

Analyse von maritimen Pumpspeicherkraftwerken für Offshore-Windparks

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im
Studiengang Wirtschaftsingenieur
der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und der
Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

vorgelegt von:

Franziska Mehlhorn



Wirtschaftsingenieur

6. Fachsemester



Hannover, den 07.08.15

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Einheiten- und Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehen/Methodik	3
2 Stand der Technik	4
2.1 Energiewende in Deutschland	4
2.2 Offshore-Windenergie in Deutschland	6
2.2.1 Bestehende Offshore-Windparks und ihre Kennzahlen	6
2.2.2 Auswahl genehmigter Projekte und Zukunftsprognosen	9
2.2.3 Probleme und Ziele	12
2.3 Pumpspeicherkraftwerke	13
3 Pumpspeicherkraftwerke als Speicherlösung für Offshore-Windparks	17
3.1 Pumpspeicherkraftwerke in Europa	17
3.1.1 Deutschland	17
3.1.2 Norwegen	22
3.1.3 Europa	23
3.2 Analyse eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks	27
3.2.1 Machbarkeitsanalyse	27
3.2.2 Designanforderungen	30
3.2.3 Berechnungsmodell	32
3.2.4 Ergebnisse der Simulation/Berechnungen	39
3.3 Ökologische und Ökonomische Analyse	42
3.3.1 Ökologische Herausforderungen	42
3.3.2 Ökonomische Herausforderungen und Potenziale	44
3.3.3 Parallelnutzbarkeit	49
3.3.4 Erweiterbarkeit und Weiterentwicklung	50
4 Einbindung und Alternativen	52
4.1 Einbindung in das Stromnetz	52
4.2 Mögliche Alternativen	57

4.2.1	Interkonnektor nach Norwegen	57
4.2.2	Alternative Energiespeichersysteme	59
4.2.3	Alternative Pumpspeicherkraftwerke.....	64
5	Erkenntnisse, Ergebnisse und Diskussion	68
5.1	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse.....	68
5.2	Ergebnisse des Amortisationsmodells.....	68
5.3	Vergleich der favorisierten Auslegung mit Alternativen	72
6	Limitation.....	75
7	Fazit und Ausblick	77
8	Literaturverzeichnis	79
9	Anhang.....	86

1 Einleitung

Ziel dieses Kapitels ist es, einen generellen Überblick über die Fragestellung und den Aufbau dieser Bachelorarbeit zu geben. Als Einleitung wird zunächst eine kurze Einführung in die Thematik gegeben. Anschließend werden die zentrale Zielsetzung und die im Verlauf dieser Arbeit zu bearbeitenden Fragen dargelegt. Abschließend wird das methodische Vorgehen bei der Bearbeitung der Fragen anhand einer Graphik erläutert.

1.1 Einführung

Die Energiewende in Deutschland und der damit einhergehende Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) bei gleichzeitiger Reduzierung der konventionellen Energieerzeugungsanlagen, stellt das deutsche Energieversorgungssystem vor viele Herausforderungen. Die Energieerzeugung wird, durch das Erreichen der gesetzten Ziele der Bundesregierung, zukünftig größtenteils auf fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern basieren. Laut der Fraunhofer Studie „Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem“ wird der Anteil der volatilen Energieträger an der Energieerzeugung im Jahr 2050 bei über 70% liegen¹, wodurch der Aspekt der System- und Versorgungssicherheit in den Fokus rückt. Dieser Umstand führt dazu, dass das Stromnetz entsprechend modifiziert und Mechanismen zum Ausgleich der Volatilität eingeführt werden müssen. Für den Aus- und Umbau des Stromnetzes wurden jährliche Netzentwicklungspläne sowohl an Land als auch offshore eingeführt, weshalb die Systemsicherheit durch eine angemessene Modifizierung des Stromnetzes auf Basis zukünftiger Gegebenheiten gewährleistet wird. Die Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist dagegen schwieriger zu realisieren. Schon heute vergeuden Volatilität und Prognoseungenauigkeit von fluktuierenden EE Potenzial und generieren langfristige Nachteile, doch Speicher können zu einer kosteneffizienten Integration beitragen.² Neben Speichern gibt es die Möglichkeit des Im- und Exports und des Lastmanagements.³ Deutschland ist geopolitisch eingebettet in die Europäische Union (EU) und eine europaweite Vernetzung der Energie- und Strommärkte ist eine alternativlose Notwendigkeit für den Erfolg der Energiewende. Als Industrienation, welche maßgeblich von ihrer Wirtschaftsleistung abhängt, ist es jedoch unbedingt notwendig auf ein relativ unabhängiges Energieversorgungssystem zugreifen zu können, um im Ausnahmefall die Versorgungssicherheit auch rein national gewährleisten können. Deutschland sollte im Falle innereuropäischer Krisen nicht über Abhängigkeiten bei der Energieversorgung erpressbar sein. Deshalb müssen die dafür notwendigen Lö-

