

ENDBERICHT

FFG Projektnummer	853662	eCall Antragsnummer	6165666
Kurztitel	Buoyant Energy	FörderungsnehmerIn	Universität Innsbruck, AB Wasserbau
Bericht Nr.	1	Berichtszeitraum	05.2016 – 10.2017 (inkl. 6 Monate Projektverlängerung)
Bericht erstellt von	Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Bernd Steidl		

Hinweise: Richtwert für den Umfang: 10-40 Seiten, als pdf im eCall hochladen!

1. Ziele und Ergebnisse

Hauptziel des vorliegenden Sondierungsprojektes war die Bewertung des Potentials und der Erfolgsaussichten des Buoyant Energy (BE) Energiespeicherkonzepts. Es galt insbesondere zu zeigen, dass das Grundkonzept von BE technisch sowie wirtschaftlich zukunftsfähig ist und sich für Industriepartner als interessant und attraktiv erweist um in den grünen Stromspeicher zu investieren. Wie sich im Zuge der Untersuchungen herausgestellt hat, zeigt sich das BE-Konzept als äußerst ortsflexible, geometrieflexible, multifunktional nutzbare und adaptierbare Energiespeicherlösung. Aktuell kann kein anderer vergleichbarer Energiespeicher derart viele Vorteile wie BE in einer Lösung vereinen.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Zielsetzungen die dem Förderungsvertrag zugrunde liegen näher eingegangen.

Ziel 1: Identifizierung des erfolgversprechendsten BE-Konzepts

Wie aus dem Antrag hervorgeht, sollen zwei unterschiedliche BE-Konzepte Variante A, eine sogenannte „schwere“ Version und Variante B, eine sogenannte „leichte“ Version auf ihre Eignung hin untersucht werden. Insbesondere gilt es eine grundlegende Aussage über die Möglichkeit einer ökonomischen Umsetzung der vorgeschlagenen Energiespeichervarianten zu tätigen bzw. jene Variante mit den besten Erfolgsaussichten zu identifizieren.

Variante A betreffend konnte anhand einer Literaturstudie gezeigt werden, dass sowohl hinsichtlich des Bauverfahrens als auch in Bezug auf materialtechnologische Aspekte auf ein solides Repertoire an vorhandenem Wissen der offshore Industrie (Gravity Based Structures, Tension Leg Structures) sowie zeitgenössischer architektonischer Projekt (Floating Houses in IJburg, IBA Dock Hamburg) zurückgegriffen werden kann.

Insbesondere die geringe Speicherkapazität von Variante A (schwerer BE-Version), als Folge der geringen Druckhöhendifferenz zwischen innerem und äußerem Reservoir, haben zu Beginn das Konzept als unwirtschaftlich erscheinen lassen. Eine durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

hat jedoch gezeigt, dass sich diese Variante als äußerst Konkurrenzfähig zu anderen, vergleichbaren Speichertechnologien erweist. Dies gilt für den Fall, dass die Plattform des Speichers sowie Teile des inneren Reservoirs multifunktionell genutzt werden und somit beispielsweise als urbane Fundamente sich ins Meer ausdehnender Städte verstanden werden. In Anbetracht, dass weltweit ein Großteil der Megacitys Küstenstädte sind, sie eine sehr hohe Siedlungsdichte kombiniert mit rasantem Bevölkerungswachstum aufweisen und zudem mit der Gefahr des Meeresspiegelanstiegs konfrontiert sind¹, erscheint BE als Alternative die nicht nur unter ökologischen sondern auch aus energetischen und gesellschaftlichen Aspekten großes Potential aufweist.

Durchaus als Highlight und vor allem auch als Ansporn für die Weiterentwicklung dieser BE-Variante kann die Philosophie der Niederländer – nicht gegen sondern mit dem Wasser zu leben – angesehen werden. Anstatt stetig wachsender Deiche wird hier auf schwimmende Urbanstrukturen gesetzt (z.B. Amphibienhäuser im gelderländischen Maasbommel²). Dass globaler Bedarf (Thailand, Vietnam, Australien, USA) an solch innovativen Lösungsansätzen besteht ist bekannt. Die Kombination mit ebenso erforderlichen Energiespeichern zur sicheren Energiewende ist jedoch noch einzigartig.

Da die grundlegende Variante B (leichtes BE-Konzept), insbesondere von einem geringen Konstruktionseigengewicht lebt (je leichter, desto höher der hydrostatische Druck, desto höher die Speicherkapazität) entfällt hier die Möglichkeit der Bebauung mit urbanen Strukturen. Dies bedeutet, dass jener Aspekt, der Variante A trotz geringer Speicherkapazität ökologisch sehr attraktiv werden lässt hier nicht anwendbar ist. Auch die Ausführung des Schwimmkörpers aus hochfestem Leichtbeton (Trockenrohdichte $800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{Tr} \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ³), kann die geringe volumetrische Energiedichte und somit eine wirtschaftliche Umsetzung von BE-Variante B als rein hydraulischen Energiespeicher nicht deutlich bessern.

Da eine leichte Variante jedoch im Offshore-Bereich (bei geringen Wassertiefen) durchaus von Interesse sein könnte, galt es zu prüfen ob bestehendes Konzept soweit angepasst werden konnte um in der ökonomischen Begutachtung zu bestehen. Dies bedeutet, eine deutliche Steigerung der Speicherkapazität bei gleichzeitiger drastischer Gewichtsreduktion. In Anbetracht der durchgeführten Studien erweist sich eine mögliche Textile Variante der BE-Speicherlösung in Kombination mit Druckluftspeicherung als äußerst vielversprechend. Nicht nur dass entsprechend ersten Untersuchungen eine überaus deutliche Steigerung der Speicherkapazität erzielt werden kann (Faktor 10, siehe AP 2) sondern dass durch die Verwendung geeigneter Membranmaterialien (z.B.

¹ Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLoS ONE*, 10(3), e0118571. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>

² Podewils Ch. (2005). Die Niederlande und das Wasser – XV Wohnen auf dem Wasser. Westfälische Wilhelms-Universität (WWU Münster), NiederlandeNet – Zentrum für Niederlande-Studien. Aktualisiert: Keim D., Juni 2014. <https://www.uni-muenster.de/NiederlandeNet/nl-wissen/geographie/vertiefung/wasser/fluesse.html>, abgerufen 12.01.2018.

³ Müller S. H., Linsel S., Garrecht H., Wagner J.-P., Thienel K.-Ch. (2000). Hochfester konstruktiver Leichtbeton – Teil 1: Materialtechnologische Entwicklungen und Betoneigenschaften. *Beton- und Stahlbetonbau* 95.7. 2000. S 392-401.

Vectran™ NT, $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$, Längszugfestigkeit = 1,1 GPa, siehe AP 2) das Konstruktionsgewicht nur mehr eine untergeordnete Rolle spielt. Die Vorteile einer flexiblen Ausführung der Konstruktion des BE-Speichers liegen auf der Hand. Durch die Transportmöglichkeit kann der Speicher in nationalen Textilbetrieben mit entsprechendem Know-how (z.B. Vorarlberg) produziert und an Interessenten weltweit ausgeliefert werden. Das Verschiffen an den geplanten Einsatzort, das einfache Aufstellen sowie Standortwechsel können als weitere Vorteile einer solchen Lösung genannt werden. Verglichen mit konkurrierenden hydraulischen Speichern ist vor allem der mögliche Einsatz in Bereichen niedriger Meerestiefen, wie sie an den aktuellen Standorten industrieller Offshore-Anlagen in der Nordsee vorzufinden sind⁴, hervorzuheben.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Ziel der Identifizierung eines geeigneten BE-Konzeptes erreicht wurde und zugunsten der schweren Variante A ausfällt was insbesondere auf die nahezu unbegrenzten Möglichkeiten der multifunktionellen Nutzung zurückzuführen ist. Wegen der zu geringen Speicherkapazität bezogen auf den Fertigungsaufwand scheidet Variante B aus. Es ist jedoch festzuhalten die Voruntersuchungen einer, den geforderten Bedürfnisse besser entsprechenden, leichten BE-Speicherlösung sich als sehr vielversprechend erweisen. Ob sich dies in einer detaillierteren Betrachtung bestätigt, war nicht Teil des vorliegenden Projekts und wurde somit nicht weiter untersucht. Es besteht jedoch klares Interesse dies in einem weiteren Forschungsvorhaben, mit geeigneten Partner näher zu prüfen.

Ziel 2: Entwicklung eines lagestabilen Schwimmkörpers

Ziel des vorliegenden Arbeitspaketes war die Bemessung des Schwimmkörpers für eine optimierte nutzbare Fallhöhe sowie die Erbringung des Nachweises der Schwimmstabilität unter Berücksichtigung dynamischer Einwirkungen mittels numerischer Simulation.

Da das BE-Speicherkonzept unterschiedliche Arten der Ausführung erlaubt war insbesondere die Frage nach der maximalen Speicherkapazität bzw. den Randbedingungen zum Erreichen dieser eine der ersten Fragen die es zu beantworten galt. Bezogen auf Variante A beispielsweise, kann der Schwimmkörper entweder sehr schwer ausgebildet werden und somit eine große Druckhöhe bei gleichzeitig geringem Füllvolumen bieten oder der Schwimmkörper wird sehr leicht ausgeführt. Letzteres bedingt zwar eine geringe Druckhöhe jedoch wird eine größeres Füllvolumen geboten. Wie gezeigt werden konnte, stellt sich bei einem idealisierten BE-Körper das Maximum der erreichbaren Speicherkapazität genau dann ein, wenn bei einem Füllgrad von 50 % des inneren Reservoirs, der Körper gerade noch nicht untergeht. Dies bedeutet, dass genau das Mittelmaß der oben angeführten Extremwertbetrachtung das Optimum an erzielbarer Speicherkapazität liefert. Die durchgeführten statischen Stabilitätsbetrachtungen, als Vorstudie der Schwimmstabilität für die dynamischen Untersuchungen, hat sehr gut verdeutlicht, welche konstruktiven Maßnahmen

⁴ Jeffrey, H., & Sedgwick, J. (2011). ORECCA European offshore renewable energy roadmap. Edinburgh: Offshore Renewable Energy Conversion Platform Coordination Action) Project.

geeignet sind um den negativen Einfluss des inneren Wasservolumens auf die Schwimmstabilität zu minimieren. Natürlich kann dies keine dynamische Betrachtung ersetzen, doch war es als Grundlage für nachfolgende Untersuchungen und für das prinzipielle Verständnis durchaus hilfreich.

Im Zuge der dynamischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die numerischen Simulationen gegebener Problemstellung (schwimmender Tank mit innerem Wasserspiegel) sich als deutlich komplexer und schwieriger erwiesen haben als vermutet. Insbesondere Validierungsexperimente an physikalischen Modellversuchen und die dabei gewonnenen Erfahrung fehlen um die Ergebnisse der Numerik ausreichend zu prüfen und abzusichern. Notwendig wäre dies jedoch vor allem zur finalen Modellbildung die wiederum den Grundstein für die Stabilitätsanalyse sowie die Bemessung der Verankerung darstellt. Insofern konnte letzteres noch keiner genaueren Betrachtung unterzogen werden. Hinsichtlich der Geometrie konnte dennoch in Erfahrung gebracht werden, dass rotationssymmetrische Körper deutliche Vorteile bei dynamischer Belastung wie z. B. Wellen aufweisen. Dies nicht nur bezogen auf die numerischen Berechnungen sondern ebenso auf die Schwimmstabilität unter dynamischer Belastung.

Ziel 3: Wirkungsgradoptimierung durch Entwicklung eines geeigneten Maschinenkonzeptes

Vorrangiges Ziel ist es durch eine abgestimmte Kombination aus Pumpen und Turbinen die Systembedingten unterschiedlichen Leistungsbereiche mit möglichst hohem Wirkungsgrad abzudecken. Wie im Zuge der Untersuchungen festgestellt werden konnte ist der kombinierte Einsatz einer einzelnen Pumpe mit Turbine nicht zielführend. In Abhängigkeit der Größe des Energiespeichers ist auf jeden Fall die Kombination mehrerer Maschinensätze notwendig um sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht interessante Wälzwirkungsgrade zu erhalten.

In Anbetracht des Einsatzes der Maschinenkomponenten in maritimer Umgebung muss auf einen besonderen Schutz der Komponenten vor den Einwirkungen des Salzwassers auf das Material geachtet werden. Die Verwendung von z. B. Edelstahl oder Aluminiumbronze, als seewasserbeständiges Material wird empfohlen. Erfahrungen in diesem Bereich sind vorhanden sodass man von einem gewissen Stand der Technik sprechen kann.

Ziel 4: Kombinationsmöglichkeiten mit schwimmenden Mehrzweckplattformen

Aktuell sind offshore Windenergieanlagen (WEA) ausschließlich in Bereichen mit verhältnismäßig geringen Wassertiefen vorzufinden. Vor allem durch die Hoffnung deutlich kürzerer Bewilligungsverfahren besteht jedoch das Interesse in Gebiete mit großen Wassertiefen vorzudringen. Aufgrund der hohen Flexibilität möglicher geometrischer Ausgestaltungen des BE-Speichers bietet sich die Integration des Energiespeichers in die Schwimmkörper der Windkraftanlagen an. Ein weiteres Ziel des Sondierungsprojektes war es somit die generelle Kombinationsmöglichkeit und die grundlegende Sinnhaftigkeit dessen zu prüfen.

Wie anhand der Ergebnisse der hier vorgestellten Kombinationslösung einer 5 MW Windkraftanla-

ge mit dem BE-Konzept interpretiert werden kann, eignet sich der Energiespeicher sehr gut zur Glättung der fluktuierenden Leistungsabgabe der Windturbine über die Dauer weniger Stunden (max. untersuchtes Glättungsintervall 3 h) und somit zum Einsatz als Kurzzeitspeicher.

Als Highlight ist hier hervorzuheben, dass ein Großteil der Speicherkapazitätsdaten innerhalb von ± 600 kWh (betrachtete Glättungsdauer 1 h, 2 h und 3 h) liegen. Diese erforderliche Speicherkapazität ist somit auch für das BE-Konzept, trotz der verhältnismäßig geringen volumetrischen Energiedichte, umsetzbar.

Natürlich steigt in Bereichen mit zunehmender Meerestiefe auch die Anzahl an konkurrierenden Speicherlösungen (z.B. StEnSea) jedoch kann BE hier vor allem durch den verhältnismäßig geringfügigen Mehraufwand bei der Herstellung und Verankerung, im Vergleich zur Erstellung einer WEA ohne Speicherlösung, punkten.

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anf.	Ende	Anf.	Ende	
1	Projektmanagement und Dissemination	100%	03/16	02/17	03/16	10/17	Verbreitung der Projektergebnisse und werben neuer Partner aus Wirtschaft und Forschung für die industrielle Forschung.
2	Konzeptentwicklung	100%	03/16	06/16	10/16	05/17	Grundlegendes Konzept zur Erhöhung der nutzbaren Fallhöhe für Typ A und Typ B untersucht. Bestimmung und Wahl des effizientesten BE-Systems zur weiteren F&E.
3	Schwimmkörperentwicklung	100%	05/16	12/16	02/17	10/17	Durchführung der Stabilitätsuntersuchungen und Untersuchung geeigneter Bauverfahren / Verankerungssystem aufgrund fehlender Validierungsexperimente nicht untersucht.
4	Maschinentechnische Ausgestaltung	100%	04/16	12/16	03/17	10/17	Untersuchung und Bewertung verschiedener Maschinenkonzepte.
5	Kombinationsmöglichkeiten	100%	12/16	02/17	02/17	10/17	Konzept für die Kombination von BE mit schwimmender Infrastruktur bzw. mit Energieerzeugern untersucht.

Tabelle 2: Meilensteine

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basistermin	Akt. Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	Projektabschluss	28.02.2017	30.10.2017	30.10.2017	
2	Konzeptdefinition	30.06.2016	01.05.2017	01.05.2017	
3	Funktionalitätsnachweis	31.12.2016	30.10.2017	30.10.2017	
4	Maschinenausstattung	31.12.2016	30.10.2017	30.10.2017	
5	Kombinationsmöglichkeiten	28.02.2017	30.10.2017	30.10.2017	

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

AP2 Konzeptentwicklung

Rahmenbedingungen

Bereits seit einigen Jahren wird in vielen Staaten der Umstieg von konventionellen auf regenerative Energiequellen wie Wind, Sonnen, Wasserkraft oder natürliche Wärmequellen⁵ angestrebt. Bestand 1990 noch 99 % des Energiemix aus Kernkraft und fossilen Energieträgern – das letzte Prozent wurde durch erneuerbare Energie abgedeckt – hat ein starkes Umdenken stattgefunden. Themenfelder wie Klimaschutz, Nachhaltigkeit, Vermeidung von CO₂ Emissionen, Umgang mit radioaktivem Müll, AKW Katastrophen (z.B. Fukushima 2011), etc. haben an Stellenwert in der Gesellschaft und in der Politik gewonnen und unter anderem im Strommarkt hin zur vermehrten Nutzung von erneuerbarer Energie (EE) geführt⁶. Da Strom nicht direkt gelagert werden kann (nur durch Umwandlung in eine andere Form) und bedingt durch die fluktuierende Erzeugungscharakteristik regenerativer Energieträger (Sonne, Wind) ist die Bereitstellung großer Stromspeicher eine notwendige Voraussetzung zur erfolgreichen Umsetzung dieses Vorhabens. Konnte das Energieangebot bis jetzt durch fossile oder nukleare Energieträger dem Bedarf angepasst werden, findet mit dem Umstieg auf regenerative Energieträger eine zeitliche Entkoppelung zwischen der Erzeugung und dem Verbrauch statt⁷. Das Energiedargebot ist somit nicht mehr bedarfsabhängig, sondern an die Erzeugungscharakteristik regenerativer Energiequellen gebunden. Zwar können kurzfristige Schwankungen einzelner, dezentral situierter EE Anlagen durch deren weite räumliche Verteilung in der Gesamtheit⁵ kompensiert werden, die Aufrechterhaltung der vorhandenen Netzqualität sowie die Vermeidung von „Blackouts“ oder „dunklen Flauten“ ist jedoch nur mit entsprechenden Speichermöglichkeiten zu erzielen⁸.

Ein bekanntes und erfolgreiches Konzept stellen hierbei Pumpspeicherkraftwerke (PSW) dar. Neben den hohen Wirkungsgraden zwischen 70 % und 80 %^{8,9}, kurzen Startzeiten, hoher Zuverlässigkeit und geringem Wartungsaufwand etc. sind sie aktuell die einzige Möglichkeit zur großmaßstäblichen Stromspeicherung¹⁰. Dies zeigt unter anderem auch der hohe Anteil der weltweit instal-

⁵ Diekmann B., Rosenthal E. (2014): Energie – Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, ISBN 978-3-658-00500-9, DOI 10.1007/978-3-658-00501-6, S.4.

⁶ Graeber R. D. (2013): Handel mit Strom aus erneuerbaren Energien. Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, ISBN 978-3-658-03641-6, DOI 10.1007/978-3-658-03642-3, S.24.

⁷ Nacht T., Stigler H. (2014): Die Erhöhung des Wertes erneuerbarer Einspeisung durch Pumpspeicherkraftwerke. 13. Symposium Energieinnovation, Austria, Graz.

⁸ Oertel D. (2008): Energiespeicher – Stand und Perspektiven. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag (TAB). Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“, <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf>, S.4,5.

⁹ Sterner M., Stadler I. (2014): Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-37379-4, DOI 10.1007/978-3-642-37380-0, S.42,480.

¹⁰ Brauner G. (2013): Die Bedeutung kurzfristiger und langfristiger Speichertechnologien in der Energiewende. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, journal article, Vol. 130(6), S.148-152.

lierten Energiespeicherkapazität von über 99 %¹¹. PSW eignen sich neben der kurzfristigen und langfristigen Energiespeicherung (Tages-, Wochen-, Monats- und Jahresspeicher)⁹ auch zur bedarfsgerechten Abgabe. Insofern können sie einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilisierung bei schwankendem Angebot liefern. Ein wesentlicher Nachteil bei Pumpspeicherkraftwerken ist jedoch die eingeschränkte Anzahl an möglichen Standorten, da diese stark von den topographischen Gegebenheiten abhängig sind. Insbesondere für größere, dezentral situierte EE Anlagen wie z. B. Windparks ist somit eine ortsnahe Speicherlösung in Form von PSW nicht umsetzbar.

Buoyant Energy (BE), ein von der Universität Innsbruck entwickelter und patentierter Energiespeicheransatz (EU Patent EP 2681445 B1 und US Patent US 9617969 B2), stellt einen Lösungsansatz dar, der die Vorteile und das nationale Know-how im Pumpspeicherbereich nutzt und gleichzeitig eine hohe Geometrie- und Standortflexibilität gewährleistet. Zudem stellt die annähernd konstante Druckhöhe während des Ein- und Ausspeichervorgangs einen wichtigen Kern des Konzeptes dar. Hinsichtlich genannter Punkte sind jedoch gewisse Grundüberlegungen zu berücksichtigen:

- Die Druckhöhendifferenz zwischen den beiden Wasserspiegeln hat einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten. Beispielsweise ergibt sich die Speicherkapazität einer Betonstruktur mit $50\text{ m} \times 50\text{ m}$, einer Höhe von 38 m ($34,000\text{ to}$) und einem angenommenen Zusatzgewicht von $36,000\text{ to}$ auf der Speicherplattform zu 1 MWh (siehe Abbildung 1a). Dieselbe Energiemenge könnte jedoch auch in anderen rechteckigen (Abbildung 1b) oder zylindrischen Strukturen (siehe Abbildung 2) gespeichert werden.

Zur Verdeutlichung gängiger und mit BE vergleichbarer Dimensionen im Offshore-Bereich sind in Tabelle 1 exemplarisch die Abmessungen und das Gewicht ausgewählter Hochspannungskonverter-Plattformen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ) der Nordsee angeführt.

Tabelle 1: Dimension exemplarisch ausgewählter HGÜ-Anlagen in der Nordsee.

Name	Standort	Dim. excl. Jacket			G_{tot} [t]	G_{topside} [t]	Max P [MW]	Firma	Status
		l [m]	b [m]	h [m]					
BorWin 2	Nordsee	72	51	25	16000	11500	800	Siemens	2015
HelWin 1	Nordsee	75	51	28,5	12000	11000	576	Siemens	2015
HelWin 2	Nordsee	98	42	26	18000	10500	690	Siemens	2015
SylWin1	Nordsee	83	65	26	25000	15000	864	Siemens	2015

G... Gewicht

- Die Druckhöhe während des Ein- und Ausspeicherzyklus verhält sich bei gedrungenen Schwimmstrukturen, d.h. Strukturen mit großer Grundfläche A (vgl. Abbildung 1 und 2b) nahezu konstant. Hingegen kommt es bei langen, schlanken Geometrien mit großer Eintauchtiefe

¹¹ Rastler D. (2010): Electricity Energy Storage Technology Options. Electric Power Research Institute (EPRI), Report, Palo Alto, California, S.ix.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

zu einer deutlichen Variation während des Speicherprozesses.

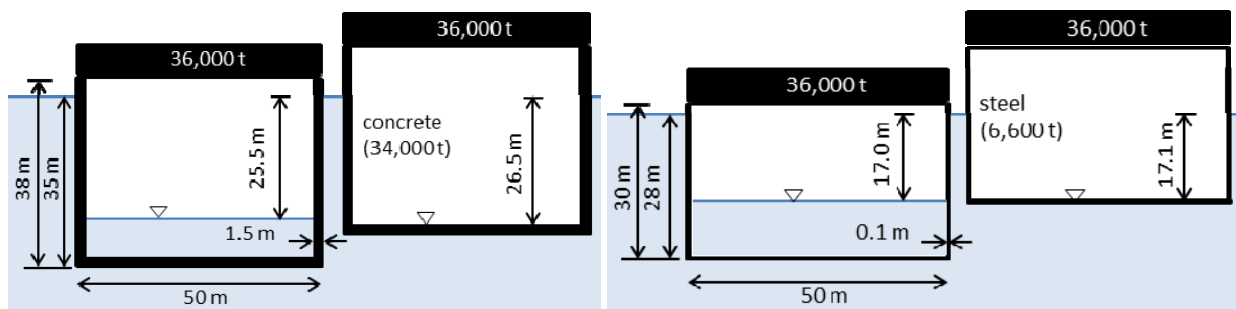


Abbildung 1: Geometrien für rechteckige Schwimmkörperstrukturen mit Zusatzlast (Energiespeicherkapazität ca. 1 MWh). Pumpe/Turbine nicht eingezeichnet. (a) Beton und (b) Stahlstruktur.

- Je dünner die Wandstärke der Unterwasserschwimmstruktur (Verhältnis der Gesamtgrundfläche zu jener des inneren Reservoirs liegt nahe bei 1) desto gleichmäßiger bleibt die Drückhöhe während dem Durchlaufen des Speicherzyklus.
- Unter der Annahme eines idealen Schwimmkörpers (Gesamtgrundfläche des Speichers entspricht jener des inneren Reservoirs) wird die maximale Energiespeicherkapazität dann erreicht, wenn bei maximaler Eintauchtiefe des Speichers das innere Reservoir halb voll mit Wasser gefüllt ist.
- Zusätzliche Auflast z. B. in Form von Infrastruktur auf dem Deck der Speicherplattform erhöht die potentielle Energie und somit die Speicherkapazität.

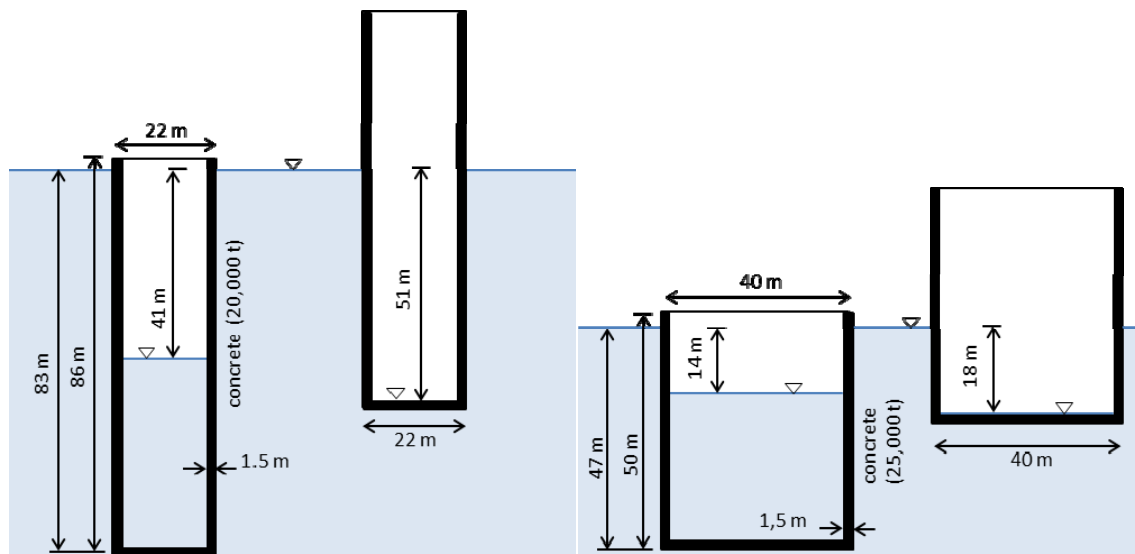


Abbildung 2: Zylindrische Geometrie schwimmender Strukturen (Energiespeicherkapazität ca. 1 MWh). Pumpe/Turbine nicht eingezeichnet. (a) schlanke Struktur (b) niedrige und weite Struktur.

