

## DRUCKLUFTSPEICHERKRAFTWERK SCHLESWIG-HOLSTEIN

Untersuchung zur Eignung Schleswig-Holsteins  
als Modellstandort für die Energiewende

April 2017

**Autoren:**

Cynthia Boysen

Heike Grotlüschen (GEO mbH, Langenhorn)

Hauke Großer (GEO mbH, Langenhorn)

Cord Kaldemeyer

Ilja Tuschy



**Zentrum für nachhaltige Energiesysteme Hochschule / Europa-Universität Flensburg**

Kanzleistraße 91-93

24943 Flensburg

Internet: [www.znes-flensburg.de](http://www.znes-flensburg.de)

**In Kooperation mit**



**Gefördert durch die:**



Gesellschaft für Energie und  
Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH



**Flensburg, April 2017**

Forschungsergebnisse 5

ISSN: 2196-7164

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Zusammenfassung

Druckluftspeicherkraftwerke sind eine von mehreren Möglichkeiten, die Integration erneuerbarer Energien in die elektrische Energieversorgung zu verbessern. Für eine Region wie Schleswig-Holstein ist diese Aufgabe von besonderer Dringlichkeit, weil eine ineffiziente Ausnutzung der lokalen erneuerbaren Ressourcen die mögliche Wertschöpfung im Land einschränkt und die hierzulande mit hohem politischem Nachdruck verfolgte Energiewende behindert. Inwiefern ein Druckluftspeicherkraftwerk jedoch praktisch in Schleswig-Holstein realisierbar ist, hängt von verschiedenen geographischen, technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

Das Ziel des durch das HWT-Programm der EKSH geförderten Projektes DLSK-SH ist es, die Perspektiven eines Druckluftspeicherkraftwerkes in Schleswig-Holstein umfassend zu evaluieren. In Kooperation mit der GEO mbH werden dazu die Aspekte der Standorteignung, der Technologiebewertung und der Wirtschaftlichkeit untersucht. Methodisch erfolgt dies aus Sicht potentieller Akteure sowie unter Berücksichtigung größtmöglicher Transparenz und Nachvollziehbarkeit.

Schleswig-Holstein weist in Anlehnung an geologische Salzformationen 14 untersuchungswürdige Standorte auf. Nach deren multikriterieller, qualitativer Bewertung ergeben sich die vier Standorte Belmhusen-Kuden-Süderhastedt, Marne-Heide-Süderstapel, Oldenswort Nord und Osterby mit bester Eignung zur Druckluftspeicherung. Die weitere Standortplanung identifiziert die wichtigsten Planungsschritte, Fristen und Meilensteine bezüglich bergbaurechtlicher Aspekte, Netzanschlussverfahren sowie Kavernenherstellung und fasst diese in logischer Abfolge mitsamt Interdependenzen in einem für Schleswig-Holstein gültigen Fahrplan zusammen.

Aus einer Vielzahl möglicher technischer Konzeptionen zur Druckluftspeicherung erweisen sich die beiden diabaten Konzepte mit Rekuperator bzw. thermischem Speicher als aussichtsreichste Konfigurationen. Deren Bewertung auf Basis des simulierten optimalen Kraftwerkseinsatzes am Spot- und tertiären Regelleistungsmarkt zeigt für die Jahre 2012 – 2014 eine betriebswirtschaftliche Machbarkeit auf. Entscheidend ist diesbezüglich die Ausrichtung des Einsatzes am Regelleistungsmarkt mit einem nachrangigen Betrieb am Spotmarkt.

Die wirtschaftlich optimierten Konzeptdimensionierungen weisen darauf hin, dass die praktische Entscheidung für ein technisches Konzept am Anwendungsfall ausgerichtet werden sollte. Werden eher kurzzeitige Speicherlösungen (1 h) benötigt, rentiert sich die Einbindung eines thermischen Speichers im diabaten Speicherkonzept. Das diabate Konzept mit Rekuperator profitiert hingegen bei mittleren Speicherkapazitäten von 9 – 13 h. Gemeinsam ist ihnen im optimierten Fall eine doppelt so hohe Einspeicherleistung im Verhältnis zur Ausspeicherleistung.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Die zukünftige Perspektive von Druckluftspeicherkraftwerken in Schleswig-Holstein ist stark abhängig von den strukturellen Veränderungen innerhalb des Energiesystems. Repräsentative Szenarien für die Jahre 2025 und 2035 zeigen durchschnittlich steigende Preise und Spreads am Spotmarkt, wohingegen Einsatzpotentiale am tertiären Regelleistungsmarkt schwinden. Unter diesen Voraussetzungen führt der Betrieb der simulierten Druckluftspeicherkraftwerke zu jährlichen Verlusten. Ohne Vergütung zusätzlicher Systemdienstleistungen, wie z.B. der Regelleistungsbereitstellung, ist also aus Sicht eines Betreibers kein wirtschaftlicher Betrieb zu erwarten. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass Druckluftspeicherkraftwerke für die Integration erneuerbarer Energien förderlich sind.

Zusammenfassend können sowohl bezüglich der Standorteignung Schleswig-Holsteins als auch der technischen Umsetzbarkeit hohe Potentiale für Druckluftspeicherkraftwerke aufgezeigt werden. Die aktuellen Entwicklungen innerhalb des Energiesystems zeigen jedoch, dass die betriebswirtschaftliche Machbarkeit perspektivisch eine Herausforderung darstellt. Inwiefern die positive Wirkung auf die Integration erneuerbarer Energien zukünftig gefördert beziehungsweise diese Dienstleistung an Märkten honoriert wird, ist ausschlaggebend für die Technologieperspektive von Druckluftspeicherkraftwerken in Schleswig-Holstein. Nachfolgende Studien sollten daher untersuchen, welche Mechanismen die Divergenz zwischen ökonomischer und ökologischer Bewertung aufheben können. Dazu gehören Ansätze wie Speicherboni oder die Förderung der Kapazitätsvorhaltung am Regelenergiemarkt. Weil davon auszugehen ist, dass sich andere Speichertechnologien im gleichen Spannungsfeld bewegen, ist auch die Positionierung der Druckluftspeicherkraftwerke im Vergleich zu anderen Flexibilitäts- und Besicherungsoptionen zu untersuchen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Inhalt .....	5
1 Einleitung.....	7
2 Methodik .....	8
2.1 Zielsetzung.....	8
2.2 Vorgehen.....	8
2.3 Berichtsstruktur .....	13
3 Standort.....	14
3.1 Potentielle Standorte.....	14
3.2 Methodik.....	15
3.3 Bewertungsgrundlage und Rahmenbedingungen .....	17
3.4 Ergebnisse.....	26
4 Technologisches Spektrum.....	33
4.1 Betrachtete Konzepte und Klassifizierung.....	33
4.2 Methodik zur Konzeptvorauswahl.....	37
4.3 Ergebnisse der Konzeptvorauswahl.....	40
5 Betriebsmodell für Druckluftspeicherkraftwerke.....	44
5.1 Methodik.....	44
5.2 Modellierung.....	45
5.3 Modellvalidierung.....	53
6 Abbildung des Versorgungssystems .....	55
6.1 Methodik.....	55
6.2 Modellierung mit renpassGIS .....	57
6.3 Datengrundlage .....	60
6.4 Modellvalidierung.....	65
6.5 Resultierende Rahmendaten .....	68
7 Simulationsbasierte Technologiebewertung.....	71
7.1 Methodik.....	71
7.2 Konzeptvergleich .....	75
7.3 Kraftwerksdimensionierung.....	80

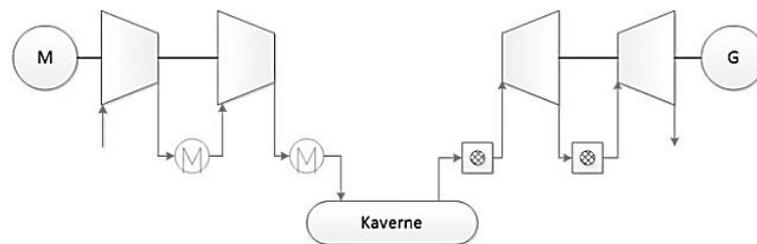
<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

7.4	Bedeutung der Märkte .....	84
7.5	Entwicklung des Energiesystems .....	85
7.6	Systemischer Nutzen .....	88
8	Diskussion der Ergebnisse .....	91
8.1	Schlussfolgerungen .....	91
8.2	Methodische Kritik.....	95
8.3	Ausblick.....	96
	Literaturverzeichnis.....	97
	Abbildungsverzeichnis.....	106
	Tabellenverzeichnis.....	109
	Abkürzungsverzeichnis.....	110
	Anhang .....	113
A.	Übersicht und Bewertung potentieller Standorte.....	113
B.	Zeitplan der Standortplanung.....	115
C.	Grundlagen zur Konzeptvorauswahl.....	119
D.	Thermodynamische und kraftwerkstechnische Grundlagen.....	130
E.	Beispielhafte Darstellung der Kraftwerkscharakteristiken.....	134
F.	Technische und wirtschaftliche Parametrierung der Kraftwerkskonzepte .....	138
H.	Detaillierte Simulationsergebnisse für D_Rek und D_TES 2014, 2025 und 2035.....	146
I.	Mathematische Beschreibung des Betriebsmodells .....	155
J.	Modellierung des Versorgungssystems mit renpassGIS .....	167

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 1 Einleitung

Druckluftspeicherkraftwerke (DLSK) gehören zu den Technologien, die mit großer Kapazität und Leistung und durchaus auch über längere Zeiträume Energie speichern können. Ihre mögliche Rolle in Systemen zur elektrischen Energieversorgung ähnelt der von Pumpspeicherkraftwerken.



