

FACHHOCHSCHULE | UNIVERSITÄT FLENSBURG

Bericht

Nr. TES-2015-EKSH-02

Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015

Autoren

Cynthia Boysen, Hauke Großer¹, Cord Kaldemeyer, Ilja Tuschy

DLSK-SH_Sachstandsbericht_20150228

¹ GEO mbH, Langenhorn

| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|-------------------------|------------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | |

Zusammenfassung

Gemeinsam mit der GEO mbH untersucht das ZNES im von der EKSH geförderten Projekt DLSK-SH die Eignung Schleswig-Holsteins als Standort für ein Druckluftspeicherkraftwerk hinsichtlich Standort, Technologie und Wirtschaftlichkeit. Das ZNES verantwortet dabei das Gesamtprojekt sowie die Arbeitspakete AP 2 Technologie und AP 3 Systemfunktion, GEO bearbeitet das Arbeitspaket AP 1 Standort. Der vorliegende Bericht hat die Aufgabe, den derzeitigen Stand der Arbeiten zu dokumentieren, um Planabweichungen gegebenenfalls frühzeitig zu erkennen und erste Ergebnisse der Arbeiten zu sichern. Zu diesem Zweck werden die Inhalte der Arbeitspakete dargestellt und der jeweilige Bearbeitungsstand beschrieben und bewertet.

Im AP 1 wurde das Ziel der ersten Standortauswahl erreicht, indem die Anzahl von 14 denkbaren Standorten auf die vier aussichtsreichsten reduziert wurde. Bei der strukturierten Auswahl wurden die Faktoren Salzstruktur, Nutzungsrechte, Netzanbindung, Stromerzeugungsanlagen, Anbindung an das Gasnetz, Abtransport der Sole und weitere Standortfaktoren berücksichtigt und begründet gewichtet. Die folgende Standortgrobplanung wird so universell angelegt sein, dass sie für die ausgewählten Standorte Belmhusen-Kuden-Süderhastedt, Marne-Heide-Süderstapel, Oldenswort Nord und Osterby zu verwertbaren Ergebnissen führt.

Im AP 2 wurden unter Berücksichtigung von geologischen und infrastrukturellen Standortanforderungen, verschiedenen Technologieaspekten und der auf der Berechnung von Auslegungspunkten beruhenden Effizienz vier Konzepte ausgewählt. Dabei wurden auch die Realisierbarkeit und die Fähigkeit, bestimmte energiewirtschaftliche Funktionen zu übernehmen, beachtet. Ausgewählt wurde mit einem so genannten adiabaten Konzept zunächst ein reines Speicherkraftwerke. Bei drei anderen Konzepten liegt eine Kombination aus Speicherkraftwerk und thermischem Spitzenlast- oder Schattenkraftwerk vor, wobei ein deutlicher Brennstoffeinsatz erforderlich ist.

Das im AP 3.1 entwickelte Modell zur Einbindung Druckluftspeicherkraftwerke in die Simulation von Energiesystemen kann alle diese Konzepte durch geringe Anpassungen und geeignete Parametrisierungen abbilden. Darüber hinaus ist die Datenschnittstelle so offen gehalten, dass eine Interaktion mit dem Systemmodell *renpass* ebenso möglich ist wie mit anderen Systemmodellen. Das Speichermodell wurde in der Programmiersprache Python implementiert und kann mit Hilfe des Programmpakets Pyomo eine Einsatzoptimierung am Produkt- und Regelenergiemarkt vornehmen. Ein erstes, beispielhaft parametrisiertes Modell wurde erfolgreich mit historischen Marktdaten getestet.

Die Arbeitspakete AP 1.1, AP 2.1 und AP 3.1 sind damit abgeschlossen. In allen darauf folgenden Arbeitspaketen ist ebenfalls ein plangemäßes Voranschreiten zu verzeichnen.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | l | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

Inhalt

| Zu | samme | nfassung | 2 |
|-----|---------|---|----|
| 1 | Einle | eitung | 4 |
| 2 | Proj | ektinhalte | 4 |
| | 2.1 | Inhalte des AP 1 Standort | 5 |
| | 2.2 | Inhalte des AP 2 Technologie | 5 |
| | 2.3 | Inhalte des AP 3 Systemfunktion | 6 |
| 3 | Stan | d der Arbeiten | 7 |
| | 3.1 | Sachstand im AP 1 Standort | 7 |
| | 3.2 | Sachstand im AP 2 Technologie | 14 |
| | 3.3 | Sachstand im AP 3 Systemfunktion | 23 |
| 4 | Eino | rdnung des Projektfortschritts und Ausblick | 28 |
| Lit | eraturv | erzeichnis | 30 |
| Ar | nhang | | 32 |
| Ar | nhang 1 | : AP 1.1 | 33 |
| Ar | nhang 2 | : AP 2.1 | 35 |
| Ar | nhang 3 | : AP 3.1 | 47 |



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|-------------------------|------------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | |

1 Einleitung

Gefördert durch das HWT-Programm der EKSH führt das ZNES in Kooperation mit der GEO mbH eine Studie zur Eignung Schleswig-Holsteins als Standort für ein Druckluftspeicherkraftwerk (DLSK) durch. Im Rahmen des Projekts DLSK-SH sollen die Aspekte Standortverfügbarkeit, Technik und Wirtschaftlichkeit untersucht werden. GEO bearbeitet dabei das erste der genannten Arbeitsfelder, während im ZNES die beiden letztgenannten Bereiche behandelt werden.

Der vorliegende Bericht soll den Stand der Bearbeitung der verschiedenen Arbeitspakete dokumentieren. Auf diese Weise kann der aktuelle Projektfortschritt bewertet werden. Dadurch lassen sich gegebenenfalls notwendige Korrekturen frühzeitig erkennen und erste Arbeitsergebnisse sichern.

Zu diesem Zweck werden im folgenden Kapitel zunächst die Inhalte des Projektes und seiner Arbeitspakete dargestellt. Auf dieser Basis wird im Kapitel 3 der Sachstand in den jeweiligen Arbeitsbereichen beschrieben. Schließlich erfolgt in Kapitel 3.3.1 ein Abgleich des Projektfortschritts mit der Projektplanung und es werden Schlussfolgerungen auf die weitere Bearbeitung des Projekts gezogen.

2 Projektinhalte

Die Bewertung der Perspektiven für ein Druckluftspeicherkraftwerk in Schleswig-Holstein erfolgt im Rahmen des Projekts mittels einer multidimensionalen Machbarkeitsuntersuchung. Die Bewertungsdimensionen Standort, Technologie und Wirtschaftlichkeit werden in entsprechenden Arbeitspaketen analysiert und schließlich, wie in Abbildung 1 dargestellt, zu einer umfassenden Bewertung zusammengeführt.



Abbildung 1: Dimensionen der Bewertung im Projekt DLSK-SH



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

In den folgenden Abschnitten werden die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete des Projekts beschrieben. Zwar stellen sich grundsätzlich In allen Arbeitspaketen direkte oder indirekte Bezüge zu allen oben abgebildeten Bewertungsdimensionen dar. Es liegt jedoch auf der Hand, dass das Arbeitspaket AP 1 Standort, im Schwerpunkt der ersten Bewertungsdimension zuzuordnen ist. In den anderen beiden Arbeitspaketen Technologie und Systemfunktion fließen die Bewertungsdimensionen dagegen stärker zusammen, wobei die Schwerpunkte sicher in der integrierten Bewertung von Technik und Wirtschaftlichkeit liegen.

2.1 Inhalte des AP 1 Standort

Ziel des Arbeitspakets Standort (AP 1)ist es, die für eine Realisierung eines DLSK in Schleswig-Holstein vorherrschenden Standortbedingungen zu ermitteln, zu prüfen und zu bewerten. Das Arbeitspaket wird unterteilt in zwei Teilpakete, Standortwahl (AP 1.1)und Grobplanung (AP 1.2). Im hier näher betrachteten AP 1.1 sollen durch die Bewertung verschiedener Regionen in Schleswig-Holstein potentielle Standorte für ein DLSK ermittelt werden. Die Festlegung auf nur einen konkreten DLSK-Standort kann im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen, da die hierfür erforderlichen Untergrunduntersuchungen die zur Verfügung stehende Zeit und das finanzielle Budget um ein Vielfaches übersteigen würden.

Das Ergebnis des AP 1.1 bildet die Grundlage für das AP 1.2 Grobplanung. Die Grobplanung beinhaltet die allgemeine Prüfung und Ermittlung des planungsrechtlichen und ggf. des finanziellen Aufwands, der für die Entwicklung eines Druckluftspeicherkraftwerks zu erwarten ist sowie die anschließende Übertragung dieses allgemeinen Ergebnisses –soweit möglich- auf die im AP 1.1 ermittelten potentiellen DLSK-Standorte.

Aus dem Gesamtergebnis des AP 1 ergibt sich eine Bewertungsgrundlage für die abschließende Stellungnahme zur Realisierungschance eines DLSK in Schleswig-Holstein. Im Gegensatz zu den AP 2 und 3, die sich im Wesentlichen mehr mit den technologischen Fragestellungen des Kraftwerks und dessen Integration in die Netzinfrastruktur beschäftigen, setzt das AP 1 den Fokus auf den räumlichen Aspekt und die Frage, ob, wo und wie ein DLSK am Standort Schleswig-Holstein zu realisieren ist.

2.2 Inhalte des AP 2 Technologie

Ziel des Arbeitspakets Technologie (AP 2) ist die Technologieauswahl. Dazu gehört zum einen erste, vornehmlich technisch orientierte Bewertung in Frage kommender Konzepte für Druckluftspeicher-kraftwerke (AP 2.1). Darüber hinaus gilt es, technische Charakteristiken des Kraftwerksbetriebs zu entwickeln, um die Anlage auf höherer Ebene abbilden zu können (AP 2.2). Schließlich soll im AP 2



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

eine technische Dimensionierung mit Blick auf einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb erfolgen (AP 2.3). Im Fokus der im Rahmen dieses Berichts behandelten Arbeiten steht AP 2.1

Das Ziel von AP 2.1 ist die Vorauswahl der vielversprechendsten technischen Konzeptionen eines Druckluftspeicherkraftwerkes (DLSK) auf Basis diverser zu beurteilender Kriterien. Das Vorgehen umfasst zunächst die Identifizierung der technischen Ansätze zur Realisierung eines DLSK. Mithilfe eines dann aufzustellenden Kriterienkataloges, welcher neben der allgemeinen technischen Effizienz, dem technologischen Reifegrad und der Konzepteignung für den Standort Schleswig-Holstein weitere spezifische technische Kennzahlen enthält, wird eine vorläufige Bewertung der zugrundeliegenden Konzepte durchgeführt. Letztendlich führt die Gewichtung der Kriterien zu einer eindeutigen Rangfolge der Konzepte, woraus sich nach einer finalen qualitativen Diskussion eine Reduktion auf die aussichtsreichsten DLSK ergibt. Diese werden im folgenden AP 2.2 hinsichtlich ihrer Kraftwerkscharakteristika detaillierter analysiert.

2.3 Inhalte des AP 3 Systemfunktion

In AP 3 steht die Einbindung des Druckluftspeicherkraftwerks in eine Energieversorgungsstruktur im Fokus. Um diese zu untersuchen, muss zunächst ein geeignetes Modul zur Abbildung von Druckluftspeicherkraftwerken in Software zur Simulation von Versorgungssystemen entwickelt werden (AP 3.1). Dieses ist im weiteren Verlauf anzuwenden, um zunächst den Betrieb des Speicherkraftwerks bei unterschiedlicher Erzeugerstruktur zu untersuchen (AP 3.2). Schließlich soll die Robustheit der gewonnenen Erkenntnisse gegenüber Veränderungen der Netzstruktur ermittelt werden (AP 3.3). Der vorliegende Bericht bezieht sich in erster Linie auf die AP 3.1 zugeordneten Arbeiten.

Ziel von AP 3.1 ist es, das bereits am Zentrum für nachhaltige Systeme bestehende Open Source Simulationsmodell *renpass* (Renewable Energy Pathways Simulation System) um ein Zusatzmodul für die Abbildung von Druckluftspeicherkraftwerken (DLSK) zu ergänzen. Dabei soll das Modul es erlauben, verschiedene Kraftwerkskonzepte, wie adiabate und diabate DLSK, adäquat abzubilden und deren Betrieb eines Kraftwerks an verschiedenen Märkten zu optimieren. Weiterhin soll eine Schnittstelle zum Simulationsmodell *renpass* die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer konkreten Kraftwerksanlage im gesamten Energieversorgungssystem zulassen. In den nächsten Arbeitspaketen des Projektes können somit Erkenntnisse über die Wirtschaftlichkeit einer Anlage in verschiedenen Entwicklungsszenarien des Energieversorgungssystems analysiert werden. Der Fokus soll hierbei vor allem auf den Ausbauszenarien für Netze und Kraftwerke liegen.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|-------------------------|------------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | |

3 Stand der Arbeiten

3.1 Sachstand im AP 1 Standort

Das erste Teilpaket AP 1-1 Standortwahl wurde im Januar 2015 abgeschlossen. Das Ergebnis des Paketes ist ein qualitativer Vergleich von verschiedenen potentiellen Standorten für ein DLSK in Schleswig-Holstein. Es basiert auf der Auswertung einer Matrix in der 14 verschiedene Standorte nach 7 selbstgewählten Kriterien untersucht und bewertet wurden. Eine qualitative Vergleichbarkeit der Standorte ist somit gegeben.

Ein einzelner, bestimmter Standort ist in diesem Teilpaket nicht ermittelt worden. Vielmehr ergibt sich durch die Abstufung des Ergebnisses eine Rangliste nach derer bei einer Realisierung eines konkreten Projektes und der zu treffenden Entscheidung, an welchen Standorten weiterführende Untergrunduntersuchungen Sinn ergeben, vorgegangen werden kann.

3.1.1 Methodik

Grundsätzliche Voraussetzung für die Errichtung eines Druckluftspeicherkraftwerks ist die Möglichkeit, im geologischen Untergrund des Standorts eine Kaverne herzustellen, in der die zu- und abzuführende Druckluft gespeichert wird. Die hierfür erforderlichen Salzformationen sind in Schleswig-Holstein weit verbreitet. Der Geologische Dienst des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), hat in einer Karte, die untersuchungswürdigen Horizonte zur Anlage von Salzkavernen zur Speicherung von Druckluft veröffentlicht [1]. Diese Potentialkarte (Anhang 1) basiert nicht auf konkreten Untergrunduntersuchungen, sondern auf dem Amt vorliegenden allgemeinen Karten und Erkenntnissen zu den Salzformationen im Untergrund Schleswig-Holsteins.