Konzeptentwicklung

Das BE-Energiespeicherkonzept kann entweder als „schwere“ oder als „leichte“ Variante ausgeführt werden. Bei der „schweren“ Variante (Abbildung 3, oben), im Folgenden „Typ A“ genannt

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

wird durch das Heben und Senken eines hohlen, schwimmenden Körpers, beispielsweise aus Beton, elektrische Energie in potentielle Energie umgewandelt und umgekehrt¹². Bei entladenem BE Speicher ist das innere Reservoir bis zu einem gewissen Teil mit Wasser gefüllt. Durch das Auspumpen des Reservoirs hebt sich der Körper und Energie wird gespeichert. Zur Stromerzeugung hingegen wird der Innenraum geflutet und der Körper senkt sich wieder ab. Das einströmende Wasser treibt während dieses Vorgangs eine Turbine an, wodurch Strom erzeugt wird.

Bei *Typ B*, der „leichten“ Variante (Abbildung 3, unten), erfolgt die Stromspeicherung und Produktion umgekehrt. Zur Speicherung wird das innere Reservoir, das aufgrund der darunter angeordneten Luftkammern über dem Wasserspiegel situiert ist, mit Wasser (Pumpbetrieb) gefüllt und der Körper senkt sich ab. Durch die Wasserspiegeldifferenz zwischen innen und außen kann beim Entleeren des Reservoirs eine Turbine angetrieben und Strom erzeugt werden.

Der wesentliche Unterschied beider Typen zeigt sich in der Lage der Wasserspiegel zueinander. Ist bei *Typ A* der Wasserspiegel im inneren Reservoir immer unterhalb des umgebenden (Meer) angeordnet verhält es sich bei *Typ B* genau umgekehrt. Ebenso konträr verhält es sich mit dem Einfluss des Konstruktionsgewichts. Lebt die schwere Variante von großen Massen ist bei *Typ B* ein möglichst geringes Eigengewicht in Bezug auf die Speicherkapazität von Vorteil.

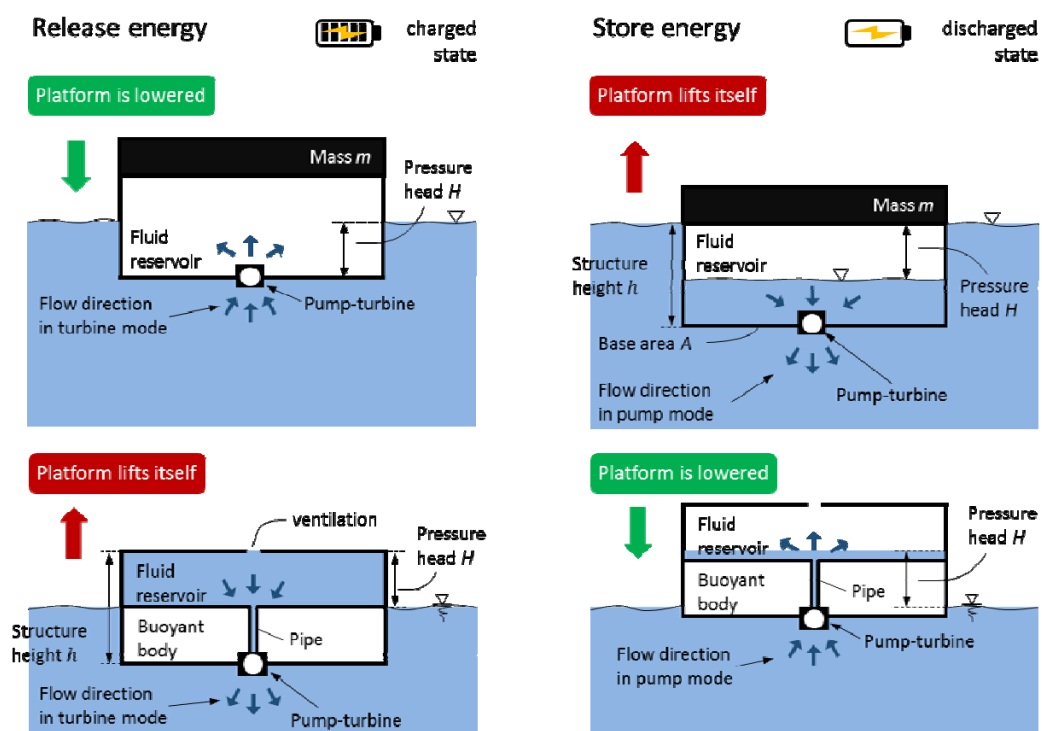


Abbildung 3: Bild oben: „schweres“ BE-Konzept (Typ A). Bild unten: „leichtes“ BE-Konzept (Typ B).

¹² Klar, Robert, Aufleger, Markus, Sant, Tonio, Neisch, Valerie, Farrugia, Robert N. (2015): Buoyant Energy – Balancing wind power and other renewables in Europe's oceans. Offshore Energy and Storage Symposium 2015 (OSSES 2015), Edinburgh, UK. Proceedings, Edinburgh: IET Renewable Power Generation (RPG).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Unabhängig ob *Typ A* oder *Typ B* drängt sich die Frage nach der maximalen Speicherkapazität auf und welche Bedingungen erfüllt werden müssen um diese auch zu erreichen. Ist es z. B. im Falle von *Typ A* ein sehr schwerer BE-Körper mit großer Druckhöhendifferenz jedoch einem geringen Wasservolumen beim Laden/Entladen oder ein sehr leichter BE-Körper mit geringer Druckhöhe jedoch einem großen Wasservolumen beim Laden/Entladen (siehe Abbildung 4).

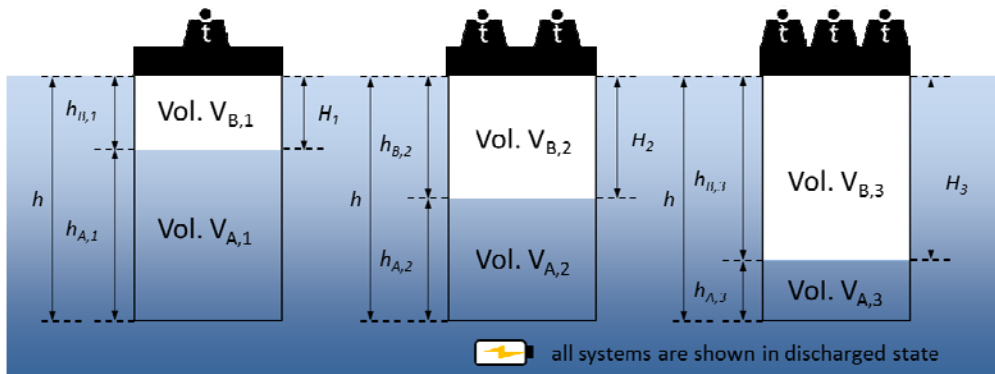


Abbildung 4: *Typ A* - Diverse Ausführungen des BE-Speichers zur Ermittlung der optimalen Speicherkapazität.

Zur Beantwortung der Frage wurde ein idealer Schwimmkörper, bestehend aus nahezu unendlich dünnen Seitenwänden und dem Konstruktionseigengewicht als, über dem Meeresspiegel konzentriert angeordnete Masse, untersucht. Nachfolgende Gleichungen 1 bis 5 beschreiben die Randbedingungen und die funktionellen Beziehungen die ein solches ideales BE-System charakterisieren. Die verwendeten Parameter sind die Dichte des Wassers ρ_w , die Erdbeschleunigung g , die Druckhöhe H , den Abfluss Q , die Füllzeit t_{max} , die Leistung P und die Speicherkapazität W . Der Wirkungsgrad η wird in nachfolgenden Gleichungen nicht angeführt.

$$A = const. \quad | \quad Q = const. \quad | \quad h = h_A + h_B = const. \quad (1)$$

$$V_A + V_B = A * h = A * (h_A + h_B) \quad \text{mit: } V_A = A * h_A \text{ und } V_B = A * h_B \quad (2)$$

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

$$P = \rho_w * g * H * Q \quad (4)$$

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

Die „optimale“ Höhe $h_{A,i}$ kann aus Gleichung 6 und die damit erzielbare maximale Speicherkapazität aus Gleichung 7 bestimmt werden.

$$dW/dh_A = 0 \rightarrow h - 2 * h_{A,opt} = 0 \rightarrow h_{A,opt} = h/2 \quad (6)$$

$$W_{opt}(t_{max}) = \rho_w * g * A * h^2/4 = m * g * h/2 \quad (7)$$

Wie das Ergebnis zeigt, wird die optimale Speicherkapazität dann erreicht, wenn Gleichung 7 erfüllt ist. D.h. im Falle von *Typ A* und unter der Annahme eines idealisierten BE-Systems, dass in

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

entladenen Zustand das innere Reservoir exakt bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt ist und der Speicher gerade noch nicht untergeht. Als Folge davon ist im geladenen Zustand bei entleertem inneren Reservoir der BE-Speicher exakt bis zur halben Reservoirhöhe h eingetaucht. In Anlehnung an die Möglichkeit der Plattformbebauung des *Typs A* ergibt sich somit das optimale Zusatzgewicht zu $G_{zu,opt} = (A \cdot h/2) \cdot \rho_w - G_{BE,konstr.}$. Dies entspricht jenem Gewicht das zusätzlich zum Konstruktionsgewicht $G_{BE,konstr.}$ aufgebracht werden muß um die optimale Eintauchtiefe im geladenen Zustand zu erreichen. Erfolgen kann dies beispielsweise in Form von städtebaulicher Infrastruktur (z. B: Wohn- oder Gewerbebebauung).

Für den Fall, dass die Gewichtserhöhung aus Gründen wie z. B. der Sicherheit oder der Umsetzbarkeit nicht durch Bebauung der Plattform möglich ist, könnten ebenso Vorkehrungen direkt am bzw. zusätzlich zum Verankerungssystem getroffen werden. Beispielsweise könnte *Typ A* durch ein System aus Zugfedern ergänzt werden (Abbildung 5, oben) werden. Alternative könnten ebenso Tauchbojen (Auftriebskörper) die über eine am Boden umgelenkte und mit dem BE-Speicher verbundene Seilkonstruktion verbunden sind (Abbildung 5, unten) zur Steigerung der Speicherkapazität dienen. Als positiver Nebeneffekt dieser Variante ist die zusätzliche horizontale Lagestabilisierung zu nennen. Wenn auch nicht als konstruktiv gesetzte Maßnahme sondern als ökologisch bedingte Gegebenheit ist der Bewuchs des Speichers mit Muscheln und ähnlichem zu nennen, der nicht nur als neuer Lebensraum für Fische dient, sondern auch zur Gewichtssteigerung und somit der Speicherkapazität führen kann.

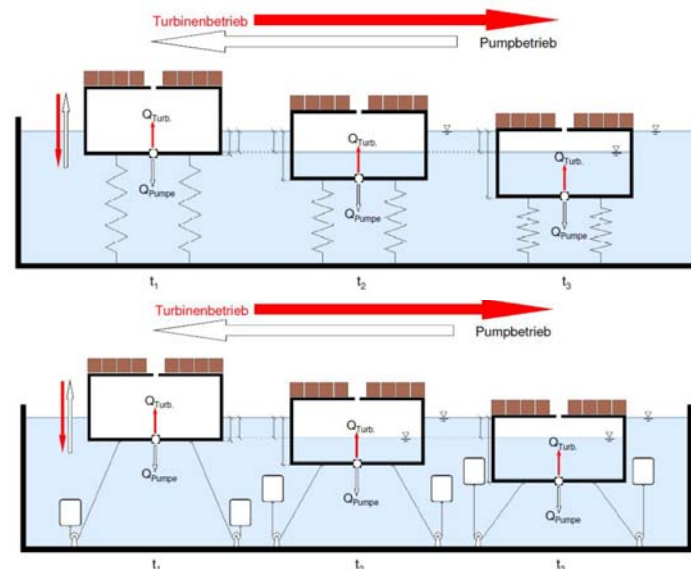


Abbildung 5: BE-Technologie gekoppelt mit: Zugfedern (oben); zusätzlichen Auftriebskörpern (unten).

Bezogen auf *Typ B* wird die maximale Speicherkapazität unter derselben Bedingung (siehe Gleichung 1 bis 7) erreicht. Folglich ist diese für ein idealisiertes BE-System dann wiederum gegeben, wenn sich die Höhe des Flüssigkeitsreservoirs und des Luftkörpers einander entsprechen und beide jeweils die halbe Strukturhöhe h aufweisen (siehe Abbildung 6). Die Druckhöhe H ergibt

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

sich dann ebenfalls zu $H = h_A = h_B = h/2$.

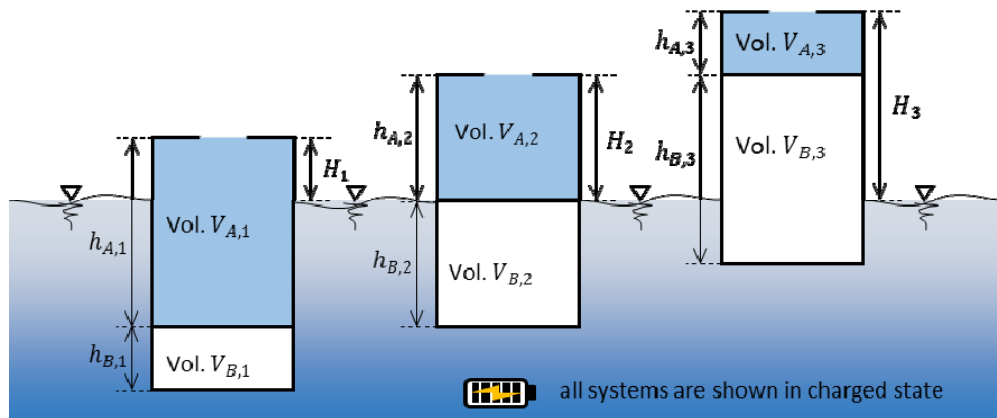


Abbildung 6: Typ B – Diverse Ausführungen des BE-Speichers zur Ermittlung der optimalen Speicherkapazität.

Abbildung 7 zeigt die optimale Speicherkapazität idealisierter BE-Systeme in Abhängigkeit der Grundfläche A und der Höhe h des Speichers.

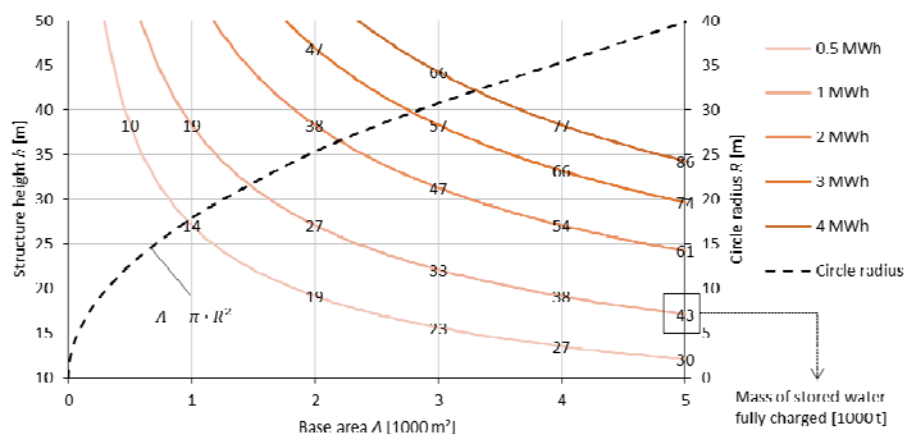


Abbildung 7: Optimale Energiespeicherkapazität des idealisierten BE-Systems als Funktion der Höhe h und der Grundfläche A .

In Tabelle 2 erfolgt eine Gegenüberstellung der volumetrische Energiedichte $\rho_{vol} = W_{opt}/V = W_{opt}/(A * h_A)$ des BE-Speicherkonzepts mit alternativen Energiespeichern. Wie daraus zu erkennen ist, weist BE aufgrund der sehr geringen zur Verfügung stehenden Druckhöhe schlechtere Werte auf als andere Speichertechnologien auf. Der Umstand, dass vergleichbare Speicher erst durch den Einbau in großen Gewässertiefen diesbezüglich gute Werte aufweisen sollte bei der Betrachtung jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Dennoch ist festzuhalten, dass angesichts der Forderung einer ökonomischen Umsetzung des Energiespeichers dies nur in Kombination mit unterschiedlichen Arten der Mehrfachnutzung, sei es durch Bebauung der Speicherplattform oder aber auch durch die Kombination/Integration in z. B. offshore Windenergieanlagen (WEA), möglich ist.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 2: Vergleich von BE mit alternativen Energiespeichern (UWCAES¹³, StEnSEA¹⁴, Gravity Storage¹⁵)

Buoyant Energy					UWCAES			StEnSEA		Gravity Storage	
Füllstand: 50 [%] / $\eta = 80$ [%]					Wasser- tiefe	pvol		Wasser- tiefe	pvol	Speicher- kapazität	pvol
l	b	h	Speicherka- pazität	pvol		isotherm	adiabatisch				
[m]	[m]	[m]	[MWh]	[kWh/m ³]	[m]	[kWh/m ³]	[kWh/m ³]	[m]	[kWh/m ³]	[GWh]	[kWh/m ³]
50	50	30	1.23	0.03	50	0.3	0.39	250	0.7	1	0.75
50	50	40	2.18	0.04	100	0.74	1.05	500	1.4	3	1.26
50	50	50	3.41	0.05	200	1.78	2.84	1000	2.8	8	1.34

pvol ... volumetrische Energiedichte

Anhand einer durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollen drei mögliche Szenarien – gut, mittel, schlecht – an einem idealisierten BE-System näher untersucht werden. Die Eingangsparameter können prinzipiell in Kostenpositionen die zur Erstellung und Instandhaltung des Speichers notwendig sind (Materialkosten, Maschinenkosten, Betriebskosten, sonstige Kosten, Nebenkosten, Verankerungskosten, Netzanschlusskosten) und in Erlöspositionen die sich durch den Betrieb des Speichers und die Vermietung der Plattformfläche (Einnahmen durch den Speicherbetrieb sowie die multifunktionelle Nutzbarkeit des Energiespeichers) ergeben, gegliedert werden. Ebenso gehen der Systemwirkungsgrad und die Anzahl der täglich durchgeführten Ein- und Ausspeicherzyklen in die Betrachtung mit ein. Die Angesetzten Parameter sind in nachstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 3: Kostenaufstellung für drei betrachtete BE-Speicherszenarien

Parameter und mathematische Symbole	Gutes Szenario	Mittleres Szenario	Schlechtes Szenario	Einheit
Spez. Pumpen-/Turbinkosten SC_{PT}	1800	2000	2200	€/kW
Betriebsdauer für einen Zyklus t_{LZ}	8	6	4	h
Spez. Betonkosten SC_{Beton}	100	125	150	€/m ³
Spez. Nebenkosten SC_N	2000	2250	2500	€/kW
Spez. Finanzierungskosten SC_F	0,08	0,10	0,12	% der Konstruktionskosten
AZ Zyklen pro Tag n_{LZ}	3	2	1	-
Systemwirkungsgrad η	80	75	70	%
Spez. O&M Kosten SC_{OM}	0,02	0,04	0,06	€/kWh
Spez. Erlös durch Multifunktionelle Nutzung SR_{multi}	200	150	100	€/m ² /a
Spez. Erlös durch Marketing SR_{direkt}	0,07	0,05	0,03	€/kWh

Zur Ermittlung der in Abbildung 8 dargestellten Diagramme wurden ein zylinderförmiger BE-

¹³ M. de Jong (2014): Commercial Grid Scaling of Energy Bags for Underwater Compressed Air Energy Storage. Proceeding of 2014 Offshore Energy & Storage Symposium, Windsor, Ontario, Canada, http://www.thin-red-line.com/140714_ThinRedLine_OSES2014.pdf, 2014.

¹⁴ H. Schmidt-Böcking, G. Luther, C. Lay, J. Bard (2013): Das Meer-Ei. Physik in unserer Zeit, 44.Jg., Nr.4, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, S.194-198, 2013.

¹⁵ Heindl Energy GmbH: Gravity Storage. <http://www.heindl-energy.com/de/der-lageenergiespeicher/idee-funktion.html>, abgerufen 12.05.2017.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Speicher mit einer maximal möglichen Eintauchtiefe von $h = 40 \text{ m}$, einer Grundfläche von $A \approx 1800 \text{ m}^2$, einer Energiespeicherkapazität von $E = 2,0 \text{ MWh}$ und einer Gesamtmasse von $m \approx 36700 \text{ t}$ für eine unterschiedliche Anzahl an Betriebsjahren n_a gemäß nachfolgenden vereinfachten Annahmen untersucht:

- Betonkosten (Struktur inkl. Verankerung): $C_B = SC_{\text{Beton}} * m / \rho_{\text{Beton}} [\text{€}]$
- Installierte Pumpen-/Turbinenleistung: $P_{PT} = 1000 * E / t_{LZ} [\text{kW}]$
- Pumpen-/Turbinkosten: $C_{PT} = P_{PT} * SC_{PT} [\text{€}]$
- Nebenkosten: $C_N = P_{PT} * SC_N [\text{€}]$
- Finanzierungskosten: $C_F = (C_B + C_{PT} + C_N) * SC_F [\text{€}]$
- Gesamtspeicherkapazität (Leben): $E_L = n_a * 365 * n_{LZ} * E / 1000 * \eta [\text{GWh}]$
- Spez. Lebenszykluskosten: $SC_{LZ} = (C_B + C_{PT} + C_A + C_F) / (E_L * 10^6) + SC_{OM} [\text{€/kWh}]$
- Gesamtlebenskosten: $CLZ = SCLZ * EL [\text{€}]$

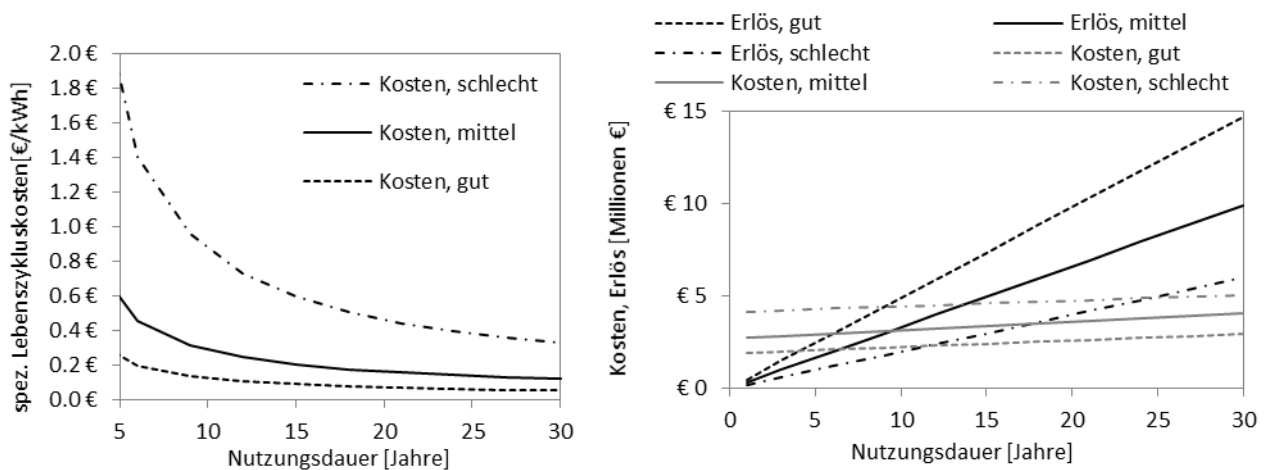


Abbildung 8: Links: Grob geschätzte Lebenszykluskosten eines multifunktional genutzten BE-Speichers (Typ A) für die drei untersuchten Szenarien. Rechts: Grobe Schätzung der Kosten und Erlöse in Abhängigkeit der Nutzungsdauer.

Der größte Teil der Lebenszykluskosten in Abbildung 8 (links) fällt auf die Betonkosten der Schwimmplattform zurück wobei erwähnt werden muss, dass für diese vereinfachte Betrachtung die Gesamtmasse des Speichers rein durch den Werkstoff Beton abgedeckt wird. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass die spezifischen Lebenszykluskosten der BE-Speicherlösung auch im schlechtesten Kostenfall und für eine betrachtete Lebensdauer von 10 Jahren mit ca. 1 €/kWh deutlich günstiger sind als bei anderen Speichertechnologien die bei ca. 10 €/kWh ¹⁶ starten. Entsprechend durchgeführter Wirtschaftlichkeitsuntersuchung variiert der Zeitpunkt ab dem die Errichtungs- und Betriebskosten des Speichers gedeckt sind und dieser gewinnbringend betrieben wird zw. ca. 5 und 25 Jahren. Auch im schlechtesten Szenario ist die Gewinnspanne, in Anbe-

¹⁶ I. Staffell, M. Rustomji (2016). Maximising the value of electricity storage. Journal of Energy Storage, 8. Jg., S. 212-225, Fig. 2. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.08.010>, 2016.

tracht einer zu erwartenden Lebensdauer von weit über 50 Jahren, sehr gut.

Die Dimension und Speicherkapazität des angesetzten BE-Energiespeichers bei vorangegangener ökonomischer Betrachtung beruht auf den Ergebnissen einer überschlagsmäßig durchgeführten energiewirtschaftlichen Betrachtung. Durchgeführt wurde diese vorrangig um einen Anhaltspunkt über die benötigte Maschinenleistung und Speicherkapazität zu Erhalten. Insofern diene sie vorrangig als Grundlage für *AP 4* weshalb hier nur kurz darauf eingegangen wird. Untersucht wurden zwei verschiedene Szenarien für den Einsatz des BE-Konzepts. In Szenario 1 erfolgte die Leistungsglättung der fluktuierenden Einspeisecharakteristik einer Windenergieanlage (WEA)^{17,18} mit angenommener Nennleistung von 10 MW für die Zeitdauer von: 1 h, 2 h, 3 h, 4 h und 6 h sowohl für einen Speicher mit begrenzter als auch für einen mit unbegrenzter Energiespeicherkapazität. Für Szenario 2 hingegen wurde die Speicherdimension und Maschinenleistung für den Tagesausgleich von 500 3-Personen-Haushalten auf Grundlage der H0 Standardlastprofile (SLP) für 2017¹⁹ ermittelt (siehe exemplarisch Abbildung 9). Da sich letzteres Szenario vor allem in Anbetracht der möglichen Mehrfachnutzung direkt am Speicher als äußerst passend erweist wurden ähnliche BE-Dimensionen wie in diesem Szenario ermittelt, herangezogen.