¹ STERNER et al.: *Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem*. Kassel : Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, 2010, S.29

² Vgl. Ebd. S.6

³ DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH (DENA): *Untersuchung der elektrizitätswirtschaftlichen und energiepolitischen Auswirkungen der Erhebung von Netznutzungsentgelten für den Speicherstrombezug von Pumpspeicherwerken*. Berlin : Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2008, S.53

sungen zum Ausgleich der Volatilität von fluktuierenden EE auch innerdeutsch gefunden werden. Instrumente des Lastmanagements allein, wie z.B. die Steuerung der Nachfrage nach elektrischer Energie, das sogenannte Demand Side Management⁴, werden zukünftig bei der hohen Menge volatil erzeugter Energie nicht ausreichen um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Deshalb sind Möglichkeiten zur Einspeicherung der überschüssig erzeugten Energie und zur entsprechenden Ausspeicherung in Bedarfszeiten mittel- bis langfristig unumgänglich. Die Offshore-Windenergie weist von allen erneuerbaren Energieträgern das größte Ausbaupotenzial auf, da riesige Flächen verfügbar sind und WEA offshore jährlich ca. 4055 Volllaststunden erreichen.⁵ Deshalb ist die logische Konsequenz, Speicheroptionen für Offshore-Windparks in das Netz zu implementieren um so eine gesicherte Energiebereitstellung zu gewährleisten und gleichzeitig das häufig Abregeln zu vermeiden.

1.2 Zielsetzung

Die zentrale Zielsetzung dieser Bachelorarbeit ist die Analyse eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks für Offshore-Windparks. Dafür spielen die Standortauswahl, die Auslegung der wichtigsten Leistungsparameter und die Kostenabschätzung eine zentrale Rolle. Zusätzlich dazu ist die Untersuchung von Vor- und Nachteilen, sowie Problemen und Nebeneffekten einerseits und die Diskussion von Alternativen andererseits wichtig, um eine umfassende Analyse und Auswertung vornehmen zu können. Zur Umsetzung der zentralen Zielsetzung werden die folgenden vier Fragen im Verlauf der Arbeit bearbeitet:

- Wie kann ein maritimes Pumpspeicherkraftwerk baulich und energietechnisch ausgelegt werden?
- In welchem Rahmen bewegen sich die Kosten und welche Auslegung ist wirtschaftlich sinnvoll?
- Welche Herausforderungen und Potenziale entstehen durch den Bau eines Pumpspeicherkraftwerks im Meer?
- Wie ist das Pumpspeicherkraftwerk im Vergleich zu Alternativen zu bewerten?

Unter Berücksichtigung dieser Fragen werden mit Hilfe eines Berechnungsmodells verschiedenen Varianten des maritimen Pumpspeicherkraftwerks simuliert und diskutiert sowie im Hinblick auf die zentrale Fragestellung unter Berücksichtigung weiterer Aspekte ausgewertet.

⁴ ENERGIE-FORSCHUNGSZENTRUM NIEDERSACHSEN ARBEITSGRUPPE ENERGIESPEICHER: *Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit*. Bd.13 Göttingen : Cuvillier Verlag, 2013, S.VIII

⁵ STERNER et al., *Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherkraftwerken*, a.a.O., S.29

1.3 Vorgehen/Methodik

Für die Analyse eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks für Offshore-Windparks werden folgende Schritte durchgeführt:

