können.

Der Anlagenwirkungsgrad steigt mit steigender Anlagengröße, während die spezifischen Investitionskosten sinken. Für den Spezialfall einer Demo –Anlage in der Kapazitäts-Klasse von 10MW<sub>el</sub> wurde ein Wirkungsgrad von 63% und spezifische Gesamt-Investitionskosten von ca. 3000€/kW ermittelt. Eine optimale Anlagengröße dürfte im Bereich 40 bis 100MW<sub>el</sub> liegen, da in dieser Kategorie sowohl Verbesserungen im Wirkungsgrad als auch in den spezifischen Kosten ersichtlich sind. Auch das Design der Verdichter lässt noch ein beträchtliches Verbesserungspotential erkennen, da aktuell die Verdichter-Austrittstemperatur mit 400°C beschränkt ist.

Im Rahmen des Sondierungs-Projektes konnte die technische Machbarkeit und die Genehmigungsfähigkeit einer derartigen Anlage bestätigt werden. Leider hat sich aufgrund der aktuellen Situation in der europäischen Energiewirtschaft der „business-case“ für Speicherkraftwerke im Allgemeinen verschlechtert, sodass auch Pumpspeicherkraftwerke zurzeit wirtschaftlich nicht dargestellt werden können.

In dieser ersten Analyse hat sich jedenfalls gezeigt, dass „SEES“-Anlagen wirtschaftlich in einer ähnlichen Liga wie Pumpspeicherkraftwerke liegen könnten, da die spezifischen Investitionskosten um 20-30% unter jenen für typische Pumpspeicherkraftwerken liegen könnten, während der Speicherwirkungsgrad in der Größenordnung von 10 – 20% niedriger sein wird. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse hat gezeigt, dass Jahresvollaststunden und Anlagengröße die zwei wichtigsten Eckpunkte für die Wirtschaftlichkeit sind. Für eine Demo-Anlage in Österreich mit 1500Vollaststunden und 10MWel ergeben sich Speicherkosten in der Größenordnung von 10-15ct/kWh, während für größere Anlagen mit 2500Vollaststunden und ca. 50MWel Speicherkosten in der Größenordnung von 5-7ct/kWh möglich sein könnten. 2500 Vollaststunden sind ein sehr hoher Wert. Im Zusammenhang mit Windenergie ist der Wert schwer darstellbar. Im Zusammenhang mit Photovoltaik gibt es aber ein Szenario, in welchem ein solcher Wert vielleicht erreicht werden könnte: die Speicherunterstützung von überdimensionierten PV-Anlagen in südlichen Gegenden, wie z.B. im Mittelmeer. In diesem Falle dient der Speicher, um den PV-Strom in Sonnenschein-lose Tageszeiten zu transferieren. (Beispiele: Zypern, Malta,...)

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Die Projektergebnisse müssen verdaut und im Rahmen der aktuellen energiewirtschaftlichen Debatte analysiert werden. Die Sandspeichertechnologie und der allgemeine Ansatz für das Anlagenkonzept werden jedenfalls weiter verfolgt.

Für die SEES-Technologie bietet sich neben dem Einsatz in Alpenseen natürlich auch der Einsatz als Speichertechnik für Regionen in Meeresnähe mit Steilküsten an. Hierzu erscheinen vor allem die Inseln Malta und Zypern besonders attraktive Einsatzgebiete zu sein. Bezüglich Malta und Zypern wurden bereits Kontakte zu lokalen Partnern geknüpft, und auch Anbahnungsgespräche mit möglichen Industriepartnern wurden initiiert.

Obwohl wir ursprünglich dachten, die Realisierung einer Demo-Anlage in einem Alpensee wäre einfacher, so scheinen aufgrund der energiewirtschaftlichen Situation in Mitteleuropa die wirtschaftlichen Randbedingungen in Zypern oder Malta aktuell wesentlich vorteilhafter als in Mitteleuropa zu sein. Dies ändert aber nicht die Aussage, dass das SEES Konzept bei entsprechenden energiewirtschaftlichen Randbedingungen einen substantiellen Beitrag zur Stromspeicherung in Österreich leisten könnte.

Weitere Forschungsarbeiten betreffen einerseits die Demonstration der Sandwärmespeicheranlage, andererseits die Demonstration des Unterwasser-Druckluft-Behälters.

Die Demonstration des Sandwärmetauschers ist bereits am Laufen und wird im Rahmen des Comet-Projektes GSG im Jahre 2015 erfolgen.

Eine Demonstration des Unterwasser-Druckluft-Behälters wäre sinnvoll, ist aber getrennt vom Kompressor und dem Gesamtanlagenkonzept nicht so einfach zu realisieren. An diesem Punkt wird zum Zeitpunkt der Berichtslegung gearbeitet.

## 6 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] IEA, *World Energy Outlook 2013*, International Energy Agency (IEA) Paris, Frankreich (2013)
- [2] European Commission Directorate-General for Energy D, *The future role and challenges of Energy Storage*, Brüssel (2012)
- [3] Albrecht, U., Landinger, H., & Weindorf, W. (2012). Erzeugungspfadanalyse Power to Gas; Kosten und Wirkungsgrade verschiedener Nutzungspfade im Vergleich. *Ergebnispräsentation · Strategieplattform Power to Gas*. Berlin: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.
- [4] Drury, E., Denholm, P., & Sioshansi, R. (2011). The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets. *Energy* , 36, S. 4959-4973.
- [5] Fertig, E., & Apt, J. (2011). Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT. *Energy Policy* , 39, S. 2330-2342.
- [6] Hartmann, N., Eltrop, L., Bauer, N., Salzer, J., Schwarz, S., & Schmidt, M. (2012). *Stromspeicherpotentiale für Deutschland*. Stuttgart: Zentrum für Energieforschung Stuttgart.
- [7] Kloess, M. *Electric storage technologies for the future power system - An economic assessment*. Vienna.
- [8] Madlener, R., & Latz, J. (2011). Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power. *Applied Energy* .

## 7 Anhang

Kein Anhang im publizierbaren Endbericht

## 8 Kontaktdaten

Projektleiter: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider  
Institut für Energietechnik und Thermodynamik,  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN  
Getreidemarkt 9, 1060 Wien  
+43/1/58801302301  
markus.haider@tuwien.ac.at  
<http://www.iet.tuwien.ac.at/>

weitere Projekt- bzw. Kooperationspartner:

ENRAG GmbH  
STRABAG Energietechnik GmbH  
Österreichische Bundesforste AG)