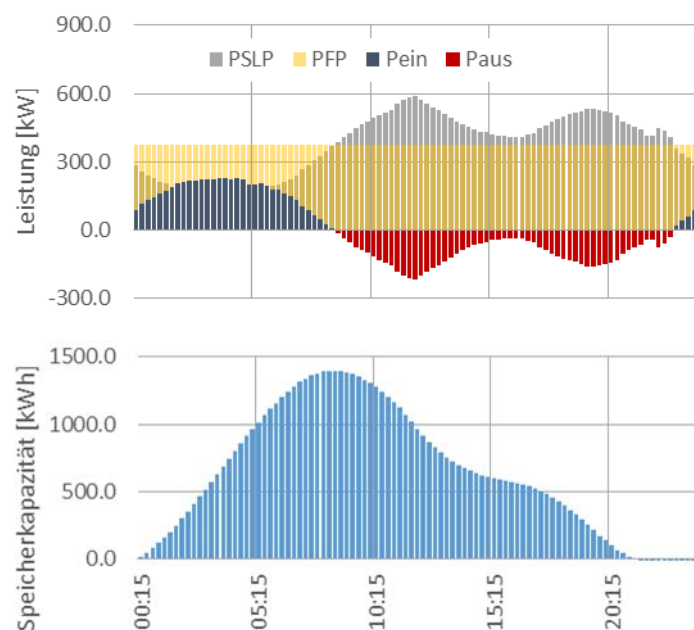


Abbildung 9: Übergangszeit Sonntag/Feiertag. Oben: H0 SLP inkl. angenommenen Leistungsfahrplan mit dem BE-Konzept (PSLP...Leistung Standardlastprofil, PFP...Leistungsfahrplan, Pein...Leistungseinspeisung, Paus...Leistungsabgabe). Unten: Verlauf der Speicherkapazität für Sonntag/Feiertag während der Übergangszeit.

Ein wesentlicher Unterschied von *Typ B* im Vergleich zu *Typ A* ist vor allem durch die Tatsache

¹⁷ Abwicklungsstelle für Ökostrom AG - OeMAG (2017): Aktive Verträge und installierte Leistung. <https://www.oem-ag.at/de/oekostromneu/installierte-leistung/>, abgerufen 24.07.2017.

¹⁸ Abwicklungsstelle für Ökostrom AG - OeMAG (2017): Aktive Verträge und installierte Leistung. <https://www.oem-ag.at/de/oekostromneu/winderzeugung/>, abgerufen 24.07.2017.

¹⁹ ED Netze GmbH (2017): Lastprofile, Temperaturtabellen – Lastprofile der ED Netze GmbH. <https://www.ednetze.de/kunde/lieferanten/lastprofile-temperaturtabellen/>, abgerufen 01.08.2017.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gegeben, dass sich bei diesem Konzept mit Zunehmendem Gewicht die Druckhöhendifferenz verringert. Insofern ist die Speicherkapazität umso größer, je geringer das Gesamtgewicht des Speichers ist. Für die ökonomische Betrachtung spielen nun zwei wesentliche Faktoren eine Rolle: die Materialkosten und der Erlös durch multifunktionale Nutzung. Die Materialkosten und der Bedarf sind stark vom Material selbst abhängig. Angenommen es kommt wieder Beton zum Einsatz (hochfester Leichtbeton), kann von einer deutlichen Materialersparnis (ca. 50 %) ausgegangen werden, was sich positiv auf die Speicherkosten auswirkt. Der Hauptfaktor für das gute wirtschaftliche Abschneiden, die Einnahmen durch multifunktionell nutzbare Infrastruktur, entfallen jedoch bei *Typ B*. Die Auswirkungen sind in Abbildung 10 (rechts) ersichtlich. Durch das Wegfallen flacht sich die Steigung der Ertragskurven stark ab, wodurch sich die Rentabilität trotz der zu Beginn geringerer Baukosten deutlich nach hinten verschiebt. Eine wirtschaftliche Nutzung des Speichers ist somit nicht gegeben. Da jedoch das leichte BE-Konzept insbesondere für offshore Windfarmen, die bis dato fast ausschließlich in Bereichen mit verhältnismäßig geringen Wassertiefen situiert sind, von Interesse sein könnte, wurden weitere Überlegungen die eine bessere Anpassung an die gegebenen Bedingungen zum Ziel haben, durchgeführt.

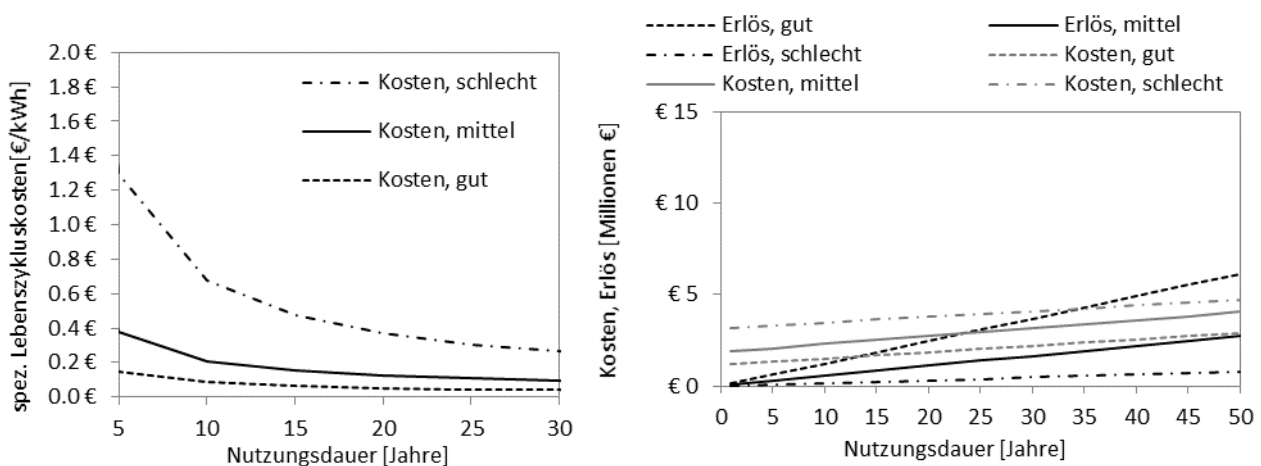


Abbildung 10: Links: Grob geschätzte Lebenszykluskosten eines multifunktionell genutzten BE-Speichers (Typ B) für die drei untersuchten Szenarien. Rechts: Grobe Schätzung der Kosten und Erlöse in Abhängigkeit der Nutzungsdauer.

In einem ersten Schritt wurden Möglichkeiten zur Steigerung der Speicherkapazität untersucht. Der Ausbau des hydraulischen zu einen hydro-pneumatischen Speicher, durch Kombination mit einem Druckluftspeicher war naheliegend. Verglichen zum herkömmlichen BE Konzept wird dabei zusätzliche Energie während des Befüllens des Reservoirs durch Kompression des Luftvolumens aus Kammer A und B (Abbildung 11) gespeichert. Um dies zu ermöglichen müssen die Kammerwände von Kammer A und B luftdicht ausgeführt sein. Zudem wird durch die Verbindung beider Kammern das zur Kompression zur Verfügung stehende Luftvolumen deutlich vergrößert, was sich wiederum positiv (im Sinne von abschwächend) auf die Temperaturentwicklung während des Komprimierungsvorganges auswirkt. Während des Entladezyklus wird somit zusätzliche Energie, durch

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

den auf den Flüssigkeitskolben in Kammer A wirkenden Druck der expandierenden Luft, freigegeben.

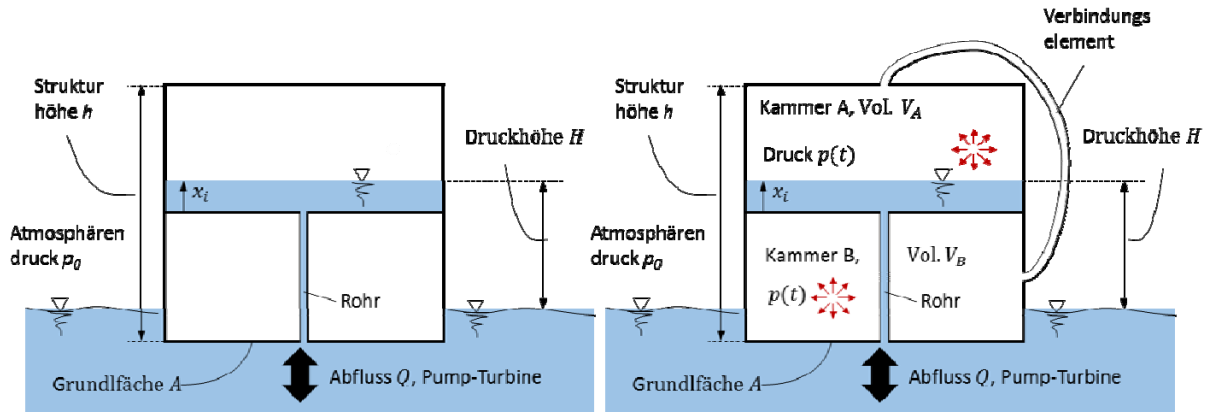


Abbildung 11: Herkömmliche BE-Variante Typ B (links). Luftdichtes BE-CAES-System mit einer Nabelverbindung zwischen beiden Kammern (rechts).

Modelliert wird der Prozess sowohl als isotherme (Temperatur bleibt während des Komprimiervorganges durch ausreichenden Wärmeaustausch zwischen Innen und Außen, konstant) als auch adiabate (unterbinden des Wärmeaustausches zwischen Innen und Außen) Zustandsänderung. In Tabelle 4 sind die angesetzten Parameter sowie die Zahlenwerte der in Abbildung 12 graphisch dargestellten Ergebnisse angeführt.

Tabelle 4: Parameter und Berechnungsergebnisse für ein exemplarisches luftdichtes BE-System in Kombination mit Druckluftspeicherung bei miteinander verbundenen Kammern A und B.

Parameter	Wert	SI-Einheit
Wasserspiegeldifferenz H	15	m
Strukturhöhe h	30	m
Grundfläche A	1000	m ²
Volume $V_A = V_B = H \cdot A$	15000	m ³
Atmosphärendruck p_0	1,01	bar
Startdruck p_{start}	10,13	bar
Abfluss der Pump-Turbine Q	2	m ³ /s
Maximale Füllzeit t_{max}	7500	s
Druck $p(t = 0)$	10,13	bar
Druck isotherm $p_{iso}(t = t_{max})$	20,27	bar
Druck adiabatisch $p_{adi}(t = t_{max})$	26,74	bar
Druckhöhe Pump-Turbine $H_{PT}(t = 0)$	108	m
Druckhöhe Pump-Turbine isotherm $H_{PT,iso}(t = t_{max})$	211,2	m
Druckhöhe Pump-Turbine adiabatisch $H_{PT,adi}(t = t_{max})$	277,2	m
Leistung der Pump-Turbine $P(t = 0)$	2,12	MW
Leistung der Pump-Turbine isotherm $P_{iso}(t = t_{max})$	4,15	MW
Leistung der Pump-Turbine adiabatisch $P_{adi}(t = t_{max})$	5,44	MW
Speicherkapazität mit Luftkompression isotherm $W_{iso}(t = t_{max})$	6,04	MWh
Speicherkapazität mit Luftkompression adiabatisch $W_{adi}(t = t_{max})$	6,94	MWh
Speicherkapazität ohne Luftkompression $W_{BE}(t = t_{max})$	0,61	MWh

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

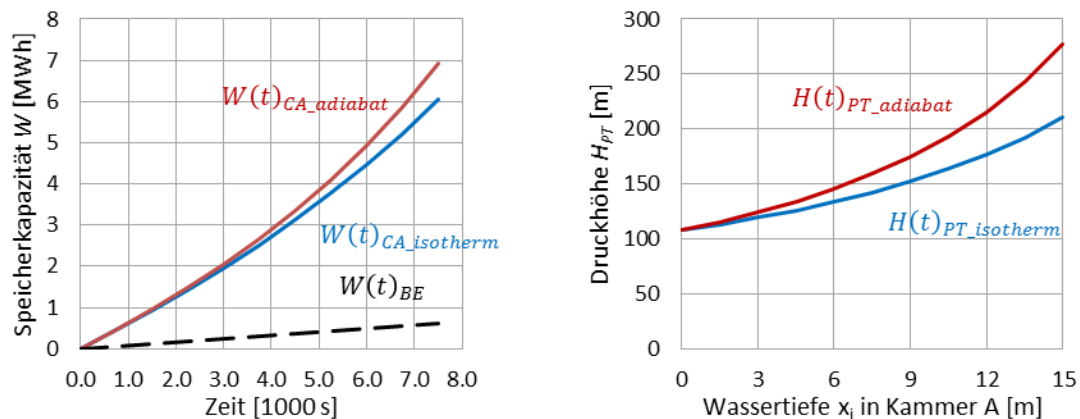


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Speicherkapazität (links) und Änderung der Druckhöhendifferenz mit steigendem Wasserspiegel im Reservoir (rechts).

Die Verhältnisse $W_{iso}(t = t_{max})/W_{BE}(t = t_{max}) = 9,86$ bzw. $W_{adi}(t = t_{max})/W_{BE}(t = t_{max}) = 11,31$ beschreiben den Nutzen der Kombination des hydraulischen Energiespeichers mit Druckluftspeicherung unter isothermer als auch adiabater Betrachtung und somit unter extremalen Bedingungen. Der tatsächliche Nutzen liegt dazwischen. Für eine erste Abschätzung kann jedoch festgehalten werden, dass es zu einer überaus deutlichen Steigerung der Speicherkapazität kommt. Einher geht dieser Gewinn jedoch mit einer stark variierenden Drückhöhe während des Speicherzyklus. Könnte dieser bei der Betrachtung von BE als rein hydraulischer Energiespeicher als nahezu konstant angenommen werden, ist dies im Falle der Kombination mit CAES nicht mehr zutreffende. 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 könnte und somit den benötigten Anwendungsbereich abdeckt (siehe Abbildung 13).

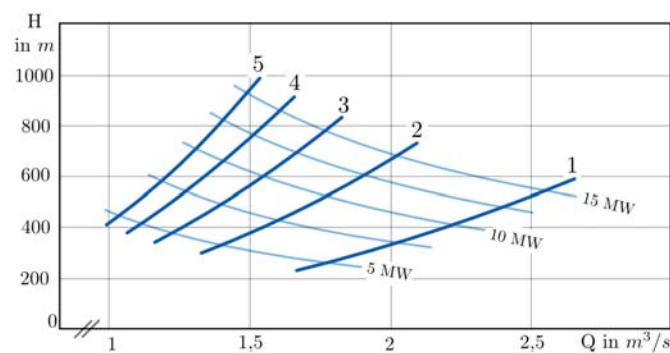


Abbildung 13: Analytische Kennlinie im Einsatzbereich eines reversiblen, mehrstufigen und drehzahlvariablen Pump-Turbinen Systems. (IET, TU-Wien)

Als Material könnte textiles Gewebe zum Einsatz kommen wobei aufgrund der sehr hohen Anforderungen eine detaillierte Prüfung durchgeführt werden müsste. Das Textil müsste nicht nur den

auftretenden Kräften infolge der äußeren Belastung, sondern ebenso den Einwirkungen durch Salzwasser und Sonne dauerhaft standhalten. Pimm et al.²⁰ haben einige Anforderungen definiert, die sie für ihre Energy-Bag-Technologie berücksichtigen müssen und die ebenso für eine textile BE-Speicher Gültigkeit haben:

- 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 standzuhalten.
- Während der geplanten Lebensdauer biologisch inaktiv sein.
- Dauerhaft Wasser- und Luftdicht sein.

Mögliche Materialien die hinsichtlich der Längszugfestigkeit als geeignet erscheinen sind z. B. Vectran™ NT (1,1 GPa), Vectran™ HT (3,2 GPa), Glasfasern (3,4 GPa) oder Karbonfasern (4,1 GPa).

Wie zu sehen ist, zeigen sich die ersten Voruntersuchungen diese BE-Konzeptes als äußerst vielversprechend. Nicht nur aufgrund der Tatsache, dass eine deutliche Steigerung der Speicherkapazität erzielt werden kann sondern ebenso aufgrund des Umstandes, dass österreichisches Know-how sowie starke Kompetenz in der Textilindustrie vorhanden sind. Durch die Transportfähigkeit der textilen Variante könnte die Herstellung in heimischen Betrieben erfolgen und nach Bedarf ausgeliefert werden wodurch eine sehr hohe Wertschöpfung gegeben wäre. Weiters könnte durch den Einsatz von Multi-Layer-Textilen sowie der möglichen Kombination mit Dünnschichtsolarzellen nicht nur auf die gegebenen Randbedingungen perfekt eingegangen sondern ebenso die Hülle multifunktionell genutzt werden. Auch eine Kombination mit dem HELIOtube²¹ der österreichischen Firma Heliovis²² wäre denkbar. Zu erwarten ist dadurch eine klare Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Speichers. Mit aktuellem Wissenstand kann jedoch lediglich eine Empfehlung auf vertiefende Untersuchungen ausgesprochen werden in der die genauen Rahmenbedingungen, die generelle Eignung sowie die Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptes näher untersucht werden.

²⁰ A. 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.

²¹ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) (2016): Mit einem Plastikslauch Sonnenstrahlen einfangen. <https://infothek.bmvit.gv.at/mit-einem-plastikslauch-sonnenstrahlen-einfangen-heliotube-ffg/>, abgerufen 09.11.2017.

²² <https://heliovis.com/>

Schlussfolgerung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das prinzipielle Konzept von BE als sehr Konkurrenzfähig und vielversprechend erscheint. Der hohe Wirkungsgrad, die lange Lebensdauer, die vernachlässigbar geringe Selbstentladung, die beinahe unbegrenzte Anzahl an möglichen Speicherzyklen, etc. können beiden Varianten (*Typ A* und *Typ B*) zugeschrieben werden. Dennoch hat sich herausgestellt, dass *Typ A* aufgrund der möglichen Kombination bzw. der Nutzung des Speichers mit baulicher Infrastruktur in Anbetracht einer wirtschaftlichen Umsetzung deutlich überlegen ist. Neben den ökonomischen Vorteilen wird die Mehrfachnutzung, die aufgrund der hohen Standortflexibilität aber auch Formvariabilität auf derart vielfältige Weise stattfinden kann, als sehr wichtige Eigenschaft des BE-Speicherkonzepts angesehen. Einerseits hebt sich dadurch die Speicherlösung klar von andere, konkurrierenden Speicherkonzepten deutlich ab und andererseits ist der gesellschaftliche Benefit nicht nur auf die Bereitstellung von Speicherleistung begrenzt. Es wird ebenso neuer Lebensraum erschlossen, der bereits überfüllten und in Anbetracht des steigenden Meeresspiegels bedrohten, städtischen Ballungsräumen weltweit neue Chancen für die Entwicklung in eine nachhaltige Zukunft bietet.

AP3 Schwimmkörperentwicklung

Ausgehend von den möglichen Belastungen auf einen Schwimmkörper (SK), welcher im Inneren einen Wasserkörper beinhaltet, werden unterschiedliche Berechnungsmethoden für die Bestimmung der Einwirkung auf den Körper erläutert und die entsprechende Wahl der verwendeten Software begründet. Dabei wird von unterschiedlichen Wassertiefen im Inneren ausgegangen, welche entsprechende Eintauchtiefen des Gesamtkörpers zur Folge haben und unterschiedliche Systemzustände des Speichers repräsentieren. Diese werden aber jeweils getrennt als konstant betrachtet und eine entsprechende Veränderung durch Pumpen oder Turbinieren wird als abgeklungen angenommen. Als Resultat dieser Berechnungen können die einwirkenden Kräfte und die damit verbundenen Bewegungen bestimmt werden. Eine entsprechende Modellierung ist Grundvoraussetzung, dass weiterführende Stabilitätsuntersuchungen und auch die Bemessung der Verankerung durchgeführt werden kann.

Im Zuge der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass dies mit deutlichen Schwierigkeiten verbunden ist und es zusätzliche Forschung in dem Bereich benötigt, welche auch entsprechende Laboruntersuchungen beinhalten sollte. Speziell fehlen entsprechende Validierungsexperimente von vergleichbaren Strukturen und die damit verbundenen Erfahrungen, um die Numerik zu überprüfen. Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde aber ein deutlicher Fortschritt in diesem Bereich erzielt und ein entsprechendes Fundament gelegt um die zukünftige Entwicklung zu fördern.

Statische Schwimmstabilitätsuntersuchungen

Eine Besonderheit des BE-Konzeptes in Bezug auf die Schwimmstabilität ist durch den im inneren Reservoir situierten und der Höhe variablen Wasserspiegel gegeben. Dieser bewirkt ein deutlich

abweichendes Schwimmverhalten zu Körper ohne innerem Wasserreservoir und bedarf somit speziellen Vorkehrungen um den destabilisierenden Einflüssen gezielt entgegenzuwirken.

Aufgrund der Problemkomplexität wurden zu Beginn einfache Stabilitätsuntersuchungen an idealisierten BE-Geometrien durchgeführt. Dabei wurde wiederum angenommen, dass die Wandstärke des Speichers nahezu infinitesimal ist, und das Gewicht zum Erreichen der optimalen Speicherkapazität als Platte der Masse m auf der Schwimmplattform situiert ist. Entsprechend nimmt die Eintauchtiefe direkt proportional zum Wasserstand im inneren Reservoir zu. Weiters wird für die statische Schwimmstabilitätsbetrachtung lediglich ein Freiheitsgrad (einaxiale Verdrehung) angenommen. Das Ergebnis dieser Voruntersuchungen sind sogenannte Hebelarmkurven, die Auskunft darüber geben ob und mit welcher Kraft ein im Wasser schwimmender und unter bestimmten Winkel ausgelenkter Körper wieder in seine stabile Schwimmlage zurückkehrt. Für gegebenes Speicherkonzept ist als stabile Schwimmlage die aufrechte Position (Kippwinkel $\alpha = 0^\circ$) definiert. Untersucht wurde die Schwimmstabilität jeweils während des gesamten Speicherzyklus (Füllgrad von 0 % bis 100 %) wobei ein 100 %iger Füllgrad jenem Wasserstand im inneren Reservoir entspricht, bei dem der Speicher gerade noch nicht untergeht. Im Falle des idealisierten BE-Speichers mit optimaler Speicherkapazität ist das inneren Reservoirs also bis zur Hälfte gefüllt. Zudem wurden eine Reihe repräsentativer Kippwinkel untersucht um aussagekräftige Hebelarmkurven zu erhalten. Aufgrund der hohen Komplexität der Schwimmstabilitätsermittlung unter gegebenen Bedingungen wurde ein Berechnungsskript erstellt, das mit Hilfe der Softwareprodukte *Visual Basic* und *AutoCAD* ein automatisiertes Berechnen der auftretenden Kraftgrößen für beliebige Geometrien ermöglicht.

Um grundsätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Schwimmstabilität zu prüfen erfolgten die ersten Untersuchungen an einem Schwimmkörper mit quadratischem Grundriss der Fläche $A \approx 2700 \text{ m}^2$ und einer Höhe von $h \approx 32 \text{ m}$. Wie sich anhand einer Reihe durchgeführter Geometriestudien, auf die hier nicht näher eingegangen wird, relativ schnell gezeigt hat, erweist sich die Unterteilung des inneren Reservoirs sowie die konstruktive Begrenzung in der Höhe als überaus effektiv hinsichtlich der Schwimmstabilität. Dies bestätigt auch der dargestellte Vergleich in Abbildung 14. Zum Verständnis ist an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass gemäß vorgenommener Definition, ein negativer Hebelarm ein aufrichtendes Moment und ein positiver Hebelarm ein kippendes Moment verursacht. Folglich zeigt sich das Einkammersystem als sehr instabil. Lediglich ohne innere Wasserfüllung weist es eine stabile, aufrechte Schwimmlage auf, die jedoch während des Ein- und Ausspeicherzyklus zu keiner Zeit gegeben ist (Abbildung 14, links). Das in der maximalen Füllhöhe begrenzte Mehrkammersystem hingegen kann während des gesamten Zyklus und für alle untersuchten Kippwinkel zufriedenstellende Hebelarmkurven vorweisen (siehe Abbildung 14, rechts).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

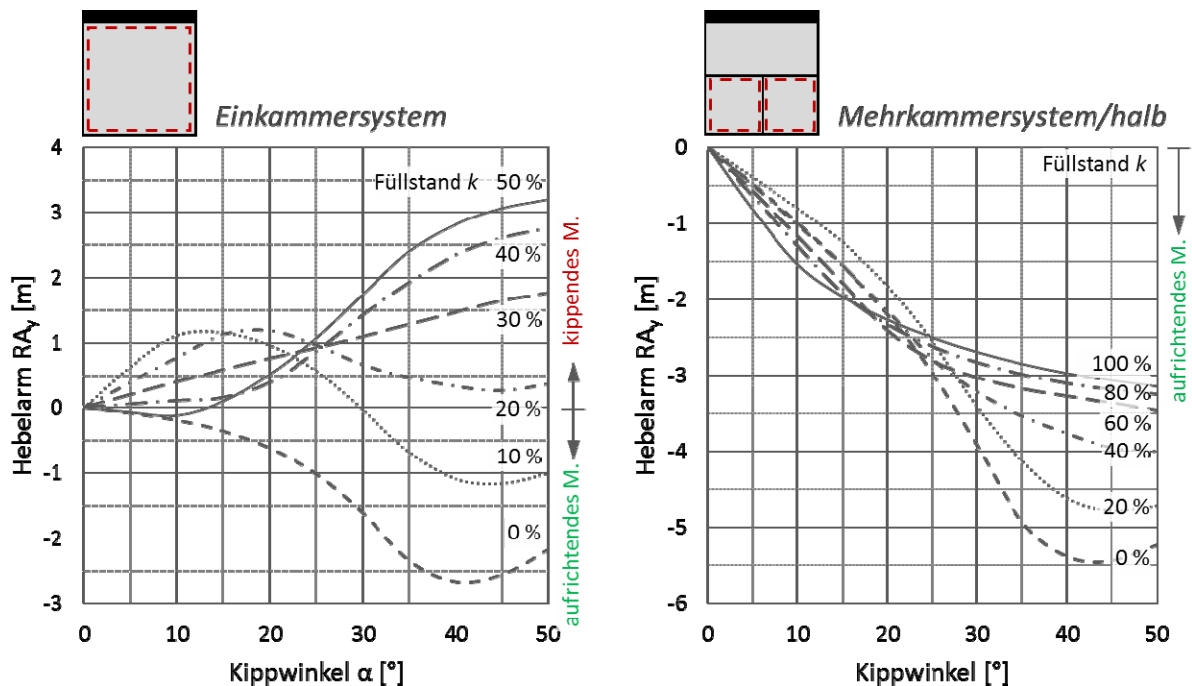


Abbildung 14: Hebelarmkurven. BE Einkammersystem (links) und Mehrkammersystem und konstruktive Begrenzung der Reservoirhöhe bei $h/2$ (rechts).