Die in dieser Karte angegebenen untersuchungswürdigen Horizonte wurden in 14 Standorte aufgeteilt und für die Bewertung nach selbst gewählten Kriterien und Maßstäben herangezogen. Für die Festlegung der Kriterien wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren identifiziert, die für die Erschließung und den Betrieb der Kaverne und des Kraftwerks von Bedeutung sind. Dabei werden den einzelnen Kriterien unterschiedliche Gewichtungen zugeteilt, je nach Relevanz und Verfügbarkeit von aussagekräftigen Angaben hierzu. Die Gewichtung erfolgt in 0,5-Schritten von 1,0 bis 3,0.

Jedem Standort wurden im Laufe der Untersuchungen je Kriterium zwischen 0 und 10 Punkte zugeteilt. Die Gesamtpunktzahl für einen Standort ergibt sich aus der Summe der Multiplikation von Kriteriumgewichtung und der jeweiligen Punktezahl. Die maximale erreichbare Punktzahl je Standort



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

beläuft sich auf 130 Punkte. Zur Bewertung der Kriterien wurden im Wesentlichen öffentlich zugängliche Dokumente und Karten herangezogen und auf deren Basis eine stichpunktartige Beschreibung in die Matrix aufgenommen.

3.1.2 Standorte

Die aus der Potentialkarte [1] ermittelten Standorte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Nummerierungen sind in der Karte im Anhang 1 wiederzufinden. Bei den Standorten handelt es sich nicht immer um einzelne Gemeinden oder Städte sondern teilweise auch um ein Gebiet, welches sich entlang mehrerer Gemeinden erstreckt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich die untersuchungswürdigen Horizonte ebenfalls über diese Distanzen erstrecken, da die relevanten Salzformationen in der Regel als Salzstock oder –mauer meist in Nord-Süd Ausrichtung im Untergrund liegen. Nur vereinzelt werden potentiell geeignete Kavernenstandorte an örtlich begrenzen Orten vermutet, weil die Salzformationen dort eine alleinstehende Erhebung im Salz erwarten lassen.

Tabelle 1: Übersicht der bewerteten Salzformationen

| Nr | Salzformation |
|----|--|
| 1 | Belmhusen-Kuden-Süderhastedt |
| 2 | Bramstedt |
| 3 | Elmshorn |
| 4 | Föhrden-Hamdorf-Oldenbüttel Süd |
| 5 | Lägerdorf-Krempe |
| 6 | Marne-Heide-Süderstapel |
| 7 | Oldenswort Nord |
| 8 | Osterby |
| 9 | Quickborn |
| 10 | Schwedeneck |
| 11 | Segeberg-Sülfeld |
| 12 | Sievershütten |
| 13 | Sterup |
| 14 | Westensee-Eisendorf-Gnutz-Meezen-Peissen |

Die Größen der untersuchungswürdigen Horizonte unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander. Ob eine Salzformation als untersuchungswürdig gilt, wurde vom LLUR lediglich anhand von bekannten Tiefenlagen der Salzstockdächer und den geschätzten Abmaßen festgelegt. Dabei gelten Salzstöcke bis zu einer Tiefenlage des Salzstockdachs von 800 m u. NHN als geeignet. Hinzu kommt, dass die teilweise komplex geformten Salzformationen im Flankenbereich Überhänge besitzen, sodass sich im Querschnitt der Formation ein pilzartiges Dach ergibt. Da diese Überhänge nicht für eine Aussolung zwecks Kavernenbaus eignen, wurden von den grundsätzlich breiten Salzformationen an den Standorten teilweise Pufferbereiche zum Rand des jeweiligen Salzstocks berücksichtigt, wenn



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

keine näheren Erkenntnisse über den weiteren Verlauf der Formation unterhalb des Salzstockdachs vorlagen.

3.1.3 Kriterien

Anhand von 7 Bewertungskriterien wurden Abschätzungen getroffen werden, in welchem Maße die vom LLUR vorgeschlagenen, untersuchungswürdigen Horizonte als Druckluftspeicherkraftwerke geeignet sind. Hierzu wurde versucht, für die jeweiligen Standorte je Kriterium mehrere Fragen zu beantworten, die zum einen den geologischen Untergrund (Salzstruktur, Nutzungsrechte) und zum anderen den überirdischen Standort und die erforderliche Infrastruktur (z.B. Netzanschluss, Abtransport Sole) betreffen. In Tabelle 2 sind die verschiedenen Bewertungskriterien aufgelistet. Jedem Kriterium wurde eine Gewichtung zwischen 1 und 3 in Schritten von 0,5 zugeteilt, da einige Kriterien von größerer Bedeutung sind als andere. Die Möglichkeiten zum Abtransport der Sole sind etwa von entscheidenderer Bedeutung, als etwa die "weichen" Standortfaktoren, die unter weitere Standortfaktoren zusammengefasst sind. Neben der unterschiedlichen Bedeutung der Kriterien ist außerdem die Verfügbarkeit von Daten oder Angaben zur Beantwortung der Fragen von unterschiedlicher Qualität. Solche Kriterien (z.B. Anbindung an das Gasnetz) werden daher mit einem geringeren Faktor gewichtet.

Tabelle 2: Übersicht der Bewertungskriterien

| Kriterium | Fragestellung | Gewichtung |
|--------------------------|---|------------|
| Salzstruktur | Wie geeignet ist die Salzformation hinsichtlich Abmaßen, | 2,0 |
| | Ausbreitung, Lage? | |
| Nutzungsrechte Salzstock | Gibt es im Bereich der Salzformationen bereits vergebe- | 1,5 |
| | ne Altverträge, Bergwerkseigentum, Bewilligungen oder | |
| | Erlaubnisse? | |
| Netzanbindung | Wie ist die Situation des öffentlichen Strom-HS- und ÜN- | 2,0 |
| | Netzes vor Ort? Ist Speicherbedarf erkennbar? | |
| Erzeugungsanlagen Strom | Welche (regenerativen) Erzeugungsanlagen gibt es in | 2,5 |
| | (unmittelbarer) Umgebung oder sind zu erwarten? | |
| Anbindung Gasnetz | Wie ist die Situation des öffentlichen Gasnetzes vor Ort? | 1,0 |
| | (Anschlussmöglichkeiten etwaiges Gaskraftwerk) | |
| Abtransport Sole | Welche Entsorgungsmöglichkeiten gibt es für die Sole | 3,0 |
| | während der Erschließungsphase? | |
| Weitere Standortfaktoren | Wodurch ist der Untersuchungsraum geprägt? Gibt es | 1,0 |
| | unvereinbare Flächennutzungen? | |

Salzstruktur

Zur Beschaffenheit und Geeignetheit der Salzstruktur wurde im Wesentlichen auf die Potentialkarte des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) [1] zu-



| Bericht Nr. TES-2015-EKSH-02 | Revision - | Autoren Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | Datum 28.02.2015 |
|--|---------------|--|---------------------|
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | |

rückgegriffen. Nur vereinzelt lagen weitere Erkenntnisse über die geologische Beschaffenheit des Untergrunds vor. Für den Standort Belmhusen etwa liegen Erkundungsbohrungen aus den Jahren 1938 und 1973 vor, die eine grundsätzliche Geeignetheit des Salzstocks stützen. Da genauere Informationen zu den Salzstöcken aufwendigen Bohrungen und Untersuchungen bedürfen, wurden zur Bewertung der Salzstruktur hauptsächlich die Ausdehnungen der untersuchungswürdigen Horizonte betrachtet. Je größer die Salzstruktur ist, so die Annahme, desto wahrscheinlicher ist es, im Untersuchungsbereich eine Stelle zu finden, die sich zur Kavernenherstellung eignet. Je kleiner die Formation, desto eher kann sich der Standort nach nur einer geologischen Untersuchung mit negativen Ergebnissen als ungeeignet herausstellen.

Da die Datenverfügbarkeit für die Bewertung der Salzstruktur begrenzt ist, das Kriterium jedoch als wesentlich einzustufen ist, wurde eine mittlere Gewichtung von 2,0 angesetzt.

Nutzungsrechte Salzstock

Der Kavernenbau im geologischen Untergrund unterliegt dem Bergbaurecht. Etwaige Konzessionen oder Genehmigungen für Arbeiten oder Untersuchungen werden in diesem Zusammenhang vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie in Clausthal-Zellerfeld (LBEG) vergeben. Dabei wird unterschieden zwischen Erlaubnissen, Bewilligungen und Bergwerkseigentum. Während eine Erlaubnis zur Aufsuchung von Bodenschätzen noch nicht zur tatsächlichen Aufsuchung oder gar zu Gewinnung berechtigt, gilt eine Bewilligung als Genehmigung für eine konkrete Handlung zum Abbau von Bodenschätzen. Alternativ zur Bewilligung berechtigt auch ein Bergwerkseigentum zur Gewinnung und zum Abbau mit dem Unterschied, dass dieses Recht sogar an einen Dritten verliehen werden kann.

In Schleswig-Holstein gibt es mehrere, großflächig Bereiche, für die entweder Erlaubnisse oder Bewilligungen erteilt wurden. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Erlaubnisse zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen (Erdöl oder Erdgas), die insbesondere mit Blick auf mögliches Fracking erteilt wurden.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Gewinnung nach Erdöl oder Erdgas nicht in denselben Bereichen erfolgt wie die Herstellung von Salzkavernen. Aus diesem Grund widersprechen bestehende Erlaubnisse oder Bewilligungen im Untersuchungsraum einem potentiellen DLSK zunächst nicht. Allerdings ist davon auszugehen, dass einer Genehmigung für (Probe)Bohrungen an den Standorten zunächst eine rechtliche Einigung bzw. Auseinandersetzung mit den Inhabern der Erlaubnissen und Bewilligungen vorangehen muss.

An den Standorten Belmhusen und Segeberg gibt es ein vergebenes Bergwerkeigentum für Steinsalze. An diesen Standorten kann es ggf. sogar zu einer Kooperation mit den Rechteinhabern kommen,



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

solange auf deren Seite ein Interesse an der Verwertung der Salzsole besteht, die beim Aussolen der Kaverne entstehet.

Wegen der unklaren Rechtslage durch erteilte Erlaubnisse und Bewilligungen, die größtenteils einem Kavernenbau grundsätzlich jedoch nicht entgegenstehen, wurde dieses Kriterium mit einem Faktor von 1,5 gewichtet.

Netzanbindung

Wesentliches Ziel eines Druckluftspeicherkraftwerks soll es sein, bei zunehmendem Anteil von erneuerbaren Energien an der bundesweiten Stromproduktion das zwangsläufig ebenfalls zunehmend fluktuierende Energieangebot durch flexible Regelleistung zu verstetigen und somit einen Beitrag zur sicheren und stabilen Stromversorgung zu leisten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Ausgleich von Erzeugung und Nachfrage nicht nur lokal oder regional zu erfolgen hat, sondern auch über größere Distanzen des Übertragungsnetzes hinaus.

Bei der Bewertung der Netzanbindung des DLSK wurden deshalb die derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Strukturen und Auslastungen des Hoch- und Höchstspannungsnetzes in Schleswig-Holstein betrachtet. Gute Bedingungen herrschen dann am betrachteten Standort vor, wenn die Anbindung an das die beiden Netzebenen in kurzen Distanzen realisierbar erscheint. Gerade eine Anbindung an Übertragungsnetze verspricht die Option, Regelenergie auf großen Distanzen und vor allem auch in größerem Leistungsumfang anbieten zu können.

Da es sich bei der DLSK nicht nur um ein reines Erzeugungskraftwerk handelt, sondern der wesentliche Zweck darin besteht, auch negative Regelleistung anbieten zu können und somit überschüssige Energie aus dem Netz abnehmen zu können, wurden es bei den Standorten als positiv angerechnet, wenn im umgebenden Übertragungsnetz einen erkennbaren Bedarf an Regelleistung gibt. Die derzeitige Netzsituation zeigt insbesondere im Bereich der Westküste einen erheblichen Engpass auf, da die dort installierte, hohe Erzeugungsleistung bei gleichzeitig geringen Bedarf in diesem Gebiet bereits heute teilweise nicht über die bestehende Netzinfrastruktur abgeführt werden kann. Zur Feststellung, in welchen Bereichen mit Engpässen in den nächsten Jahren zu rechnen ist, wurden Angaben des hiesigen Netzbetreibers Schleswig-Holstein Netz AG herangezogen [2].

Die Netzanbindung ist an fast allen Standorten gegeben. Verlässliche Abschätzung über den Regelenergiebedarf an einzelnen Netzknotenpunkten können höchstens für die nächsten 7 Jahre getroffen werden. Auf Grund dieser Datenunsicherheit wurde dem dennoch wichtigen Kriterium ein Faktor von 2 zugewiesen.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| <u>Titel</u> | | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | | |

Erzeugungsanlagen Strom

Wie zuvor erwähnt ist der Einsatz eines regelbaren Speicherkraftwerks insbesondere dort sinnvoll, wo eine hohe, schwankende Einspeisung durch erneuerbare Energien besteht. Vor diesem Hintergrund bieten Standorte mit einer hohen Anschlussleistung von erneuerbaren Energien, ähnlich wie beim Netz, einen Vorteil gegenüber Standorten mit wenig bis gar keiner fluktuierenden Einspeiseleistung. Sowohl das DLSK als auch die EE-Anlagen können durch Kombination miteinander somit ggf. auf höhere Betriebsstunden kommen, als ohne die Möglichkeit der Leistungsregelung durch das DLSK. Zur Bewertung des EE-Potentials wurden sowohl bestehende Windenergieanlagen als auch potentielle neue Standorte anhand der Regionalpläne und der dort ausgewiesenen Eignungsräume für Windenergieanlagen herangezogen.

Mit Blick auf das Ziel des Projektes, die Möglichkeiten eines DLSK gerade in Kombination mit dem Ausbau Erneuerbarer Energien zu betrachten, wurde dieses Kriterium mit einem Faktor von 2,5 angesetzt.

Anbindung Gasnetz

Je nach Wahl der DLSK-Technologie kann es sinnvoll oder erforderlich sein, eine Zufeuerung durch Erdgas in das Kraftwerk zu integrieren. Zu diesem Zweck ist eine gute Anbindung an das Erdgas-Verteilungs- oder Übertragungsnetz erforderlich.

Da zu dem öffentlichen Gasnetz kaum verlässliche Daten verfügbar waren und mit Ausnahme der Standorte Marne-Heide-Süderstapel und Belmhusen-Kuden-Süderhastedt auch keine wesentlichen Gas-Kraftwerke oder Anlagen bekannt waren, wurde dieses Kriterium mit dem kleinsten Faktor 1 gewichtet.