**Abbildung 1: Aufbau eines Druckluftspeicherkraftwerks**

Das Grundprinzip der Druckluftspeicherkraftwerke ist es, in Zeiten eines möglichen Überangebots Energie zu speichern, indem Luft aus der Umgebung angesaugt, verdichtet und in Kavernen oder andere Druckbehälter verpresst wird. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1 auf der linken Seite dargestellt. Zum Entladen des Speichers wird die Druckluft aus der Kaverne in Turbinen entspannt, um bedarfsgerecht elektrische Energie bereitzustellen. Diese Betriebsweise findet sich im Bild rechts.

Welchen konkreten Beitrag Druckluftspeicherkraftwerke so zur Netzintegration erneuerbarer Energien in Zukunft leisten können, hängt allerdings davon ab, welche von verschiedenen denkbaren Konzepten sich nicht nur als technisch machbar, sondern dazu noch als unter den konkreten Randbedingungen wirtschaftlich tragbar erweisen.

Gefördert durch das HWT-Programm der EKSH hat das ZNES in Kooperation mit der GEO mbH vor diesem Hintergrund eine Studie zur Eignung Schleswig-Holsteins als Standort für ein Druckluftspeicherkraftwerk durchgeführt. Im Rahmen des Projekts DLSK-SH wurden die Aspekte Standortverfügbarkeit, Technik und Wirtschaftlichkeit untersucht. GEO bearbeitete dabei das erste der genannten Arbeitsfelder, während im ZNES die beiden letztgenannten Bereiche behandelt wurden.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 2 Methodik

### 2.1 Zielsetzung

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Perspektiven eines DLSK in Schleswig-Holstein umfassend zu evaluieren. Insbesondere soll festgestellt werden, welcher technische Ansatz am ehesten für diese Netzregion in Betracht kommt und ob ein aus Sicht eines potenziellen Betreibers wirtschaftlich attraktiver Betrieb zu erwarten ist.

Grundsätzlich wird die Bewertung dabei aus Sicht potenzieller Akteure und nicht etwa nach volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten vorgenommen. Dieser Ansatz folgt dem Gedanken, dass ein konkretes Projekt nur dann realisiert wird, wenn es für einen Geldgeber einen wirtschaftlichen Nutzen verspricht. Nur ein tatsächlich realisierbares Projekt kann den gewünschten Beitrag zur Netzintegration der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energien leisten.

Darüber hinaus soll die Bewertung des Einzelprojektes auch hinsichtlich der unterstellten Randbedingungen größtmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit aufweisen. Hier liegt insbesondere ein Unterschied zu Arbeiten von Versorgern und Netzbetreibern vor, die aus nachvollziehbaren Gründen keinen Einblick in ihre interne Modellierung von Erzeugung und Netzinfrastruktur geben möchten [1] [2]. Mit dem für das Projekt gewählten Ansatz ist das Vorgehen nicht nur bestmöglich auf die Bewertung anderer Standorte und Technologien übertragbar, sondern es wird außerdem anderen Arbeitsgruppen auch der Vergleich mit eigenen Arbeiten erleichtert.

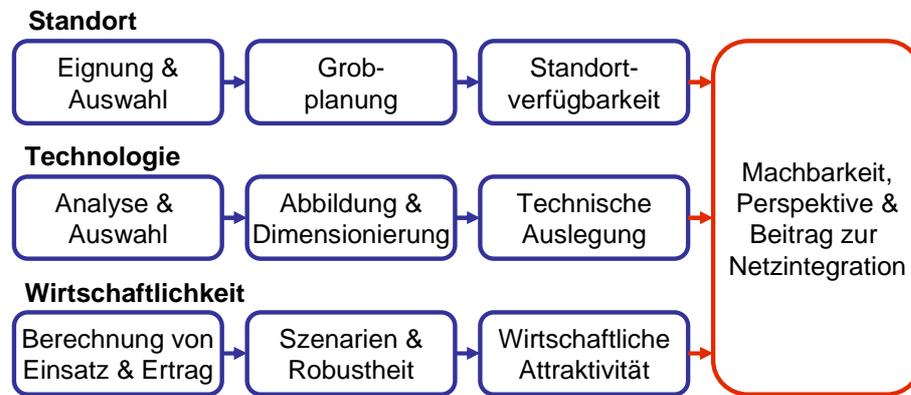
Die belastbare Bewertung der Perspektiven eines DLSK in Schleswig-Holstein erfolgt also aus methodischer Sicht über die Evaluation der Wirtschaftlichkeit unter besonderer Berücksichtigung der Strukturen des Energiesystems sowie der technischen Machbarkeit. Zusätzlich sollen im Sinne des Untersuchungsziels aber auch andere mögliche Hindernisse einer Projektrealisierung identifiziert werden, wozu eine beispielhafte Standortgrobplanung durchgeführt wird. Der Beitrag eines solchen Kraftwerks zur verbesserten Nutzung erneuerbarer Energien ergibt sich aus den technischen Betriebsdaten einer wirtschaftlich attraktiven und praktisch umsetzbaren Option.

### 2.2 Vorgehen

Mit Blick auf die skizzierten Ziele des Projektes erfolgt die Bewertung der Perspektiven für ein DLSK in Schleswig-Holstein mittels einer multidimensionalen Machbarkeitsuntersuchung. Die Bewertungsdimensionen Standort, Technologie und Wirtschaftlichkeit werden in entsprechenden Arbeitsschritten

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

analysiert und schließlich, wie in Abbildung 2 dargestellt, zu einer umfassenden Bewertung zusammengeführt.



**Abbildung 2: Dimensionen der Bewertung im Projekt DLSK-SH**

Das methodische Vorgehen zur Bewertung der Attraktivität eines Druckluftspeicherkraftwerks in Schleswig-Holstein orientiert sich dabei an den folgenden Leitfragen:

1. Welche Standorte in Schleswig-Holstein eignen sich für Druckluftspeicherkraftwerke?
2. Welche Schritte sind zur Erschließung dieser Standorte notwendig?
3. Wie lang sind die zur Erschließung einzuplanenden Zeiträume?
4. Welche Druckluftspeichertechnologien kommen für eine Realisierung in Betracht?
5. Welches technische Konzept hat für Betreiber derzeit die größte Attraktivität?
6. Wie groß sollten installierte Leistungen und Speicherkapazitäten von Einzelanlagen sein?
7. Führt ein betriebswirtschaftlich orientierter Betrieb zum gewünschten Systemeffekt?
8. Welche Märkte sind für einen wirtschaftlichen Betrieb von Bedeutung?
9. Wie verändert sich die Bewertung durch einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien?
10. Wie beeinflusst eine sich entwickelnde Netzstruktur den Speichereinsatz?
11. Wie robust ist die Bewertung hinsichtlich der Unsicherheit zukünftiger Szenarien?

Die Fragen lassen sich dabei, wie oben geschehen, nach Ihrem Bezug auf die Standortsuche, die Technologie und das umgebende Energieversorgungssystem gruppieren. In jedem dieser Bereiche können konkrete Arbeitsschritte zur Beantwortung der jeweiligen Fragen definiert werden.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### 2.2.1 Arbeitsschritte mit Bezug zur Standortsuche

In einem ersten Arbeitsschritt sind mögliche Standorte für ein DLSK in Schleswig-Holstein zu identifizieren, wobei auf die Anbindung an das elektrische Netz ebenso zu achten ist wie auf die geologischen und geografischen Voraussetzungen, die für die Erschließung einer Kaverne notwendig sind. Unter den geeigneten Standorten ist eine Rangordnung festzulegen und zu begründen. Somit werden potentielle Optionen ermittelt, die als Modellstandorte für weitere Untersuchungen verwendet werden können.

Die Festlegung auf nur einen konkreten DLSK-Standort kann im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen, da die hierfür erforderlichen Untergrunduntersuchungen das zur Verfügung stehende Zeit- und finanzielle Budget um ein Vielfaches übersteigen würden. Es kann aber so eine Vorauswahl getroffen werden, welche Standorte in Schleswig-Holstein sich für ein Druckluftspeicherkraftwerk am ehesten anbieten würden.

Danach ist mit Blick auf die potentiellen DLSK-Standorte in Schleswig-Holstein eine grobe Standortplanung durchzuführen. Dabei steht der Nachweis der generellen Machbarkeit im Vordergrund, während die zu einer Detailplanung gehörigen Aufgaben nur allgemein beschrieben werden sollen. Das generelle Vorgehen bei einer tatsächlichen Standortplanung ist zu skizzieren und erkennbare Herausforderungen zu identifizieren. Erscheinen darunter einzelne technische oder sonstige Punkte kritisch, sind diese im Sinne der generellen Machbarkeit zu bewerten.

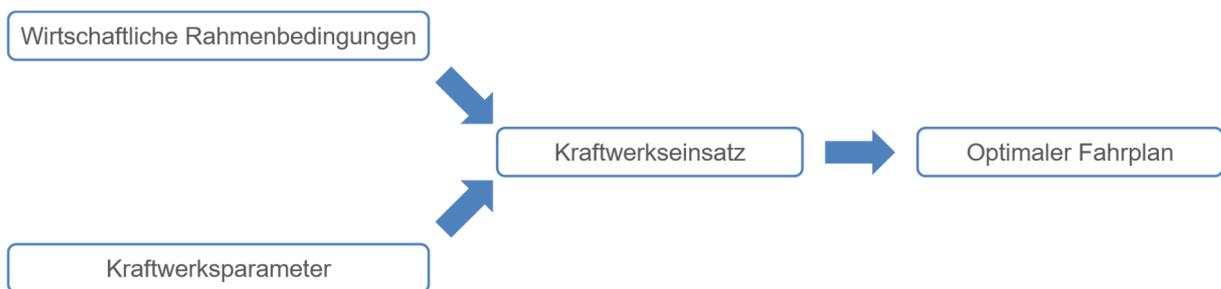
Die Grobplanung beinhaltet die allgemeine Prüfung und Ermittlung des planungsrechtlichen und ggf. des finanziellen Aufwands, der für die Entwicklung eines DLSK zu erwarten ist sowie die anschließende Übertragung dieses allgemeinen Ergebnisses –soweit möglich- auf die zuvor ermittelten potentiellen DLSK-Standorte. Als Ergebnis liegt dann ein Ablaufplan vor, aus dem sowohl die Planungsschritte als auch die zu erwartenden Zeitspannen hervorgehen.