In Anbetracht der Annahme, einer korrekt angesetzten Massenverteilung des BE-Speichers wirkt sich das Verhältnis der Grundfläche A zur Gesamthöhe h wesentlich auf die Schwimmstabilität des Speichers aus. Je höher und schlanker die Speicherform desto instabiler ist das Schwimmverhalten und je gedrungener die Geometrie, desto stabiler liegt der Körper im Wasser. Um dies zu verdeutlichen bzw. zur Bestimmung des Grenzfalles wurden eine große Anzahl verschiedener Geometrien (8 Geometrien, je Geometrie 40 unterschiedliche Verhältnisse von A/h) untersucht wobei im Gegensatz zu vorangegangener Untersuchung folgende Parameter festgelegt wurden:

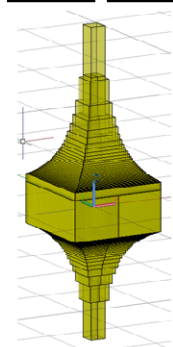
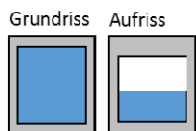
- Alle Speicher weisen eine maximale Speicherkapazität von $E_{max} = 2 \text{ MWh}$ auf.
- Als Baumaterial wird Beton mit einer Dichte von $\rho_B = 2600 \text{ kg/m}^3$ angesetzt.
- Alle Massen sind Lagerichtig angebracht (Außenwände, Zwischenwände und -decken).
- Alle Wand- und Deckenstärken wurden überschlagsmäßig mit 1 m angesetzt.
- Notwendiges Zusatzgewicht zum Erreichen der geforderten Speicherkapazität von $E_{max} = 2 \text{ MWh}$ wurde in Form einer Betonplatte mit entsprechender Höhe und somit Masse auf dem Speicher liegend angesetzt.
- Es wird die Schwimmstabilität für einen gesamten Speicherzyklus untersucht (Füllstand von 0 % bis 100 %).
- Es werden Kippwinkel von $\alpha = 0^\circ$ bis $\alpha = 90^\circ$ untersucht.
- Statische Stabilitätsbetrachtung.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

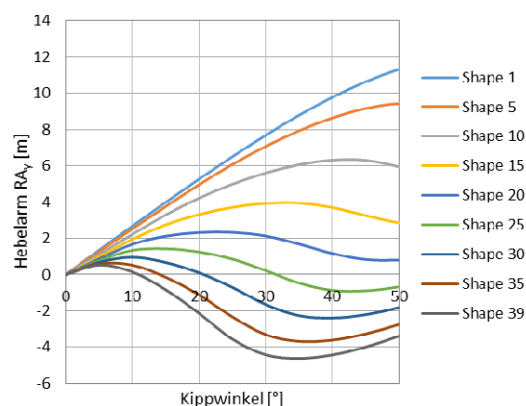
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Aufgrund der großen Anzahl untersuchter Varianten (insg. 320) werden exemplarisch wiederum 2 repräsentative Geometrien miteinander verglichen (siehe Abbildung 15 und 16). Dabei handelt es sich einmal um ein Einkammersystem ohne konstruktive Begrenzung der maximalen Füllhöhe im Reservoir (Abbildung 15) und ein weiteres Mal um ein Mehrkammersystem (insg. 4 Kammern) mit konstruktiver Begrenzung der maximalen Füllhöhe (Abbildung 16).

Einkammersystem



Geometrie 1 / Füllstand 10 %



Geometrie 1 / Shape 39

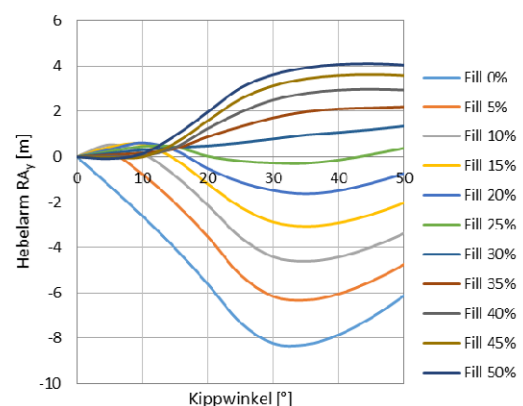


Abbildung 15: Hebelarmkurven BE Einkammersystem. Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Shapes eines Einkammersystems bei 10% Füllstand (links). Schwimmstabilität während unterschiedlicher Speicherzyklen von Shape 39 (rechts).

Die jeweils links angeordneten Diagramme zeigen die Hebelarmkurven für unterschiedliche „Shapes“ (Shapes unterschieden sich durch das Verhältnis von A/h , wobei mit steigender Shapenummer auch die Verhältniszahl A/h ansteigt) einer vorgegebenen Grundgeometrie wobei anzumerken ist, dass sich die Füllstände (10 %) aller abgebildeten Shapes im inneren Reservoir einander entsprechen. Wie zu erwarten war, bessert sich mit zunehmender Verhältniszahl A/h das Schwimmstabilitätsverhalten der Struktur und auch die Gliederung des Reservoirs erweist sich wiederum als sehr effektiv. Ein gewisses Grundverhältnis darf jedoch nicht unterschritten werden, die hier angesetzten Bedingungen vorausgesetzt.

Die beiden Diagramme rechts in Abbildung 15 und 16 zeigen die Hebelarmkurven während unterschiedlicher Speicherzyklen des Shape 39 für beide betrachteten Geometrien. Wie bereits bei der Schwimmstabilitätsbetrachtung des idealisierten BE-Speichers kann auch hier wieder festgehalten werden, dass zur Gewährleistung der Schwimmstabilität unter der hier durchgeführten statischen Problembetrachtung sich ein Reservoir aus mehreren Kammern sowie der konstruktiven Begrenzung der maximalen Füllhöhe bewährt hat. Die Begrenzung der Füllhöhe verhindert eine ungewollte Massenverteilung der inneren Flüssigkeit und somit das Auftreten eines kippenden Momentes. Es ist noch zu erwähnen, dass die einzelnen Kammern durch Öffnungen miteinander verbunden sind. Die Größe der Öffnungen ist ein Parameter in Abhängigkeit der geforderten Wellendämpfung. In der durchgeführten statischen Schwimmstabilitätsbetrachtung wurde ein Massenaus-

tausch der Flüssigkeit zwischen den einzelnen Kammern nicht berücksichtigt.

Mehrkammersystem/halb

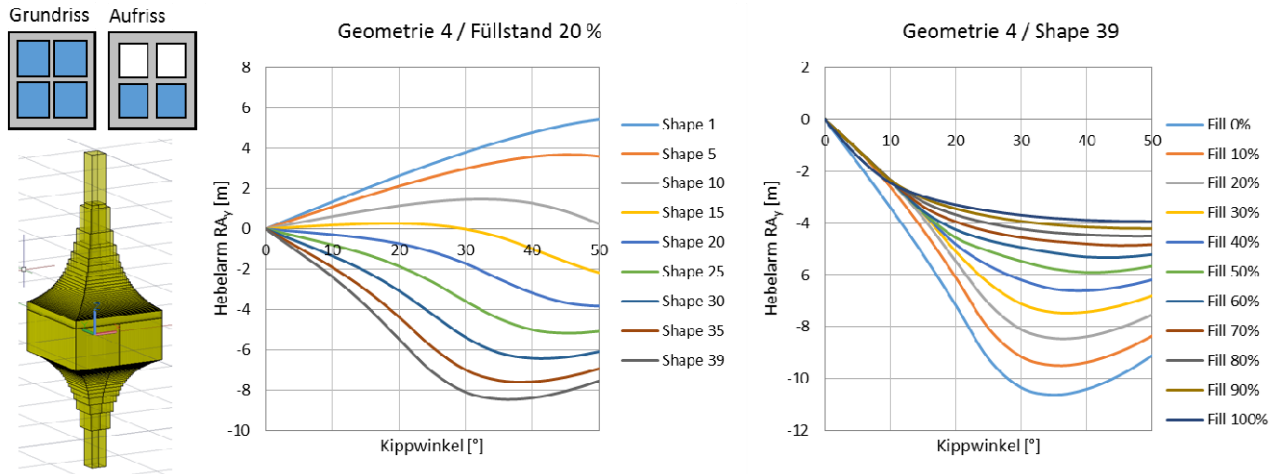


Abbildung 16: Hebelarmkurven BE Mehrkammersystem. Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Shapes eines Einkammersystems bei 20% Füllstand (links). Schwimmstabilität während unterschiedlicher Speicherzyklen von Shape 39 (rechts).

Statische und dynamische Belastung

Das Arbeitspaket AP 3 beschäftigt sich mit der statischen und dynamischen Belastung auf einen solchen Schwimmkörper. Die Besonderheit in diesem Fall ist, dass der Schwimmkörper einen zweiten konstanten Wasserkörper im Inneren enthält, welcher durch die Struktur abgeschlossen ist. Dies wirft zusätzliche Fragestellungen auf, die nur ansatzweise mit dem Projekt abgedeckt werden konnten.

Als erster Schritt kann die statische Bemessung herangezogen werden. Dabei sind die hydrostatischen Kräfte (Druck entspricht Wassertiefe multipliziert mit der Dichte von Wasser und der Erdbeschleunigung) anzusetzen. Entsprechend dem relativen Wasserspiegel (WSP) kann die Belastung auf eine Fläche/Körper bestimmt werden. Für ein solches Belastungsbild ist aber davon auszugehen, dass beide Wasserkörper (innen und außen) sich in Ruhe befinden bzw. die Bewegung vernachlässigbar klein sind. Vorstellbar ist dies in einem abgeschirmten Bereich des Hafens oder auf einem Binnengewässer/See. Besonders zu berücksichtigen werden solche Belastungen aber hauptsächlich in der Bauphase sein, wenn sie nicht in einem Trockendock durchgeführt werden können. Für die weitere Bearbeitung im Zuge dieses AP wird dieser Fall ausgeklammert.

Deutlich komplexer stellt sich die Ermittlung der dynamischen Belastung auf den SK heraus. Neben den Regellastfällen, welche entsprechend häufig vorkommt, sind auch zusätzliche Katastrophenlastfälle (extreme Seezustände und Sturm) zu berücksichtigen. Letztere sind in der Regel maßgebend und aus der Erfahrung mit unterschiedlichsten Modellen zur Energieerzeugung aus Wellen kann davon ausgegangen werden, dass an sehr vielen Standorten eine solche notwendige Überlebensfähigkeitsuntersuchung zu deutlichen Mehrkosten führt. Dies sollte immer bei der Auswahl des Standortes berücksichtigt werden.

Bei den dynamischen Belastungen sind allgemein betrachtet zwei von außen einwirkenden Phänomene zu unterscheiden. Zum einen ist dies eine Einwirkung durch Strömung und zum anderen durch Wellen. Beides ist vom konkreten Untersuchungsort abhängig und kann selbstverständlich auch in Kombination auftreten. Eine Untersuchung der Überlagerung beider Einwirkungen ist zum Beispiel in der Versuchseinrichtung FloWave der University of Edinburgh möglich²³.

Strömung wird im vorliegenden Fall so definiert, dass der gesamte Wasserkörper eine eindeutige Geschwindigkeit in eine Richtung hat. In einer entsprechenden Versuchseinrichtung wird dies zum Beispiel durch Turbinen und einem Rückflussbereich ermöglicht. Eine solche Belastung auf das Bauwerk beeinflusst die Drücke auf die Außenhülle des Bauwerks und kann durch Wirbelablösungen zusätzliche transiente Belastungen erzeugen. Besonders im Hinblick auf die Bemessung der Verankerung des SK ist eine genaue Kenntnis der Strömung notwendig.

Die Wellen, als zweite dynamische Belastung, sind durch eine Veränderung der Lage der Wasseroberfläche ersichtlich. Außerhalb von abgeschlossenen Wasserkörpern ist nahezu immer mit Wellen zu rechnen, welche sehr stark von den Windverhältnissen abhängen. Typischerweise wird eine solche Belastung mit Paddels im Labor erzeugt und kann in reguläre Wellen, welche aus ausgerichteten Sinuswellen bestehen, und irreguläre Seezustände unterteilt werden. Letztere werden näherungsweise durch die Überlagerung von regulären Wellen (teilweise aus unterschiedlichen Richtungen) erzeugt²⁴.

Strömung und Wellen sind zeitlich veränderlich und auch sehr stark von der konkreten Region abhängig. Für die weitere Untersuchung wird die Belastung aus Strömung vernachlässigt. Bei der Belastung aus den Wellen werden nur reguläre Wellen angenommen. Ist eine Berechnung dieser periodischen Belastungen möglich, kann die Bemessung ohne weiteres auf die entsprechenden irregulären Wellen an einem konkreten Standort ausgeweitet werden. Im Hinblick auf eine Verallgemeinerung der Untersuchung wird von einem Frequenzbereich ausgegangen, welcher im *Curved Tank*²⁵ der University of Edinburgh abgebildet werden kann. Dort können Wellenzustände in einem Maßstab von ca. 1:50 bis 1:100 nachgebildet werden. Der zu untersuchende SK wird in einem Modellmaßstab / in Laborgröße untersucht. Der Vorteil dieses Vorgehens ist es, dass die Ergebnisse im Zuge einer weiterführenden Untersuchung im Labor kontrolliert werden können und somit die Berechnungen abgesichert werden. Eine nachfolgende Skalierung in den Naturmaßstab ist einfach möglich.

²³ Ingram, D, Wallace, R, Robinson, A & Bryden, I 2014: The design and commissioning of the first, circular, combined current and wave test basin. in Proceedings of Oceans 2014 MTS/IEEE Taipei, Taiwan., 131217-002, IEEE, OCEANS'14 MTS/IEEE Conference, Taipei, Taiwan, Province of China, 7-10 April.

²⁴ DNV 2014: Modelling and Analysis of Marine Operations. Recommended practice DNV-RP-H103 <http://rules.dnvgi.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2014-02/RP-H103.pdf>, abgerufen 26.09.2017.

²⁵ Gyongy, I, Richon, J-B, Bruce, T, Bryden, I, 2014b: Validation of a hydrodynamic model for a curved, multi-paddle wave tank. Applied Ocean Research, Volume 44, Pages 39-52, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.11.002>.

Berechnungssoftware WAMIT

Eine systematische Untersuchung aller Freiheitsgrade (siehe nachfolgendes Kapitel) eines vereinfachten Modelles ist im Rahmen des aktuellen Projektes im Labor nicht möglich. Deshalb wird ein numerischer Ansatz gewählt, welcher auch als Vorbereitung für ein Validierungsexperiment genutzt werden kann. Im Zuge der Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass der klassische Ansatz mit netzbasierten Methoden (zum Beispiel mit kommerziellen Softwareprodukten wie FLOW-3D oder ANSYS-CFX oder auch open-source Software wie OpenFOAM) deutlich zu viel Rechenzeit in Anspruch nimmt um eine breit angelegte Variationsstudie durchzuführen. Zudem besteht bei einem solchen Ansatz die Problematik mit der sich bewegenden Umrandung. Der innenliegende und der außenliegende Wasserkörper wirkt auf diese ein und kann zu einer entsprechend großen Bewegung führen. Damit verbunden ist entweder eine Anpassung des Berechnungsnetzes oder eine Korrektur der diskretisierten Geometrie. Beides verlangsamt den Berechnungsprozess zusätzlich und kann unter gewissen Umständen zu zusätzlichen Fehlern führen. Eine mögliche Lösung stellt der SPH (Smoothed-particle hydrodynamics)-Ansatz dar, wobei dieser jedoch noch in der Entwicklungsphase steckt. Hingegen ist die Vereinfachung der Problematik und Lösung im Frequenzraum (frequency domain) eine etablierte Methode. Das Konzept wird nachfolgend kurz beschrieben, wobei aber für zusätzliche (allgemeine) Informationen zur dieser numerischen Methode exemplarisch auf DNV (2014) verwiesen wird. Die durchgeführte Bearbeitung stützt sich auf die kommerzielle Software WAMIT, welche von der University of Edinburgh bei unterschiedlichsten Projekten erfolgreich eingesetzt wurde^{25,26}. Zudem bietet diese Software die Möglichkeit einen oder mehrere innere Wasserkörper zu definieren²⁷.

Die Berechnung mit WAMIT basiert, wie auch vergleichbare Programme, auf der linearen Wellentheorie. Dabei wird das Wasser als inkompressibel, eine Potentialströmung und auch eine sehr kleine Wellenhöhe angenommen. Daraus resultiert eine kleine Bewegung des Körpers. Dämpfung und externe Kräfte können in der Berechnung berücksichtigt werden, sowie auch die Interaktion mehrerer Körper, die jeweils mit bis zu sechs Freiheitsgraden (DoF Degree of Freedom) berechnet werden können. Die benötigten Inputdaten bestehen aus der Frequenz und Richtung der Wellen sowie die zu untersuchende Geometrie. Entsprechende Dateien werden mit einem Matlab Code erstellt, welcher von der Software abgearbeitet wird. Die Ergebnisse für Kräfte und Bewegung setzen sich aus zwei Teilen zusammen: (a) die Phasenverschiebung zeigt eine entsprechend verzögertes Auftreten der maximalen Ergebnisgröße an, welche mit einem (b) Faktor für die Amplitude anzupassen ist. Somit sind Eingangs- und Ausgangswerte jeweils als Wellen zu verstehen. Um den zeitlichen Verlauf darstellen zu können, ist ein entsprechendes Umrechnen mit der Wellengleichung notwendig, wo die gewünschte zeitliche Diskretisierung eingeführt werden kann.

²⁶ Gyongy, I, Bruce, T, Bryden, I, 2014a: Numerical analysis of force-feedback control in a circular tank. Applied Ocean Research, Volume 47, Pages 329-343, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.07.002>.

²⁷ WAMIT 2012: Lee C, Newman J.: WAMIT, Inc.. user manual, version 7.062 PC. Chestnut Hill, MA.

Überblick Berechnungen

Für die Variationsstudie werden die Rahmenbedingungen der Versuchseinrichtung Curved Tank der University of Edinburgh angesetzt. Dieser hat eine fixe Wassertiefe von $1,2\text{ m}$ und kann Wellen in einem Frequenzbereich von $0,5$ bis $1,6\text{ Hz}$ mit einer Wellenamplitude um die ca. $0,1\text{ m}$ erzeugen. Durch die gekrümmt angeordneten Wellenpaddel (Radius beträgt 9 m) ist eine Ausrichtung oder auch Überlagerung der Einwirkungsrichtung der Wellen auf das zu untersuchende Objekt in einem gewissen Rahmen möglich. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden immer nur homogene Sinuswellen angesetzt, welche im Versuch nach einer Einschwingphase zu einer kontinuierlichen Verhalten führen.

Die zu untersuchende Geometrie wird ebenfalls im Modellmaßstab angesetzt.

Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass alle Strukturen aus Plastik/Plexiglas mit einer Dichte von 1200 kg/m^3 erstellt werden. Es werden zwei prinzipielle Formen untersucht: Box und Zylinder. Der erste Ansatz basiert auf einem Quadrat mit einer Seitenlänge von $0,4\text{ m}$ und einer Materialstärke von 2 cm . Beim Zylinder kann von einer erhöhten Stabilität ausgegangen werden und die Materialstärke wird auf $0,5\text{ cm}$ reduziert bei einem Außendurchmesser von $0,5\text{ m}$. In beiden Fällen wird von nur einem inneren Tank ausgegangen. Ist das Verhalten eines solchen vergleichsweise einfachen Modelles entsprechend gut vorhersagbar, kann ohne weiteres eine zusätzliche Unterteilung oder Abtrennungen inkludiert werden. Abbildung 17 zeigt beide Ansätze im Vergleich zu den Abmessungen des Curved Tanks. Diese Geometrieparameter wurden für die Bearbeitung als unveränderlich angenommen. Im Zuge der Berechnung wird von einem unendlichen Becken ausgegangen, das perfekte Wellenverhältnisse liefert. Dies kann im Labor nur näherungsweise nachgebildet werden.

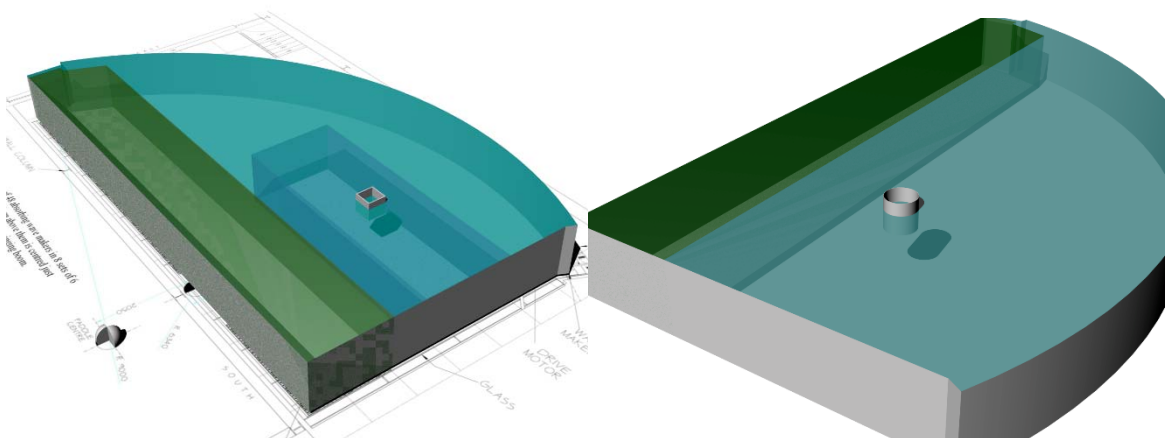


Abbildung 17: Quadratischer Ansatz/Box (links) und Zylinder (rechts) im Vergleich zu den Abmessungen des Curved Tank – Wellenpaddel sind im Bogen angeordnet und der grüne Bereich ist der Wellendämpfer.

Die Freiheitsgrade für die Untersuchung bestehen aus dem Frequenzbereich ($0,5$ bis $1,6\text{ Hz}$ für den Curved Tank, ausgeweitet auf $0,25$ bis $3,2\text{ Hz}$), der Einwirkungsrichtung β der Welle (0 bis 360° , wobei entsprechende Symmetrien berücksichtigt werden), und der Eintauchtiefe des SK.

Letztere ist direkt abhängig von der Wassertiefe des inneren Wasserkörpers weshalb dieser keinen eigenen Freiheitsgrad darstellt. Ein typischer Durchlauf umfasst 11 (17; Werte für den Zylinder) Wassertiefen mit 60 unterschiedlichen Frequenzen und 5 (1) Richtungen. Dies ergeben 3300 Rechenläufe für die Box und 1020 für den Zylinder. In diesem Zusammenhang sei aber angemerkt, dass die Anzahl der Rechenläufe zweitrangig ist, da die Hauptleistung in der Erstellung und Verifikation des parametrisierten Modelles für die konkrete Fragestellung liegt. Der deutliche Unterschied in der Anzahl der Berechnungen zwischen dem Ansatz mit der Box und dem Zylinder ist dem Umstand geschuldet, dass bei einer rotationssymmetrischen Geometrie die Einwirkungsrichtung der Welle keine unterschiedlichen Ergebnisse erzielt. Zudem bilden sich keine Ablösungszonen wie es bei der Box an jeder Kante der Fall ist, welche zusätzliche Wirbelbildungen und transientes Verhalten zur Folge hat.

Zusätzlich wird ein Parameter für die Beschreibung der Vernetzungsdichte der Oberfläche definiert. Im Zuge einer Netzstudie wird sichergestellt, dass die Ergebnisse unabhängig von der gewählten Auflösung sind. Diese und weitere Voruntersuchungen zur Verifikation des Modelles werden nicht im Detail beschreiben, sind aber ein wichtiger Bestandteil der gesamten Untersuchung. Im Zuge der Bearbeitung wurden unterschiedlichste Modellierungsansätze angewendet um spezifische Vereinfachungen gesondert zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Der entscheidende Vergleich stellt dabei die Gegenüberstellung des homogenen Ansatzes mit dem Modell inklusive des inneren Tanks dar. Für letzteres wurde der innenliegende Tank als eigener zu berechnender Fluidbereich aufgelöst und berechnet. Beim homogenen Modellansatz wird hingegen davon ausgegangen, dass das Wasser nur als unbeweglicher Ballast wirkt. Je nach Wasserstand wird ein entsprechendes Gewicht und Volumen bestimmt. Die Vereinfachung liegt dabei, dass von einer einheitlichen Dichte ausgegangen wird, wobei aber die Lage des Massenmittelpunktes korrekt abgebildet wird. Es werden damit also zwei möglichst gleichwertige Modell einmal mit und einmal ohne den dynamischen Effekten des inneren Wasserkörpers im SK miteinander verglichen. In einem ersten Ansatz wurde die Verankerung vernachlässigt. Damit konnten sich die jeweiligen untersuchten SK frei bewegen und drehen (6 DoF (degree of freedom)). Die dabei berechneten Kräfte entsprechen aber jenen, die benötigt werden, um den SK in Ruhe zu behalten. Nach einer Absicherung dieser Berechnung durch ein noch zu erstellendes spezifisches Validierungsexperiment können diese als Eingangswert für eine Verankerungsbemessung verwendet werden. Daraus ergibt sich wiederum ein Ansatz für die Dämpfung, welche wiederum einen Einfluss auf die ursprüngliche Berechnung hat. Nach entsprechenden Iterationen kann ein entsprechend stabiles und belastbares Ergebnis erzielt werden.

Exemplarische Ergebnisse

Die in diesem Bericht gezeigten Auswertungen sind rein exemplarisch und dienen der Verdeutlichung der Schlussfolgerungen. Jede Berechnung wurde gesondert ausgewertet und zusätzliche Vergleiche wurden durchgeführt sowie auch die Konvertierung der Ergebnisse aus dem Fre-

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

quenzbereich in einen tatsächlichen zeitlichen Ablauf. Besonders letzteres ermöglicht die berechnete Anpassung der Amplitude sowie die Phasenverschiebung korrekt einzuordnen. Es zeigte sich dabei, dass in gewissen Frequenzbereichen ein sehr plausibles Ergebnis erzielt werden konnte, doch es auch deutliche Bereiche gibt, in denen die Modellannahme der kleinen Bewegung nicht mehr eingehalten werden kann. Dies zeigte sich auch dadurch, dass die Massenerhaltung des inneren Wasservolumens teilweise nicht mehr gegeben ist, wenn die berechneten Wasserspiegelveränderungen angewendet werden. Damit kann angenommen werden, dass das Berechnungsmodell gewisse Bereiche nicht abdecken kann.

Ein sehr guter Überblick über die Ergebnisse kann durch die Auswertung der normierten Amplitude in Abhängigkeit von der einwirkenden Wellenfrequenz gegeben werden. Zum Beispiel beschreibt ein Wert von 2 [-] in dieser Darstellung für die Bewegung in x-Richtung (mov x), dass die Bewegung des SK in x-Richtung doppelt so groß ist, wie eine einwirkende Wellenhöhe. Analog dazu werden die weiteren beiden Bewegungsrichtungen und die drei Rotationen dargestellt. In dieser Auswertung ist die Phasenverschiebung nicht enthalten, wobei diese aber nur für den zeitlichen Verlauf bzw. im Fall der Beurteilung eines möglichen Überströmens der Struktur von Interesse ist (zum Beispiel das Zusammentreffen einer tiefen Lage einer Seite mit einem Hochpunkt in der Welle).