Abtransport Sole

Der Abtransport der Sole stellt das wesentliche Kriterium für die Erschließungsphase der Kaverne dar. Bei der Herstellung der Kaverne mit einem Volumen zwischen 200.000 m³ und 800.000 m³ kann der Prozess der Aussolung bis zu 2-3 Jahre dauern. In der Regel wird die durch Ausspülung mit Frischwasser gewonnene Sole über Pipelines in das Meer gespült. Alternativ kann der Abtransport auch zu anderen Standorten (z.B. Chemieindustrie) erfolgen, wenn dort ein entsprechender Bedarf besteht. Der Zeitaufwand für den Bau einer Pipeline beträgt ungefähr ein Jahr, wobei die privatrechtliche Sicherung der Trassenführung ein wesentlicher Aspekt ist. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist eine Solung mittels Pipelines bis zu einer Entfernung von 50 km zwischen Kaverne und Meer bzw. Entsorgungsstelle sinnvoll [3].



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

In Schleswig-Holstein kommt bei der Entsorgung der Sole erschwerend hinzu, dass an der Westküste die Einleitung von Sole in die Nordsee nur außerhalb des Nationalpark Wattenmeers erfolgen darf. Die zu überbrückenden Abstände von den untersuchten Standorten verlängern sich somit zusätzlich. Die Entfernungen zur Nord- oder Ostsee wurden beim Kriterium Abtransport Sole als wesentliche Punkte bewertet, da konkret Informationen über alternative Verwendungsmöglichkeiten in der Industrie nicht vorliegen und im wesentlichen Teil von Schleswig-Holstein ohnehin nicht zu erwarten sind.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Abtransportmöglichkeiten, wurde dieses Kriterium mit dem maximalen Faktor von 3 gewichtet.

Weitere Standortfaktoren

Unter diesem Kriterium wurden hauptsächlich sogenannte weiche Faktoren berücksichtigt. Diese betreffen strukturelle Merkmale des Standorts, wie etwa Vorbelastung der Landschaft durch Industrie, Siedlungsentwicklung, Landwirtschaft, Naturschutzgebiete o.ä. Diese Punkte stellen für sich keine Ausschlusskriterien für die Errichtung eines Kraftwerks dar, können in einigen Fällen jedoch die Ansiedlung einer solchen industriellen Anlage erschweren oder erleichtern.

Aufgrund der nebensächlichen Bedeutung dieser Faktoren wurde das Kriterium mit 1 gewichtet.

3.1.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse (Tabelle 3) zeigen eine Spannweite der je Standort erreichten Punktzahl von 38% bis 79% der maximal erreichbaren Punkte. Es zeigt sich, dass insbesondere solche Standorte, die eine weite Distanz für die Entsolung aufweisen, aufgrund der hohen Gewichtung nur auf eine geringe Gesamtpunktzahl kommen. Die nach dieser Bewertungsgrundlage am besten geeigneten Standorte liegen verhältnismäßig nicht an der Nord- oder Ostseeküste und weisen auch eine große Verbreitung von Windenergieanlagen vor Ort vor. Eine detailliertere Darstellung findet sich im Anhang.

Für weitere Untersuchungen ist mindestens für die Standorte 1, 6, 7 und 8 eine nähere Untersuchung in Betracht zu ziehen. Diese Standorte haben in den wesentlichen Kriterien eine gute Bewertung erhalten. Der Standort Lägerdorf-Krempe (5) hat gerade in Bezug auf Netzanbindung und Zugang zu Erneuerbaren Energien ebenfalls eine gute Bewertung, auch die Größe des Salzstocks kann mehrere Untersuchungen ermöglichen. Aufgrund der weiten Entfernung zum Meer (außerhalb des Nationalparks) ist der wirtschaftlich Abtransport der Sole allerdings nicht ohne weiteres sichergestellt. Die Berücksichtigung dieses Standorts kann aber insbesondere dann Sinn machen, wenn Möglichkeiten für einen alternativen Abtransport (etwa über die Elbe) bestehen.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Tabelle 3: Ergebnis der Standortbewertung

| Salzformation | Nr | Punkte | Prozent |
|--|----|--------|---------|
| Belmhusen-Kuden-Süderhastedt | 1 | 103,0 | 79% |
| Marne-Heide-Süderstapel | 6 | 102,0 | 78% |
| Oldenswort Nord | 7 | 91,5 | 70% |
| Osterby | 8 | 87,5 | 67% |
| Lägerdorf-Krempe | 5 | 82,0 | 63% |
| Sterup | 13 | 80,0 | 62% |
| Westensee-Eisendorf-Gnutz-Meezen-Peissen | 14 | 73,0 | 56% |
| Föhrden-Hamdorf-Oldenbüttel Süd | 4 | 71,5 | 55% |
| Segeberg-Sülfeld | 11 | 67,0 | 52% |
| Schwedeneck | 10 | 64,0 | 49% |
| Elmshorn | 3 | 62,0 | 48% |
| Bramstedt | 2 | 55,0 | 42% |
| Sievershütten | 12 | 52,0 | 40% |
| Quickborn | 9 | 49,5 | 38% |

3.2 Sachstand im AP 2 Technologie

Die Arbeiten am AP 2.1 wurden im Januar 2015 abgeschlossen. Die geleisteten Arbeiten umfassen sowohl die Entwicklung des methodischen Vorgehens zur Vorauswahl der DLSK-Konzepte (siehe Abschnitt 3.2.1) als auch deren Anwendung zur Ergebnisfindung (Abschnitt 3.2.3). Dazu wurden ebenfalls als Teil der Arbeiten im AP 2.1 die im ersten Schritt zu betrachtenden Kraftwerkskonzepte identifiziert und klassifiziert (Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Methodik

Das methodische Vorgehen im Zuge des AP 2.1 gliedert sich in sieben Arbeitsschritte:

- 1. Zusammenstellung der Druckluftspeicherkonzepte
- 2. Auswahl und Klassifizierung der zu bewertenden Konzepte
- 3. Thermodynamische Berechnung der Konzepte
- 4. Aufstellung der Bewertungskriterien zu Standort, Technologie und Effizienz
- 5. Gewichtung der Bewertungskriterien
- 6. Bewertung der Konzepte
- 7. Auswahl der aussichtsreichsten Konzepte



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

Als Basis der weiterführenden Arbeiten wurden im ersten Schritt nach umfassender Literaturrecherche und selbstständigen Weiterentwicklungen verschiedene Konzepte der Druckluftspeicherung zusammengestellt. Durch den grundsätzlichen Ausschluss einiger Konzepte erfolgte eine Reduktion auf die zu bewertenden DLSK-Konzepte und deren Klassifizierung.

Die thermodynamische Analyse der Konzepte stellt ein zentrales Element des AP 2.1 dar. In diesem Schritt wurde das stationäre Betriebsverhalten gegen einen feststehenden Kavernendruck als Best-Point-Efficiency untersucht. Die Konzepte wurden nach Möglichkeit durch zwei Verdichter- und Turbinenstufen mit jeweils gleichen Druckverhältnissen abgebildet (Anhang). Dabei galten für die Festlegung der Betriebsparameter die Belastungsgrenzen der Komponenten. Des Weiteren wurde als Arbeitsmedium trockene Luft angenommen und im Rahmen des Idealen-Gas-Gesetzes mit temperaturabhängiger isobarer Wärmekapazität behandelt. Weitere Rahmenbedingungen und Annahmen sind im Anhang dargestellt.

Im vierten Arbeitsschritt erfolgte die Aufstellung von entscheidungsrelevanten Bewertungskriterien eines DLSK-Konzeptes hinsichtlich der Standorterfordernisse, der technologischen Erfordernisse und Charakteristika sowie der Effizienz. Die Bewertung der Konzepte in den einzelnen Kategorien führte mithilfe des zuvor aufgestellten Gewichtungsschemas und unter Berücksichtigung übergeordneter Metakriterien zur Auswahl der aussichtsreichsten Druckluftspeicherkonzepte. Diese Auswahl im Rahmen von zwei bis vier Konzepten wird im nächsten Arbeitspaket vertieft analysiert.

3.2.2 Klassifizierung und Aufbau der Konzepte

Das Prinzip der Druckluftspeicherung umfasst die Kompression von Luft zur Speicherung elektrischer Energie, die Vorhaltung dieser komprimierten Luft im Speicher sowie bei Bedarf die Expansion der Luft zur Rückgewinnung der elektrischen Energie. Grundsätzlich kann dieser Prozess durch eine Vielzahl verschiedener Kraftwerkskonzeptionen erreicht werden, die sich hinsichtlich ihrer Potentiale unterscheiden.

Abbildung 2 zeigt die im Rahmen der Arbeiten vorgenommene Klassifizierung der zur Bewertung ausgewählten Konzeptionen. Die Einteilung der Konzepte folgt zunächst der Art der Arbeitsmedien in ausschließlich luftbetriebene sowie hydropneumatische Systeme. Des Weiteren bestehen unterschiedliche Ansätze im angestrebten Prozessverlauf. Dabei werden so genannte adiabate Konzepte, bei denen möglichst keine Wärme an die Umgebung übertragen wird von so genannten diabaten unterschieden, bei denen eine forcierte Wärmeabgabe und eine Zufuhr thermischer Energie auf hohem Temperaturniveau vorhanden ist. Unter einem quasi-isothermen Prozessverlauf wird demgegenüber hier verstanden, dass Wärmeübertragung an die und von der Umgebung nur auf gleichbleibendem Temperaturniveau nahe der Umgebungstemperatur erfolgt. Neben den verbreiteten, mit



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

Umgebungsluft arbeitenden Systemen sind geschlossene Systeme denkbar, in denen Luft in einem geschlossenen Behälter unter bestimmtem Vordruck komprimiert wird. Eine letzte Untergliederung wird nach Einbeziehung eines thermischen Speichers (TES) vorgenommen.

In diese Systematik lassen sich, wie in der Grafik zu sehen, auch die im Folgenden näher beschriebenen Prozesskonzepte A1a bis HP2 einordnen. An dieser Stelle wird zunächst der Aufbau der verschiedenen Schaltungen beschrieben. Eine ausführlichere Darstellung aller Konzepte befindet sich mit den jeweiligen Berechnungsdaten im Anhang.

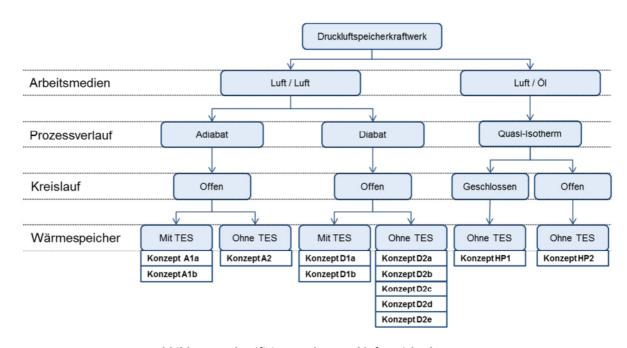


Abbildung 2: Klassifizierung der Druckluftspeicherkonzepte

Die adiabaten DLSK wurden in der Technologievorauswahl in drei Varianten untersucht. Die entsprechenden Schaltbilder sind in Abbildung 3 dargestellt. Das Konzept A1a beschreibt dabei ein klassisches adiabates Druckluftspeicherkraftwerk mit einem thermischen Speicher (TES) und einer geringfügigen Zwischenkühlung nach der ersten Verdichtung, die den Zweck hat, Temperaturbelastungen bei hohen Kavernendrücken zu verringern. Demgegenüber steht der konzeptionelle Ansatz auch die im ersten Verdichtungsschritt entstehende Abwärme in einem zweiten TES zu speichern und dem Prozess vor der zweiten Expansionsstufe wieder zuzuführen. Dieses so genannte Multistage-TES Konzept wird hier als A1b bezeichnet. Als weiteres adiabates DLSK wurde eine Variante ohne TES (Konzept A2) untersucht. Besonderes Augenmerk ist hier auf die Temperaturbelastungsgrenzen der Kaverne zu richten [4] [5].



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

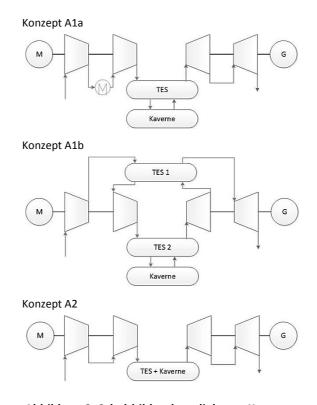


Abbildung 3: Schaltbilder der adiabaten Konzepte

Eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten bietet das diabate DLSK (siehe Abbildung 4). Das Konzept D1a vereint den Ansatz der Wärmespeicherung im TES mit einer zusätzlichen Wärmezufuhr durch erdgasbefeuerte Brennkammern. Als zusätzliche Komponente kann der Dampfteil eines GuD-Kraftwerkes die hohen Temperaturen des Abgases nach der Expansion nutzen und somit zusätzliche elektrische Energie erzeugen (Konzept D1b). Das 1978 gebaute Kraftwerk Huntorf ist ein Beispiel des klassischen diabaten Konzeptes D2a, welches auf einen thermischen Speicher verzichtet. Um verschiedene Kraftwerkskomponenten ergänzt, leiten sich daraus weitere Konzepte ab. Ein Rekuperator, welcher die Wärme des Abgases zur Erwärmung der Luft nach Kavernenaustritt nutzt, wurde praktisch im Kraftwerk McIntosh realisiert (Konzept D2b). Außerdem ist der Anschluss eines Gasturbinenkraftwerkes (Konzept D2c), eines Dampfteils (Konzept D2d) oder einer Kombination der beiden letzteren möglich (Konzept D2e) [5] [6] [7].



 Bericht Nr.
 Revision
 Autoren
 Datum

 TES-2015-EKSH-02
 Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I.
 28.02.2015

 Titel

 Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015

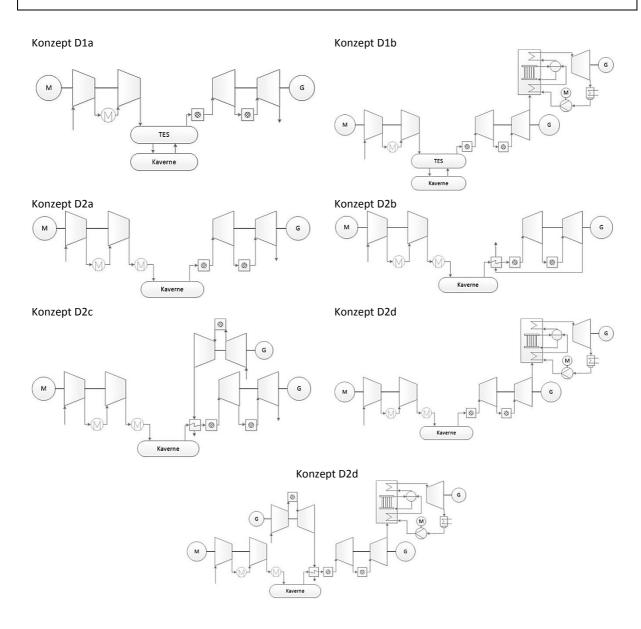


Abbildung 4: Schaltbilder der diabaten DLSK

Weitere kombinatorische Möglichkeiten der diabaten und adiabaten Druckluftspeicherung bezüglich einer Implementierung der zusätzlichen Komponenten Rekuperator, thermischer Speicher, Gasturbinenanlage sowie Dampfteil wurden geprüft und ausgeschlossen. Die thermodynamische Sinnhaftigkeit ist bei den wärmetechnischen Zusätzen aufgrund der ähnlichen Temperaturniveaus nicht gegeben. Beispielsweise kann bei Systemen ohne TES ein Rekuperator nicht mit einem Dampfteil kombiniert werden, weil beide um die nach der Expansion der Druckluft verbleibende Abwärme konkurrieren. Sobald dagegen ein TES vor der ersten Expansion eingesetzt wird, verliert ein Rekuperator dadurch an Attraktivität, dass der TES die Nutzung der Abgasenergie durch den Rekuperator erheb-



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

lich einschränkt. Aus gleichem Grund bietet sich auch die Kombination von TES und Gasturbine nicht an.