### 2.2.2 Technologiebezogene Arbeitsschritte

Um die Frage zu klären, welche Technologiekonzepte im Grundsatz für ein Druckluftspeicherkraftwerk in Schleswig-Holstein in Betracht kommen, sollen zunächst in einer Vorauswahl von den vielen technischen Ansätzen für DLSK die aussichtsreichsten identifiziert werden. Die erste Bewertung der Konzepte erfolgt dabei qualitativ anhand verschiedener relevanter Kriterien, wie beispielsweise dem Wirkungsgrad und der technischen Machbarkeit. Somit ist das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes die begründete Reduktion der verschiedenen Konzepte auf die im Rahmen des Projektes vertieft zu betrachtenden Varianten.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Zur Identifikation des aus derzeit aus Betreibersicht attraktivsten Konzepts sind die zuvor identifizierten Technologien hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit vergleichend zu bewerten. Die betriebswirtschaftliche Bewertung erfordert die Ermittlung eines Betriebsergebnisses, das auf einer Einsatzplanung eines DLSK im Energiesystem basiert. Der Kraftwerksfahrplan resultiert dabei aus einer Simulation des Kraftwerkeinsatzes auf Basis von Kraftwerkscharakteristiken und Marktpreiszeitreihen der Elektrizitätsversorgung. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang mit den jeweiligen Informationsflüssen. Der dargestellte Ablauf wird in einem Einsatzmodell für Druckluftspeicherkraftwerke umgesetzt.



**Abbildung 3: Modellübersicht zur Einsatzplanung eines DLSK**

Die ausgewählten Kraftwerkskonzepte sind demnach zum Zweck der detaillierten Berechnung genauer abzubilden. Auf dieser Basis werden Kraftwerkscharakteristiken bereitgestellt, die zur Simulation des Kraftwerkeinsatzes im Versorgungssystem verwendet werden können. Die Gestalt der Kraftwerkscharakteristiken muss dabei einerseits ausreichend einfach sein, um die Simulation nicht unangemessen zu verkomplizieren. Dazu ist im besten Fall die allgemeine Form der Charakteristik für alle technischen Speicherkraftwerkskonzepte gleich. Andererseits muss die Unterschiedlichkeit verschiedener Konzepte abgebildet werden können. Auf Basis einer geeigneten Parametrisierung wird dann das Betriebsverhalten der zuvor ausgewählten Konzepte durch die dazugehörigen Kraftwerkscharakteristiken repräsentiert.

Mit Hilfe dieser Kraftwerkscharakteristiken prognostiziert die Simulation der Konzepte im Energiesystemmodell die jeweiligen Einsatzzeiten als auch damit einhergehende Erlös- und Kostenstrukturen. Im Ergebnis kann so eine betriebswirtschaftliche Bewertung mit dem Ziel der Auswahl des attraktivsten Konzeptes erfolgen.

Weiter soll für das zuvor identifizierte attraktivste Kraftwerkskonzept eine Variation der technischen Dimensionierung mit Blick auf einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb erfolgen. Eine Optimierung des Konzepts im wissenschaftlich strengen Sinne ist mit Blick auf den Zeit- und Kostenrahmen des Projekts nicht möglich. Wohl aber kann eine strukturierte Variantenprüfung zur Identifikation einer günstigen Konfiguration führen. So können für die bevorzugte Kraftwerkskonfiguration nicht nur das generelle

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Schaltungskonzept und die praxisgerechte Parametrisierung der Komponenten, sondern auch Leistungsklassen und Speicherkapazitäten ermittelt werden.

Durch Kombination der Betriebsdaten des Druckluftspeicherkraftwerks mit den Einsatzdaten der übrigen Erzeugungsanlagen im Versorgungssystem ist es schließlich auch möglich, eine Aussage über die Systemdienlichkeit des Anlagenbetriebs zu treffen.

### 2.2.3 Arbeitsschritte mit Bezug zur Entwicklung des Versorgungssystems

Das oben in seinen Grundzügen beschriebene DLSK-Einsatzmodell soll es erlauben, den Betrieb verschiedener Kraftwerkskonzepte an unterschiedlichen Märkten zu optimieren. Um die Bedeutung von Spot- und Regelenergiemarkt für den wirtschaftlichen Betrieb von Druckluftspeicherkraftwerken zu untersuchen, können zunächst historische Marktdaten verwendet werden. Sie liefern die für das Einsatzmodell nötigen Preiszeitreihen unterschiedlicher Märkte.

Zur Fortschreibung des Versorgungssystems ist es dann notwendig, dieses ebenfalls modellhaft abzubilden. Die Simulation des Versorgungssystems wird mit dem am Zentrum für nachhaltige Systeme unter Einsatz von Open-Source-Software entwickelten Simulationsmodell renpassG!S durchgeführt, welches das zuvor genutzte Simulationsmodell renpass (Renewable Energy Pathways Simulation System) ersetzt. Mit Hilfe dieses Modells können stündlich aufgelöste Daten zum Einsatz und Status unterschiedlicher Erzeuger im betrachteten Energieversorgungssystem, zu Im- und Exporten zwischen einzelnen Netzregionen sowie daraus resultierende Großhandelspreise gewonnen werden. Die Schnittstelle zwischen dem DLSK-Einsatzmodell und dem Simulationsmodell des Versorgungssystems wird durch die Preiszeitreihen gebildet. Das erlaubt die an die jeweilige Einsatzzeit gekoppelte Weiterführung der skizzierten Daten und ermöglicht somit die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer konkreten Kraftwerksanlage im Energieversorgungssystem.

Mit Hilfe von renpassG!S soll die Systemfunktion eines Druckluftspeicherkraftwerks für die Energieversorgung in Schleswig-Holstein dann in verschiedenen Erzeugungsstrukturen beleuchtet werden. Dazu wird der Betrieb in mehreren Szenarien, die jeweils einen unterschiedlichen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung abbilden, analysiert. So lässt sich die Frage beantworten, welchen Einfluss ein steigender Anteil erneuerbarer Energien im Versorgungssystem auf die Bewertung von Druckluftspeicherkraftwerken hat.

Um die Bedeutung von Veränderungen der Netzstruktur für den Betrieb von Druckluftspeicherkraftwerken zu untersuchen, werden weiter auch Varianten des Netzausbaus in entsprechenden Simulati-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

onen berücksichtigt. Die Erhöhung der Im- und Exportkapazitäten zwischen den verschiedenen Netzregionen schließt beispielsweise auch die Möglichkeit des Zugriffs auf Pumpspeicherkraftwerke in anderen Netzregionen mit ein.

Ebenso wie die Szenarien mit veränderter Erzeugungsstruktur werden die Varianten bei veränderter Netzstruktur um weitere Variationen der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen ergänzt und als Grundlage der Bewertung der Robustheit des wirtschaftlichen Ergebnisses verwendet. Mit Blick auf den Untersuchungsumfang kann die Beleuchtung solcher Szenarien nicht für alle Kraftwerkskonzepte erfolgen. Daher wird hierfür nur das wirtschaftlich aussichtsreichste Konzept herangezogen.

## 2.3 Berichtsstruktur

Die techno-ökonomische Technologiebewertung basiert demnach auf der Anwendung des im Rahmen des Projekts entwickelten Einsatzmodells. In diesem fließen technische Eigenschaften der untersuchten Druckluftspeicherkraftwerke mit den wirtschaftlichen Randbedingungen des umgebenden Versorgungssystems zusammen. Die standortbezogenen Untersuchungen können aber ebenso wie die erste Einschränkung des technologischen Untersuchungsrahmens unabhängig davon vorgenommen werden.

Daher werden im vorliegenden Bericht zunächst im Kapitel 3 die Fragen zur Standortidentifikation und -erschließung behandelt und anschließend im Kapitel 4 das technologische Spektrum der Untersuchung auf die Konzepte eingegrenzt, die für Betreiber von näherem Interesse sind. Weil nach diesem Arbeitsschritt das zentrale Einsatzmodell benötigt wird, werden in den Kapiteln 5 und 6 die Modellansätze für den Anlagenbetrieb und das umgebende Versorgungssystem dargelegt. In allen zuvor genannten Kapiteln wird anfänglich die jeweilige Methodik weiter ausdifferenziert.

Im Kapitel 7 folgt dann die integrierte techno-ökonomische Analyse im zuvor aufgespannten Untersuchungsfeld. Deren Ergebnisse werden schließlich in Kapitel 8 mit den übrigen Erkenntnissen in einer abschließenden Diskussion zur integrierten multidimensionalen Bewertung der Chancen für ein Druckluftspeicherkraftwerk in Schleswig-Holstein zusammengefasst.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### 3 Standort

Folgend werden zunächst die untersuchungswürdigen potentiellen DLSK-Standorte innerhalb Schleswig-Holsteins skizziert. Der anschließende Abschnitt umfasst das methodische Vorgehen zur multikriteriellen Standortbewertung, auf dessen Grundlage die Standortauswahl durchgeführt wird. Darauf folgend wird die Methodik zur Standortgrobplanung skizziert.

#### 3.1 Potentielle Standorte

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 [3]. Diese Potentialkarte (Anhang A) basiert nicht auf konkreten Untergrunduntersuchungen, sondern auf den dem Amt vorliegenden allgemeinen Karten und Erkenntnissen zu den Salzformationen im Untergrund Schleswig-Holsteins.