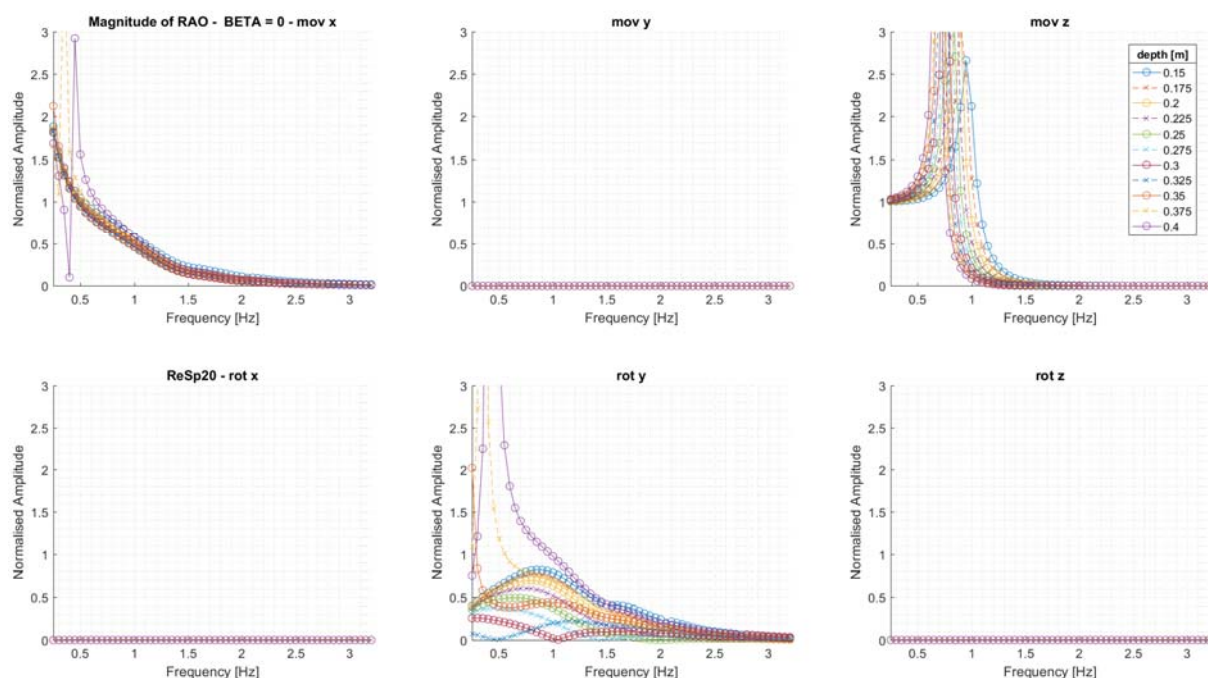


Abbildung 18: Auswertung quadratische Geometrie homogener Ansatz – unterschiedliche Eintauchtiefe und erweiterten Frequenzbereich.

Alle gezeigten Auswertungen gehen von einem frontal einwirkenden Wellenbild aus ($\beta = 0^\circ$).

Abbildung 18 und 19 stellen alle Freiheitsgrade der Bewegung dar und es ist ersichtlich, dass in y-Richtung (normal zur Einwirkung) keine Bewegung durch die gerade einwirkende Welle erzeugt

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

wird und damit verbunden auch keine Drehung um die x- bzw. z- Achse zu erwarten ist. Wird die Einwirkungsrichtung aber nur leicht verändert, werden aber sofort Bewegungen in diese Richtungen induziert. Ein Eintreffen der Wellen in 45° Winkel bringt in den meisten Fällen die größten Bewegungen. Beim Zylinderansatz fällt eine solche Abhängigkeit weg. Deshalb werden in den Abbildung 20 und 21 diese drei Komponenten ausgespart und statt der Bewegung in y-Richtung die Drehung um diese Achse dargestellt. Beim Zylinder wird um die Übersichtlichkeit zu erhalten auch nur eine ausgewählte Anzahl an Eintauchtiefen dargestellt.

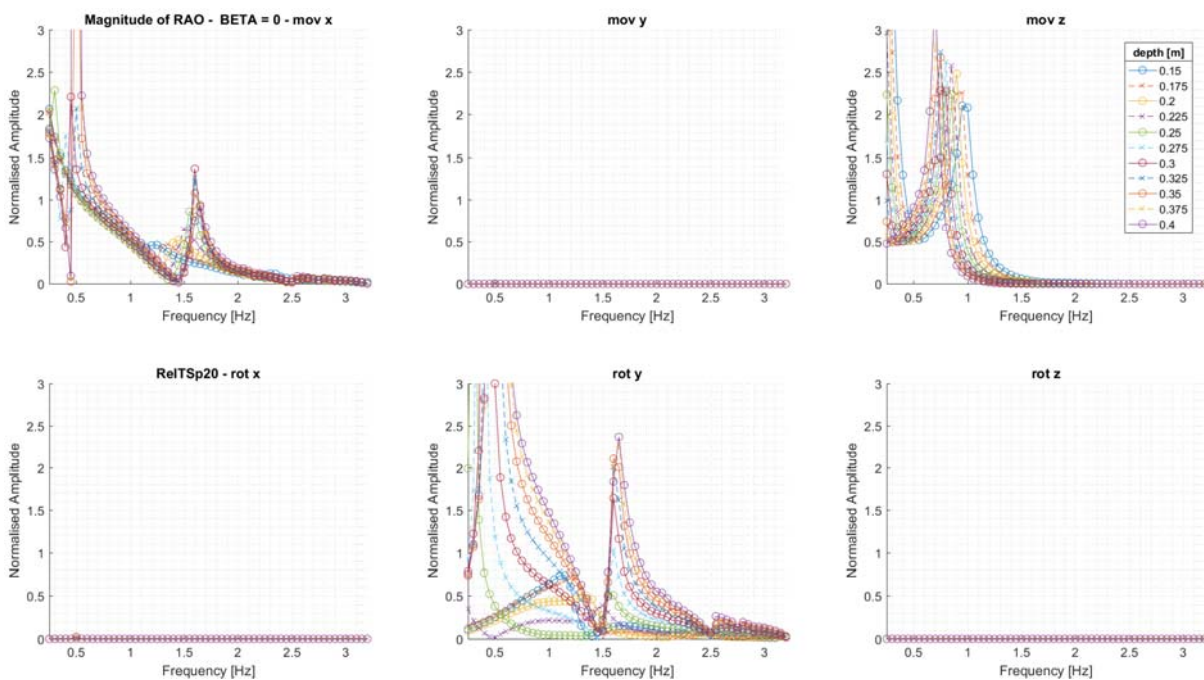


Abbildung 19: Auswertung quadratische Geometrie inklusive innerer Tank – unterschiedliche Eintauchtiefe und erweiterter Frequenzbereich.

Alle vier Abbildungen weisen dieselbe Achsenaufteilung auf um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Vergleichbar hohe Werte werden bei niedrigen Frequenzen in die x-Richtung ermittelt, was direkt mit der sehr langen Wellenperiode zusammenhängt. Die untersuchten Modelle weisen zudem alle eine Resonanz im Bereich um $0,75 \text{ Hz}$ auf, die zu extremen Werten in der z-Richtung führt. Dies ist ein physikalisch inkorrektes Verhalten und dem Fehlen einer Dämpfung im System geschuldet. Ein solche Überreaktion der Software ist im User Manual *WAMIT* (2012) dokumentiert. Es konnte auch bei Vergleichsrechnungen mit einer angenommenen Dämpfung nachgewiesen werden, dass dieser Peak gedämpft wird bzw. nicht mehr auftritt. Wie schon erwähnt, wird in einem konkreten Projekt die notwendige Verankerung einen Ansatzpunkt geben, um diese Dämpfung konkret zu bestimmen.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

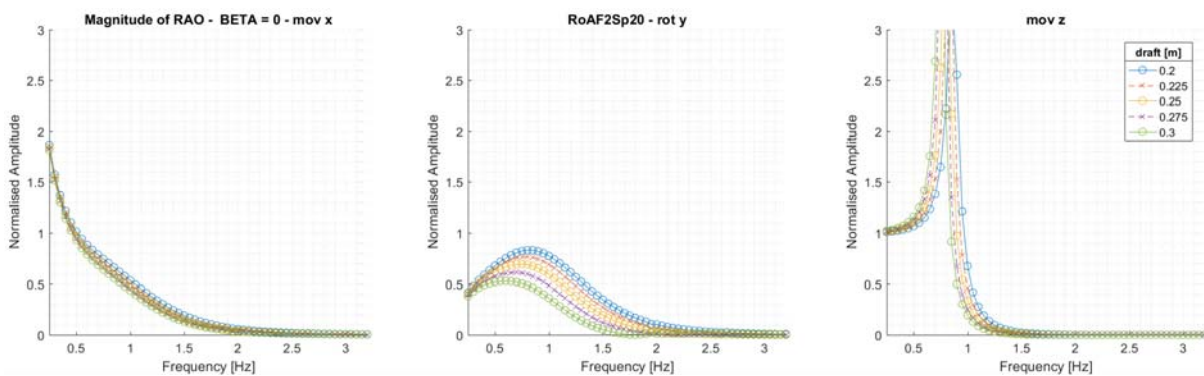


Abbildung 20: Auswertung Zylinder homogener Ansatz – unterschiedliche Eintauchtiefe (reduzierte Anzahl) und erweiterten Frequenzbereich.

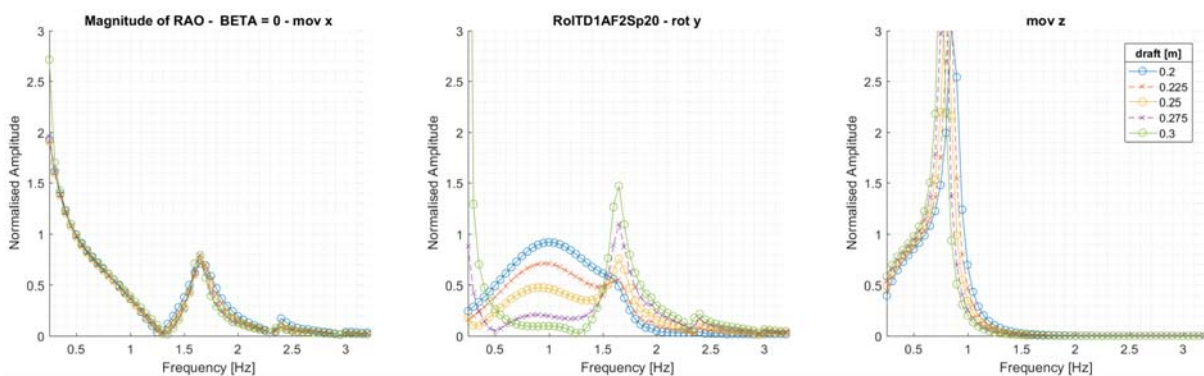


Abbildung 21: Auswertung Zylinder inklusive innerer Tank – unterschiedliche Eintauchtiefe (reduzierte Anzahl) und erweiterten Frequenzbereich.

Der Vergleich zwischen den beiden unterschiedlichen Geometrietypen zeigt, dass der Zylinder tendenziell zu einem gutmütigeren Verhalten neigt. Dieser Eindruck verdeutlicht sich noch mehr, wenn man die Einwirkungsrichtung leicht dreht und die Wellen nicht frontal auf die Box treffen. Entscheidend für die vorliegende Untersuchung ist aber der Vergleich des homogenen Modelles (Abbildung 18 und 20) mit dem Ansatz inklusive innerem Tank (Abbildung 19 und 21). Bei beiden Ansätzen der Geometrie ist in der x-Richtung eine deutliche zusätzliche Spitze ab einer Frequenz von knapp über 1,5 Hz zu erkennen. Es ist darauf zu schließen, dass also um die Wellenperiode von knapp über 0,66 Sekunden der innere Wasserspiegel eine Resonanzverhalten aufweist. Bei noch schnelleren Wiederkehrintervallen klingt die Bewegung wieder ab und nähert sich dem homogenen Ansatz für den inneren Wassertank an. Beim Zylinder tritt diese Spitze vergleichsweise früher auf. Im Einklang zu der Bewegung in die x-Richtung konnte auch eine zusätzliche Spitze bei der Rotation um die y-Achse (rot y) festgestellt werden. Maximale Werte wurden bei Box und Zylinder bei einer Eintauchtiefe von 0,3 m erreicht. Die schon erwähnte und physikalische vermutlich inkorrekte Spitze bei der Bewegung in die z-Richtung um 0,75 Hz nimmt mit der Berücksichtigung des inneren Tanks ab, doch ist ein erneuter Anstieg der normierten Amplitude im niedrigen Frequenzbereich zu erkennen. In wie weit diese Abweichung nur aus der numerischen Berechnung stammt oder doch einen tatsächlichen physikalischen Hintergrund hat, konnte nicht geklärt werden. Auch in diesem Fall zeigt sich, dass eine

Überprüfung der Ergebnisse im Labor dringend notwendig ist, um die numerischen Ergebnisse korrekt einzuordnen.

Schlüsse und Zusammenfassung

Die im Antrag formulierte Problemstellung hat sich als deutlich komplizierter und aufwändiger erwiesen als bei der Angebotserstellung gedacht. Für die finale Modellbildung, welche für eine Stabilitätsanalyse und eine Bemessung der Verankerung notwendig ist, sind zusätzliche Untersuchungen im Labor notwendig. Durch eine solche Validierung der Erkenntnisse kann sichergestellt werden, dass das in WAMIT implementierte Modell für einen innenliegenden abgeschlossenen Tank in einem solchen Fall, wo dieser einen deutlichen Einfluss auf das dynamische Verhalten des gesamten Schwimmkörpers (SK) hat, anwendbar ist. Wird dieser Nachweis erfolgreich geführt, kann die Software für zukünftige Bemessungen eingesetzt werden und auch sehr spezifische Randbedingungen (orts- und projektabhängig) berücksichtigen.

Die erzielten Ergebnisse lassen sehr deutlich auf den Einfluss des inneren Tanks schließen der vermutlich eine sehr klare Resonanzfrequenz hat und damit eine Bewegungsspitze erzeugt. In wie weit dies mit der angewendeten numerischen Methode korrekt abgebildet wird, ist aktuell sehr schwer einschätzbar. Es mangelt an vergleichbaren Untersuchungen im Labor und somit muss sehr deutlich darauf hingewiesen werden, dass ein zusätzliches Validierungsexperiment unbedingt notwendig ist, um die Berechnungen abzusichern. Die Bearbeitung konnte zeigen, dass es einen eindeutigen Forschungsbedarf für die numerische Berechnung von Schwimmkörpern mit einer Teilfüllung gibt und es sich auch in diesem Bereich lohnen wird, weiteren Aufwand zu investieren. Die University of Edinburgh wird dies auf jeden Fall je nach Möglichkeit weiterverfolgen.

Was sich aus den ersten Untersuchungen aber sagen lässt, ist das eine rotationssymmetrische Geometrie deutliche Vorteile mit sich bringt. Zum einen erleichtert dies die Berechnung und Bemessung der zukünftigen Anlage extrem, da der Angriffswinkel der Wellen nicht gesondert berücksichtigt werden muss. Zudem bringt jede Kante eine gewisse numerische Unsicherheit mit sich, da im Hinblick auf mögliche zusätzliche Wirbelbildung ein tendenziell destabilisierender Einfluss auf die Gesamtstruktur zu erwarten ist.

Bauverfahren

Betonstrukturen im Offshore-Bereich sind bereits seit mehreren Jahrzehnten im Einsatz. Die erste, aus Beton hergestellte Offshore-Struktur war die Ekofisk I (1973²⁸) eine ca. 90 m hohe, vorgespannte Betonstruktur mit einer kreisrunden Grundfläche ($d = 99 \text{ m}$). Heute sind eine Vielzahl (mehr als 300²⁸) weiterer, sogenannter „Gravity Based Structures“ (GBS) oder „Tension Leg Platforms“ (TLP) (abhängig von der Meerestiefe am Förderstandort), erfolgreich im Einsatz.

²⁸ Fernande J. F., Bittencourt T. N., Helene P. (2008). A review of the Application of Concrete to Offshore Structures. Special Publication 253, 2008. S 393-408

Die konstruktiven aber auch materialtechnischen Anforderungen in dieser hochgradig anspruchsvollen Umgebung sind enorm. Dynamischen Belastungen durch 29 m hohen Wellen, Windgeschwindigkeiten von mehr als 200 km/h sowie die Belastung durch den Bewuchs von Algen und Muscheln lassen auf die rauen Bedingungen, wie sie z.B. in der Nordsee vorzufinden sind und die dadurch gestellten Anforderungen an offshore Bauwerke schließen. Folglich sind die zum Einsatz kommenden Strukturen in Betonbauweise hauptsächlich hochfest, hochbewehrt und vorgespannt. Die Ansprüche an die meist immens großen Strukturen sind nicht nur in Bezug auf die Festigkeitseigenschaften sondern auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit (w/z Wert generell ≤ 0.45 , im Spritzwasserbereich ≤ 0.40 ²⁹ zum Erhalten einer möglichst geringen Porosität, Mindestzementgehalt $\geq 300 \text{ kg/m}^3$ im Spritzwasserbereich $\geq 400 \text{ kg/m}^3$ ²⁹; Betonfestigkeitsklassen zw. C40 bis C85²⁸) nicht mit herkömmlichem Betonzusammensetzungen vergleichbar.

Der vielfache Einsatz von Beton (GBS) ist vor allem auf die Wirtschaftlichkeit des Werkstoffs zurückzuführen. Betonstrukturen erweisen sich als überaus Betriebssicher, günstig in der Instandhaltung sowie bei Reparaturen und zudem als äußerst Dauerhaft³⁰. Durch die intensive Forschungsarbeit der letzten Jahrzehnte konnten der Zement und die Zuschlagstoffe immer zielgerichteter den Anforderungen angepasst werden. Zudem ist es auch auf die hohen geltenden Qualitätsstandards zurückzuführen, dass sich alle seit den frühen 1970er in der Nordsee gebauten Beton Offshore Plattformen in einem sehr guten Zustand befinden³¹.

Ein weiteres Resultat der fortwährenden Entwicklungsarbeit stellt die Ölförderplattform „Heidrun“, eine sogenannte TLP dar. Aufgrund der Verwendung von hochfestem Leichtbeton (Trockenrohdichte $800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{Tr} \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ³²) konnte die Gründung, im Gegensatz zu GBS die direkt auf dem Meeresboden gegründet werden, über sogenannte Zugbänder (tension legs) erfolgen. Mit diesem neuen Typus können somit deutlich tiefere Meeresregionen zur Förderung erschlossen werden³³.

Wie sich anhand bereits bestehender Offshore Strukturen zeigt, eignet sich Beton als durchaus gute und attraktive Alternative zum Baustoff Stahl insbesondere wenn es um die wirtschaftliche Herstellung großer Strukturen geht was im Sinne von Buoyant Energy durchaus zutrifft. Durch die große Variabilität bei der Betonherstellung (unterschiedliche Zementsorten, die Wahl der Zuschlagstoffe und Zuschlagmittel, die Massenanteile, etc.) kann auf die unterschiedlichsten Bedürfnisse zielgerichtet eingegangen werden. Die hohe Dauerhaftigkeit bei gleichzeitig geringen Wartungskosten wirkt sich zudem günstig auf die Wirtschaftlichkeit des Energiespeichers aus.

In Zusammenhang mit der Mehrfachnutzung von Buoyant Energy als Fundament für die städte-

²⁹ Det Norske Veritas AS (2012). Offshore Concrete Structures. Offshore Standard DNV-OS-C502, <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2012-09/Os-C502.pdf>, abgerufen 11.01.2018. S 38.

³⁰ Gudmestad O. T., Holand I., Jersin E. (2002). Design of Offshore Concrete Structures. CRC Press, 2002.

³¹ Gjorv O. E. (2014). Durability design of concrete structures in severe environments. CRC Press, 2014. S 88.

³² Müller S. H., Linsel S., Garrecht H., Wagner J.-P., Thienel K.-Ch. (2000). Hochfester konstruktiver Leichtbeton – Teil 1: Materialtechnologische Entwicklungen und Betoneigenschaften. Beton- und Stahlbetonbau 95.7. 2000. S 392-401.

³³ Faust T. (2003). Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. John Wiley & Sons, 2003. S 214.

bauliche Nutzung zeigt sich insbesondere hochfester Leichtbeton, mit der im Vergleich zu Normalbeton deutlich geringeren Rohdichte als äußerst interessant. Die mögliche Gewichtsreduktion der Speicherkonstruktion könnte in diesem Fall weiteren, kostbaren Nutzraum darstellen und somit die ökonomische Bilanz des multifunktionellen Energiespeichers weiter verbessern.

Bezüglich der Herstellung des Energiespeichers ist wiederum auf die Offshore-Industrie zu verweisen. In Abhängigkeit von der Größe des geplanten Bauvorhabens werden dort entweder das komplette Konstrukt oder nur einzelne Teile in einem Trockendock hergestellt. Bei GBS beispielsweise wird letzteres, unter anderem aus wirtschaftlichen Gründen, durchgeführt. Dabei werden zuerst in Trockendocks die Fundamentschalen in ihrer Höhe soweit aufgebaut, dass sie bei geflutetem Dock noch mittels Schiffen in Bereiche größerer Wassertiefe geschleppt werden können³⁰, wo anschließend die weiteren Betonierarbeiten stattfinden. Gleiches gilt für TLP aus Beton die, abgesehen von der vertikalen Auf- und Abbewegung von Buoyant Energy während des Ein- und Ausspeicherns, gut miteinander vergleichbar sind.

Es ist davon auszugehen, dass die grundsätzliche Herstellung der konstruktiven Struktur des Buoyant Energy Speichers keinerlei größere Schwierigkeiten darstellt, da sowohl das Know-how als auch die Anlagen zur Fertigung bereits vorhanden sind.

Bereits umgesetzte Projekte die zwar dimensionsmäßig etwas kleiner einzuordnen, jedoch vergleichbar sind findet man beispielsweise in den Niederlande. Aufgrund der besonderen Situation und der engen Verbundenheit des Königreichs der Niederlande mit dem Wasser, geologisch betrachtet ein Jahrtausende alter Schwemmkegel der Maas und des Rhein der in die Nordsee mündet³⁴, und dem seit jeher aktuellen und immer akuter werdendem Problem großflächiger Überschwemmungen mit schweren Folgen findet ein Umdenken statt: „Wasser als Chance und nicht mehr als Bedrohung.“ Städtebauliche Konzepte wie z.B. das vom Architekturbüro Marlies Rohmer umgesetzte „Floating Houses in IJburg“ (insg. 43 im Wasser treibende Häuser in Amsterdam, siehe Abbildung 22, links) erfreuen sich steigender Beliebtheit und stellen eine mögliche Antwort auf den steigenden Meeresspiegel und die zunehmenden Regenfälle dar³⁵.

Als Fundament dienen schwimmende Betonwannen wodurch ausreichend Auftrieb erzeugt wird, sodass die ca. 16 m^2 großen, dreigeschossigen Wohnungen sicher über Wasser gehalten werden. Zur Fixierung der horizontalen Lage sind die Häuser über Ringe mit Pfählen verbunden wodurch auch die notwendige vertikale Lageänderung im Falle eines Hochwassers nicht unterbunden wird. Ein weiteres vergleichbares und bereits umgesetztes Beispiel schwimmender Bauten stellt das IBA Dock am Muggenburger Zollhafen in Hamburg dar (Abbildung 22, rechts). Hier ruht auf einem 50 m langen und 26 m breiten Beton-Ponton das größte schwimmende Ausstellungs- und Büro-

³⁴ Podewils Ch. (2005). Die Niederlande und das Wasser – IX Raum für Flüsse und Maaswerke. Westfälische Wilhelms-Universität (WWU Münster), NiederlandeNet – Zentrum für Niederlande-Studien. Aktualisiert: Keim D., Juni 2014. <https://www.uni-muenster.de/NiederlandeNet/nl-wissen/geographie/vertiefung/wasser/fluesse.html>, abgerufen 12.01.2018.

³⁵ Schweighöfer K. (2014). Schwimmende Städte. Deutsche Welle. <http://p.dw.com/p/1BXvu>, abgerufen 12.01.2018.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gebäude Deutschlands³⁶. Zur Gewichtsersparnis sowie aus Transportgründen wurden die modularen Aufbauten aus Stahl gefertigt. Auch hier erlaubt die Befestigung des Pontons an Dalben die vertikale Lageänderung des Docks, die im vorliegenden Fall der Wasserspiegelschwankung der Tide (Gezeiten) von 3,5 m entspricht, bei gleichzeitiger Fixierung der horizontalen Lage. Auch hier gilt wie in den Niederlanden der Ansatz eines neuen Umgangs mit der Natur. Anstatt ständig wachsender Deiche und dem Versuch die Natur auszusperren, sollen mit der Natur im Einklang stehende Lösungen umgesetzt werden.

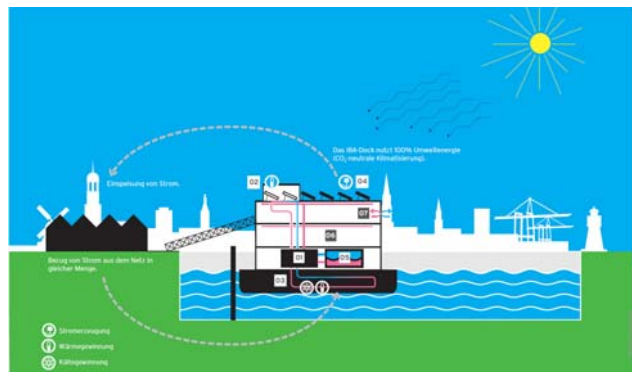


Abbildung 22: Floating Houses in IJburg – Architekturbüro Marlies Rohmer (links). IBA-Dock Hamburg (rechts).

Zusammenfassung Bauverfahren

Wie anhand der angeführten Wohnbauten aber auch einer Reihe weitere Beispiele (Häuser im Eilbekkanal, Lausitz Resort, etc.) abzuleiten ist, gibt es neben den Offshore-Strukturen bereits eine Reihe von Referenzprojekten für Bauten am Wasser. Als gemeinsamer Nenner beider (Wohn- und Industriebauten) kann sowohl die, wenn es dimensionsmäßig möglich ist, Vorfertigung in einem Trockendock mit anschließendem Transport an den geplanten Standort, als auch die verwendeten Grundmaterialien (Beton oder Stahl), angeführt werden.

Aufgrund der anzunehmenden Größe der Buoyant Energy Strukturen sowie dem Wunsch nach einer möglichst wartungsarmen, leicht revisionierbaren, stabilen und dauerhaften Hüllstruktur die bestmöglich an die vorherrschenden Bedingungen angepasst werden kann bietet sich der Baustoff Beton als optimale Lösung für den Energiespeicher an. Nicht zuletzt aufgrund der Möglichkeit der Verwendung von hochfestem Leichtbeton im Falle der multifunktionellen des Energiespeichers als Fundament für städtebauliche Belange erweist sich Beton als ökonomisch gute Wahl.

Die Herstellung der Hüllstruktur des Energiespeichers kann nach den bewährten und vielfach durchgeführten Methoden der Offshore-Industrie in einem Trockendock, mit anschließendem Verschiffen des fertigen Energiespeichers an den geplanten Einsatzort, erfolgen.

³⁶ IBA Hamburg GmbH. IBA Dock. <http://www.iba-hamburg.de/projekte/iba-dock/projekt/iba-dock.html>, abgerufen 12.01.2018.