Zusätzlich zu den dargestellten Konzepten sind Varianten mit Anschluss an das Fernwärmenetz sowie an industrielle Betriebe möglich. Durch einen Fernwärmeanschluss kann die während der Verdichtung sonst an die Umgebung abgegebene Wärme stattdessen als Fernwärme effizient genutzt werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, Industrieabwärme auf hohem Temperaturniveau innerhalb des Expansionsprozesses zuzuführen und somit Brennstoff einzusparen. Aufgrund der Tatsache, dass in diesen Fällen eine Nähe zu größeren Zentren sowie zu Hochtemperaturindustrien vorausgesetzt ist und diese im landwirtschaftlich geprägten Bundesland Schleswig-Holstein zumeist nicht vorhanden ist, werden beide Varianten in der Auswahl ausgeschlossen. Gleiches gilt für ein isobares Konzept, welches durch einen hohen Volllastanteil Effizienzvorteile bedeutet, aber auf ein oberirdisches Solependelbecken angewiesen ist. Auch diese Voraussetzung ist in Schleswig-Holstein nicht erfüllt.

Bisher weniger erforscht im Zusammenhang mit der Energiespeicherung auf Netzebene sind die hydropneumatischen Systeme, die zur Verdichtung der Luft oder eines Gases eine Flüssigkeit, zumeist Öl, nutzen. Angestrebt wird hierbei ein nahezu isothermer Prozessverlauf, der durch kontinuierliche Wärmeübertragung zwischen dem Fluid und der Umgebung erreicht werden soll. Praktisch werden jedoch polytrope Prozessverläufe erreicht, welche sich aus adiabaten und isothermen Kombinationen ergeben [8].

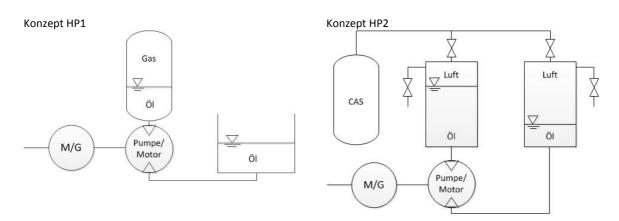


Abbildung 5: Schaltbilder der hydropneumatischen Konzepte

Konzeptionell wird dies in geschlossenen Systemen (Konzept HP1) realisiert, in denen Luft mit hohem Überdruck durch das Pumpen eines Ölstromes in den Behälter komprimiert wird. Offene Systeme (Konzept HP2) hingegen nutzen Umgebungsluft, um sie nach dem so genannten "Liquid-Piston"-Prinzip zu verdichten [8], und benötigen somit ein wesentlich geringeres Ölvolumen. In der weiteren Bewertung wurde zunächst das geschlossene System fokussiert, da es aufgrund höherer Ausgangsdrücke und eines dem isothermen Verlauf näheren Prozess bei ansonsten weniger aufwendigem



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|-------------------------------|------------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | |

kraftwerkstechnischen Aufbau wesentliche Vorteile gegenüber dem offenen Konzept aufweist. Eine Relevanz könnte das Konzept HP2 erlangen, wenn hohe Ölvolumenströme wegen externer Faktoren vermieden werden müssen.

3.2.3 Konzeptbewertung hinsichtlich des Kriterienkataloges

Die beschriebenen Konzepte zur Druckluftspeicherung wurden in der anschließenden Arbeit hinsichtlich diverser Kriterien zu den Kategorien Standort, der Technologie und der Effizienz beurteilt. In jedem Kriterium werden die Konzepte mit Werten zwischen 0 und 10 Punkten bewertet, die prozentual gewichtet eine Beurteilung zu jeder Kategorie erlauben. Eine ausführliche Darstellung und Erklärung der Bewertung befindet sich im Anhang.

Tabelle 1 fasst die Bewertung bezüglich der Standorterfordernisse, die sich in geologische und infrastrukturelle Anforderungen unterscheiden, zusammen. Diesbezüglich weisen die Speicher keine wesentlichen Differenzen zueinander auf. Die Konzepte A1b und HP1a sind vor allem aufgrund des nicht zwingend erforderlichen Erdgasanschlusses führend.

Tabelle 4: Konzeptbewertung bezüglich der Standorterfordernisse

| | Geo | ologische Erfordern | isse | Infrastrukturelle Erfordernisse Anschluss an: | | | |
|------|-------------|---------------------|---------------|--|-----------|------------|-------|
| | Solependel- | Kave | | | | Industrie- | |
| | becken | Erforderlichkeit | Energiedichte | Erdgas | Fernwärme | abwärme | |
| | 10 % | 25 % | 25 % | 20 % | 10 % | 10 % | 100 % |
| A1a | 10 | 0 | 5 | 7 | 10 | 10 | 5,65 |
| A1b | 10 | 0 | 6 | 7 | 10 | 10 | 5,90 |
| A2 | 10 | 0 | 0 | 7 | 10 | 10 | 4,40 |
| D1a | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 |
| D1b | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 |
| D2a | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 |
| D2b | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 |
| D2c | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 |
| D2d | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 |
| D2e | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 |
| HP1a | 10 | 2 | 1 | 10 | 10 | 10 | 5,75 |
| HP1b | 10 | 2 | 0 | 10 | 10 | 10 | 5,50 |

Ein deutlich abweichendes Bild ergibt sich bei der Bewertung der Kategorie Technologie, die insbesondere die heutige Machbarkeit der Konzepte sowie deren grobe Charakteristika analysiert. Offensichtlich zeigen hier insbesondere die schon realisierten Kraftwerkskonzepte (Huntorf, McIntosh) hohe Bewertungen. Vor allem der thermische Speicher, welcher für die Industrie noch einen großen



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Forschungsaufwand bedeutet und den alleinigen Kraftwerksbetrieb im adiabaten System ausschließt, hat, wie in Tabelle 5 zu sehen ist, einen negativen Einfluss auf die betreffenden Konzepte.

Tabelle 5: Konzeptbewertung bezüglich der Technologiekriterien

| | Allg. | | System- | | Betrieb | Brenn- | | | |
|------|---------|---------------|--------------|---------|-----------|---------|-------------|--------|-------|
| | Mach- | Komp | entwick- | Anlauf- | als | stoff- | Kapazitäts- | | |
| | barkeit | verfügbarkeit | lungs-status | zeit | Kraftwerk | einsatz | begrenzung | Kosten | |
| | 20 % | 20 % | 20 % | 5 % | 10 % | 10 % | 5 % | 10 % | 100 % |
| A1a | 6 | 5 | 6 | 3 | 0 | 10 | 8 | 4 | 5,35 |
| A1b | 6 | 5 | 5 | 3 | 0 | 10 | 8 | 4 | 5,15 |
| A2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 0 | 10 | 6 | 6 | 3,45 |
| D1a | 6 | 5 | 4 | 3 | 0 | 9 | 6 | 5 | 4,85 |
| D1b | 6 | 5 | 4 | 3 | 0 | 4 | 6 | 6 | 4,45 |
| D2a | 10 | 10 | 10 | 3 | 10 | 7 | 6 | 7 | 8,85 |
| D2b | 10 | 10 | 10 | 3 | 10 | 3 | 6 | 8 | 8,55 |
| D2c | 10 | 10 | 2 | 3 | 10 | 1 | 6 | 7 | 6,65 |
| D2d | 10 | 7 | 4 | 3 | 10 | 1 | 6 | 7 | 6,45 |
| D2e | 10 | 7 | 0 | 3 | 10 | 0 | 6 | 7 | 5,55 |
| HP1a | 10 | 10 | 6 | 6 | 0 | 10 | 10 | 0 | 7,00 |
| HP1b | 10 | 10 | 6 | 6 | 0 | 10 | 10 | 0 | 7,00 |

Tabelle 6 zeigt schließlich die Bewertungsergebnisse aus Sicht der Kraftwerkseffizienz. Es wurden zwei verschiedene Ansätze zur Wirkungsgraddefinition genutzt, welche sich in ihrer Systemsichtweise unterscheiden. Der Referenzwirkungsgrad setzt die ausspeicherbare Energie abzüglich der Energie, die mit dem eingesetzten Brennstoff in einem Spitzenlastkraftwerk erzeugt hätte werden können, ins Verhältnis zur eingespeicherten elektrischen Energie und bildet somit ein Speicherkraftwerk ab. Auf der anderen Seite wird der exergetische Wirkungsgrad nach dem Berechnungsschema eines Spitzenlastkraftwerkes erstellt. Eine höhere Gewichtung jedoch wurde dem Referenzwirkungsgrad beigemessen, da das Abfangen von Energieüberschüssen speziell in Schleswig-Holstein von hoher Bedeutung ist und dieses durch das entsprechende Speicherkraftwerk gewährleistet werden muss.

Grundsätzlich kann in diesem Zusammenhang angemerkt werden, dass sich die Speicherkonzepte in Bezug auf ihren Spitzenlast- bzw. Schattenkraftwerksanteil unterscheiden. Wegen des wachsenden Gewichts der zugeführten Brennstoffenergie im Verhältnis zur eingespeicherten Energie rücken additive Komponenten wie beispielweise die Gasturbinenanlage sowie der Dampfteil Konzepte deutlich weiter in Richtung eines Spitzenlast- oder Schattenkraftwerkes.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Tabelle 6: Konzeptbewertung bezüglich der Effizienzkriterien

| | Wirkungsgrad n | ach energetischer Re | Exergetischer | | |
|------|----------------|----------------------|---------------|--------------|-------|
| | η_{ref} = | | | Wirkungsgrad | |
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | | |
| | 10 % | 40 % | 10 % | 40% | 100 % |
| A1a | 8 | 8 | 8 | 9 | 8,40 |
| A1b | 9 | 9 | 9 | 10 | 9,40 |
| A2 | 6 | 6 | 6 | 9 | 7,20 |
| D1a | 8 | 8 | 7 | 8 | 7,90 |
| D1b | 10 | 9 | 6 | 4 | 6,80 |
| D2a | 4 | 2 | 1 | 3 | 2,50 |
| D2b | 8 | 3 | 0 | 3 | 3,20 |
| D2c | 8 | 2 | 0 | 3 | 2,80 |
| D2d | 9 | 4 | 0 | 4 | 4,10 |
| D2e | 10 | 4 | 0 | 0 | 2,60 |
| HP1a | 8 | 8 | 8 | 8 | 8,00 |
| HP1b | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,00 |

Zusammenfassend resultiert eine Rangfolge der Systeme, welche in Tabelle 7 dargestellt ist. Bei Annahme eines realisierbaren isothermen Prozessverlaufes weist das geschlossene hydropneumatische DLSK die höchsten Bewertungen auf. Im Zuge der Konzeptauswahl stellt jedoch die Prozessrealisierbarkeit ein übergeordnetes Metakriterium dar. Prinzipiell ist der isotherme Verlauf des Konzeptes HP1a zu dem jetzigen Zeitpunkt nicht praktisch realisierbar und bringt lediglich das Potential des Systems zum Vorschein. Es wird auch aufgrund des deutlich weiter abgeschlagenen Ranges des polytropen Prozesses von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Tabelle 7: Rangfolge der Konzepte zur Druckluftspeicherung

| | | Standort | Technologie | Effizienz | |
|----|------|----------|-------------|-----------|-------|
| | | 20 % | 40% | 40 % | 100 % |
| 1 | HP1a | 5,75 | 7,00 | 8,00 | 7,15 |
| 2 | A1b | 5,90 | 5,15 | 9,40 | 7,00 |
| 3 | A1a | 5,65 | 5,35 | 8,40 | 6,63 |
| 4 | D1a | 4,50 | 4,85 | 7,90 | 6,00 |
| 5 | D2b | 5,50 | 8,55 | 3,20 | 5,80 |
| 6 | D1b | 5,50 | 4,45 | 6,80 | 5,60 |
| 7 | HP1b | 5,50 | 7,00 | 4,00 | 5,50 |
| 8 | D2a | 4,50 | 8,85 | 2,50 | 5,44 |
| 9 | D2d | 5,50 | 6,45 | 4,10 | 5,32 |
| 10 | A2 | 4,40 | 3,45 | 7,20 | 5,14 |
| 11 | D2c | 4,50 | 6,65 | 2,80 | 4,68 |
| 12 | D2e | 5,50 | 5,55 | 2,60 | 4,36 |



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Auf den folgenden Rängen sind das adiabate DLSK mit mehreren thermischen Speichern sowie jenes mit einem thermischen Speicher vertreten. Die konstruktive Nähe beider Konzepte erlaubt eine Reduktion auf das Konzept A1b für die Analyse im AP 2.2. Ebenso werden das diabate DLSK mit thermischem Speicher als auch das diabate Konzept mit Rekuperator in das folgende Arbeitspaket übernommen. Aufgrund des deutlich in Richtung eines konventionellen Schattenkraftwerks divergierenden Konzeptes D1b, welches neben dem thermischen Speicher einen Dampfteil enthält, wurde entschieden, dieses als ein viertes Konzept im Detail zu untersuchen. Alle genannten Konzepte genügen dem Metakriterium der Prozessrealisierbarkeit.

3.3 Sachstand im AP 3 Systemfunktion

Im Arbeitspaket AP 3.1 wurden zum einen Entscheidungen bezüglich des Modellierungsansatzes getroffen (siehe Abschnitt 3.3.1). Ein entsprechendes Modell wurde dann implementiert und getestet (Abschnitt 3.3.3.), wobei dafür zu diesem im Rahmen der Arbeiten vorbereitete Beispieldaten verwendet wurden (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Konzeptabbildung, Betriebsszenarien und verwendete Software

In einer grundlegenden Einarbeitung in die verschiedenen Kraftwerkskonzepte konnten als wesentliche, alle Konzepte verbindende Vorgänge innerhalb eines Druckluftspeicherkraftwerks die Speicherbeladung, die Speicherentladung sowie die mechanische und eine optionale thermische Speicherung identifiziert werden. Unter der Prämisse, dass der Fokus des Modells auf einer Betriebsoptimierung liegt und lediglich die wesentlichen physikalischen Restriktionen der Kraftwerkskonzepte abgebildet werden müssen, erfolgte zum Zweck der Modellierung eine Aufteilung des Speicherzyklus in diese Abschnitte.