Die aus der Potentialkarte [3] untersuchungswürdigen Horizonte wurden in 14 Standorte aufgeteilt und sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Nummerierungen sind in der Karte im Anhang A 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 lokal begrenzten Orten vermutet, weil die Salzformationen dort eine alleinstehende Erhebung im Salz erwarten lassen.

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

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**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

## 3.2 Methodik

### 3.2.1 Standortbewertung

Die Standortauswahl basiert auf einer multikriteriellen Bewertung. 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. Anhand von 7 Bewertungskriterien werden Abschätzungen getroffen, in welchem Maße die vom LLUR vorgeschlagenen untersuchungswürdigen Horizonte als Druckluftspeicherkraftwerke geeignet sind. Hierzu wird 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 höherer Bedeutung, als die „weichen“ Standortfaktoren, die unter den weiteren 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.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

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 Kriteriengewichtung und der jeweiligen Punktezahl. Die maximal erreichbare Punktzahl je Standort beläuft sich auf 130 Punkte. Die Gewichtung sowie die Bewertungsgrundlage der einzelnen Kriterien werden in Abschnitt 3.3.1 näher erläutert. Zur Bewertung der Kriterien wurden im Wesentlichen öffentlich zugängliche Dokumente und Karten herangezogen und auf deren Basis eine stichpunktartige Beschreibung in die Matrix aufgenommen. Nach diesem Vorgehen ergibt sich eine Rangfolge der Standorte bezüglich ihrer Eignung für ein DLSK nach relevanten Kriterien.

**Tabelle 2: Übersicht der Bewertungskriterien**

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

### 3.2.2 Standortgrobplanung

Die Standortgrobplanung umfasst eine strukturierte Aufstellung der einzelnen Planungsschritte mitsamt planungsrechtlich relevanter Grundlagen und möglichen Herausforderungen innerhalb des Prozesses. Für die Ermittlung der rechtlichen Rahmenbedingungen konnte teilweise auf vergangene Tätigkeiten von GEO im Bereich der bergbaurechtlichen Antragsstellung sowie der Netzanschlussverfahren zurückgegriffen werden. Da diese Themenfelder einer kontinuierlichen, juristischen und organisatorischen Überarbeitung unterliegen, ging es auch darum, etwaige rechtliche Novellierungen zu identifizieren und mit zu berücksichtigen. Bezüglich der Verfahrensbeschreibung für die Kavernenherstellung standen ebenfalls Unterlagen aus vorangegangenen Tätigkeiten zu diesem Themenkomplex zur Verfügung. Zum Teil stammen diese aus einer projektbezogenen Zusammenarbeit mit dem Kavernenbauunternehmen KBB Underground Technologies GmbH sowie aus weiteren Informationen von KBB, die entweder im Internet frei verfügbar angeboten werden oder sich aus einem Gespräch mit einem KBB Mitarbeiter ergaben.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Auf Basis der zu berücksichtigenden Rechtsvorschriften und Richtlinien gelten für einzelne Arbeitsschritte Anforderungen und Bestimmungen, die sich zum einen auf die Qualität der zu erreichenden Ergebnisse und zum anderen auf den zeitlichen Ablauf der Verfahren beziehen. Die sich so ergebenden Fristen und Meilensteine werden zunächst für jeden Bereich im Einzelnen aber auch im Zusammenhang mit den anderen Bereichen dargestellt. Da es bezüglich der zeitlichen Abfolge zu Interdependenzen zwischen den Bereichen kommt, ergibt sich somit ein grober Zeitplan für das Verfahren, welches an die Festlegung auf einen Kraftwerkstyp und einen Standort anknüpft und bis zur Herstellung und Inbetriebnahme des Kavernenspeichers dauert.

Der Bezug zu den zuvor identifizierten potentiellen Standorten wird dort hergestellt, wo die jeweiligen Standorte besondere Merkmale mit Blick auf das Antrags- und Herstellungsverfahren besitzen. So kann auf bestehende Vorteile oder Nachteile bestimmter Standorte für eine etwaige, folgende Realisierung eines DLSK im Rahmen dieses Projektes bereits hingewiesen werden.

Im Abschnitt 3.3.2 werden die wichtigsten Rahmenbedingungen zu den bergbaurechtlichen Voraussetzungen, dem Netzanschlussverfahren und der Herstellung der Kaverne erläutert.

### **3.3 Bewertunggrundlage und Rahmenbedingungen**

#### **3.3.1 Standortbewertung**

##### ***Salzstruktur***

Zur Bewertung der Beschaffenheit und Eignung der Salzstruktur wurde im Wesentlichen auf die Potentialkarte des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) [3] zurückgegriffen. 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 Eignung 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, wird eine mittlere Gewichtung von 2,0 angesetzt.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### ***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 zur 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 von 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 Erlaubnisse und Bewilligungen vorangehen muss.

An den Standorten Belmhusen und Segeberg gibt es ein vergebenes Bergwerkseigentum für Steinsalze. An diesen Standorten kann es ggf. sogar zu einer Kooperation mit den Rechteinhabern kommen, solange auf deren Seite ein Interesse an der Verwertung der Salzsole besteht, die beim Aussolen der Kaverne entsteht.

Wegen der unklaren Rechtslage durch erteilte Erlaubnisse und Bewilligungen, die größtenteils einem Kavernenbau grundsätzlich jedoch nicht entgegenstehen, wird 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

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

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 werden deshalb die derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Strukturen und Auslastungen des Hoch- und Höchstspannungsnetzes in Schleswig-Holstein betrachtet. Gute Bedingungen liegen dann am betrachteten Standort vor, wenn die Anbindung an 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 einem DLSK nicht nur um ein reines Erzeugungskraftwerk handelt, sondern der wesentliche Zweck darin besteht, auch negative Flexibilität anbieten und somit überschüssige Energie aus dem Netz abnehmen zu können, wurde es den Standorten positiv angerechnet, wenn im umgebenden Übertragungsnetz einen erkennbaren Bedarf an flexibler Bezugsleistung gibt. Die derzeitige Netzsituation zeigt insbesondere im Bereich der Westküste einen erheblichen Engpass auf, da die dort installierte hohe Erzeugungsleistung bei gleichzeitig geringem 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 [4].

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

### ***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. Als Grundlage galten in diesem Zusammenhang die Regionalpläne nach der Teilfortschreibung Wind aus dem Dezember 2012. Das nach der Bewertung erlassene Urteil des OLG

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Schleswig (1 KN 6/13 vom 20.01.2015), welches diese Regionalpläne für ungültig erklärt, hat keinen Eingang in die Bewertung gefunden.

Mit Blick auf das Ziel des Projektes, die Möglichkeiten eines DLSK gerade in Kombination mit dem Ausbau erneuerbarer Energien zu betrachten, wird 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 m<sup>3</sup> und 800.000 m<sup>3</sup> 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 [5].

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.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### ***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 wird das Kriterium mit 1 gewichtet.

## **3.3.2 Standortgrobplanung**

### ***Bergbauliche Voraussetzungen***

- Hintergrund

Bei der Herstellung von unterirdischen Salzkavernen ist das Bundesberggesetz (BBergG) anzuwenden. Das Bergrecht unterscheidet zwischen grundeigenen und bergfreien Bodenschätzen. Während grundeigene Bodenschätze im Eigentum des jeweiligen Grundeigentümers stehen, erstreckt sich das Eigentum eines Grundeigentümers nicht auf die unterhalb seines Grundstücks befindlichen bergfreien Bodenschätze. Im Rahmen der Kavernenherstellung erfolgt durch das Aussolen die Gewinnung von Salzen bzw. Sole, die gemäß § 3 Abs. 3 BBergG zu den bergfreien Bodenschätzen gezählt werden.

Das Aufsuchen bzw. die Gewinnung von bergfreien Bodenschätzen erfordert deshalb einen Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis bzw. Bewilligung bei der zuständigen Behörde. Mit einer Erlaubnis nach § 7 BBergG ist ausschließlich das Aufsuchen zulässig, also Erkundungsarbeiten, bei denen festgestellt werden soll, ob in einem bestimmten unterirdischen Bereich die erwartete Gewinnung eines bestimmten Bodenschatzes möglich ist. Hingegen wird mit einer Bewilligung nach § 8 BBergG auch das Recht gewährt, die bestimmten Bodenschätze zu gewinnen und das Eigentum daran zu erwerben.

Eine Erlaubnis führt für den Antragssteller nicht automatisch zu einer zeitlich unbegrenzten Sicherung seiner bergbaulichen Interessen. Vielmehr ist die Genehmigung der Bergbehörde mit diversen Bedingungen verknüpft; insbesondere enthält sie Anforderungen an den zeitlichen Umfang der genehmigten Arbeiten und legt Fristen fest, innerhalb derer bestimmte Verfahrensschritte durchgeführt werden müssen. Durch diese Auflagen wird sichergestellt, dass den Anträgen die erforderliche Ernsthaftigkeit und Verbindlichkeit zu Grunde liegt und die Bergbauberechtigung nicht zu einer reinen Blockierung der bergfreien Bodenschätze gegenüber Dritten führt.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Wer bereits Inhaber einer Bewilligung für ein bestimmtes Feld und die Bodenschätze ist, hat die Möglichkeit, die Verleihung von Bergwerkseigentum an diesem Feld zu beantragen. Das Bergwerkseigentum umfasst dieselben Rechte wie eine Bewilligung. Durch die Verleihung des Eigentums wird dem Feld allerdings ein rechtlicher Status vergleichbar dem eines Grundstücks zugeteilt. So ist zum Beispiel auch eine Veräußerung des Eigentums nach § 23 BBergG möglich.

Die Erlaubnis bzw. Bewilligung allein berechtigt noch nicht zur Errichtung und Führung eines Aufsuchungs- bzw. Gewinnungsbetriebs. Die zum Betrieb gehörenden Tätigkeiten und Einrichtungen sind gesondert von der zuständigen Behörde in Form eines Betriebsplans zu genehmigen. Die entsprechenden Unterlagen und Dokumentation sind vom Antragsteller vorzulegen.