AP 4 Maschinentechnische Ausgestaltung (TUW IET)

Grundlegende Untersuchungen

Einen wichtigen Punkt des BE-Speicherkonzeptes stellt die maschinentechnische Ausstattung des Energiespeichers dar. Ersten Überlegungen zufolge könnten entweder reversible oder ternäre Systeme zum Einsatz kommen. Im Falle von ternären Systemen sind Turbine (Francis oder Pelton) und Pumpe separat voneinander angeordnet. Dadurch kann bei Bedarf innerhalb kürzester Zeit der Pumpbetrieb zur Energiespeicherung aus dem Stillstand erfolgen. Im Gegensatz dazu sind reversible Systeme eine Kombination aus Pumpe und Turbine, deren Betriebsweise (Pump- oder Turbinierbetrieb) durch die jeweilige Drehrichtung bestimmt wird. Neben einer kompakten Bauweise ermöglicht die große Auswahl an spezifischen Geschwindigkeiten den Einsatz bei Fallhöhen von weniger als 50 m bis mehr als 800 m³⁷. Wie die Erfahrung zeigt, sind beide System äußerst langlebig und zuverlässig.

Im Falle von BE kann zwar auf dasselbe bewährte Prinzip zurückgegriffen werden, jedoch sind die auftretenden Fallhöhen im Vergleich zu jenen bei PSW deutlich geringer. Aufgrund der Neuartigkeit des Konzeptes gilt es hier eine geeignete Lösung in Abhängigkeit von einer definierten BE Dimension zu entwickeln.

Zur Ermittlung realistischer BE-Dimensionen wurden zwei verschiedenen Szenarien, wie bereits in Kapitel „AP2 Konzeptentwicklung“ kurz angesprochen, untersucht. Szenario 1 prüft die Möglichkeit der Leistungsglättung einer Windenergieanlage (WEA)^{17,18} mit einer angenommenen Nennleistung von 10 MW über eine festgelegte Zeitdauer von: 1 h, 2 h, 3 h, 4 h und 6 h sowohl für eine begrenzte als auch einem Speicher mit unbegrenzter Energiespeicherkapazität. In Szenario 2 wird hingegen die benötigte Speicherkapazität und Maschinenleistung für den Tagesausgleich von 500 3-Personen-Haushalten auf Grundlage der H0 Standardlastprofile (SLP) für das Jahr 2017¹⁹ ermittelt.

Als Grundlage für Szenario 1 wurden die Ganglinien der Netzeinspeiseleistung der Windenergieanlagen in der österreichischen Ökostrom Bilanzgruppe für die Jahre 2009 bis 2016 (15-min Werte) herangezogen und auf eine angesetzte Nennleistung von 10 MW skaliert. Anzumerken ist, dass durch die geographische Verteilung der Anlagen eine gewisse Glättung bzw. Vergleichmäßigung der Leistung in der Ganglinie auftritt. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der Einfluss dieses Effekts durch die Konzentration der WEA auf den Osten Österreichs relativiert wird und somit die fluktuierende Charakteristik erhalten bleibt.

Aufbauend auf diesen Daten wurden in weiterer Folge sogenannte Leistungsfahrpläne *PFP* festgelegt, die das Glättungsintervall (1 h bis 6 h, siehe exemplarisch Abbildung 23) der fluktuierenden Einspeisecharakteristik der WEA definieren. Mithilfe dieser Fahrpläne war es möglich, die notwendige Einspeiseleistung in den Energiespeicher (Abbildung 23, P_{ein}) bzw. die notwendige Abgabeleistung aus dem Speicher an das Netz (Abbildung 23, P_{aus}) zu bestimmen.

³⁷ Voith (2017): Pumped storage machines – Reversible pump turbines, Ternary sets and Motor-generators. Voith Hydro Holgind GmbH & Co. KG, www.voith.com, Heidenheim, Germany, S.6,9.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Für den gesetzten Fall, dass die Speicherleistung auf 1,5 MW begrenzt ist können zudem die Ein- und Ausspeicherverluste ermittelt werden. Dies sind jene Verluste, die sich ergeben, wenn einerseits der Speicher gefüllt ist und somit im Falle der Überproduktion (höhere Leistung als im PFP vorgesehen) die Einspeicherung gestoppt wird oder andererseits bei leerem Speicher und einer geringeren Leistung als im PFP angesetzt keine Energie mehr entnommen werden kann.

Exemplarisch ist in Abbildung 24 der festgelegte Leistungsfahrplan (siehe linkes Diagramm) sowie die während dieses Zeitraumes vorherrschende Speicherkapazität (siehe rechtes Diagramm) dargestellt, wobei angemerkt werden muss, dass von einer 50 %igen Füllung des Speichers zum Startzeitpunkt ausgegangen wird. Wie zu erkennen ist treten Verluste bei der Ein- und Ausspeicherung auf. Eine Auflistung über den Verlustanteil (prozentuell sowie zeitlich) während des betrachteten Zeitraumes und für alle untersuchten Leistungsfahrpläne ist in Tabelle 5 gegeben. Hierbei handelt es sich um den Mittelwerte der über die im betrachteten Zeitraum auftretenden Ein- und Ausspeicherverluste für die jeweiligen definierten Glättungsintervalle. Wie zu sehen ist ergeben sich Verluste für die Dauer von wenigen *Min/Jahr* bis hin zu mehreren *Tagen/Jahr*.

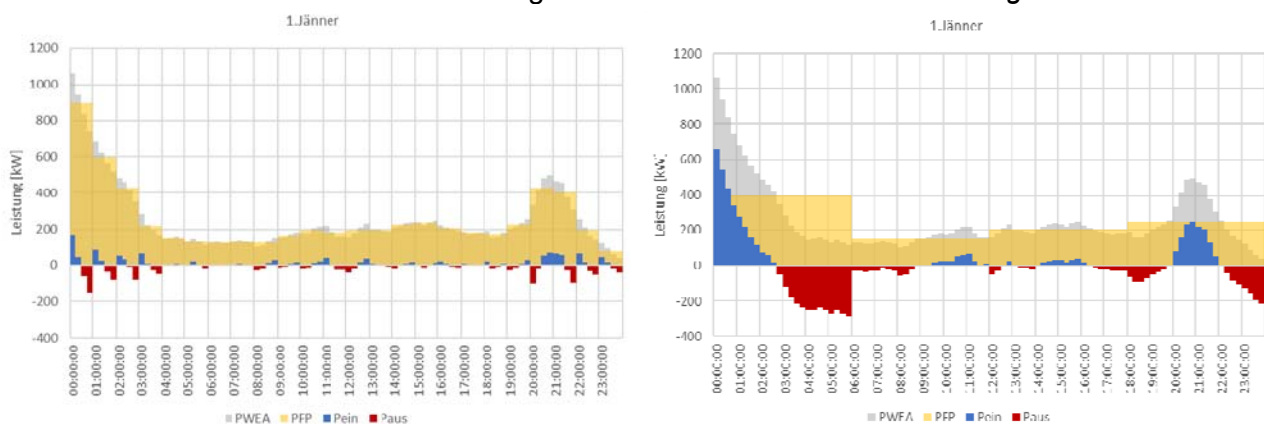


Abbildung 23: Leistungsfahrplan 1. Jänner 2016. Glättungsintervall 1 h (links). Glättungsintervall 6 h (rechts).

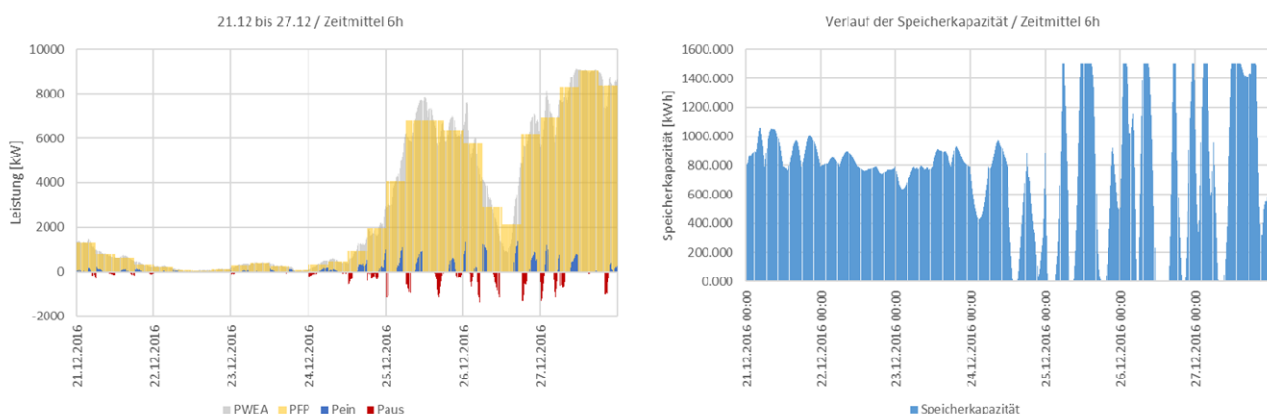


Abbildung 24: 21.12.2016 bis 27.12.2016: PFP (Glättungsintervall 6 h, links). Speicherkapazitätsverlauf (rechts).

Tabelle 5: Mittelwert der Ein- und Ausspeicherverluste im Zeitraum 2009 – 2016 für die angesetzten Glättungsdauern (PFP) sowohl als prozentueller Anteil des Gesamtanteils als auch in *Min/Jahr* bzw. *Tagen/Jahr* ausgedrückt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

PFP		Einspeicherverlust	Ausspeicherverlust		Einspeicherverlust	Ausspeicherverlust
1 h	Mittelwert	0.002%	0.005%	Min/Jahr	11	24
2 h	Mittelwert	0.45%	0.34%	Tage/Jahr	2	1
3 h	Mittelwert	2.41%	2.38%	Tage/Jahr	9	9
4 h	Mittelwert	5.45%	6.00%	Tage/Jahr	20	22
6 h	Mittelwert	10.98%	13.02%	Tage/Jahr	40	48

Die Benötigte Speicherkapazität bzw. Pumpen- und Turbinenleistung zur vollständigen Abdeckung der Fahrplanleistung während des gesamten Betrachtungszeitraums ist in Tabelle 6 gegeben. Wie der Vergleich mit Tabelle 7 zeigt (begrenzte Speicherkapazität) steigt mit zunehmender Glättungsdauer auch die erforderliche Kapazität stark an. Bei einem Glättungsintervall von 6 h ergibt sich somit eine erforderliche Speicherkapazität von **15,5 MWh**. Geometrisch betrachtet müsste ein Speicher mit einer quadratischen Grundfläche von **50 x 50 m** eine Höhe von ca. **95 m** (siehe Tabelle 6) aufweisen um die geforderten Kapazität zu erzielen.

Tabelle 6: Ergebnis WEA für einen Energiespeicher mit unbegrenzter Kapazität.

Ergebniszusammenfassung BE zum Fluktuationsausgleich einer WEA mit 10000 [kW] Nennleistung												
Ausgleichsdauer	Angesetzte der Speicherkapazität	Lres	Bres	Hres,ges	Hdruck	Hw,max	Vwasser,max	Qpumpen	Qturbinieren	Pspeichern (Pumpe)	Pabgabe (Turbine)	Eerf
[h]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³]	[m³/s]	[m³/s]	[kW]	[kW]	[kWh]
1	unbegrenzt	50	50	31.6	15.8	15.8	39517.7	22.5	20.0	3482.5	3104.2	1702.2
2	unbegrenzt	50	50	48.6	24.3	24.3	60791.8	18.7	19.4	4449.3	4635.6	4028.2
3	unbegrenzt	50	50	65.4	32.7	32.7	81697.9	16.2	16.5	5187.1	5287.8	7275.3
4	unbegrenzt	50	50	77.4	38.7	38.7	96800.7	13.9	14.6	5286.2	5552.3	10213.7
6	unbegrenzt	50	50	95.1	47.6	47.6	118896.0	12.3	12.2	5743.5	5709.2	15408.5

Tabelle 7: Ergebnis WEA für einen Energiespeicher mit begrenzter Kapazität von 1,5 MW.

Ergebniszusammenfassung BE zum Fluktuationsausgleich einer WEA mit 10000 [kW] Nennleistung												
Ausgleichsdauer	Angesetzte der Speicherkapazität	Lres	Bres	Hres,ges	Hdruck	Hw,max	Vwasser,max	Qpumpen	Qturbinieren	Pspeichern (Pumpe)	Pabgabe (Turbine)	Eerf
[h]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³]	[m³/s]	[m³/s]	[kW]	[kW]	[kWh]
1	begrenzt	50	50	29.7	14.8	14.8	37096.5	23.9	18.7	3482.5	2729.2	1500.0
2	begrenzt	50	50	29.7	14.8	14.8	37096.5	26.9	21.3	3914.0	3096.3	1500.0
3	begrenzt	50	50	29.7	14.8	14.8	37096.5	27.5	24.5	4008.0	3562.8	1500.0
4	begrenzt	50	50	29.7	14.8	14.8	37096.5	26.3	31.4	3832.1	4563.8	1500.0
6	begrenzt	50	50	29.7	14.8	14.8	37096.5	24.2	35.0	3522.4	5094.2	1500.0

Als Grundlagedaten für Szenario 2 wurden die H0 Standardlastprofile (SLP) für Haushalte (15-min Werte) für das Jahr 2017¹⁹ herangezogen und auf den Bedarf von 500 3-Personenhaushalten skaliert. Der maximale Speicherbedarf sowie die maximale Ein- und Ausspeicherleistung die sich bei Betrachtung aller relevanten Tageslastfälle im Betrachtungszeitraum ergeben, können für nachfolgende maschinentechnische Untersuchungen als Grundlagedatendaten herangezogen werden. Exemplarisch sind in Abbildung 25 die Lastkurven, die angesetzten Leistungsfahrpläne sowie die Ein- und Ausspeicherleistung für Werktage im Jahr 2017 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

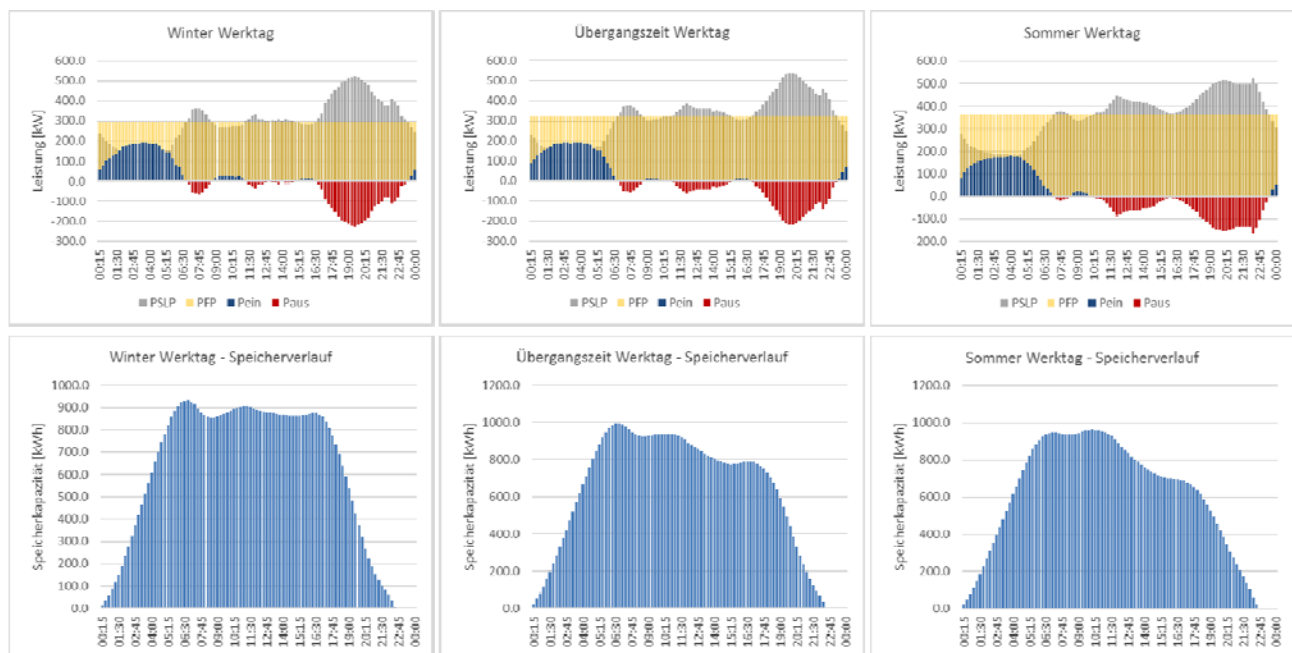


Abbildung 25: Lastkurven, Leistungsfahrpläne, Ein- und Ausspeicherleistung für Werktag im Jahr 2017.

Die Ergebnisse von Szenario 1 sind in Tabelle 8 dargestellt. Diese liefert eine Übersicht über die benötigte Speicherkapazität, sowie einen Richtwert für die maximale Pumpen- und Turbinenleistung die zum Abdecken des geforderten Leistungsfahrplans für die angesetzten 500 3-Personen-Haushalte benötigt wird.

Die Ergebnisse der beiden untersuchten Szenarien sollen als Grundlage für die weiterführenden maschinentechnischen Untersuchungen dienen.

Tabelle 8: Benötigte Speicherkapazität, Pumpen- und Turbinenleistung zum Ausgleich des SLP für 500 3-Personen-Haushalte.

Ergebniszusammenfassung BE zum Ausgleich eines H0 (Haushalt) Standardlastprofil (SLT)										
Lres	Bres	Hres,ges	Hdruck	Hw,max	Vwasser,max	Qpumpen	Qturbinieren	Pspeichern (Pumpe)	Pabgabe (Turbine)	Eerf
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[kW]	[kW]	[kWh]
50	50	32.9	16.5	16.5	41150.0	1.8	2.0	229.8	260.0	1476.6

Maschinenkonzepte

Aus der einschlägigen Fachliteratur^{38,39,40} geht hervor, dass man prinzipiell zwei Möglichkeiten in der hydraulischen Energiespeicherung einsetzt.

Zum einen die reversible Pumpturbine, die in der einen Drehrichtung als Pumpe und in die andere Drehrichtung als Turbine betrieben wird. Dieses Konzept ist äußerst kompakt und wirtschaftlich und wird bis zu einer Leistungsklasse von mehreren 100 MW eingesetzt. Grenzen weist dieses

³⁸ Strömungsmaschinen, C. Pfeleiderer, H. Petermann, Springer 2005

³⁹ Wasserkraftanlagen, J. Giesecke, E. Mosonyi, Springer 2009

⁴⁰ Wasserkraftmaschinen und Anlagen, Raabe, R. Schilling, Springer 2005

Konzept hinsichtlich der Umschaltzeiten und des Wälzwirkungsgrades auf, da hier im Design gewisse Kompromisse eingegangen werden müssen. Eine gewisse Verbesserung lässt sich durch einen drehzahlvariablen Motorgenerator erreichen, da hierdurch die optimalen Betriebspunkte der Maschine im pumpen und turbinieren angefahren werden können.

Hier gegenüber steht das drei Maschinen Konzept mit einer separaten Pumpe und Turbine mit maximal erreichbaren Wirkungsgraden, jedoch durch die Konstruktion deutlich teurer als die reversible Pumpturbine. Eine Besonderheit bei diesem Konzept ist die Möglichkeit des hydraulischen Kurzschlusses, der eine extrem schnelle Umschaltzeit vom Pumpen zum Turbinieren für mehrere *100 MW* innerhalb einer Minute ermöglicht.

Für das hier untersuchte Konzept eignen sich diese großtechnischen Ausführungen nicht und aus diesem Grunde werden im Folgenden Möglichkeiten aufgezeigt und über definierte Fälle Maschinenkonzepte betrachtet die der Aufgabestellung bestmöglich gerecht werden.

Variantenstudie zu den Maschinenkonzepten und Auslegungen

Durch eine Kombination von Turbinen und Pumpen soll das Ziel erreicht werden, unterschiedliche Leistungsbereiche unter den sich aus dem System ergebenden Randbedingungen (annähernd konstante Höhe) mit guten Wirkungsgraden abzudecken. Die Einstellung verschiedener Leistungsbereiche erfolgt auf Seite der Turbinen mit Hilfe eines Leitapparats. Pumpenseitig wird die Änderung des Betriebspunktes durch Drehzahländerung realisiert. Für angepasste Maschinensätze kann entsprechend dem Stand der Technik, sowohl pumpen- als auch turbinenseitig maximale Wirkungsgrade von ca. 92 % erreicht werden. Für einen Generator bzw. Motor können Bestwirkungsgrade von ca. 98 % erzielt werden.

Wenn man nun von angepassten Maschinen zu Serienmaschinen übergeht ergibt sich ein etwas anderes Bild. Hierzu zeigt exemplarisch Abbildung 26 Kennlinien einer typischen Serienpumpe bei konstanter Drehzahl (links) und konstanter Höhe (rechts) dargestellt. Von diesen Referenzwerten wird für die nachfolgenden Variantenrechnungen ausgegangen. Aus dieser Darstellung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Drehzahl lässt sich unter den gewählten Voraussetzungen ein sinnvoller Einsatzbereich für die Pumpe im Drehzahlbereich zwischen *800* und *1100 U/min* über 70 % ermitteln.

Stellt man analog das Wirkungsgradverhalten einer Referenz-Turbine in Abhängigkeit von der Drehzahl dar, so erhält man die in Abbildung 2 ersichtliche Charakteristik. Dabei zeigt sich, dass sich im Bereich von 50 bis 130 % der nominellen Leistung ein Wirkungsgrad über 80 % ergibt.

Ergibt sich die Notwendigkeit, einen breiteren Leistungsbereich abzudecken, so müssen mehrere Maschinen in paralleler Anordnung betrieben werden. Abbildung 3 zeigt den zugehörigen Wirkungsgradverlauf über der Leistung beim Einsatz mehrerer Turbinen (oben) bzw. Pumpen (unten). Bei den folgenden Simulationen wurde von marktverfügbaren Pumpensystemen ausgegangen. Für diese bestehenden Pumpensysteme konnte ein Optimierungspotenzial festgestellt werden, dass durch spezielle Auslegungen verbessert werden könnte.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

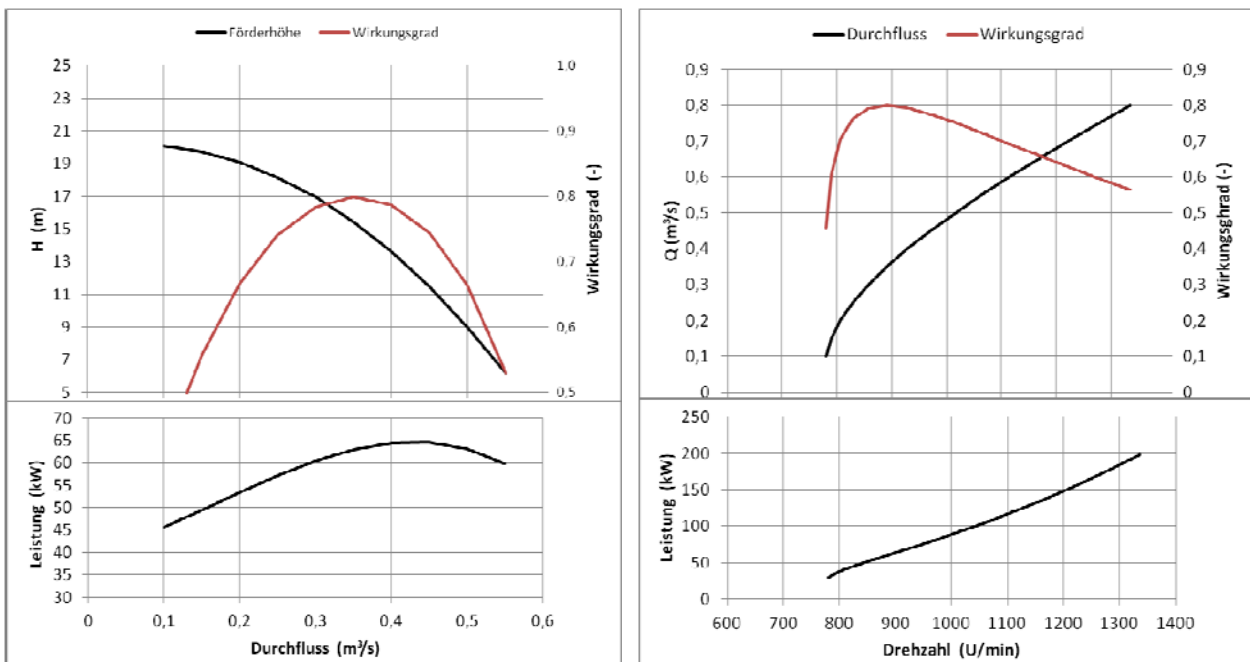


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad, Leistung, Durchflussmenge und Drehzahl als Ausgangsbasis für die gewählte Serienpumpe.

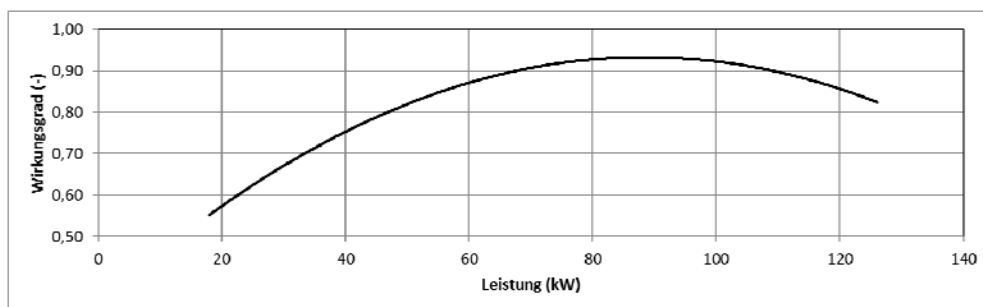


Abbildung 27: Wirkungsgradverlauf über der Leistung bei einer repräsentativen Turbine.

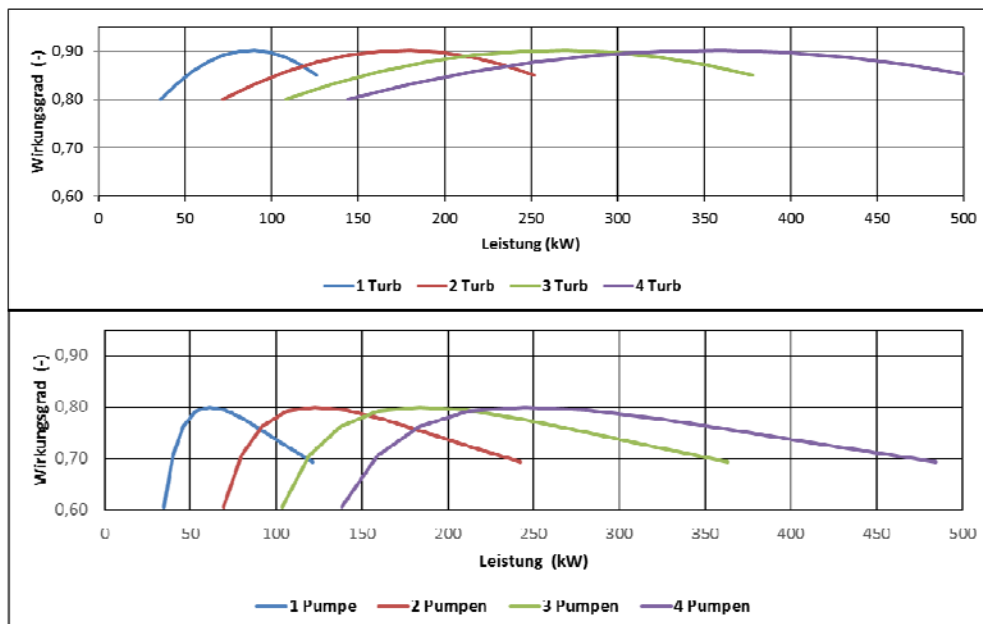


Abbildung 28: Wirkungsgrade über der geforderten Leistung bei Parallelschaltung mehrerer Turbinen (oben) und Pumpen (unten).