Anschließend wurden im nächsten Schritt potentielle Betriebsszenarien für ein Speicherkraftwerk identifiziert. Hier scheinen in erster Linie die Vermarktung der Leistung am Intraday und die Vermarktung am Day-Ahead Spotmarkt in Frage zu kommen. Zusätzlich ist eine Teilnahme am Markt für Regelleistung (Minutenreserve) möglich. Beide Optionen abbilden zu können, wurde daher als Anforderung an die Modellierung formuliert.

Nach der Identifikation geeigneter Kraftwerkskonzepte und Betriebsszenarien wurde nach einem Verfahren für die Betriebsoptimierung und einer geeigneten Programmiersprache gesucht. Aufgrund der häufigen Anwendung im Bereich der Kraftwerkseinsatzplanung und der guten Verfügbarkeit von übertragbarer Fachliteratur [9] [10] wurde hier das Verfahren der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung ausgewählt. Bei der Festlegung der Programmiersprache fiel vor dem Hintergrund



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

der Verfügbarkeit umfassender Bibliotheken für die Optimierung und der geforderten Kompatibilität des Moduls mit *renpass* die Wahl auf Python [11].

Für die mathematische Beschreibung des Optimierungsproblems wird das Paket *Pyomo (Python Optimization Modeling Objects)* verwendet. *Pyomo* ist ein in Python geschriebenes Open Source Softwarepaket für die Formulierung und Analyse von verschiedensten Optimierungsproblemen. So können unter anderem lineare, quadratische, nichtlineare und gemischt ganzzahlige lineare Probleme algebraisch beschrieben und anschließend unter Verwendung verschiedener Standardsolver gelöst werden [12]. Die Anwendung des Solvers ist dabei unabhängig von der jeweiligen Problemformulierung. Daher kann beispielsweise bei sehr großen Problemen mit hoher Laufzeit auf einen schnelleren Solver zurückgegriffen werden, ohne die gesamte Codebasis verändern zu müssen.

Um die in den möglichen Betriebsszenarien ermittelten Märkte hinreichend abbilden zu können, werden umfangreiche Preiszeitreihen für den Spot- und Regelleistungsmarkt in einer relationalen Datenbank gespeichert. Hier fiel die Wahl auf das professionelle, freie relationale Datenbankmanagementsystem (RDBMS) *PostgreSQL* [13]. Dies erlaubt eine effiziente, widerspruchsfreie und dauerhafte Speicherung entsprechend großer Datenmengen und bietet ein hohes Maß an Flexibilität für weitere Anpassungen über entsprechende Schnittstellen. Zudem wird diese Datenbank aufgrund ihrer Performanz und Zuverlässigkeit bereits erfolgreich in anderen Projekten des Instituts (unter anderem in der neuen *renpass* Version) eingesetzt.

3.3.2 Aufbereitung und Speicherung der Marktdaten

Für die nötige Validierung des Modells wurde zunächst auf historische Börsendaten der *European Energy Exchange (EEX)* sowie historische Daten des Regelleistungsmarktes zurückgegriffen. Die Börsendaten stammen von der Transparenzplattform der EEX [14], während die Daten des Regelleistungsmarktes von der gemeinsamen Internetplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zur Ausschreibung von Regelleistung [15] bezogen wurden. Für die in Arbeitspaket AP-3.2 anstehenden Berechnungen mit verschiedenen Erzeugungsszenarien können diese Marktdaten hingegen aus einem übergeordneten Energiesystemmodell wie z. B. *renpass* entnommen werden.

Die Aufbereitung und Speicherung der Daten in der Datenbank erfolgt über Python-Skripte. Diese lesen die EEX- bzw. Minutenreserve-Daten aus den vorliegenden Excel- bzw. CSV-Dateien aus, bereiten diese auf und importieren sie anschließend in die Datenbank. Für die stündlichen Preise des Intraday- und Day-Ahead-Marktes mussten keine zusätzlichen Berechnungen vorgenommen werden. Die Leistungs- und Arbeitspreise für Minutenreserve wurden hingegen nach dem Import aus den vorliegenden Auktionsdaten ermittelt. So wurde über Datenbankabfragen für alle gehandelten Produkte (Zeitscheiben von 4 h für positive und negative MRL) der jeweilige Grenzpreis (letztes Gebot



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

mit Zuschlag), Median, Mittelwert und Minimalpreis für die zur Verfügung gestellte Leistung (Leistungspreis) und Arbeit (Arbeitspreis) berechnet. Im Gegensatz zu den einstündigen Spotmarkt-Produkten und vierstündigen MRL-Produkten liegen die Abrufe für Minutenreserve im Netzregelverbund (NRV) der deutschen ÜNB in viertelstündlicher Auflösung vor. Diese unterschiedlichen Zeitauflösungen würden die mathematische Beschreibung des Optimierungsproblems allerdings erheblich erschweren und wurden daher vereinheitlicht.

Als einheitliche Zeitauflösung für das Modell wurde eine stündliche Auflösung gewählt. Diese ermöglicht das Rechnen mit exakten Börsenpreisen bei gleichzeitig ausreichend genauer Abbildung des Regelleistungsmarktes. Zudem reduziert sich gegenüber einer viertelstündlichen Auflösung die Problemgröße und damit einhergehend die Rechenzeit des Solvers. Für die Umrechnung der viertelstündlichen Abrufe innerhalb des NRV wurde ein stündlicher Mittelwert gebildet. Die zuvor berechneten Leistungspreise wurden hingegen geviertelt und gleich auf die 4 Stunden innerhalb einer Zeitscheibe verteilt. Anschließend wurden die auf eine stündliche Zeitauflösung umgerechneten Daten in einer gemeinsamen Tabelle gespeichert. Dies erleichtert eine spätere Abfrage, da lediglich die entsprechenden Spalten und der zu berechnende Zeitraum adressiert werden müssen.

3.3.3 Aufbau und Validierung des Modells

Nach der Auswahl möglicher Betriebsszenarien und der verwendeten Software sowie der Aufbereitung und Speicherung der Markdaten wurde ein Modell für die Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks entwickelt. Vor der Implementierung wurde dafür zunächst eine Struktur definiert, die sicherstellt, dass die Anforderungen aus AP-3 erfüllt werden können. Abbildung 6 zeigt die Gesamtstruktur des Modells.

Es wird deutlich, dass die Schritte der Parametrierung, mathematischen Problembeschreibung, Modellerstellung und des Lösens klar voneinander getrennt wurden. Zusätzlich bietet das Modell Schnittstellen für den Datenimport aus übergeordneten Energiesystemmodellen wie *renpass* und ein Modul für auf den Optimierungsergebnissen basierende, nachgelagerte Berechnungen (Postprocessing). Damit können nach einem Optimierungslauf die relevanten Größen einfach durch entsprechende Plots visualisiert werden. Da sich *renpass* derzeit in einem Versionsumbruch befindet, wurde die Schnittstelle zu übergeordneten Energiesystemmodellen bewusst flexibel gehalten und beschränkt sich zunächst auf den Import von Marktdaten.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

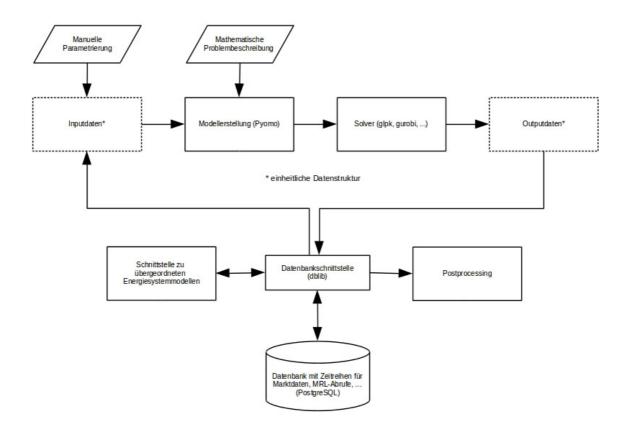


Abbildung 6: Struktur des Modells zur Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks

Alle Datenbankzugriffe erfolgen über eine Datenbankschnittstelle, die vom ZNES gemeinsam mit dem Reiner Lemoine Institut in Berlin entwickelt wird. Diese stellt sicher, dass der Zugriff auf die Datenbank zur Erstellung der Eingangsdaten und Speicherung der Ausgangsdaten über zentral definierte Funktionen erfolgt. Somit müssen bei eventuellen späteren Änderungen an der Datenbank die Änderungen nur an einer Stelle im Code vorgenommen werden und der Rest des Codes bleibt unbeeinträchtigt.

Nach der Implementierung wurde das Modell zuerst mit Zufallspreiszeitreihen und anschließend mit historischen Marktdaten validiert. Als zu minimierende Zielfunktion wurde eine Kostenfunktion des Kraftwerks, bestehend aus Strombezugs- und Gaskosten, sowie Erlösen am Intraday-, Day-Ahead- und Minutenreservemarkt, ausgewählt. Als Restriktionen wurden exemplarische Leistungen für den Verdichter, die Turbine und die Kaverne angenommen. Bisher konnte das gesamte Modell, teils durch den Einsatz von Linearisierungstechniken, linear beschrieben werden. Die entsprechenden Gleichungen sind im Anhang aufgeführt und knapp kommentiert.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Bei der Optimierung an den verschiedenen Märkten wird von einer perfekten Voraussicht (perfect foresight) auf die zukünftigen Preise und MRL-Abrufe ausgegangen. Somit werden zeitliche Unterschiede zwischen den Handelszeitpunkten, wie beispielsweise der Gebotsabgabe am Minutenreservemarkt um 10 Uhr und der Day-Ahead-Auktion um 12 Uhr, nicht berücksichtigt. Handelsstrategien, wie etwa Gebotsstrategien am Regelleistungsmarkt, werden zunächst nicht betrachtet bzw. nur über die für die Zeitreihen berechneten Parameter (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) abgebildet. Falls sich dieses im weiteren Projektverlauf als wichtig herausstellen sollte, könnten diese aber über entsprechende Heuristik als Nebenbedingung in die Optimierung eingehen.

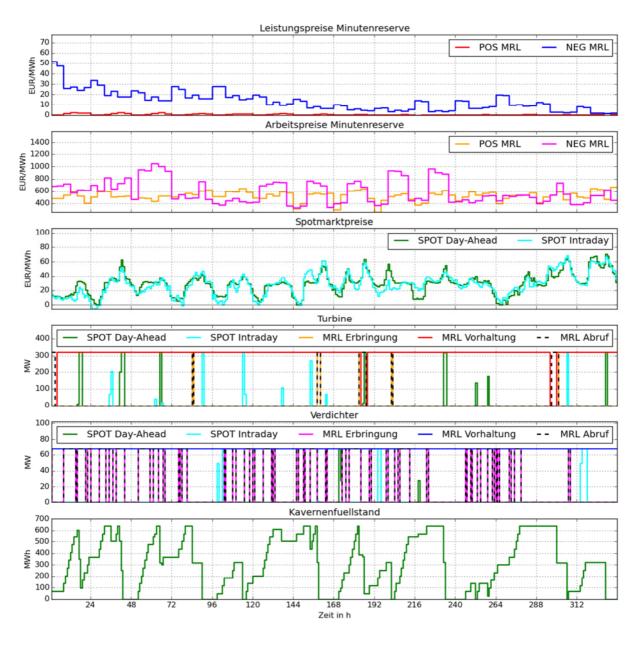


Abbildung 7: Optimaler Fahrplan des Kraftwerks in Huntorf für die ersten beiden Januarwochen im Jahr 2014



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Für eine exemplarische Parametrierung wurde das diabate Druckluftspeicherkraftwerk in Huntorf mit einer elektrischen Turbinenleistung von 321 MW, einer elektrischen Verdichterleistung von 68 MW und einer nutzbaren Kavernenkapazität von 640 MWh ausgewählt. Abbildung 7 zeigt den hinsichtlich der Erlöse optimalen Fahrplan des Kraftwerks für die ersten beiden Januarwochen im Jahr 2014.

Es wird deutlich, dass sich das Kraftwerk verhält, wie erwartet. Die Einspeicherung von Strom in die Kaverne erfolgt in Zeiten niedriger Strompreise, während die Rückverstromung stattfindet, wenn der Stromverkaufspreis möglichst weit über den Kosten liegt. Sofern Regelleistung abgerufen wird, wird dafür in der jeweiligen Zeitscheibe die Leistung vorgehalten und der Abruf erbracht. Weiterhin werden die für die Komponenten definierten Restriktionen in jedem Zeitschritt eingehalten. So bewegen sich die Turbinen- und Verdichterleistungen sowie die Kavernenkapazität in jedem Zeitschritt innerhalb des zulässigen Wertebereichs.

Die Funktionsfähigkeit des im Rahmen des AP 3.1 entwickelten Druckluftspeichermodells zur Verwendung in Energiemarktsimulationen konnte somit nachgewiesen werden.

4 Einordnung des Projektfortschritts und Ausblick

Mit der Identifikation der aussichtsreichsten Standorte im Rahmen der Arbeiten am AP 1.1 und der Selektion von Kraftwerkskonzepten im Zuge der Bearbeitung von AP 2.1 sind die wesentlichen Entscheidungen über den Gegenstand der nun folgenden vertiefenden Untersuchungen gefallen. Beide Arbeitspakete sind abgeschlossen und die Arbeiten an den jeweils folgenden Arbeitspaketen wurden begonnen. Der Meilenstein "Auswahl" wurde erreicht.

Die Auswahl im Arbeitspaket AP1.1 bedeutet eine Reduktion der Standorte auf eine Anzahl von vier. Daraus ergibt sich, dass sich die im AP1.2 folgende Standortgrobplanung auf einer breit angelegte Methodik abstützen muss. Die Identifikation von Aufgaben der Standortplanung wird dadurch eher universell nutzbare als hoch spezifische Ergebnisse liefern, was im Sinne einer möglichst umfassenden Bewertung der Chancen der Druckluftspeichertechnologie am Standort Schleswig-Holstein positiv zu sehen ist.

Im Zuge des AP 2.2 wurden nach umfangreicher Bewertung vier Speicherkonzeptionen ausgewählt, die ebenfalls eine angemessene technologische Breite abbilden. Diese werden im anschließenden AP 2.2 hinsichtlich ihrer Prozesscharakteristiken untersucht, um das Betriebsverhalten im Energieversorgungssystem abbilden zu können. Dazu findet bereits jetzt eine intensive Kommunikation zwischen den Arbeitspaketen 2 und 3 statt. Die Anzahl der verschiedenen Konzeptionen wird von beiden



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Seiten als beherrschbar eingeschätzt, weil bei der Modellierung ein allgemeiner Ansatz gewählt wurde, der bereits alle Elemente der ausgewählten Konzepte abdecken kann. Die Untersuchung verschiedener Anlagentypen reduziert sich damit weitestgehend auf die Frage der Parametrisierung.