- Antrag

Die für Schleswig-Holstein zuständige Bergbehörde ist das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover. Die dem niedersächsischen Wirtschaftsministerium nachgeordnete Fachbehörde bescheidet über die Anträge auf Erlaubnis bzw. Bewilligung nach den Richtlinien, die vom Wirtschaftsministerium Niedersachsen im Runderlass zur „*Erteilung von Erlaubnissen und Bewilligungen nach dem Bundesberggesetz*“ aufgestellt und veröffentlicht wurden und u.a. eine Konkretisierung der §§ 11, 12 BBergG darstellt. Die im Runderlass und seinen Anlagen enthaltenen Vorgaben und Fristsetzungen knüpfen an die zuvor genannte Zielsetzung an, nur verbindliche und realisierbare Vorhaben zu genehmigen.

Die Anlage 1 zum o.g. Runderlass legt (in Verbindung mit § 11 BBergG) die Bedingungen für den Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis fest, in Anlage 2 werden (in Verbindung mit § 12 BBergG) die Anforderungen für Anträge auf Erteilung einer Bewilligung definiert. Wesentlicher Bestandteil bei Anträgen nach Anlage 1 und Anlage 2 ist die Aufstellung eines Arbeitsprogramms. Das Arbeitsprogramm ist ein entscheidendes Kriterium bei der Abwägung der Genehmigungsbehörde und muss daher schlüssig und detailliert ausgearbeitet sein. Aus ihm geht hervor, welche Arbeitsschritte in welchem Umfang und zu welchem Zweck durchzuführen sind, und es stellt dar, dass die Arbeiten mit Blick auf die Größe des beantragten Felds in einem angemessenen Zeitraum bzw. bei Bewilligungen im gesamten Feld durchgeführt werden können. Eine Erlaubnis für Aufsuchungsarbeiten wird für einen befristeten Zeitraum von höchstens 5 Jahren erteilt. Die Gültigkeitsdauer von Bewilligungen für die Gewinnung von Bodenschätzen ist vom Umfang und Aufwand der Gewinnung abhängig und kann 50 Jahre und ggf. mehr betragen.

Da bei Aufsuchungsarbeiten vor der Durchführung noch Unsicherheiten bestehen, ob die zu gewinnenden Bodenschätze überhaupt vorhanden bzw. förderbar sind, hat sich der Antragsteller dazu zu

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

verpflichten, der Genehmigungsbehörde nach Abschluss der Arbeiten die Ergebnisse der Arbeiten vorzulegen. Bei Anträgen auf Bewilligung ist der Nachweis, dass die Bodenschätze tatsächlich im beantragten Feld vorhanden sowie nach Lage und Beschaffenheit gewinnbar sind, hingegen bereits im Vorfeld zu erbringen. Die tatsächliche Fundstelle der Bodenschätze ist der Genehmigungsbehörde unter Angabe ihrer Lage und Tiefe wiederum nach Abschluss der Arbeiten mitzuteilen.

Neben den genannten zu erbringenden Nachweisen über die Eignung des beantragten Feldes für die vorgesehene bergbauliche Nutzung ist die fachliche und finanzielle Präqualifikation des Antragsstellers sowohl bei Anträgen auf Erlaubnis als auch bei denen auf Bewilligung vorab durch entsprechende Nachweise zu belegen. Die fachliche Eignung bzw. die technische Leistungsfähigkeit des Antragsstellers ist etwa durch Dokumentation bereits erfolgter bergbaulicher Tätigkeiten in den vergangenen 5 Jahren, durch Auflistung der zur Verfügung stehenden Geräte und technischen Ausrüstung und/oder durch schlüssige Beschreibung der geplanten Maßnahmen nachzuweisen. Für den Nachweis der finanziellen Präqualifikation sind die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel, Kredite oder Zuschüsse beispielsweise durch Bankauskünfte, Kreditzusagen, Förderbescheide oder ähnliches glaubhaft darzulegen.

Nach Erteilung der Erlaubnis oder der Bewilligung hat der Antragsteller der Genehmigungsbehörde einen Betriebsplan vorzulegen, in dem die vorgesehenen Arbeiten und Einsätze von Geräten und Technik (kurz: der vorgesehene Betrieb) im Detail dargestellt werden. Die Genehmigungsbehörde wird so in die Lage versetzt die Auswirkungen des Betriebes abzuschätzen und auf dieser Grundlage zum Beispiel die Anforderungen an eine etwaige erforderliche Umweltverträglichkeitsprüfung des Vorhabens festzulegen. Der Betriebsplan ist gemäß § 55 BBergG zu genehmigen, solange keine negativen Auswirkungen durch den Betrieb zu erwarten sind. Dabei kommt auch die konzentrierende Wirkung der bergrechtlichen Genehmigung zum Tragen, bei der in einer Genehmigung auch sämtliche anderen genehmigungsrelevanten Belange, wie etwa der Immissionsschutz, mitberücksichtigt werden.

### **Netzanschlussverfahren**

Für den Netzanschluss eines Kraftwerks mit einer Leistung von mehr als 100 MW und einer Spannungsebene von mindestens 110 kV, bildet die Kraftwerks-Netzanschlussverordnung (KraftNAV) den gesetzlichen Rahmen für das Anschlussverfahren. Sie beinhaltet verbindliche Fristen und Vorgaben für das Verfahren bis zum Abschluss eines Netzanschlussvertrags und regelt die Verantwortlichkeiten zwischen Netzbetreiber und Antragssteller.

Wesentliche Schritte und Fristen des Netzanschlussverfahrens sind:

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- Antrag

Die Netzbetreiber der 110 kV Hochspannungsnetze haben auf ihrer jeweiligen Internetseite gem. § 3 Abs. 1 KraftNAV unter anderem sämtliche Angaben zu veröffentlichen, die vom Antragssteller bei einem Netzanschlussantrag einzureichen sind und die für die erforderlichen Prüfungen des potentiellen Anschlusspunktes benötigt werden. Beispielhaft für das 110-kV-Hochspannungsnetz in Schleswig-Holstein ist unter [6] die entsprechende Veröffentlichung der Schleswig-Holstein Netz AG zu finden.

Nach Eingang eines die genannten Kriterien erfüllenden Anschlussbegehrens hat der zuständige Netzbetreiber innerhalb von 2 Wochen Auskunft über die zur Beantwortung des Antrags und zur Ermittlung eines geeigneten Netzanschlusspunktes erforderlichen Prüfungen sowie die hierfür anfallenden Kosten mitzuteilen. Sobald der Antragsteller 25% dieser Kosten als Anzahlung geleistet hat, ist die Prüfung durchzuführen. Der Netzbetreiber hat dann innerhalb von 3 Monaten das Ergebnis der Prüfung mitzuteilen.

- Anschlusszusage und Netzanschlussvertrag

Zusammen mit der Übermittlung des Ergebnisses der Antragsprüfung wird dem Antragssteller eine Anschlusszusage erteilt. Diese Zusage gilt als verbindliche Reservierung der Netzanschlussleistung an einem bestimmten Netzanschlusspunkt und wird wirksam, sobald der Antragssteller innerhalb eines Monats die restlichen Kosten der erfolgten Prüfung sowie eine Reservierungsgebühr von 1.000€ je Megawatt Anschlussleistung gezahlt hat.

Sowohl Netzbetreiber als auch Antragssteller sind dazu verpflichtet, anschließend zwecks einer zügigen Vorbereitung eines Netzanschlussvertrags zusammenzuarbeiten. Der Netzanschlussvertrag regelt (gemäß 4 Abs. 4 KraftNAV) die wesentlichen eigentumsrechtlichen und technischen Details der Herstellung des Kraftwerks und des Anschlusses sowie dessen Betriebs. Die jeweiligen Zuständigkeiten für einzelne Komponenten der gesamten Anlage werden dem Kraftwerksbetreiber und Netzbetreiber zugewiesen sowie technische Anforderungen an den Anlagenbetrieb fixiert. Somit soll ein reibungsloser und sicherer Betrieb des Kraftwerks und des Hochspannungsnetzes gesichert werden.

Neben der gesetzlichen Verpflichtung zum Abschluss eines Netzanschlussvertrags sieht die KraftNAV die Aufstellung eines Realisierungsfahrplans vor, in dem Netzbetreiber und Antragssteller die einzelnen Schritte zur Verwirklichung des Kraftwerks und des Netzanschlusses vereinbaren. Der Realisierungsfahrplan enthält Fristen z.B. für den Erwerb dinglicher oder Eigentumsrechte, einzuholende Genehmigungen, Beginn der Baumaßnahmen usw. Für den Fall der Nichteinhaltung der vereinbarten Fristen hat der Fahrplan angemessene Folgen vorzusehen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### ***Herstellung der Kaverne***

Die Herstellung der Kaverne nimmt im gesamten Planungs- und Realisierungsprozess den Großteil der Zeit in Anspruch. Bereits die geologischen Voruntersuchungen vor Beginn des eigentlichen Herstellungsprozesses der Kaverne können bis zu 5 Jahre andauern.

- Voruntersuchung/Aufsuchung

In der zunächst theoretischen Voruntersuchung gilt es, anhand von vorliegenden Untergrundinformationen eine Abschätzung zur gebirgsmechanischen Eignung des gewählten Standorts vorzunehmen. Grundlage hierfür bilden zum Beispiel geologische Kartierungen mit Auskünften über die unterschiedlichen vorhandenen Schichten oder im Idealfall sogar Ergebnisse bereits durchgeführter Probebohrungen im Planungsgebiet.