Dem Stand der Technik entsprechend wurde in einem ersten, konservativen Rechenansatz pumpenseitig ein maximaler Wirkungsgrad von 80 % angenommen. Im relevanten Einsatzbereich bewegt sich das Pumpenkollektiv damit in einem Band von 70-80 %.

Im Folgenden werden drei verschiedene Referenzfälle simuliert, wobei als Basis 4 Pumpen und 4 Turbinen für die Berechnungen als sinnvoll erachtet werden. Hierzu werden Leistungsdaten von Windenergieanlagen von 4 Jahren herangezogen. Für die beiden ersten Fälle wird eine Fall- bzw. Förderhöhe von 15 m angenommen. Die Fläche des Speichers ist mit 50.000 m² gewählt.

1. Fall: Buoyant Energy (schwere Variante) – Windenergieanlage
2. Fall: Buoyant Energy (schwere Variante) – Standardlastprofil für den Haushalt
3. Fall: Buoyant Energy (leichte Variante) – Standardlastprofil für den Haushalt

Für Fall 1 ergeben sich, abhängig von der Mittelungsdauer, unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen für den Verlauf der elektrischen Ausgleichsleistung, die vom Speichersystem aufgenommen bzw. abgegeben werden muss. Die Abbildung 4 links zeigt, dass man bei einer kurzen Mittelungszeit von 1 Stunde einen Leistungsbereich von 30 bis 200 kW auswählen sollte, da dieser Leistungsbereich am häufigsten vorkommt. Für eine Mittelungsdauer von sechs Stunden ergibt sich der häufigste Leistungsbereich von 100 bis 300 kW, siehe hierzu Abbildung 3 rechts.

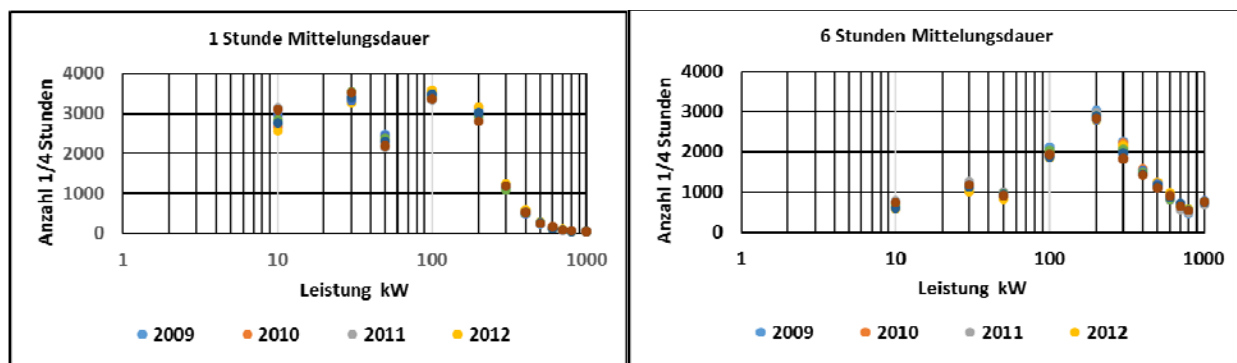


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Leistungsbereiche bei unterschiedlicher Mittelungsdauer von einer und sechs Stunden.

Die Abbildung 5 und 6 zeigen die Ausgleichsleistungen bei einer oder sechs Stunden Mittelung für eine Datenbasis von 10 Tagen. Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei einer kurzen Mittelung die Oszillation höher ist als bei einer niedrigen Ausgleichsleistung von maximal ± 500 kW. Der Wasserspeicherstand hebt sich über den betrachteten Zeitraum für ca. 1,5 m. Für längere Mittelungen nimmt die Oszillation ab und die Ausgleichsleistung verfünffacht sich, bei einer Wasserspeicherzunahme von ca. 7 m.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

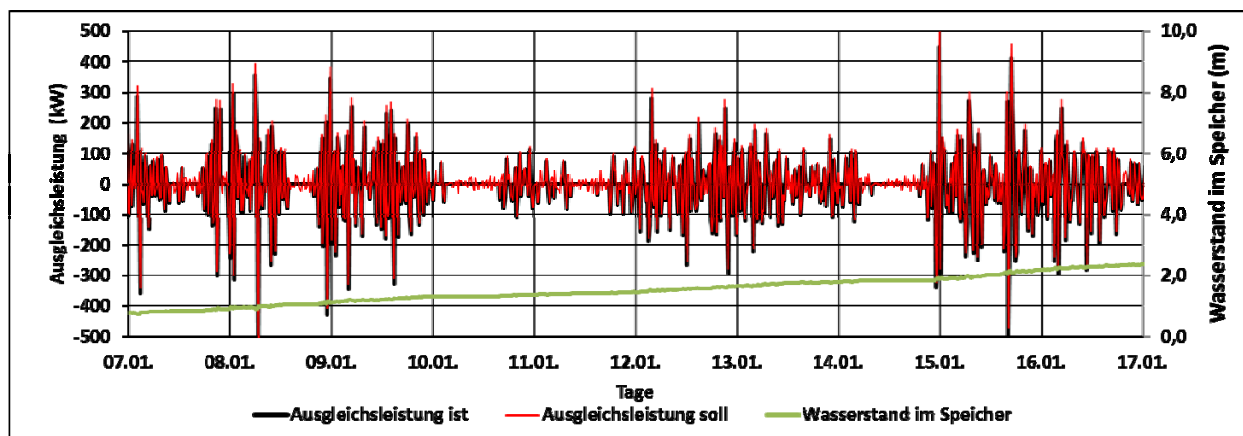


Abbildung 30: Ausgleichsleistung bei einer bei einer Mittelung von einer Stunde.

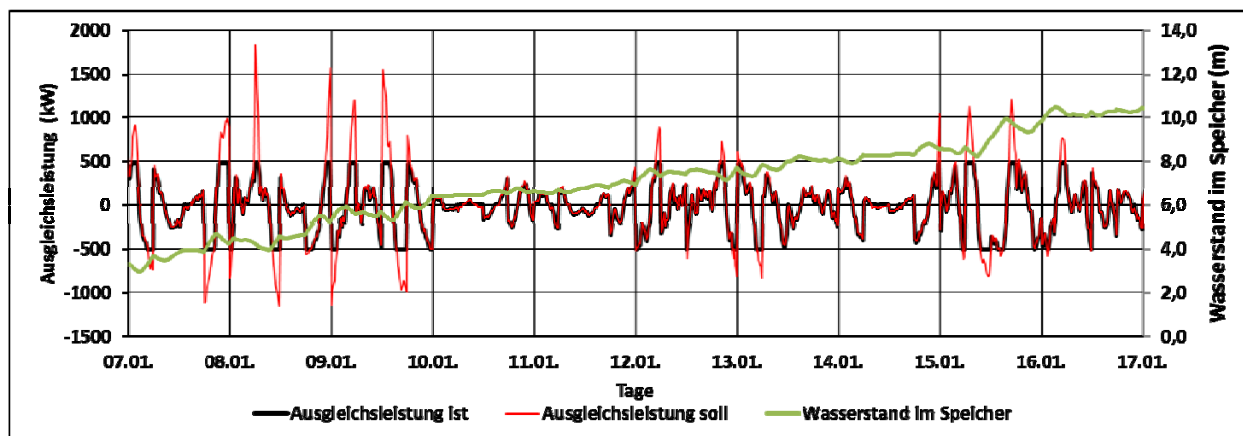


Abbildung 31: Ausgleichsleistung bei einer bei einer Mittelung von sechs Stunde.

Für die Fälle 2 und 3 wird von einem konstanten Dargebot an elektrischer Leistung ausgegangen. Daraus soll mit Hilfe von Ein- und Ausspeichervorgängen im Speichersystem ein elektrischer Leistungsverlauf vom System abgegeben werden, der einem Haushaltslastprofil entspricht. Abbildung 7 und 8 zeigen die Ergebnisse für zwei verschiedene Tage. Es wird wieder mit einer Kombination von mehreren Maschinen (Pumpen und Turbinen) ausgegangen. Das Lastprofil wird gut nachgefahren; nur bei sehr kleinen Leistungen gibt es aufgrund der gegebenen Wirkungsgradgrenzen keinen Ausgleich. Wählt man eine Speichergröße von 5.000 m^3 und darüber hinaus von 15 m Fall- bzw. Förderhöhe aus, so steigt der Speicher bei einem Ausgleich auf den Mittelwerten des Tageslastprofils im Laufe des Tages um ca. 2 bis 3 m an.

Mit der gewählten Konfiguration lässt sich die gesamte Bandbreite zwischen dem Tag mit der größten und jenem mit dem geringsten Leistungsbedarf abdecken. Um den Wasserstand im Speicher im Tagesrhythmus konstant zu halten, darf nicht auf den Mittelwert des Tagesprofils, sondern es muss um einen etwas höheren Wert ausgeglichen werden. Die Abbildung 9 zeigt den ausgeglichenen Speicherstand, wenn auf 106 % des Tagesmittels ausgeglichen wird.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

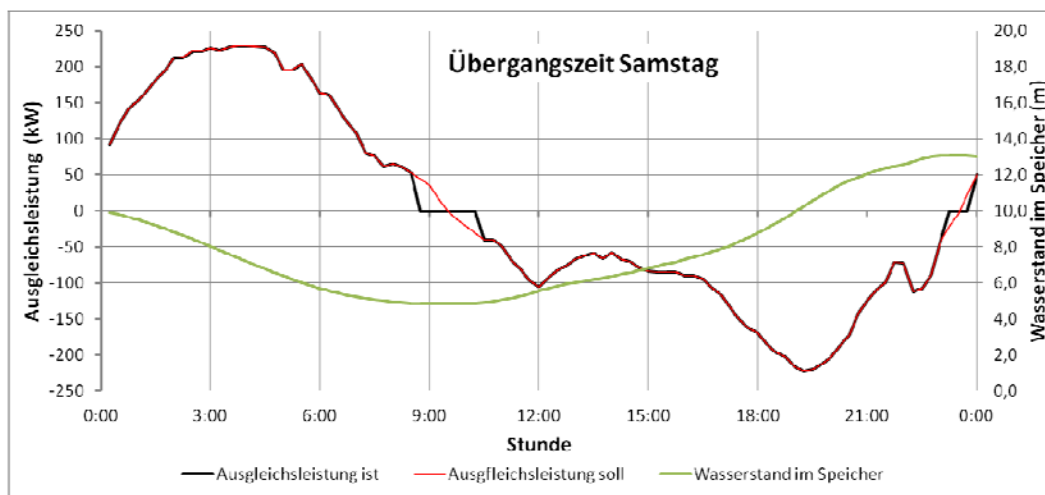


Abbildung 32: Ausgleichsleistung und Wasserspeicherstand in der Übergangszeit an einem Samstag.

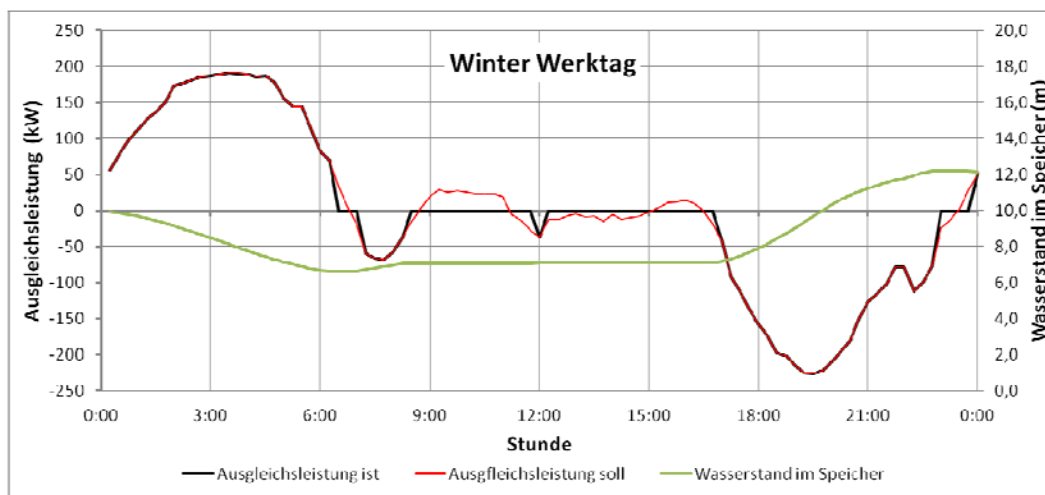


Abbildung 33: Ausgleichsleistung und Wasserspeicherstand im Winter an einem Werktag.

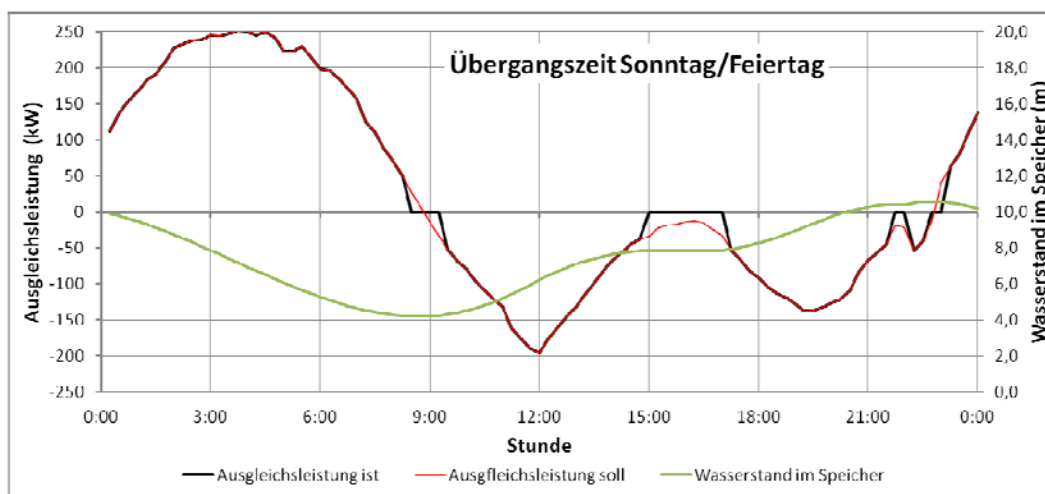


Abbildung 34: Ausgleichsleistung und Wasserspeicherstand in der Übergangszeit an einem Sonn- und Feiertag.

Im Fall 3 steigt mit zunehmendem Füllgrad des Speichers der Gegendruck und somit bei Leistungsaufnahme die benötigte Förderhöhe bzw. bei Leistungsabgabe die Fallhöhe. Mit turbinen- und pumpenseitiger Drehzahlregelung kann diesem Phänomen begegnet werden. Damit geht allerdings eine leichte Reduktion des Wälzwirkungsgrades einher. Wird der Wälzwirkungsgrad als das Verhältnis zwischen ausgespeicherter elektrischer Energie und aufgewendeter, zugeführter Energie definiert, so ergeben sich für das System folgende Resultate:

- Durch die Optimierung der einzelnen Maschinen, bei konstanten Betriebsbedingungen im Bestpunkt, ist ein Wälzwirkungsgrad von über 80 % zu erreichen.
- Unter den für die obigen Fälle getroffenen Annahmen (variabler Betrieb, Serienmaschinen) ergeben sich Wälzwirkungsgrade zwischen 50 und 65 %.
- Wenn auch kleinste Leistungsschwankungen abdeckt werden sollen, kann der Wälzwirkungsgrad im „hydraulischen Kurzschluss“ (Pumpe und Turbine sind gleichzeitig im Betrieb) rechnerisch bis auf 0 % sinken.

Aus der Untersuchung und den dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass eine reine Kombination von einer Pumpe mit Turbine zur Erfüllung der Anforderungen des betrachteten Konzeptes nicht zielführend ist. Je nach Gesamtgröße der Anlage mit höherem Leistungsbereich sind auf jeden Fall mehrere Maschinensätze zu kombinieren, die dann aus technischer und wirtschaftlicher Sicht interessante Wälzwirkungsgrade erbringen.

Korrosionsschutzmaßnahmen und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Das hier dargestellte Konzept wird in einer maritimen Umgebung eingesetzt und muss hier besonders dem Einfluss von Salzwasser auf die Komponenten geschützt werden. Verschiedene Pumpenhersteller bieten ihre Pumpen schon heute für andere Anwendungen als seewasserbeständig an und man kann hier natürlich auch auf die langjährigen Erfahrungen aus dem Bereich der Schifffahrt bzw. neuerdings auch auf die Gezeitenkraftwerke zurückgreifen. Im Wesentlichen wird auf seewasserbeständige Materialien wie z. B. Edelstahl oder Aluminiumbronze zurückgegriffen. In diesem gesamten Bereich hat man schon so viel Erfahrung gesammelt, dass man auch hier von einem gewissen Stand der Technik sprechen kann.

Für das hier verfolgte Konzept haben wir auf Standard Pumpen und Turbinen für die Simulationen zurückgegriffen, um die grundsätzlichen Fragestellung dieser Sondierung zu beantworten. Mit der bisherigen Datenlage ist es nicht zielführend ein angepasstes Design zu entwickeln und sollte erst bei einer Detailstudie mit festgelegten Randbedingungen durchgeführt werden. Unter dem Hintergrund der Standardkomponenten kann hier direkt auf die Erfahrungen des Herstellers zurückgegriffen werden. Ein wesentlicher Vorteil der Standardlösung beim Einsatz von mehreren baugleichen Pumpen und Turbinen ist die schnelle Austauschbarkeit und somit geringere Ertragsverluste durch Stillstand.

AP5 Kombinationsmöglichkeiten

Integration von Buoyant Energy in Offshore Windfarmen

Zum aktuellen Zeitpunkt werden offshore Windfarmen ausschließlich in verhältnismäßig seichten offshore Bereichen erstellt, wodurch die Gründung dieser am Meeresboden erfolgen kann. Hier wäre es möglich, eine beliebige Anzahl an Buoyant Energy (BE) Energiespeicher an den Verbindungsstellen der Kabelleitungen der zahlreichen Windturbinen mit jenen der Seekabel die in Richtung Küste laufen, zu platzieren.

Heutzutage besteht großes Interesse schwimmende offshore Windturbinen zu entwickeln. Dadurch wäre es nicht nur möglich in Bereichen großer Wassertiefen, weit weg von der Küste, Windenergie zur Stromerzeugung nutzen zu können, sondern es wird auch erwartet, dass dadurch Bewilligungen deutlich schneller erteilt werden. Die Integration des BE Konzeptes in die Schwimmstruktur dieser Windturbinen ist ein nächster Schritt für weiterführende Untersuchungen (Abbildung 35a, 36a und 36b). Würde jede schwimmende Windturbine mit ihrer eigenen Energiespeichereinheit verbunden, würde das eine deutliche Flexibilitätssteigerung des Gesamtsystems bedeuten. BE könnte als Kurzzeitspeicher fungieren, die fluktuierende Stromabgabe der Windturbine in eine geglättete und über ein vordefiniertes Zeitintervall gleichmäßige umwandeln was wiederum die üblicherweise auftretenden Schwierigkeiten bei der Netzeinspeisung des Stroms aus herkömmlichen Windkraftanlagen bessern würde.

Das Mittelmeer weist mit seinen weitläufigen Bereichen hoher Wassertiefe diesbezüglich sehr großes Potential auf. Hier könnten die genannten schwimmenden Kombinationssysteme (Windturbine mit BE) großmaßstäblich ausgeführt werden. Beispielhaft wird eine 5 MW Anlage mit angenommenem Standpunkt vor Malta (zentrales Mittelmeer) näher untersucht. Der Untersuchungszeitraum für die schwimmende offshore Windturbine geht über eine Dauer von fünf Jahren (2007-2011). Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten von Malta, 10 km von der Küste entfernt in einem Bereich mit einer Meerestiefe von 200 m (Abbildung 35b).

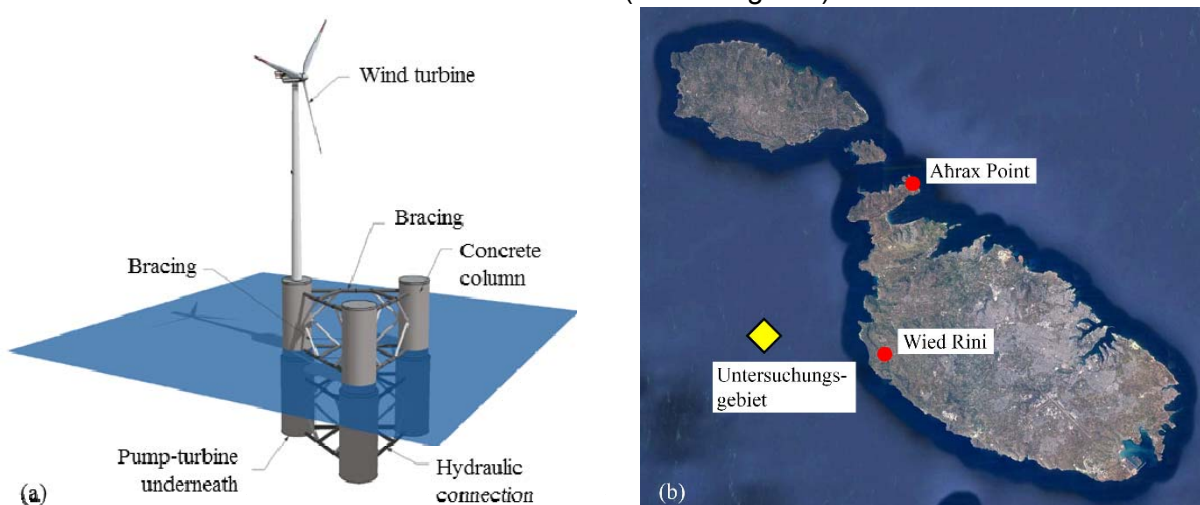


Abbildung 35: (a) Schwimmende Windturbine – Integration des Buoyant Energy Konzepts in das schwimmende Fundament der Windkraftanlage. (b) Karte der maltesischen Inseln inkl. dem offshore Untersuchungsgebiet, WiedRini und Ahrax Point (Quelle: Google Earth, abgerufen Juli 2017).

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die angesetzte Windgeschwindigkeit für diesen Bereich, 90 m über dem mittleren Meeresspiegel (mean sea level, m.s.l.), wurde anhand von landgebundenen Messungen und CFD (Computational Fluid Dynamics) Prognosen bestimmt. Langzeitmessungen der Windgeschwindigkeiten und -richtungen für 10 m über dem Boden (above ground level, a.g.l.) in Wied Rini und Kurzzeitmessungen für 80 m a.g.l. in Ahrax Point⁴¹ wurden als Datengrundlage einer durchgeführten MCP-Methode (Measure-Correlate-Predict) mit der Softwar WindPRO⁴² verwendet. Dieser prognostizierte Datensatz wurde anschließend in der CFD-Software Anwendung WindSim⁴³ verwendet um die Windressourcen am Offshore-Standort, im Makrobereich die maltesischen Inseln abdeckend, modelliert. Der 5 jährliche Durchschnitt der Windgeschwindigkeit wurde mit 7,29 m/s angenommen und der Weibull Parameter k , für 90 m über m.s.l., mit 1,76.

Die resultierenden Zeitserien der Windgeschwindigkeitsdaten, bestehend aus 10 minütigen Durchschnittswerten, wurden in Verbindung mit Leistungskurven für die NREL 5 MW Windturbine⁴⁴ verwendet um den Verlauf der erzeugten elektrischen Leistung zu prognostizieren. Der durchschnittliche jährliche Energiegewinn der Windturbine wurde, unter Berücksichtigung Übertragungsverluste, mit 16 GWh/Jahr angesetzt wodurch sich ein Kapazitätsfaktor von 36,5 % ergibt.

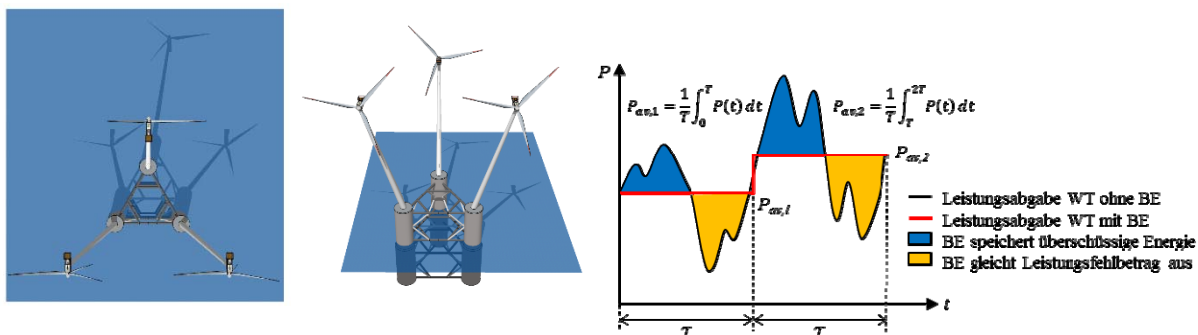


Abbildung 36: (a) und (b) zeigen eine weitere mögliche Version von Windturbinen bei denen das Buoyant Enregy Konzept in die Schwimmstruktur integriert werden kann. (c) Konstante Leistungsabgabe einer Windturbine über ein definiertes Zeitintervall T durch die Integration von Buoyant Energy.

In der vorliegenden Betrachtung wurde der Buoyant Energy Energiespeicher zur Leistungsglättung des fluktuierenden Ertrags der Windturbine über ein kurzes, definiertes Zeitintervall wie in Abbildung 36c dargestellt angesetzt. Die Arbeitsablauf eines, in die Schwimmkörper einer Windturbine integrierten Buoyant Energy Systems, während der Dauer des Intervalls T , ist in Abbildung 37 dargestellt. Wie zu sehen ist, beding der Ein-/Ausspeicherprozess eine ständige Variation der Betriebshöhe der Windturbine. Zu Beginn jedes Intervalls ($t = 0$ sec) befindet sich die Schwimmstruk-

⁴¹ Malta Resources Authority (2010): Grant Scheme. Triq Aldo Moro, Marsa, Malta, 2010.

⁴² EMD International A/S. WindPRO™ Ver. 2.7. EMD, Aalborg, Denmark, 2008.

⁴³ WindSIM AS. WindSim™ Ver. 5.01.1. WindSim AS, Tønsberg, Norway, 1997 – 2010.