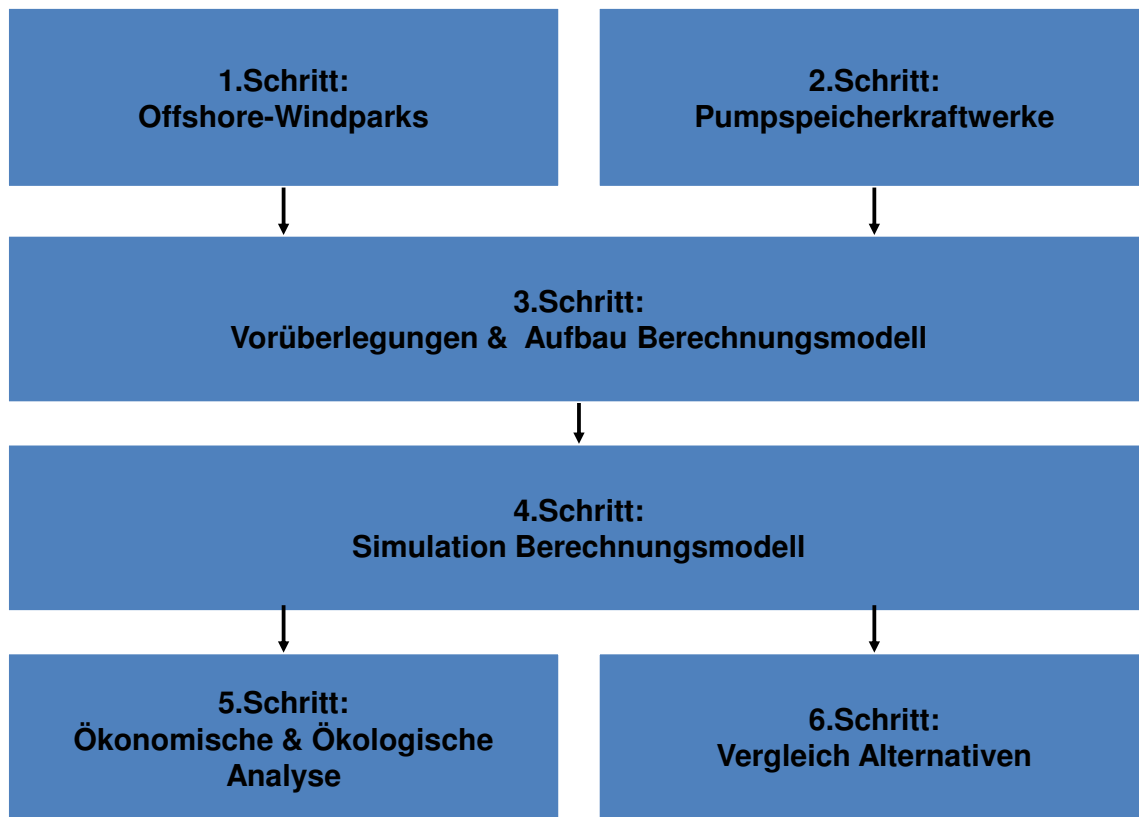


Abbildung 1: Vorgehensweise

Um das Thema der Bachelorarbeit übersichtlich einzuleiten, wird für die Bearbeitung von Schritt 1 und 2 zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dadurch wird ein Überblick über die aktuelle Situation des Ausbaus der Offshore-Windenergie und den Stand der Technik von Pumpspeicherkraftwerken geboten. Zusätzlich dazu werden prognostizierte Entwicklungen dargelegt. In Schritt 3 wird das Konzept eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks vorgestellt und Vorüberlegungen bezüglich der Anforderungen an die Auslegung festgehalten. Auf dieser Basis wird ein Berechnungsmodell entworfen, womit durch Parametervariation verschiedene Auslegungen simuliert werden können. Im 4. Schritt werden anschließend Simulationen im Berechnungsmodell durchgeführt, wobei die Auswirkungen der Parametervariationen graphisch dargestellt werden. Aus der Simulation soll eine optimierte Auslegung für zuvor definierte Ziele hervorgehen. Für Schritt 5 werden ökonomische und ökologische Auswirkungen eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks ausführlich analysiert. Abschließend wird in Schritt 6 die optimale Auslegung mit möglichen Alternativen verglichen um eine Bewertung vornehmen zu können.