Ergibt die theoretische Voruntersuchung eine grundsätzliche Machbarkeit, folgt im nächsten Schritt eine Erkundungsbohrung („slim-hole“) im Untersuchungshorizont zur Gewinnung von Bohrkernen. Mithilfe der Bohrkernne können aussagekräftige Informationen über den genauen geologischen Aufbau gesammelt sowie gebirgsmechanische Tests durchgeführt werden. Die bei den Tests ermittelte Dichte sowie das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Salzes werden benötigt, um die dauerhafte Stabilität der späteren Kaverne und ihr thermodynamisches Verhalten berechnen zu können.

An die Erkundungsbohrung schließen sich die gebirgsmechanischen Tests an, deren Ergebnisse in der Regel in einem Gutachten zusammengefasst werden. Unter Einbeziehung sämtlicher Voruntersuchungen und Erkenntnisse entsteht so eine Form Machbarkeitsstudie, die auch als Ergebnis der gesamten Aufsuchungsarbeiten zählt.

- Planung und Herstellung der Kaverne

Bevor es zur tatsächlichen Herstellung der Kaverne und des Kraftwerks kommt, bedarf es einer Auslegung der geplanten Anlage. Hierbei sind die gegenseitigen Abhängigkeiten verschiedener Komponenten zu berücksichtigen. So hängen etwa Kavernengröße und Kraftwerksdimensionierung unmittelbar zusammen und können sich jeweils maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojektes auswirken. Die gebirgsmechanische Auslegung der Kavernen sollte daher in unmittelbarer Abstimmung mit der Kraftwerksplanung durchgeführt werden oder sogar für verschiedene Varianten erfolgen, um auf unterschiedliche Kraftwerkskonstellationen flexibler reagieren zu können.

Grundlage für die Auslegung der Kavernenspeicher bildet in der Regel ein geologisches Modell. In dieses fließen sämtliche Basisdaten ein, die etwa bereits vorgelegen haben oder durch die Voruntersu-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

chung und Probebohrung inkl. Auswertung zur Verfügung stehen. Das Modell ermöglicht es, unterschiedliche Betriebszustände abzubilden sowie das statische und dynamische Verhalten der geologischen Strukturen während der Herstellung und während des Betriebes zu simulieren.

Für die Simulation sind sämtliche Parameter der Kaverne festzulegen, die das gebirgsmechanische Verhalten beeinflussen können. Dazu gehören sowohl die grundsätzliche Frage, ob Einzel- oder Mehrfachkavernen gewollt bzw. benötigt werden, als auch spezifischere Angaben zur Teufenlage und Volumen der Kaverne oder zu erwartenden Betriebsdrücke sowie Lade- und Entladezyklen. Gerade die beiden zuletzt genannten Parameter hängen, wie bereits erwähnt, auch von der Dimensionierung und Auslegung des Kraftwerks ab, wodurch eine enge Verknüpfung von mechanischer Speicherauslegung, thermodynamischer Dimensionierung und Kraftwerksauslegung sinnvoll ist. Ist ein solch iterativer Prozess nicht möglich, bietet die parallele Entwicklung unterschiedlicher Kavernenalternativen gegebenenfalls ausreichend Flexibilität.

Neben der Kavernendimensionierung ist die detaillierte Planung des technischen Herstellungsprozesses ein weiterer wichtiger Meilenstein im Planungsprozess. Dabei ist zum einen die Bohrtechnik entsprechend der Gegebenheiten vor Ort auszulegen, um bereits im Herstellungsprozess Ungenauigkeiten und Fehler zu vermeiden, die im späteren Betrieb zu Effizienzverlusten führen können. Darüber hinaus ist die genaue Planung des Solungsprozesses vorzunehmen. Das betrifft sowohl die geologischen und gebirgsmechanischen Parameter der Aussolung als auch den überirdischen Solbetrieb. Dieser kann je nach Kavernengröße bis zu 3 Jahre dauern, weshalb eine genaue Planung hinsichtlich Frischwasserversorgung, Soleverbringung (Pipelines) und deren Automatisierung bzw. Personalbedarf notwendig ist.

Sämtliche Planungen zur Kavernenherstellung, Soleentsorgung und Kavernenbetrieb sind in einem Betriebsplan darzustellen und zu dokumentieren. Sobald eine Genehmigung des Betriebsplans von der zuständigen Behörde ausgestellt wird, kann die eigentliche Herstellung der Kaverne und des Kraftwerks erfolgen.

### 3.4 Ergebnisse

In Anlehnung an die dargestellte Methodik werden die Ergebnisse separat für die Bereiche der Standortauswahl und der Standortgrobplanung beschrieben. Der Bezug der planungstechnischen Abläufe auf die ausgewählten potentiellen Standorte ergänzt die standortbezogene Untersuchung der Machbarkeit eines DLSK in Schleswig-Holstein.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### 3.4.1 Standortbewertung

Die Ergebnisse der multikriteriellen Standortbewertung sind in Tabelle 3 dargestellt. Die detaillierten Bewertungsergebnisse finden sich im Anhang. Die Gesamtergebnisse 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 dicht an der Nord- oder Ostseeküste und weisen auch eine große Verbreitung von Windenergieanlagen vor Ort vor.

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.

**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%

### 3.4.2 Standortgrobplanung

Aus der Standortgrobplanung resultiert ein Zeitplan (Anhang B), der die Planungs- und Genehmigungsschritte sowie die einzuplanenden Fristen umfasst. Weitere Bestandteile des Planungs- und Realisierungsprozesses für ein DLSK, wie etwa die technische Auslegung des Kraftwerks oder baurechtliche

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Aspekte, die den Kraftwerksbau betreffen, sind in diesem Plan nicht dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die technische Kraftwerksplanung, wie im Abschnitt 7 beschrieben, parallel und inhaltlich abgestimmt zur Kavernendimensionierung erfolgt und somit keine gesonderten Meilensteine erforderlich sind. Baurechtliche Aspekte werden, sofern sie nicht von der konzentrierenden Wirkung der bergbaurechtlichen Genehmigung bereits berücksichtigt werden, ebenfalls als parallel zum Verfahren nach BBergG abgehandelt angesehen.

- Vorarbeiten (Aufsuchung)

Ausgangspunkt des Zeitplans ist die Festlegung eines Standortes für das DLSK. Der Rangliste aus der Standortwahl folgend kann ebenfalls die Wahl auf mehrere potentielle Standorte fallen. Entsprechend müssten die im Zeitplan dargestellten Schritte bis zur endgültigen Entscheidung (etwa nach Vorliegen erster Erkundungsergebnisse) dann für alle Standorte parallel durchgeführt werden. Weitere Vorarbeiten, die vor Beginn der eigentlichen Entwicklung des Standorts abzuschließen sind, betreffen zum einen die nutzungsrechtliche Sicherung der überirdischen Flächen und zum anderen die Kooperation mit geo- und gebirgstechischen Fachfirmen. Erst nach erfolgter Flächensicherung ist es sinnvoll, bergbaurechtliche Anträge in Angriff zu nehmen, da ansonsten etwaige, hierauf erteilte Genehmigungen nicht zu nutzen sind, wenn es keine Einigkeit mit den betroffenen Landeigentümern gibt.

Es ist zu empfehlen, verbindliche, schriftliche Nutzungs- bzw. Gestattungsverträge abzuschließen (ggf. mit verpflichtender grundbuchlicher Sicherung durch beschränkt persönliche Dienstbarkeiten), in denen sämtliche Zugriffsrechte und etwaige Entschädigungszahlungen oder Schadenersatzansprüche geregelt werden. Diese Verträge dienen sowohl dem Nachweis der erforderlichen Ernsthaftigkeit für ein bergbaurechtliches Antragsverfahren als auch der Absicherung für eine etwaige Finanzierung durch Kreditmittel.

Je nachdem, wer die Position des Antragsstellers bzw. Projektentwicklers einnimmt, sind gegebenenfalls weitere Projektpartner zu akquirieren, um die nötige Fachkompetenz in der Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie der späteren Umsetzung belegen und nutzen zu können.

- Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis und Genehmigungsverfahren

Nach Abschluss der Vorarbeiten für das Aufsuchen von bergfreien Bodenschätzen kann der Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis mit der erforderlichen Sicherheit vorbereitet und gestellt werden. In wie weit die Ausarbeitung des Antrags bereits parallel zu den Vorarbeiten durchgeführt werden, hängt von deren Verlauf ab. Zeichnen sich bereits früh Lösungen bei der Projektpartnersuche und der Flächensicherung ab, ist die Chance auf Realisierbarkeit von Aufsuchungsarbeiten gegeben, sodass die Unterlagen für das Antragsverfahren auch schon früher vorbereitet werden können. Die tatsächliche Einreichung

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

eines Antrags ist jedoch erst dann zu empfehlen, wenn verbindliche Verträge (insbesondere für die Flächensicherung) abgeschlossen wurden.

Das anschließende Genehmigungsverfahren dauert bis zu zwölf in etwa Monate.

- Voruntersuchung Kaverne (Aufsuchung)

Die Erlaubnis für Aufsuchung bodenfreier Bodenschätze ist bis zu 5 Jahren gültig. Erst mit Erteilung der Genehmigung kann ein berechtigtes Interesse an geologischen Daten für ein bestimmtes Feld belegt werden. Gegebenenfalls ist die Sichtung und Auswertung solcher Bestandsdaten deshalb erst nach Genehmigungserteilung möglich, solange der Antragssteller oder seine Projektpartner die Daten über Behörden oder ggf. andere Stellen beschaffen muss und nicht bereits zuvor Zugang zu entsprechenden Unterlagen hatte.

Nach Auswertung der Daten ist der Betriebsplan für den Aufsuchungsbetrieb aufzustellen, in dem sämtliche Arbeitsschritte unter technischen und genehmigungsrechtlichen Aspekten (z.B. Umwelt- und Immissionsschutz) beschrieben werden. Für die Genehmigung dieses Betriebsplans wird im Zeitplan eine Dauer von 12 Monaten angesetzt, die je nach Ansprüchen an das Genehmigungsverfahren (z.B. UVP-Pflicht) auch variieren kann.