⁴⁴ J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott (2009): Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech. Rep. NREL/TP-500-38060, February 2009.

tur in neutraler Position. In diesem Zustand (Zustand A) ist der Speicher bis zu einem gewissen Grad, jedoch nicht komplett geladen. Folglich ist er in Zustand A in der Lage, sowohl weitere Energie zu speichern als auch Strom zu produzieren. Übersteigt die aktuelle Leistung der Windturbine (P_{WT}) den Mittelwert (P_{av}) über das Zeitintervall T werden die Pumpen aktiviert, das innere Reservoir entleert und somit Energie gespeichert (Zustand B). Dies hat eine Erhöhung der Windturbine bezogen auf die mittlere Meeresspiegellage zur Folge. Im Falle einer Windflaute hingegen, wenn der Ertrag der Windturbine unterhalb den geforderten Leistungsmittelwert (P_{av}) abfällt, wechselt der Energiespeicher in den Turbinenmodus, wodurch Strom erzeugt und somit der Leistungsfehlbetrag ausgeglichen werden kann, sodass dieser konstant gehalten wird. Als Folge des geänderten Betriebsmodus des Speichers senkt sich dieser ab was eine Höhenreduktion der Lage der Windturbine verursacht (Zustand C). Am Ende des Zeitintervalls ($t = T \text{ sec}$) befindet sich das System wieder in neutraler Position (Zustand A).

Zusätzlich wurde die Speicherkapazität die für eine gleichmäßige Leistungsbereitstellung über ein kurzes Zeitintervall T benötigt wird ermittelt. Als Bemessungsgrundlage wurden die Datengrundlage der Jahre 2007-2011 herangezogen und für die Zeitintervalle $T = 1 \text{ h}$, $T = 2 \text{ h}$ und $T = 3 \text{ h}$ angesetzt. Typische Leistungserträge der Windturbine sind in Abbildung 38 dargestellt.

Bei Vernachlässigung der Verluste des BE Speichers (Pumpen-/Turbinenverluste) ergibt sich die aktuelle Energiekapazität E_t in KWh zu jedem Zeitpunkt t mit folgender Beziehung:

$$E_t = [P_{WT}(t) - P_{av}(t)] * \Delta t + E_{t-1} \quad (8)$$

E_t entspricht dabei der, bezogen auf die zu Beginn bereits gespeicherte Energiemenge, zusätzlich eingespeicherten und E_{t-1} jener eingespeicherten Energiemenge des vorangegangenen 10-Minuten Intervalls. Die zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ sec}$ und $t = T \text{ sec}$ vorhandene Energiemenge wird zu 0 gesetzt. Insofern ergeben sich sowohl positive (Zustand B) als auch negative (Zustand C) Kapazitäten (Abbildung 37). Wie in Abbildung 38 ersichtlich führt eine Steigerung des betrachteten Zeitintervalls T zu einer Verringerung der Leistungsschwankungen bei gleichzeitiger Zunahme der benötigten Speicherkapazität.

Abbildung 39 (links) zeigt die kumulative Häufigkeitsverteilung der aktuell eingespeicherten Energiemenge des BE-Systems (E_t) bei Verwendung aller 10-Minuten Datenpunkte über den gesamten 5-jährigen Betrachtungszeitraum. Wie ersichtlich wird die kumulative Häufigkeit F über der aktuellen Speicherkapazität E_t für alle drei Zeitintervalle angeführt. Derartige Diagramme sind hilfreich zur Bestimmung der optimalen Speichergröße von BE-Systemen. Wie aus Abbildung 39 (links) gut zu erkennen ist, liegt der Großteil der 10-minütigen Speicherkapazitätsdaten E_t innerhalb von $\pm 600 \text{ kWh}$. Es treten zwar Umstände auf die deutlich größere Mengen an gespeicherter Energie erfordern jedoch ist deren Auftretenswahrscheinlichkeit so gering, dass eine Steigerung des zur Verfügung gestellten Speichervolumens nicht gerechtfertigt erscheint.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

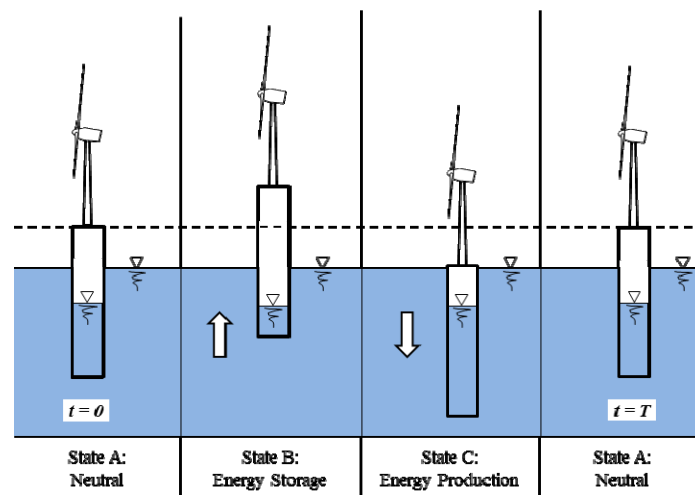


Abbildung 37: Betriebszustände einer Windkraftanlage in Kombination mit BE während eines Zeitintervalls T .

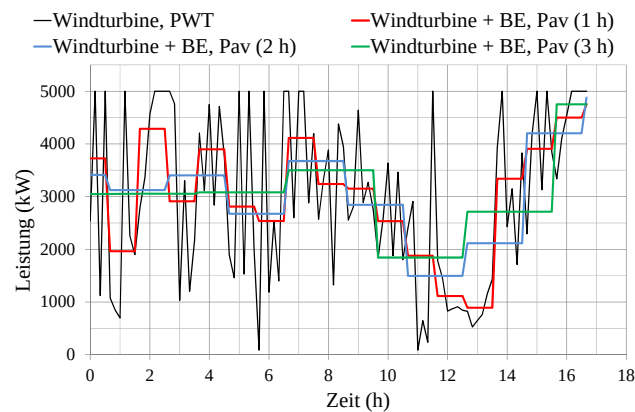


Abbildung 38: Leistungsabgabe einer 5 MW starken schwimmenden Windkraftanlage mit und ohne dem BE-Speicherkonzept.

Die Bestimmung der erforderlichen Energiespeicherkapazität E_c zur Abdeckung der Leistung innerhalb des, durch die Auftretenswahrscheinlichkeit (X) definierten Bereichs, lässt sich wie folgt ermitteln:

$$E_c(X) = E_t(F_2) - E_t(F_1) \quad \text{mit:} \quad X = F_2 - F_1 \quad (9)$$

Das rechte Diagramm in Abbildung 39 zeigt die benötigte Energiespeicherkapazität der drei untersuchten Zeitintervalle T für eine $X = 90, 95$ und 99 %ige Regulierung der auftretenden Leistungen bezogen auf die Datengrundlage. Der Parameter X symbolisiert in Realität also jenen prozentuellen Leistungsanteil der durch die Kombination der Windturbine mit dem BE-System in Form einer konstanten Leistungsabgabe innerhalb des definierten Zeitintervalls T an den Verbraucher weitergegeben werden kann. Die Abdeckung von X -Werten größer 95 % würde eine signifikante Steigerung der benötigten Speicherkapazität zur Folge haben. Solch große Kapazitäten würden nur für sehr kurze Zeitfenster während der Betriebsphase von Windturbinen benötigt was die ökonomische Sinnhaftigkeit in Frage stellt.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Wie ebenso aus Abbildung 39 (rechts) ersichtlich, liegen die benötigten Speicherkapazitäten zur Leistungsglättung von 5 MW Windturbine und unter den klimatischen Bedingungen wie sie im zentralen Mittelmeer vorherrschen, innerhalb realistischer Größenordnungen, wie sie von typischen Dimensionen des BE-Systems bewältigt werden können. Nochmal zu erwähnen ist die Vernachlässigung der Wirkungsgradverluste des BE-Speichers (Pumpen-/Turbinenwirkungsgrad) in dieser vereinfachten Betrachtung. Insofern sind die in Abbildung 39 (rechts) ermittelten Speicherkapazitäten als konservativ anzusehen.

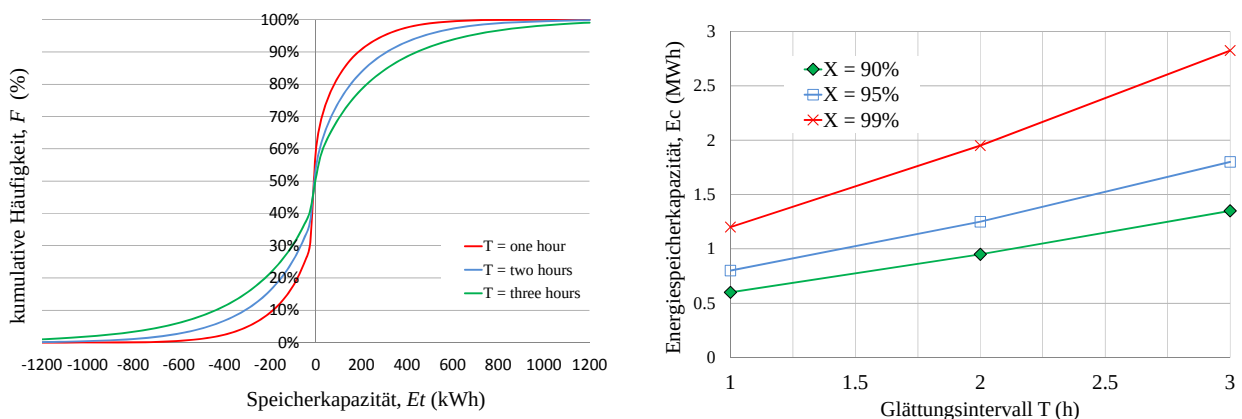


Abbildung 39: Diagramm links: Kumulative Häufigkeitsverteilung der berechneten Speicherkapazität des BE-Systems. Diagramm rechts: Benötigte Energiespeicherkapazität für unterschiedliche X -Werte.

In der vorliegenden Analyse wurde zudem der prozentuelle Anteil der drei Betriebszustände A , B und C des in die Windturbine integrierten BE-Systems im betrachteten Zeitraum ermittelt (siehe Abbildung 37). Das Ergebnis für die drei untersuchten Zeitintervalle T ist in Abbildung 40 dargestellt. In Zustand A wird weder Energie gespeichert noch erzeugt. Der Speicher befindet sich in Ruhe. Dieser Betriebszustand stellt sich unter folgenden Umständen ein: (1) Die Windgeschwindigkeit liegt unterhalb des Einschaltwertes der Windturbine, weshalb sie nicht zur Erzeugung genutzt wird. (2) Die Windgeschwindigkeit liegt zwar über dem Nennwert und die Leistungsabgabe der Windturbine wird jedoch durch die Rotorblattverstellregelung konstant gehalten. Wie aus Abbildung 40 ersichtlich führt eine Verlängerung des Zeitintervalls T zur Leistungsglättung zu einer Reduktion des prozentuellen Anteils des Zustandes A von 6,2 % bei $T = 1 \text{ h}$ auf 2,4 % bei $T = 3 \text{ h}$. Dies wiederum bedeutet, dass mit zunehmendem T auch die Pump- bzw. Turbinierzeiten ansteigen. Auffallend ist auch, dass sich der Energiespeicher länger im Betriebsmodus C , also der Energieproduktion als in Betriebsmodus B , der Speicherung, befindet.

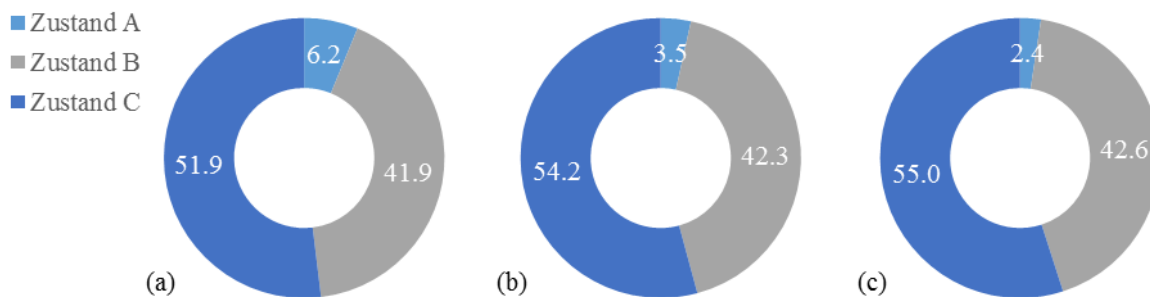


Abbildung 40: Prozentueller Anteil der Betriebszustände A, B und C: (a) $T = 1$ h; (b) $T = 2$ h; (c) $T = 3$ h.

Mehrfachnutzung von Buoyant Energy

Wie sich bereits in den Untersuchungen in AP2 herausgestellt hat, erweist sich das BE-Konzept als äußerst geeignet zur Nutzung der schwimmenden Plattform für weitere Zwecke. Beinahe jede Art der Mehrfachnutzung kann angedacht werden. Sei es als Fundament städtebaulicher Strukturen (Stadterweiterung), als Schutzwall vor Breakwater (Floating Cities) oder auch in Kombination mit andern Speichertechnologien (Batterien) bzw. erneuerbaren Erzeugern. Jedoch nicht nur durch die Möglichkeit der Plattformbebauung hebt sich das BE-Konzept von konkurrierenden Speichern ab. Auch die hohe Formvariabilität zeigt das Potential des Speichers auf. Insofern ist die Integration in die Auftriebskörper schwimmender Strukturen beinahe immer umsetzbar.

Die Grundidee den Nutzwert und die Speicherfunktion miteinander zu verbinden liegt somit auf der Hand und wie die Ergebnisse der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsuntersuchung (AP2) gezeigt haben, erweist sich das multi-use-platform Konzept zudem als überaus ökonomisch.

Nachfolgend sollen ein paar Beispiele der Mehrfachnutzung des BE-Konzepts aufgezeigt werden:

- In der Region Kinki in Japan wurde der Flughafen Kansai, 5 km von der Küste entfernt, auf einer künstlich angelegten Insel im Meer errichtet und 1994 eröffnet. Vier Jahre später folgte der neue Flughafen in Hongkong Chek Lap Kok (China). Auf einer Buoyant Energy-Plattform, hätte ein Flughafen nicht mehr den alleinigen Nutzen als Verkehrs- und Logistikzentrum sondern könnte ebenso als Energiespeicher genutzt werden.
- In Abbildung 41 (links) wird eine weitere Kombinationsvariante, ein „offshore“-Frachthafen, dargestellt. Ein derartiger Containerterminal wäre als Knotenpunkt der Transportwege zum Umschlagen zwischen Seeschiffe und Feederschiffen⁴⁵ vorstellbar.
- Sollte in Zukunft die Aquafarm-Idee realisiert werden so wäre auch diese mit dem BE-Speicherkonzept kombinierbar. In Abbildung 41 (rechts) wird ein derartiges Bauwerk illustriert. In einem doppelten Boden könnte beispielsweise Süßwasser zur Bewirtschaftung der Agrarflächen gespeichert werden. Das große Reservoir hingegen dient zur Speicherung potentieller Energie. Um eine einseitige Wasserablagerung zu verhindern und um ausreichende Stabilität in Längsrichtung zu gewährleisten, wären allerdings Wasserschotten mit bodennahen Öffnungen erforderlich.

⁴⁵ Ein Feederschiff ist ein speziell für Containertransporte gebautes Frachtschiff.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

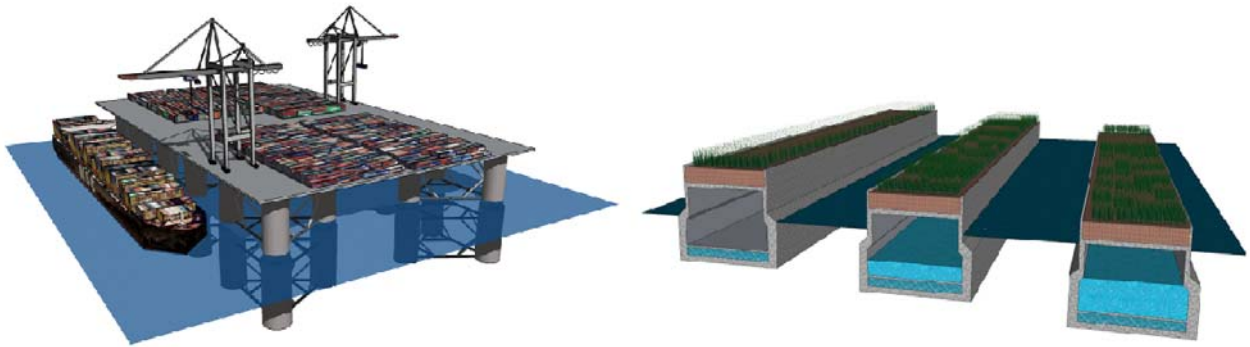


Abbildung 41: Schwimmender Frachthafen mit integrierter BE-Technik in den Schwimmkörpern (links). BE-Konzept in Kombination mit einer Aquafarm (rechts).

Ebenso die Kombination von BE mit Energieerzeugern (Offshore-Windkraftanlagen, Solarkraft- oder Meeresströmungskraftwerke) ist möglich. Eine genauere Untersuchung der Kombination mit einer 5 MW Windraftanlage wurde abgehandelt und hat das Potential solcher Kombinationslösungen aufgezeigt.

Im Zuge von weiteren Untersuchungen soll in Zukunft vor allem näher auf den städtebaulichen Einsatz des BE-Speichers eingegangen werden. Ziel ist es verschiedene Typologien (BE-Speicher kombiniert mit städtebaulicher Infrastruktur unterschiedlicher Art) zu entwerfen, aus technischen, architektonischen, energieökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu betrachten und schlussendlich eine „Energiespeicherlösung mit Mehrwert“ zu definieren, das den gesellschaftlichen Anforderungen und zukünftigen Bedürfnissen gerecht wird.

2.3 Änderungen im weiteren Projektverlauf

Während des Projektverlaufs kam es zu keinen signifikanten Veränderungen. Es war lediglich notwendig eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate (bis 30.10.2017) zu beantragen. Bedingt war dies durch den verspäteten Arbeitsantritt eines Schlüsselmitarbeiters der durch die unvorhersehbare Verlängerung eines laufenden Drittmittelprojektes für das vorliegende Projekt nicht früher zur Verfügung stand. Die kostenneutrale Projektverlängerung wurde ordnungsgemäß eingereicht und von Seiten der FFG freigegeben.

3. Projektteam und Kooperation

Bei den Drittleistern gab es keine Veränderungen. Es wurde jedoch ein weiterer interner Schlüsselmitarbeiter eingestellt. Aufgrund seines abgeschlossenen Architektur- und Bauingenieurwesenstudiums konnte davon ausgegangen werden, dass er einen wichtigen Beitrag und Input zum Erfolg des Projektes liefert.

Die Zusammenarbeit der Konsortialpartner hat sich als Offen und Aufrichtig erwiesen. Die Kommunikation untereinander war immer respektvoll und zuvorkommend. Aufgrund des kleinen Teams konnten die Vorlaufzeiten für Besprechungen oder Projektabstimmungen immer sehr kurzfristig anberaumt werden. Zudem war die Aufteilung der einzelnen Arbeitspakete so gegliedert, dass maximal 2 Partner vertreten waren. Insofern gab es auch diesbezüglich keine internen Reibereien und man konnte sich schnell auf die Arbeitsweise einigen sowie auftretende Fragestellungen schnell und konstruktiv beantworten.

Hinsichtlich der Arbeitsaufteilung wurden keine Änderungen vorgenommen.

4. nur Endbericht: Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

Vorliegendes Speicherkonzept aber auch die Universität konnten mit Hilfe dieses Projekts in verschiedensten Bereichen auf sich aufmerksam. Neben einer Publikation, einer Diplomarbeit, der Patentanmeldung auf europäischer (EP 2681445 B1) und US-amerikanischer (US 9617969 B2) Ebene, mehrere Konferenzbeiträgen und mehrere Zeitungsartikel konnte auch ein Konzeptmodell des BE-Speichersystems auf der Weltausstellung (EXPO) 2017 in Astana / Kasachstan, mit dem Titel „Future Energy“, präsentiert werden. Das Modell wurde im Haupthaus der Weltausstellung präsentiert. Auch jetzt, nach dem Ende der EXPO bleiben die Exponate dieses Hauses in Form einer Dauerausstellung der Öffentlichkeit zugänglich.

Publikationen

- Journal of Energy Storage
Robert Klar, Bernd Steidl, Tonio Sant, Markus Aufleger, Robert N. Farrugia, Buoyant Energy – balancing wind power and other renewables in Europe's oceans, In Journal of Energy Storage, Volume 14, Part 2, December 2017, Pages 246-255, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.07.023>.

Diplomarbeit

- Daniel Rigo (2014): Hydraulische Energiespeicher – Neue Ideen und Konzepte für Pumpspeichertechnologie. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, S. 259.

Internationale Konferenzbeiträge

- OSES 2017 Offshore Energy and Storage Symposium. Cape Cod, USA.
Klar, Robert; Steidl, Bernd; Aufleger, Markus (2017): A new floating Energy Storage System based on Fabric.
- IAHR World Congress 2017. Kuala Lumpur, Malaysia.
Steidl, Bernd; Klar, Robert; Aufleger, Markus (2017): Buoyant Energy - Multifunctional offshore

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

energy storage and grid balancing system for future requirements.

- OSES 2016 Offshore Energy and Storage Symposium. Valetta, Malta.
Klar, Robert; Aufleger, Markus; Scheide, Günter; Neisch, Valerie (2016): PrepareBE (Buoyant Energy) – Exploratory Project Presentation.
- OSES 2015 Offshore Energy and Storage Symposium. Edinburgh, UK.
Klar, Robert; Aufleger, Markus; Sant, Tonio; Neisch, Valerie; Farrugia, Robert N. (2015): Buoyant Energy – Balancing Wind Power and Other Renewables in Europe's Oceans.
- Hydro 2013. Innsbruck, Österreich.
Neisch, Valerie; Klar, Robert; Aufleger, Markus (2013): Development of Hydraulic Energy Storage Systems for Decentralized Applications.
- 2nd IAHR Europe Congress 2012. München, Deutschland.
Aufleger, Markus; Brinkmeier, Barbara; Neisch, Valerie; Klar, Robert (2012): New Approaches Of Water As Energy Storage.
- 12. Symposium Energieinnovation 2012. Graz, Österreich
Klar, Robert; Neisch, Valerie; Aufleger, Markus (2012): Buoyant Energy - Dezentrale Offshore Stromspeicherung im europäischen Kraftwerkspark.
- 2. Workshop „Energiespeicher als Schlüsseltechnologie für Erneuerbare Energie“ 2011. Graz, Österreich.
Vortragende/r: Klar, Robert *Co-AutorInnen:* Aufleger, Markus: Hydraulische Großenergiespeicher.

Ausstellungen

- EXPO 2017 Weltausstellung (Astana, Kasachstan) – Konzeptmodell des Energiespeichers (Kooperation mit Architekturbüro Najjar & Najjar); Fotos von der Expo Ausstellung in Astana: <https://goo.gl/photos/PyKgJEsw4BZgkVPt8>

Zeitschriften- und Zeitungsartikel

- Der Standard
Auftrieb für ein Atlantis der Zukunft
von MAIK NOVOTNY, 7. Juli 2017
„Innsbrucker Forscher und Architekten entwickeln Pläne für Energiespeicher als Basis für schwimmende Städte und bauen energieautarke Fischerhäuser“
<http://derstandard.at/2000060764786/Auftrieb-fuer-ein-Atlantis-der-Zukunft>
- Tiroler Tageszeitung
Die Zukunft auf dem Wasser gebaut
von Philipp Schwartze, Di, 27.06.2017 08:30 TT / Tiroler Tageszeitung Onlineausgabe
„Zwei Tiroler Ideen sollen künftig Küstenstädte revolutionieren: Dabei wird aus dem Wasser nicht nur Strom, sondern auch noch nutzbare Fläche erzeugt. Als Bühne dient die EXPO in

Astana.“

<http://www.tt.com/lebensart/freizeit/13146690-91/die-zukunft-auf-dem-wasser-gebaut.csp>

- Future - Das Zukunftsmagazin der Wiener Zeitung

Auf dem Weg von der Utopie zur Wirklichkeit

von USCHI SORZ, Ausgabe 4, 2017

„Nachhaltige Energie erzeugen, sie effizient speichern und zugleich explodierenden Megacities etwas entgegensetzen: Forscher von der Universität Innsbruck wurden eingeladen, ihre visionären Konzepte für Küstenstädte an der diesjährigen Weltausstellung in Kasachstan zu zeigen.“

Für die nähere Zukunft sind weitere Konferenzbesuche wie z. B. Offshore Renewable Energy (CORE 2018) und das Offshore Energy and Storage Symposium (OSES) geplant bzw. besteht bereits die Zusage zur Präsentation von Forschungsergebnissen des BE-Konzeptes (15. Symposium Energieinnovation / Graz). Zudem durchläuft gerade ein weiteres Paper „*A floating Energy Storage System based on Fabric*“ den Peer-Review Prozess beim „Journal of Ocean Engineering“.

5. Erläuterungen zu den Kosten

Zu Abweichungen im Kostenplan ist es einerseits bei den Material- und Sachkosten, hier war lt. Projektantrag nichts vorgesehen und andererseits bei den Reisekosten gekommen. Die angefallenen Sach- und Materialkosten beziehen sich auf zwei durchgeführte physikalische Versuche des BE-Konzeptes im Wasserbaulabor der Universität Innsbruck und einem errichteten Präsentationsmodell des BE-Energiespeichers für die Weltausstellung 2017 (EXPO 2017) in Astana.

Bei den beiden durchgeführten Modellversuchen ging es vorrangig darum, das prinzipielle Konzept von BE zu prüfen und im Falle der leichten BE-Variante, erste Erfahrungen einer flexiblen Ausführung zu gewinnen. Diese Kleinversuche stellten sich als äußerst Aufschlussreich für die weitere Arbeit dar.

Die angefallenen Kosten für das Präsentationsmodell bei der EXPO 2017 waren zu Projektbeginn nicht vorhersehbar, weshalb keine Kosten diesbezüglich angesetzt wurden. Dieser einzigartigen Möglichkeit das Speicherkonzept sowie die Tätigkeit österreichischer Forschungseinrichtungen im Offshore-Bereich der Welt zu präsentieren wurden als große Chance, die es zu nützen galt, angesehen.

Bei den Reisekosten ist es ebenso zu einer Abweichung gekommen. Die tatsächlich angefallenen Kosten sind beinahe doppelt so hoch als die veranschlagten. Insbesondere die hohen Tagungskosten sowie die Mehrkosten beim Projektmeeting mit dem Subauftragnehmer in Edinburgh sind darauf zurückzuführen. Letzteres Treffen war jedoch dringend notwendig um das Projekt, die Problemstellung, die Details der durchzuführenden Arbeit und die Vorgehensweise mit dem Subauftragnehmer, als Fachexperten im Bereich schwimmender Offshore-Strukturen, gemeinsam zu

besprechen. Hinsichtlich den Konferenzen ist anzumerken, dass die Offshore Energy and Storage Symposium (OSES) eine überaus wichtige Konferenz im Bereich der Offshore Energieerzeugung und –speicherung ist, weshalb die Präsentation der Forschungsleistung in diesem Rahmen als durchaus wichtig erachtet wurde. Einerseits um den aktuellen Stand laufender Forschungsprojekte zu erfahren und andererseits um auf die eigene Tätigkeit in diesem Bereich aufmerksam zu machen.

6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

Es liegen keine projektspezifischen Sonderbedingungen und Auflagen vor.

7. Meldungspflichtige Ereignisse

Es liegen keine der FFG mitzuteilende Ereignisse vor.