Entsprechend können auch die Arbeiten an AP 3.1 als abgeschlossen gelten. Weitere Arbeiten an dem hier entwickelten Modell sind Aufgabe der kontinuierlichen Modellpflege. Dazu gehört beispielsweise, dass das Modell in den nächsten Schritten hinsichtlich der Laufzeit optimiert werden soll. Durch die hohe Anzahl an Restriktionen und die zum Teil notwendige Einführung von Binärvariablen, beträgt die Laufzeit für einen Optimierungshorizont von einem Monat mit einem leistungsfähigen kommerziellen Solver etwa eine Stunde. Diese Laufzeit kann durch geeignete Modellierungstechniken reduziert werden.

Weiterhin soll das Postprocessing-Modul um einen auf den Optimierungsergebnissen aufbauenden Kostenrechner ergänzt werden. Dieser soll mit kraftwerksspezifischen Investitionskosten, betriebsgebundenen Kosten, verbrauchgebundenen Kosten und Finanzierungskosten parametriert werden können, um daraus wirtschaftlich relevante Größen zu berechnen. Diese können anschließend visualisiert oder exportiert werden, insbesondere um im Arbeitspaket 2 zur Verfügung zu stehen.

Da sich das übergeordnete Systemmodell *renpass* derzeit in einem Versionsumbruch befindet beziehungsweise in ein institutsübergreifendes Energiesystemmodell übergeht, wurde die entsprechende Schnittstelle bewusst offen und universell nutzbar gestaltet. Eine direkte Einbindung in das Modell erfolgt dabei absichtlich nicht, ein automatisierter Datenaustausch ist aber möglich. Die Entwicklung des neuen übergeordneten Modells schreitet termingemäß voran, sodass im Rahmen der folgenden Arbeiten voraussichtlich schon mit geringen Anpassungen eine Interaktion des Druckluftspeichermodells mit dem neuen Systemmodell realisiert werden kann.

Damit liegen alle Arbeiten im Zeitplan des Projekts. Aus heutiger Sicht erscheint die Einhaltung des Zeitplans ebenso wie die Erreichung der Ziele ungefährdet.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

Literaturverzeichnis

- [1] LLUR, "Untersuchungswürdige Horizonte zur Anlage von Salzkavernen zur Speicherung von Druckluft," 2014. [Online]. Available: http://www.umweltdaten.landsh.de/atlas/script/index.php. [Zugriff am 2015 Januar 19].
- [2] Schleswig-Holstein Netz AG, [Online]. Available: https://www.sh-netz.com/cps/rde/xchg/sh-netz/hs.xsl/136.htm.
- [3] P. L. Horvath, Interviewee, Dipl.-Geol.. [Interview]. 25 September 2014.
- [4] N. Hartmann, O. Vöhringer, C. Kruck und L. Eltrop, "Simulation and analysis of different adiabatic Compressed Air Energy Storage plant configurations," *Applied Energy*, pp. 541-548, 2012.
- [5] D. Wolf, "Methods for Design ans Application of Adiabatic Compressed Air Energy Storage Based on Dynamic Modeling," Verlag Karl Maria Laufen, Bochum, 2010.
- [6] C. Schlitzberger, R. Leithner und L. Nielsen, "Isobares GuD Druckluftspeicherkraftwerk mit Wärmespeicher," in 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2008, Dresden, 2008.
- [7] I. Tuschy, "Druckluftspeicherkraftwerke als Option zur Netzintegration erneuerbarer Energiequellen: Ein Vergleich der Konzepte," in 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, 2008.
- [8] S. Lemofouet-Gatsi, "Investigation ans Optimisation of Hybrid Electricity Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2006.
- [9] J. Kallrath, Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [10] L. Suhl und T. Mellouli, Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen, 2.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | | |
|-------------------------|------------|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | | |

Hrsg., Berlin: Springer-Verlag, 2009.

- [11] "Python," [Online]. Available: https://www.python.org/.
- [12] "About Pyomo," [Online]. Available: http://www.pyomo.org/about/.
- [13] "PostgreSQL The world's most advanced open source database," [Online]. Available: http://www.postgresql.org/.
- [14] "Transparency in Energy Markets," [Online]. Available: http://www.eextransparency.com/startseite.
- [15] "Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung," [Online]. Available: https://www.regelleistung.net/ip/action/index.
- [16] B. Stöver, C. Bergins, A. Alekseev und C. Stiller, "Flüssigenergiespeicher (LAES): ein flexibles System für großtechnische Anwendungen," in *Kraftwerkstechnik 2014*, 2014.
- [17] I. Cyphelly, P. Brückmann, W. Menhardt und A. Reller, "Einsatz von Druckluftspeichersystemen," Bundesamt für Energie, Les Brenets, 2004.
- [18] P. Konstantin, Praxis Energiewirtschaft Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, Springer, VDI, 2007.
- [19] B. Zakeri und S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [20] F.-E. Jordt, J. Jürgensen und J. M. Thomsen, "Untersuchung zum Einsatz eines Druckluftspeicherkraftwerkes für die Region Schleswig-Holstein," Flensburg, 2014.



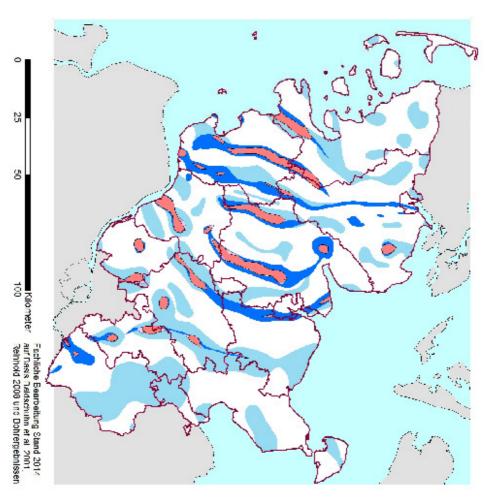
| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

Anhang



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

Anhang 1: AP 1.1



zur Anlage von Salzkavernen zur Speicherung von Druckluft Untersuchungswürdige Horizonte

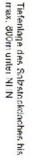


Lendesem für Landwirtschaft, Umwalt und ländliche Räume des Landes Schlesteig Holstein

Geologischer Dienst







Salzmauer oder Salzstock

Erläuterung

spelcherung Die Salzstöcke sind aufgrund ihrer strukturellen Aus Bohrergebnissen lässt sich ableiten, dass Kenntnisstand). von Kavernen bis 800 m unter NHN als maximal für die Aussolung (Top der Zechstein und Rotliegend-Ablagerungen) Wesentlichen die Tiefenlage des Salzstockdaches untersuchungswürdigen Horizonten zur Druckluft Salzmauern. dle maximale Ausdehnung der Salzstöcke und Flankenbereichen Überhänge auf. Dargestellt ist als Doppelsalinare aufgebaut und weisen in ihren gesteinen des Zechstein und des Rotliegend intern komplex - aus den Salzvertretbare Tiefe (derzeitiger Zur Salzkavernen Abgrenzung dlente Yon 3



wird aufgrund der zu erwartenden, unterschiedlich

NHN liegen kann. Eine Nutzung der Flankenbereiche der ausgewiesenen Bereiche tiefer als 800 m unter Hutgesteinen das solfähige Gestein auch innerhalb lokal aufgrund der Ausbildung von mächtigen

| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

| Kriterium | Gewich- tung | Standorte | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------|-------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Salzstruktur | 2,0 | 9 | 8 | 7 | 8 | 8 | 7 | 4 |
| Nutzungsrechte Salzstock | 1,5 | 7 | 7 | 10 | 8 | 10 | 10 | 5 |
| Netzanbindung | 2,0 | 8 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 | 3 |
| Erzeugungsanla- gen Strom | 2,5 | 9 | 9 | 7 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| Anbindung Gasnetz | 1,0 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Abtransport Sole | 3,0 | 8 | 9 | 8 | 4 | 10 | 2 | 10 |
| weitere Standortfaktoren | 1,0 | 8 | 8 | 4 | 4 | 4 | 7 | 4 |
| Summe Bewertung | | 102,0 | 103,0 | 91,5 | 73,0 | 87,5 | 71,5 | 64,0 |

| Kriterium | Gewich- tung | Standorte | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| | | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Salzstruktur | 2,0 | 6 | 5 | 5 | 5 | 8 | 5 | 5 |
| Nutzungsrechte Salzstock | 1,5 | 6 | 6 | 8 | 9 | 8 | 7 | 7 |
| Netzanbindung | 2,0 | 5 | 6 | 5 | 5 | 7 | 6 | 5 |
| Erzeugungsanla- gen Strom | 2,5 | 4 | 6 | 4 | 3 | 8 | 5 | 2 |
| Anbindung Gasnetz | 1,0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Abtransport Sole | 3,0 | 2 | 3 | 6 | 1 | 4 | 10 | 2 |
| weitere Standortfaktoren | 1,0 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 4 | 7 |
| Summe Bewertung | | 55,0 | 62,0 | 67,0 | 52,0 | 82,0 | 80,0 | 49,5 |



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|-------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

Anhang 2: AP 2.1

Isothermer Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Verdichtungs- als auch Expansionsprozesses ist im Wesentlichen von der Prozessführung abhängig. Ein isothermer Prozess stellt dabei maximalen Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Komponentenwirkungsgrade dar. In Abbildung 8 wird dieser Zusammenhang deutlich. Je mehr Stufen ein Prozess enthält und je kleiner das Druckverhältnis über die jeweilige Stufe dadurch ist, desto höhere Wirkungsgrade werden erreicht. Dies gilt unter der Voraussetzung der Zwischenkühlung auf ein konstantes Temperaturniveau, wodurch ein isothermer Prozessverlauf angenähert wird.

Für die erste Auswahl wurden jeweils 2-stufige Prozesse gewählt, da diese deutlich höhere Wirkungsgrade als 1-stufige Modelle erreichen und dabei die Komplexität mehrstufiger Modelle begrenzen. In praktischen Überlegungen sind 2 – 3-stufige Verdichtung sowie 1 – 2-stufige Expansion weitestgehend üblich [4] [5].

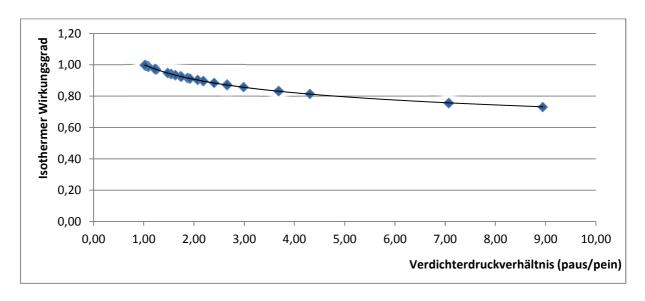


Abbildung 8: Abhängigkeit des isothermen Wirkungsgrades vom Verdichterdruckverhältnis



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |
|--------------------------------------|------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| <u>Titel</u> Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | |

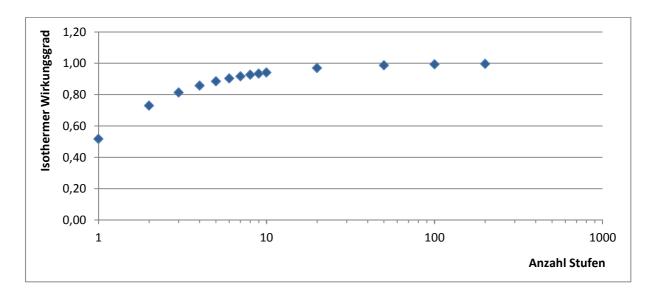


Abbildung 9: Abhängigkeit des isothermen Wirkungsgrades von der Anzahl der Verdichterstufen

Rahmenbedingungen und Annahmen der Berechnung

| Allgemeines | | | |
|---|-------------------------------|--|--|
| Arbeitsmedium | Trockene Luft als ideales Gas | | |
| Umgebungsdruck | 101.325 Pa | | |
| Umgebungstemperatur | 288,15 K | | |
| Bezugstemperatur Enthalpie | 273,15 K | | |
| Bezugstemperatur Entropie | 298,15 K | | |
| Bezugsdruck Entropie | 100.000 Pa | | |
| Verdichter | | | |
| Wirkungsgrad des Verdichters | 87,5 % | | |
| Maximaltemperatur Verdichter | 800 K | | |
| Massenstrom Ladung | 100 kg/s | | |
| Turbine | | | |
| Wirkungsgrad der Turbine | 92,5 % | | |
| Maximaltemperatur Hochdruckturbine | 873,15 K | | |
| Maximaltemperatur Niederdruckturbine | 1473,15 K | | |
| Massenstrom Entladung 100 | | | |
| Kaverne | | | |
| Kavernendruck | 7,5 MPa | | |
| Druckverlust Kaverne | vernachlässigt | | |
| Maximaltemperatur Kaverne | 323,15 K | | |
| Sonstige Einbauten | | | |
| Druckverluste in Einbauten und Brennkammern | 3 % | | |
| Minimale Kühltemperatur | 293,15 K | | |
| Rekuperator Grädigkeit | 5 K | | |
| Wirkungsgrad Thermischer Speicher | 98 % | | |



| Bericht Nr. TES-2015-EKSH-02 | Revision - | Autoren Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | <u>Datum</u> 28.02.2015 | | | |
|--------------------------------------|--|---|----------------------------|--|--|--|
| <u>Titel</u> Sachstandsbericht DLSK- | Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | |

| Wirkungsgrad Elektrische Maschinen | 98 % |
|--|-----------------------|
| Modellierung der Verbrennung | Wärmezufuhr von außen |
| Eigenbedarf der Anlage | vernachlässigt |
| Dampfteil | |
| Wirkungsgrad Dampfturbine | 85 % |
| Maximale Dampftemperatur Dampfturbine | 873,15 K |
| Dampfdruck | 8 MPa |
| Pinch Point | 20 K |
| Kesseldruckverluste | 16,7 % |
| Kondensatordruck | 10.000 Pa |
| Wirkungsgrad Speisewasserpumpe | 75 % |
| Hydropneumatisches Konzept | |
| Volumen Behälter | 200.000 m³ |
| Volumenverhältnis Behälter/Volumen Gas | 0,7 |
| Ausgangsdruck Gas | 10 MPa |
| Wirkungsgrad Hydraulikpumpe | 95 % |
| Wirkungsgrad Hydraulikmotor | 95 % |
| Wirkungsgrad Hydraulischer Kreislauf | 95 % |
| Be- / Entladezeit | 5 h |



| Bericht Nr. | Revision | Revision Autoren | | | |
|--|----------|--|------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | 2015 | | | |