Da für die anschließende Erkundungsbohrung im sogenannten Slim-Hole-Verfahren eine entsprechende Fachfirma zu beauftragen ist, sollte ggf. bereits vor Erteilung der Betriebsplangenehmigung eine Ausschreibung der Bohrarbeiten erfolgen bzw. vorbereitet werden. So können etwaige starke Auslastungen der Firmen rechtzeitig erkannt und berücksichtigt werden. Der Zeitplan sieht für die Erkundungsbohrung einen Zeitraum von einem halben Jahr vor, inklusive Einrichtung und Abrüstung des Aufsuchungsbetriebes. Die Dauer der anschließenden gebirgsmechanischen Tests auf Basis der gewonnenen Bohrkernsowie die Zeit für die Dokumentation der Aufsuchungsarbeiten ist mit 2 Jahren so gewählt, dass ein gewisser Zeitpuffer vorhanden ist, sollten sich die vorangegangenen Schritte verzögern.

Die Ergebnisse der Aufsuchungsarbeiten sind ausschlaggebend für alle weiteren Schritte zur Errichtung der Speicherkavernen und des Kraftwerks. Sollten die gebirgsmechanischen Tests keine geeigneten Untergrundvoraussetzungen belegen, ist das gesamte Verfahren erneut zu durchlaufen und, wenn gewollt, auf einen anderen Standort auszulegen.

- Vorarbeiten (Gewinnung)

Nach Vorliegen der Ergebnisse gebirgsmechanischer Tests sind die Aussichten auf eine technische Realisierbarkeit der Kavernen und damit des DLSK gegeben. Parallel zur Ausarbeitung des Antrags auf Erteilung einer Bewilligung ist deshalb die Flächenakquise für alle weiteren Schritte anzugehen. Sofern

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

die erste Flächensicherung für die Aufsuchungsarbeiten einen etwaigen dauerhaften Speicherkraftwerksbetrieb noch nicht mit vorgesehen hat, ist dieser nun im Vorfeld nutzungs- bzw. eigentumsrechtlich zu sichern. Da bei einem Kraftwerksbetrieb die Flächennutzung durchaus großräumiger zu betrachten ist als bei Aufsuchungsarbeiten und sich über einen deutlich längeren Zeithorizont (mehrere Jahrzehnte) hinzieht, ergibt es durchaus Sinn, statt nur Nutzungsrechte auch das Eigentum an den benötigten Flächen zu erhalten.

Da neben dem Kraftwerk- auch der Gewinnungsbetrieb nutzungsrechtlich abgesichert werden muss, sind für die benötigte Infrastruktur entsprechende Verträge mit Grundstückseigentümern abzuschließen. Dies betrifft vor allem das Erfordernis, für den durchaus mehrjährigen Aussolungsprozess der Kavernen den Abtransport der Sole sicherzustellen. Da dieser unter Umständen je nach Standort bis zu 50 km über Pipelines erfolgt (siehe Standortwahl), ist ein entsprechender Zeitaufwand bei der Flächensicherung vorzusehen. Erst nach Abschluss von verbindlichen Verträgen kann die soltechnische Auslegung als Bestandteil der Auslegung & Planung der Kaverne erfolgen.

- Antrag auf Erteilung einer Bewilligung und Genehmigungsverfahren

Die Vorbereitungen des Antrags auf Erteilung einer Bewilligung knüpfen direkt an die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Tests an. Auf Basis der gewonnenen Daten wird ein digitales geologisches Modell erstellt, mithilfe dessen die gebirgsmechanische Vorauslegung und Festlegung der einzelnen Parameter, wie Volumen, Form, Drücke usw., erfolgt. Da diese Schritte in enger Abstimmung mit der Kraftwerksdimensionierung erfolgen müssen, sind nach Abschluss dieses Arbeitsschrittes sämtliche Voraussetzungen erfüllt, um mit der Planung der Kavernenherstellung sowie dem Antragsverfahren für den Netzanschluss fortzufahren.

Sobald die soltechnische Auslegung der Kaverne, die vom Abschluss entsprechender Nutzungsverträge abhängige Planung und Auslegung der Soleentsorgung sowie die Dimensionierung der Bohr- und Erschließungstechnik erfolgt sind, wird wiederum ein Betriebsplan erstellt, in dem sämtliche betriebliche Maßnahmen, die im Rahmen der Kraftwerks- und Kavernenherstellung sowie während deren Betrieb durchgeführt werden, im Detail beschrieben werden. Der Betriebsplan ist bei der Genehmigungsbehörde einzureichen und wird von dieser zwecks Beteiligung an weitere Behörden, Verbände oder sonstige Träger öffentlicher Belange weitergeleitet. Je nach Untersuchungsumfang (UVP-Pflicht) ist bis zur Genehmigung mit einer Dauer von etwa einem Jahr zu rechnen.

Nach Genehmigungserteilung für den Betriebsplan des Kavernen- und Kraftwerksbetriebs beginnen die Herstellungsarbeiten der Kaverne und des Kraftwerks. Da bereits der Aussolungsprozess bis zu 3 Jahren dauern kann, wird eine gesamte Bauzeit von 5 Jahren angenommen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- Antragsverfahren Netzanschluss

Für den Antrag auf Netzanschluss nach KraftNAV bedarf es detailreicher technischer Parameter, die für die Prüfungen des Netzbetreibers benötigt werden. Da diese Parameter unter Umständen erst nach Abstimmung der Kraftwerks- und der gebirgsmechanischen Auslegung endgültig benannt werden können (z.B. das netztechnische Verhalten im Be- bzw. Entladebetrieb), ist eine verbindliche Netzanschlusszusage ggf. erst zu einem recht fortgeschrittenen Stadium möglich.

Damit die Realisierung und der Aufwand für die Netzanbindung des Kraftwerks dennoch rechtzeitig abgeschätzt werden können, ist es empfehlenswert, deutlich früher bereits Gespräche mit dem Netzbetreiber zu führen und ihn über die Planungen des Kraftwerks kontinuierlich zu informieren. So kann eine verlässliche Kooperationsgrundlage geschaffen werden und das eigentliche Antragsverfahren ggf. etwas vereinfachen bzw. den Abstimmungsprozess verkürzen.

### 3.4.3 Standortspezifischer Bezug zur Standortauswahl

Die in Tabelle 3 bewerteten potentiellen Standorte bieten mit Blick auf die Entwicklung eines DLSK-Kraftwerks unterschiedliche Voraussetzungen. Im Einzelnen sind diese Aspekte der Bewertungstabelle in Anhang A zu entnehmen. An dieser Stelle sollen lediglich einige Besonderheiten hervorgehoben werden, die es bei der Standortentwicklung nach zuvor genanntem Prozess zu berücksichtigen gilt. Durch die Bewertung lassen sich die Untersuchungsgebiete auf eine Vorauswahl von 3 bis 5 guten Standorten beschränken, auf die hier näher eingegangen wird.

An den Standorten Belmhusen-Kuden-Süderhastedt und Marne-Heide-Süderstapel sind bereits diverse Untergrunderkundungen in der Vergangenheit durchgeführt worden. So liegen für das Gebiet Belmhusen Bohrerergebnisse bei der RWE Dea AG vor, mit Hilfe derer der Arbeitsschritt Aufsuchung unter Umständen verkürzt bzw. im Aufwand reduziert werden könnte. Auch ist es möglich, dass anhand der Ergebnisse bereits vorab Schlüsse gezogen werden können, die für die weitere Auslegung und Dimensionierung des Standorts hilfreich sind. Eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit den Inhabern der Untersuchungsergebnisse ist daher empfehlenswert, um diesbezüglich Projektpartner, mindestens jedoch aussagekräftige Unterlagen, zu akquirieren.

In der Salzformation Marne-Heide-Süderstapel hat es in der Vergangenheit neben Erkundungsbohrungen sogar bereits erste Kavernenbohrungen gegeben. Die Kavernen wurden im Zusammenhang mit dem Erdölraffineriebetrieb Hemmingstedt im Bereich Heide erschlossen und belegen die grundsätzliche Eignung des Salzstocks für derartige Vorhaben. Um weitere Analysen durchführen zu können, ist es in diesem Fall ebenfalls ratsam, bereits im Rahmen der Vorarbeiten einen Kontakt zu den jeweiligen

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Rechte- und Ergebnisinhavern herzustellen und Daten zu akquirieren. Auch eine Kooperation mit den Stadtwerken Heide, Rechteinhaberin einer Bewilligung zur Gewinnung von Sole, ist denkbar.

Mit Blick auf das Genehmigungsverfahren, insbesondere die Betriebsplangenehmigungen, sind an mehreren Standorten die erhöhten Anforderungen an den Naturschutz zu berücksichtigen. So befinden sich etwa an den Standorten Marne-Heide-Süderstapel, Oldenswort Nord und Lägerdorf-Krempe Naturschutzgebiete in der Umgebung potentieller DLSK-Standorte. Dies spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn durch diese Gebiete ein etwaiger temporärer Pipelinebetrieb für den Abtransport der Sole zu führen ist. Der Immissionsschutz ist im Genehmigungsverfahren nach BBergG mit inbegriffen, was dazu führen kann, dass sich die Laufzeiten der Verfahren durch erhöhte Anforderungen verlängern. Äquivalent gilt dies auch bei der Tangierung von Wasserschutzgebieten, die sich zum Beispiel an den Standorten Marne-Heide-Süderstapel und Lägerdorf-Krempe befinden.