7 Fazit und Ausblick

Die Zielsetzung dieser Arbeit, die Analyse eines maritimen Pumpspeicherkraftwerks für Offshore-Windparks, wurde in Form einer Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbewertung für ausgewählte Anlagenkonfigurationen maritimer Pumpspeicherlösungen umgesetzt. Die dafür in Kapitel 1.2 formulierten Fragestellungen wurden, unter den in Kapitel 6 dargelegten Limitationen, umfassend beantwortet. Die Literaturrecherche zum Offshore-Windenergieausbau hat ergeben, dass durch den steigenden Anteil dieses fluktuierenden Energieträgers an der Energieerzeugung Speichermöglichkeiten unbedingt notwendig sind, um die Versorgungssicherheit auch zukünftig zu gewährleisten. Die Analyse der Machbarkeit sowie der baulichen und energietechnischen Anforderungen hat den Rahmen für die Anlagenparameter vorgegeben, in dem die Auslegung des maritimen Pumpspeicherkraftwerks zweckmäßig ist. Bei der Simulation verschiedener Auslegungsvarianten im Berechnungsmodell wurden verschiedene Anlagenparameter variiert und deren Auswirkung auf die Investitionskosten und die benötigte Fläche untersucht. Dabei wurden systematisch durch Berücksichtigung festgelegter Kriterien Auslegungsvarianten eingegrenzt. Schlussendlich hat sich durch diesen Prozess ergeben, dass sich ein maritimes Pumpspeicherkraftwerk in 35 m Wassertiefe und mit einer Kapazität von 200 GWh im Hinblick auf die Kriterien am besten dazu eignet, die Überschussenergie von Offshore-Windparks zu speichern. Ein solcher Ringwallspeicher kann bei einer Entladedauer von 120 h 1.666 MW Leistung bereitstellen und erfordert ein Investitionsvolumen von ca. 11.926 Mio. €. Das Pumpspeicherkraftwerk könnte inklusive der Betriebskosten in einem Betriebszeitraum von mindestens 20 Jahren bei Stromgestehungskosten von 15,38 ct/kWh und einer Annuität von 3% amortisiert werden. Damit wäre diese Lösung konkurrenzfähig zu anderen EE wie Offshore-Windenergie und Photovoltaik. Diese Berechnungsergebnisse stehen unter dem Vorbehalt, dass sich die Investitions- und Betriebskosten, sowie die Annuitäten so entwickeln, wie in dieser Arbeit angenommen. Um die Gültigkeit der Ergebnisse weiter abzusichern ist es notwendig, eine umfassende Feststellung sämtlicher Kostenpunkte und ihrer Höhe durch Forschungen und Auswertungen von Prototypensimulationen exakter zu bestimmen. Darüber hinaus ist es wichtig, die Einbindung des PSW in den Strommarkt zu analysieren und die für die sinnvolle Integration notwendigen Änderungen der aktuellen Gesetzeslage zu identifizieren.

Bei der Analyse der Auswirkungen auf die Ökonomie und Ökologie wurde festgestellt, dass der Eingriff in die Umwelt bei dem Bau enorm ist, aber gleichzeitig auch wirtschaftliche Vorteile generiert werden. In diesem Zusammenhang müssen Studien zum Ausmaß des Eingriffes in die Natur durchgeführt und bewertet werden. Zusätzlich müssen auch Studien zum volkswirtschaftlichen Gesamtnutzen und den damit einhergehenden Herausforderungen realisiert werden. Insgesamt sollten also weitere Bewertungen sämtlicher Aspekte, auf die dieses Projekt Einfluss haben könnten, stattfinden. Bei der weiteren Analyse wurde gezeigt, dass diverse Möglichkeiten der Parallelnutzung und Erweiterung bestehen. Auch hier sind weitergehende Untersuchungen zu empfehlen.

Die Betrachtung von Alternativen hat aufgezeigt, dass das maritime Pumpspeicherkraftwerk als Speichertechnologie entscheidende Vorteile aufweist, und damit aktuell im Vergleich zu anderen Speichertechnologien am besten für die Speicherung von Offshore-Windenergie und die Teilnahme am Energiemarkt geeignet ist. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass der Wirkungsgrad und der Reifegrad der zum Einsatz kommenden Technik hoch sind sowie die Anzahl der verfügbaren Standorte groß ist. Allerdings sind diese Herausstellungsmerkmale nur so lange gegeben, wie andere Speichermöglichkeiten sich noch in der Forschungs-, Entwicklungs- und Prototypenphase befinden. Sollten alternative Speichertechnologien die Marktreife erreichen, muss eine Wirtschaftlichkeit des maritimen PSW erneut überprüft werden. Der Vergleich mit der Alternative des Interkonnectors nach Norwegen hat unter getroffenen Annahmen gezeigt, dass aus der Sicht der Versorgungssicherheit und der Strompreisentwicklung der Bau eines Pumpspeicherkraftwerks neben dem Bau eines Interkonnectors sinnvoll ist. Auch hier sollten vertiefende Untersuchungen stattfinden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein maritimes Pumpspeicherkraftwerk aus technischer Sicht umsetzbar ist und unter den getroffenen Annahmen kosteneffizient und wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Umsetzung der Energiewende auf Basis von Offshore-Windenergie erfordert unabdingbar die Integration von Speichern in das Energieversorgungssystem. Nach aktueller Forschungssituation sind maritime Pumpspeicherkraftwerke die einzigen Speicher, die in der Lage sind, dieses Erfordernis zu erfüllen, weshalb die oben und in Kapitel 6 dargelegten Studien und Untersuchungen durchgeführt, sowie Möglichkeiten der Finanzierung, z.B. mit der KfW, analysiert werden sollten. Wenn Deutschland die Umsetzung erfolgreich realisiert, entsteht eine Technologieführerschaft mit hohem Exportpotenzial, von dem die deutsche Wirtschaft nachhaltig profitieren kann.