Schaltbilder

Erklärung: Temperatur in K Druck in MPa Leistung in MW

Enthalpie in kJ/kg Entropie in kJ/kgK

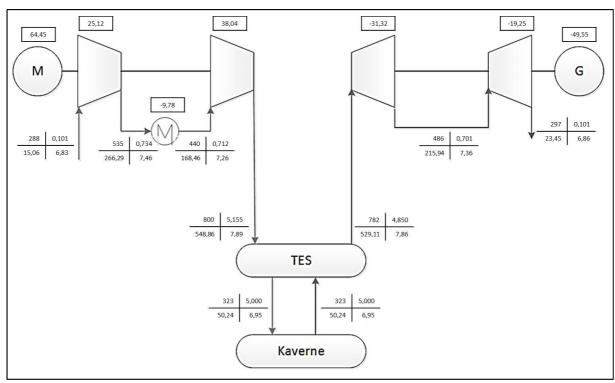


Abbildung 10: Schaltbild Adiabates DLSK mit thermischem Speicher A1a



| Bericht Nr. | t Nr. Revision Autoren | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--|------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | | | |

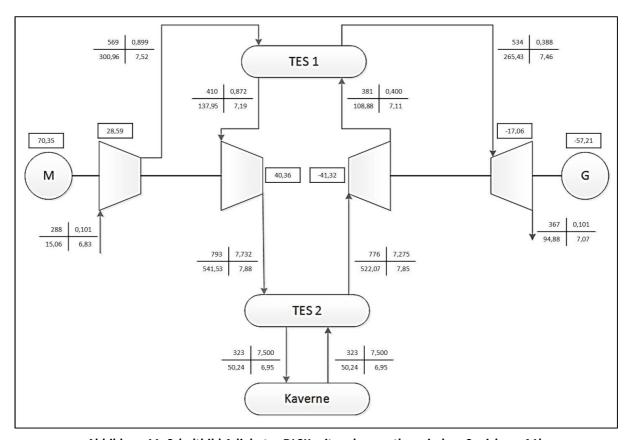


Abbildung 11: Schaltbild Adiabates DLSK mit mehreren thermischen Speichern A1b

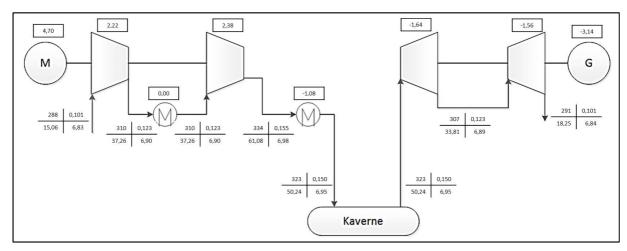


Abbildung 12: Schaltbild Adiabates DLSK ohne thermischen Speicher A2



| Bericht Nr. | t Nr. Revision Autoren | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--|------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | | | |

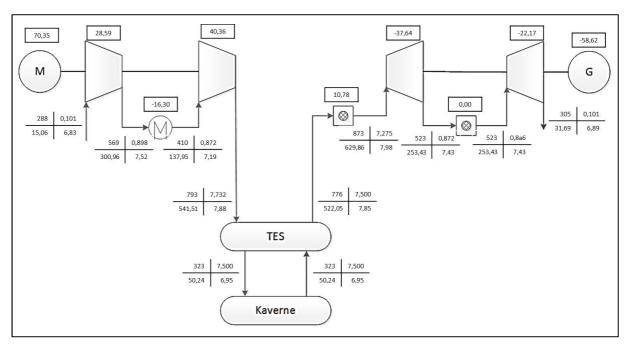


Abbildung 13: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher D1a

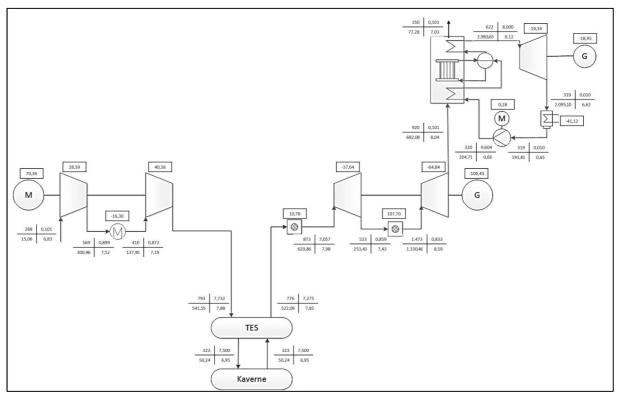


Abbildung 14: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher und Dampfteil D1b



| Bericht Nr. | t Nr. Revision Autoren | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--|------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK- | SH Februar | 2015 | | | | |

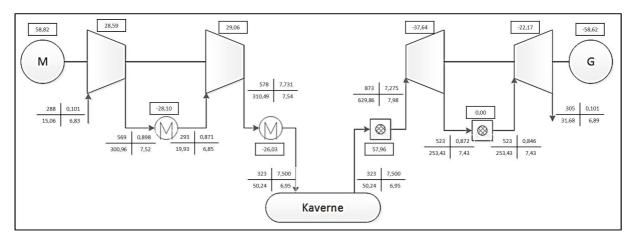


Abbildung 15: Schaltbild Diabates DLSK D2a

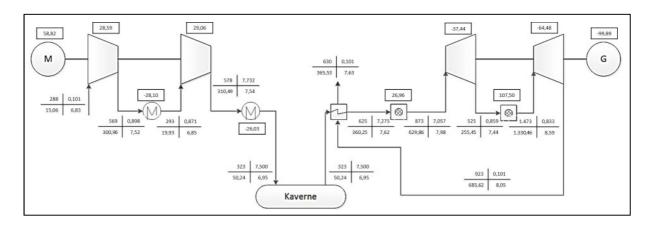


Abbildung 16: Schaltbild Diabates DLSK mit Rekuperator D2b



| Bericht Nr. | r. <u>Revision</u> <u>Autoren</u> | | | | | |
|--|-----------------------------------|--|------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | | |

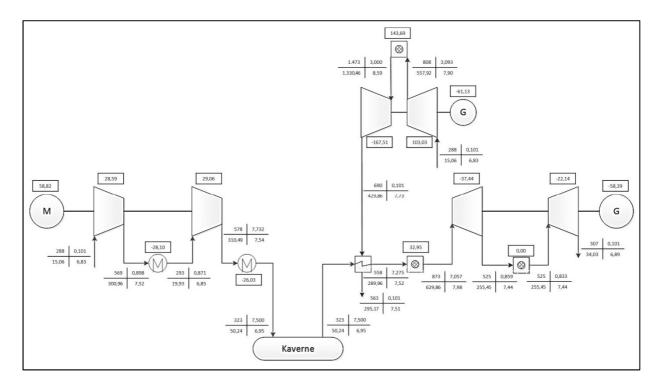


Abbildung 17: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage D2c

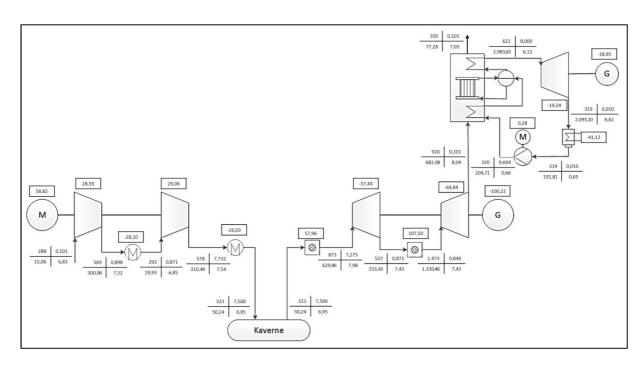


Abbildung 18: Schaltbild Diabates DLSK mit Dampfteil D2d



| Bericht Nr. | Revision | <u>Datum</u> | | | | |
|--|----------|--|------------|--|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | |
| <u>Titel</u> | | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | | |

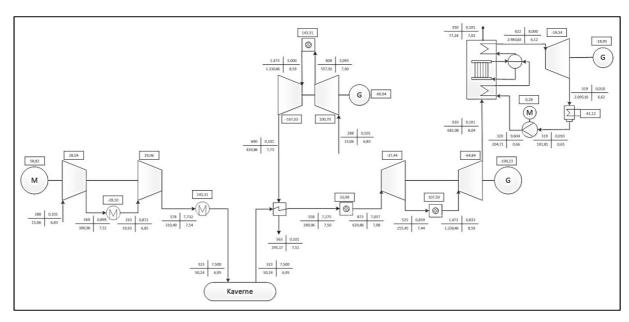


Abbildung 19: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage und Dampfteil D2e

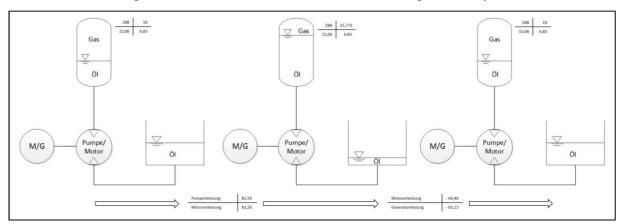


Abbildung 20: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK isotherm HP1a

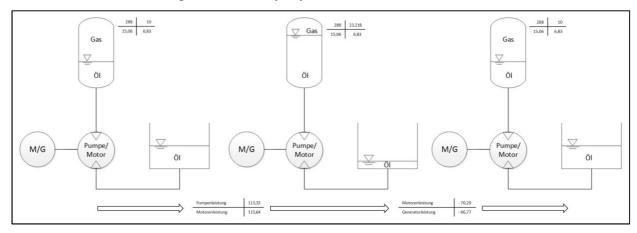


Abbildung 21: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK adiabat + isochor HP1b



| Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | | | | | |
|--|------------|--|--|--|--|--|
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | | |
| 01! | 5 | | | | | |

Erklärung zur Konzeptbewertung

| | 0 | Geologische Erfordernisse | | Infrastrukturelle Erfordernisse | | | | |
|------|---|--|---|--|--|--|-------|--|
| | Kaverne Solenendelbecken Erforderlichkeit ^a | | 2 | | Anschluss an: | | | |
| | Solependelbecken | Erforderlichkeit ^a | Energiedichte | Erdgas | Fernwärme | Industrieabwärme | | |
| | 10 % | 25 % | 25 % | 20 % | 10 % | 10 % | 100 % | |
| A1a | 10 | 0 | 5 | 7 ^c | 10 | 10 | 5,65 | |
| A1b | 10 | 0 | 6 | 7 ^c | 10 | 10 | 5,90 | |
| A2 | 10 | 0 | 0 | 7 ^c | 10 | 10 | 4,40 | |
| D1a | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 | |
| D1b | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 | |
| D2a | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 | |
| D2b | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 | |
| D2c | 10 | 0 | 6 | 0 | 10 | 10 | 4,50 | |
| D2d | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 | |
| D2e | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5,50 | |
| HP1a | 10 | 2 ^b | 1 | 10 | 10 | 10 | 5,75 | |
| HP1b | 10 | 2 ^b | 0 | 10 | 10 | 10 | 5,50 | |
| | 0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich | 0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich | In kWh/m ³ 0 := <2 1 := 2 < n < 4 2 := 4 < n < 6 3 := 6 < n < 8 4 := 8 < n < 10 5 := 10 < n < 12 6 := 12 < n < 14 7 := 14 < n < 16 8 := 16 < n < 18 9 := 18 < n < 20 10 := >20 | 0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich | 0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich | 0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich | | |

a) Kleinere DLSK können auch in Behältern realisiert werden. Hier liegt der Fokus auf Großanwendungen

c) Gasanschluss oder Brennstoffvorratsbehälter wird zum Durchfahren schwieriger Betriebszustände benötigt



b) Keine Kaverne benötigt, aber ein Behälter mit hoher Druckfestigkeit

| Titel | | | |
|------------------|-----------------|--|--------------|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 |
| Bericht Nr. | <u>Revision</u> | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> |

Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015

| | Allg. Mach- | n- Komponenten- verfüg- Systementwicklungs- | | | Betrieb als Kraft- | Brennstoff- | Kapazitäts- | | |
|------|--------------------|---|--------------------------|-------------------------|--------------------|----------------|-------------------------|---------------------|-------|
| | barkeit | barkeit | status | Anlaufzeit ^a | werk ^b | einsatz | begrenzung ^a | Kosten ^c | |
| | 20% | 20% | 20% | 5% | 10% | 10% | 5% | 10% | 100 % |
| A1a | 6 | 5 | 6 | 3 | 0 | 10 | 8 | 4 | 5,35 |
| A1b | 6 | 5 | 5 | 3 | 0 | 10 | 8 | 4 | 5,15 |
| A2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 0 | 10 | 6 | 6 | 3,45 |
| D1a | 6 | 5 | 4 | 3 | 0 | 9 | 6 | 5 | 4,85 |
| D1b | 6 | 5 | 4 | 3 | 0 | 4 | 6 | 6 | 4,45 |
| D2a | 10 | 10 | 10 | 3 | 10 | 7 | 6 | 7 | 8,85 |
| D2b | 10 | 10 | 10 | 3 | 10 | 3 | 6 | 8 | 8,55 |
| D2c | 10 | 10 | 2 | 3 | 10 | 1 | 6 | 7 | 6,65 |
| D2d | 10 | 7 | 4 | 3 | 10 | 1 | 6 | 7 | 6,45 |
| D2e | 10 | 7 | 0 | 3 | 10 | 0 | 6 | 7 | 5,55 |
| HP1a | 10 | 10 | 6 | 6 | 0 | 10 | 10 | 0 | 7,00 |
| HP1b | 10 | 10 | 6 | 6 | 0 | 10 | 10 | 0 | 7,00 |
| | 0 := Nicht mach- | 0 := Komponenten | 0 := Keine aktive | 0 := >15 m | 0 := Nicht möglich | 0 := > 4,5 | 10 := 5 kW - 1 GW | 0 := >1.000 | |
| | bar | nicht verfügbar | Forschung | 3 := 5 m - 15 m | 10 := Möglich | 1 := 4,0 - 4,5 | 8 := 1 MW - 1 GW | 1 := 900 - 1.000 | |
| | 3 := Eingeschränkt | 5 := Komponenten mit | 2 := Grundlagen- | 6 := 30 s – 5 s | | 2 := 3,5 - 4,0 | 6 := 5 MW - 1 GW | 2 := 800 - 900 | |
| | 6 := Theoretisch | Forschungsaufwand | forschung | 10 := < 30 s | | 3 := 3,0 - 3,5 | | 3 := 700 - 800 | |
| | gegeben | verfügbar | 5 := Umfassendere | | | 4 := 2,5 - 3,0 | | 4 := 600 - 700 | |
| | 10 := Gegeben | 10 := Komponenten | Forschung | | | 5 := 2,0 - 2,5 | | 5 := 500 - 600 | |
| | | verfügbar | 7 := Demonstrations- | | | 6 := 1,5 - 2,0 | | 6 := 400 - 500 | |
| | | | anlage realisiert | | | 7 := 1,0 - 1,5 | | 7 := 300 - 400 | |
| | | | 10 := Bereits realisiert | | | 8 := 0,5 - 1,0 | | 8 := 200 - 300 | |
| | | | | | | 9 := 0 - 0,5 | | 9 := 100 - 200 | |
| | | | | | | 10 := 0 | | 10 := < 100 | |

a) Quelle: [5] b) Quelle: [16]

c) Die Investitionskosten sind bezogen auf den gesamten elektrischen Output. Betriebskosten wurden vernachlässigt, da angenommen wird, dass Brennstoffkosten den größten Anteil verursachen und der Brennstoffmassenstrom als separater Faktor berücksichtigt ist. Kostenberechnung umfasst Kraftwerkskomponenten. Kaverne ist nicht miteinbezogen, da die Größendifferenzen im Faktor Energiedichte miteinbezogen werden. Quellen: [17] [5] [18] [19] [20]



| Bericht Nr. | Revision | Autoren | | <u>Datum</u> | | |
|--|----------|--|--|--------------|--|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | | 28.02.2015 | | |
| <u>Titel</u> | | | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | | | |

| | Wirkungsgra | d nach energetischer Restwertm | ethode; η _{ref} = | Exergetischer Wirkungsgrad ^b | |
|------|-----------------|--------------------------------|----------------------------|---|-------|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | | |
| | 10% | 40% | 10% | 40% | 100 % |
| A1a | 8 | 8 | 8 | 9 | 8,40 |
| A1b | 9 | 9 | 9 | 10 | 9,40 |
| A2 | 6 | 6 | 6 | 9 | 7,20 |
| D1a | 8 | 8 | 7 | 8 | 7,90 |
| D1b | 10 | 9 | 6 | 4 | 6,80 |
| D2a | 4 | 2 | 1 | 3 | 2,50 |
| D2b | 8 | 3 | 0 | 3 | 3,20 |
| D2c | 8 | 2 | 0 | 3 | 2,80 |
| D2d | 9 | 4 | 0 | 4 | 4,10 |
| D2e | 10 | 4 | 0 | 0 | 2,60 |
| HP1a | 8 | 8 | 8 | 8 | 8,00 |
| HP1b | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,00 |
| | 0 := <0,3 | 0 := <0,3 | 0 := <0,3 | 0 := <0,3 | |
| | 1 := 0,3 - 0,4 | 1 := 0,3 - 0,4 | 1 := 0,3 - 0,4 | 1 := 0,3 - 0,4 | |
| | 2 := 0,4 - 0,5 | 2 := 0,4 - 0,5 | 2 := 0,4 - 0,5 | 2 := 0,4 - 0,5 | |
| | 3 := 0,5 - 0,55 | 3 := 0,5 - 0,55 | 3 := 0,5 - 0,55 | 3 := 0,5 - 0,55 | |
| | 4 := 0,55 - 0,6 | 4 := 0,55 - 0,6 | 4 := 0,55 - 0,6 | 4 := 0,55 - 0,6 | |
| | 5 := 0,6 - 0,65 | 5 := 0,6 - 0,65 | 5 := 0,6 - 0,65 | 5 := 0,6 - 0,65 | |
| | 6 := 0,65 - 0,7 | 6 := 0,65 - 0,7 | 6 := 0,65 - 0,7 | 6 := 0,65 - 0,7 | |
| | 7 := 0,7 - 0,75 | 7 := 0,7 - 0,75 | 7 := 0,7 - 0,75 | 7 := 0,7 - 0,75 | |
| | 8 := 0,75 - 0,8 | 8 := 0,75 - 0,8 | 8 := 0,75 - 0,8 | 8 := 0,75 - 0,8 | |
| | 9 := 0,8 - 0,9 | 9 := 0,8 - 0,9 | 9 := 0,8 - 0,9 | 9 := 0,8 - 0,9 | |
| | 10 := > 0,9 | 10 := > 0,9 | 10 := > 0,9 | 10 := > 0,9 | |

a)
$$\eta = \frac{\sum |P_{ab}| - \eta_{ref} * \sum Q_{zu}}{\sum P_{zu}}$$
 Mit P_{ab} = abgeführte elektrische Leistung, Q_{zu} = zugeführte Wärmeleistung, P_{zu} = zugeführte elektrische Leitung, $\eta_{ref.}$ = Referenzwirkungsgrad [7]

b)
$$\eta = \frac{\sum |Ex_{P,ab}|}{\sum Ex_{P,ab} + \sum Ex_{Q,ab}}$$
 Mit $Ex_{P,ab}$ = abgeführter Exergiestrom (Elektrisch), $Ex_{Q,zu}$ = zugeführte Exergiestrom (Wärme), $Ex_{P,zu}$ = zugeführter Exergiestrom (Elektrisch)



| Bericht Nr. TES-2015-EKSH-02 | Revision - | Autoren Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | <u>Datum</u> 28.02.2015 | |
|--|---------------|---|----------------------------|--|
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

Anhang 3: AP 3.1

1 Mathematische Modellbeschreibung

Auf technische Feinheiten wie Lastbereiche der Komponenten und Wirkungsgrade wurde zunächst verzichtet. So liegt der Fokus auf der Marktanbindung.

1.1 Zielfunktion

Minimiere die Summe aus Brennstoffkosten, abzüglich der Erlöse durch vorgehaltene Leistung und erbrachte Arbeit am Markt für negative und positive Minutenreserve und den Erlösen am Day-Ahead- und Intraday-Markt.

$$min \sum_{t} (C_{gas}Q_{gas}(t) + C_{price_da}(t)P_{comp_da}(t) + C_{price_id}(t)P_{comp_id}(t) - C_{price_da}(t)P_{turb_da}(t) - C_{price_id}(t)P_{turb_id}(t) - C_{price_tr_neg_capacity}(t)P_{comp_tr_capacity}(t) - C_{price_tr_neg_work}(t)P_{comp_tr_work}(t) - C_{price_tr_neg_work}(t)P_{turb_tr_capacity}(t) - C_{price_tr_pos_capacity}(t)P_{turb_tr_capacity}(t) - C_{price_tr_pos_work}(t)P_{turb_tr_capacity}(t) - C_{price_tr_pos_work}(t)P_{turb_work}(t))$$

$$(1.1)$$

1.2 Nebenbedingungen

1.2.1 Turbinenleistung

Der Turbinenleistung darf sich nur zwischen Null und der Obergrenze P_{turb_max} bewegen. Dies wird innerhalb der Optimierung über Boundaries geregelt.

$$0 \le P_{turb}(t) \le P_{turb_max} \, \forall t$$
 (1.2)

1.2.2 Turbinenleistung: Aufteilung auf Märkte

Die zur Verfügung stehende Turbinenleistung teilt sich auf die jeweiligen Märkte auf.

$$P_{turb}(t) = P_{turb_da}(t) + P_{turb_id}(t) + P_{turb_tr_work}(t) \,\forall t$$
(1.3)



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

1.2.3 Verdichterleistung

Der Verdichterleistung darf sich nur zwischen Null und der Obergrenze P_{comp_max} bewegen. Dies wird innerhalb der Optimierung über Boundaries geregelt.

$$0 \le P_{comp}(t) \le P_{comp_max} \ \forall t$$
 (1.4)

1.2.4 Verdichterleistung: Aufteilung auf Märkte

Die zur Verfügung stehende Verdichterleistung teilt sich auf die jeweiligen Märkte auf.

$$P_{comp}(t) = P_{comp \ da}(t) + P_{comp \ id}(t) + P_{comp \ tr \ work}(t) \forall t \qquad (1.5)$$

1.2.5 Zufeuerung Turbine

Um 1 kWh elektrischem Output zu erzeugen werden 1,6 kWh Gas benötigt.

$$\dot{Q}_{gas}(t) - 1.6 \cdot P_{turb}(t) = 0 \,\forall t$$
 (1.6)

1.2.6 Speicherbilanz

Die Nebenbedingung der Speicherbilanz legt fest, dass die gespeicherte Energiemenge im Zeitschritt t gleich der Energiemenge des vorausgegangenen Zeitschritts zuzüglich aktuell eingespeicherten und abzüglich der ausgespeicherten Energie ist.

$$W_{st}(t) - W_{st}(t-1) - (P_{comp}(t) - P_{turb}(t)) = 0 \ \forall t$$
 (1.7)

1.2.7 Speicherkapazität

Der Speicherfüllstand darf sich nur zwischen Null und der Obergrenze W_{max} bewegen. Dies wird innerhalb der Optimierung über Boundaries geregelt.

$$0 \le W_{st}(t) \le W_{max} \,\forall t \tag{1.8}$$

1.2.8 Day-Ahead-Markt: Bedingung für Zeitscheiben von 1 h für die Turbine

Wenn Turbinenleistung P_{turb_da} vermarktet wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von einer Stunde erfolgen.

$$P_{turb_da}(t) = P_{turb_da}(t+1) = P_{turb_da}(t+2) = P_{turb_da}(t+3) \ \forall t \in [0, 4, 8, ...]$$
 (1.9)



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| Titel Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

1.2.9 Day-Ahead-Markt: Bedingung für Zeitscheiben von 1 h für den Verdichter

Wenn Verdichterleistung P_{comp_da} vermarktet wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von einer Stunde erfolgen.

$$P_{comp_da}(t) = P_{comp_da}(t+1) = P_{comp_da}(t+2) = P_{comp_da}(t+3) \ \forall t \in [0,4,8,...]$$
 (1.10)

1.2.10 Intraday-Markt: Bedingung für Zeitscheiben von 1 h für die Turbine

Wenn Turbinenleistung P_{turb_id} vermarktet wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von einer Stunde erfolgen.

$$P_{turb_id}(t) = P_{turb_id}(t+1) =$$

 $P_{turb_id}(t+2) = P_{turb_id}(t+3) \ \forall t \in [0,4,8,...]$ (1.11)

1.2.11 Intraday-Markt: Bedingung für Zeitscheiben von 1 h für den Verdichter

Wenn Verdichterleistung P_{comp_id} vermarktet wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von einer Stunde erfolgen.

$$P_{comp_id}(t) = P_{comp_id}(t+1) =$$

 $P_{comp_id}(t+2) = P_{comp_id}(t+3) \ \forall t \in [0,4,8,...]$ (1.12)

1.2.12 Positive Minutenreserve: Setzen der Turbinenleistung auf die Abrufhöhe

Die aktivierte Turbinenleistung am Minutenreservemarkt muss der abgerufenen positiven Minutenreserveleistung $P_{tr_pos_act}$ entsprechen, sofern sie über die Binärvariable $OP_{tr_pos}(t)$ aktiviert ist.

$$P_{turb_tr_work}(t) = P_{tr_pos_act}(t)OP_{tr_pos}(t) \ \forall t \tag{1.13}$$

1.2.13 Positive Minutenreserve: Begrenzung der aktivierten Turbinenleistung auf die vorgehaltene Leistung

Die aktivierte Turbinenleistung darf höchstens der vorgehaltenen positiven Minutenreserveleistung $P_{turb_tr_capacity}$ entsprechen.

$$P_{turb\ tr\ work}(t) \le P_{turb\ tr\ capacity}(t) \ \forall t$$
 (1.14)



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

Eine Aktivierung darf jedoch nur erfolgen wenn Leistung vorgehalten wird. Dies wird über die Multiplikation mit der Binärvariable $OP_{tr_pos}(t)$ sichergestellt. Da dies zu einem quadratischen Ausdruck führt, muss dieser über 4 Zusätzliche Gleichungen in eine lineare Form überführt werden.

$$P_{turb\ tr\ work}(t) \le P_{turb\ tr\ capacity}(t)OP_{tr\ pos}(t)\ \forall t$$
 (1.15)

1.2.14 Positive Minutenreserve: Bedingung für Zeitscheiben von 4 h für die Turbine

Wenn Turbinenleistung $P_{turb_tr_capacity}$ vorgehalten wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von insgesamt 4 Stunden erfolgen.

$$\begin{split} P_{turb_tr_capacity}(t) &= P_{turb_tr_capacity}(t+1) = \dots = \\ P_{turb_tr_capacity}(t+14) &= P_{turb_tr_capacity}(t+15) \ \forall t \in [0, 16, 32, \dots] \end{split} \tag{1.16}$$

1.2.15 Negative Minutenreserve: Setzen der Verdichterleistung auf die Abrufhöhe

Die aktivierte Verdichterleistung am Minutenreservemarkt muss der abgerufenen negativen Minutenreserveleistung $P_{tr_neg_act}$ entsprechen, sofern sie über die Binärvariable $OP_{tr_neg}(t)$ aktiviert ist.

$$P_{comp tr work}(t) = P_{tr neg act}(t)OP_{tr neg}(t) \forall t$$
(1.17)

1.2.16 Negative Minutenreserve: Begrenzung der aktivierten Verdichterleistung auf die vorgehaltene Leistung

Die aktivierte Verdichterleistung darf höchstens der vorgehaltenen negativen Minutenreserveleistung $P_{turb_tr_capacity}$ entsprechen.

$$P_{comp_tr_work}(t) \le P_{comp_tr_capacity}(t) \ \forall t \eqno(1.18)$$

Eine Aktivierung darf jedoch nur erfolgen wenn Leistung vorgehalten wird. Dies wird über die Multiplikation mit der Binärvariable $OP_{tr_neg}(t)$ sichergestellt. Da dies zu einem quadratischen Ausdruck führt, muss dieser über 4 Zusätzliche Gleichungen in eine lineare Form überführt werden.

$$P_{turb_tr_work}(t) \leq P_{turb_tr_capacity}(t)OP_{tr_neg}(t) \; \forall t \tag{1.19} \label{eq:1.19}$$

1.2.17 Negative Minutenreserve: Bedingung für Zeitscheiben von 4 h für den Verdichter

Wenn Verdichterleistung $P_{comp_tr_capacity}$ vorgehalten wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von insgesamt 4 Stunden erfolgen.



| Bericht Nr. | Revision | <u>Autoren</u> | <u>Datum</u> | |
|--|----------|--|--------------|--|
| TES-2015-EKSH-02 | - | Boysen, C.; Großer, H.; Kaldemeyer, C.; Tuschy, I. | 28.02.2015 | |
| <u>Titel</u> | | | | |
| Sachstandsbericht DLSK-SH Februar 2015 | | | | |

$$\begin{split} P_{comp_tr_capacity}(t) &= P_{comp_tr_capacity}(t+1) = \ldots = \\ P_{comp_tr_capacity}(t+14) &= P_{comp_tr_capacity}(t+15) \; \forall t \; \in [0, 16, 32, \ldots] \end{split} \tag{1.20}$$