Von den nach Tabelle 3 fünf besten potentiellen Standorten liegen vier Untersuchungsgebiete im westlichen Schleswig-Holstein, sodass die Soleentsorgung durch Einleitung in die Nordsee erfolgen würde. Da hierbei jedoch durch die Querung des Wattenmeers ebenfalls erhöhte naturschutz- bzw. immissionsschutzfachliche Bestimmungen zu berücksichtigen wären, sollten etwaige Alternativen ebenfalls betrachtet werden. An den Standorten Belmhusen-Kuden-Süderhastedt und Marne-Heide-Süderstapel kann zum Beispiel die räumliche Nähe zum Industriestandort Brunsbüttel Kooperationen ermöglichen, bei denen eine Soleeinleitung in Gewässer vermieden werden kann. Eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit möglichen Abnehmern von Sole ist daher ausdrücklich zu empfehlen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 4 Technologisches Spektrum

Das Prinzip der Druckluftspeicherung umfasst die Kompression von Luft zur Speicherung elektrischer Energie, die Vorhaltung dieser komprimierten Luft im Speicher sowie die Expansion der Luft zur Rückgewinnung der elektrischen Energie. Grundsätzlich kann dieser Prozess durch eine Vielzahl verschiedener Kraftwerkskonzeptionen erreicht werden, die sich jedoch hinsichtlich ihrer Eignung für ein Druckluftspeicherkraftwerk in Schleswig-Holstein unterscheiden.

### 4.1 Betrachtete Konzepte und Klassifizierung

Abbildung 4 zeigt die im Rahmen der Arbeiten vorgenommene Klassifizierung der zur Bewertung ausgewählten Konzeptionen. Die Einteilung der Konzepte erfolgt zunächst nach 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 sind. 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 Umgebungsluft arbeitenden Systemen sind geschlossene Systeme denkbar, in denen Luft in einem geschlossenen

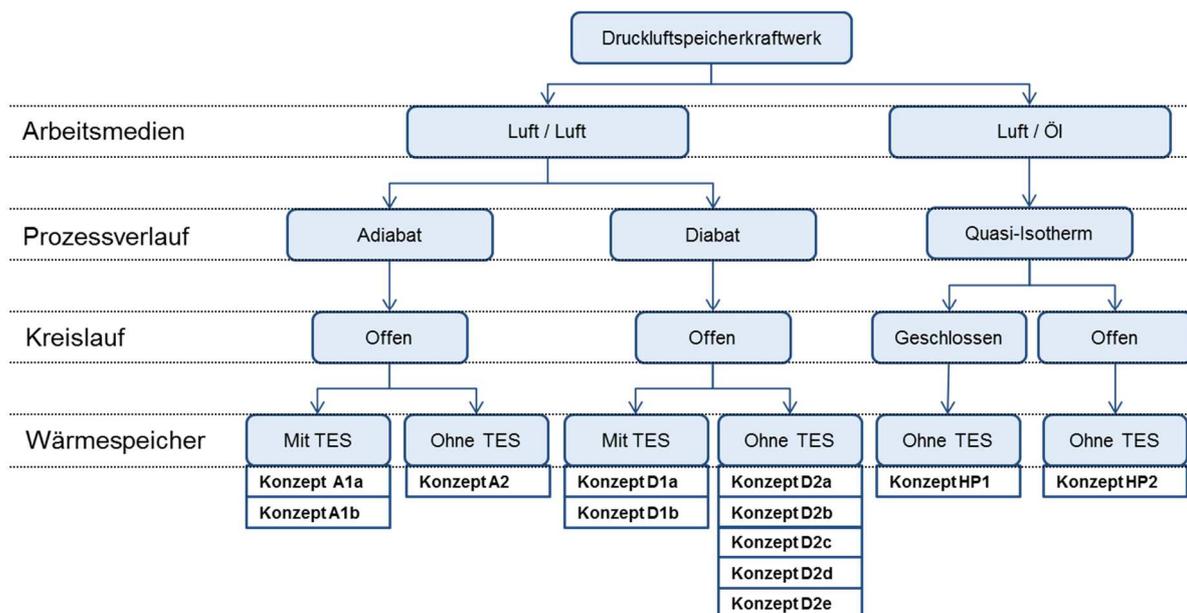


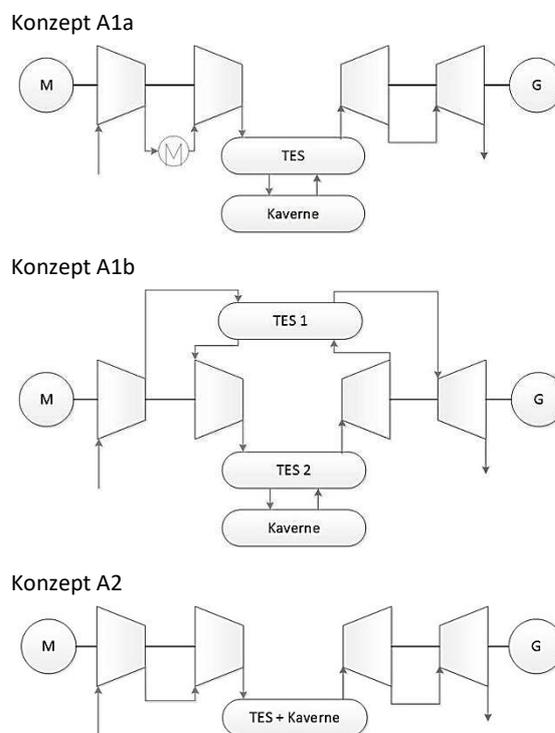
Abbildung 4: Klassifizierung der Druckluftspeicherkonzepte

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Behälter unter bestimmtem Vordruck komprimiert wird [7]. Eine letzte Untergliederung wird nach Einbeziehung eines thermischen Speichers (TES) vorgenommen.

In diese Systematik lassen sich, wie in der Abbildung 4 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 vorläufigen Berechnungsdaten im Anhang C.

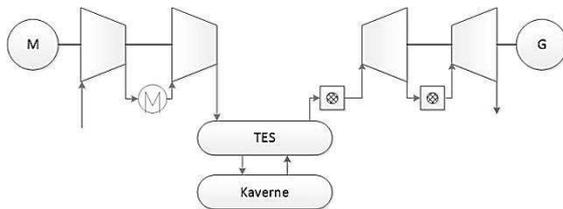
Die adiabaten DLSK wurden in der Technologievorauswahl in drei Varianten untersucht. Die entsprechenden Schaltbilder sind in Abbildung 5 dargestellt. Das Konzept A1a beschreibt dabei ein klassisches adiabates Druckluftspeicherkraftwerk mit einem thermischen Speicher (TES) und einer geringfügigen Zwischenkühlung nach der ersten Verdichtung, die den Zweck erfüllt, 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 [7] [8].



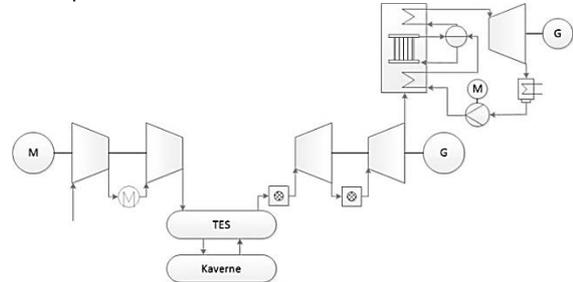
**Abbildung 5: Schaltbilder der adiabaten Konzepte**

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

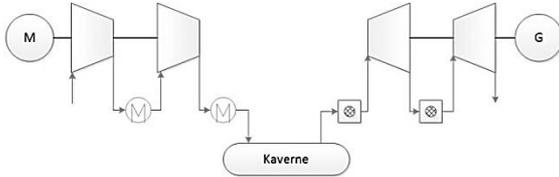
Konzept D1a



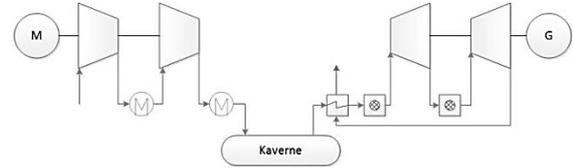
Konzept D1b



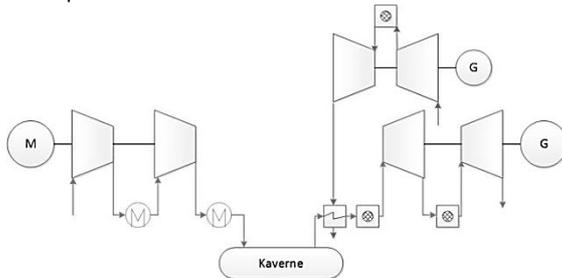
Konzept D2a



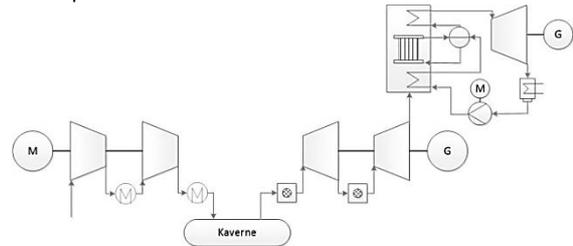
Konzept D2b



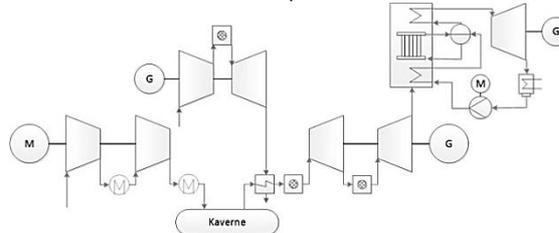
Konzept D2c



Konzept D2d



Konzept D2e



**Abbildung 6: Schaltbilder der diabaten DLSK**

Eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten bietet das diabate DLSK (siehe Abbildung 6). 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

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

(Konzept D2c), eines Dampfteils (Konzept D2d) oder einer Kombination der beiden letzteren möglich (Konzept D2e) [9] [7] [10].

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.

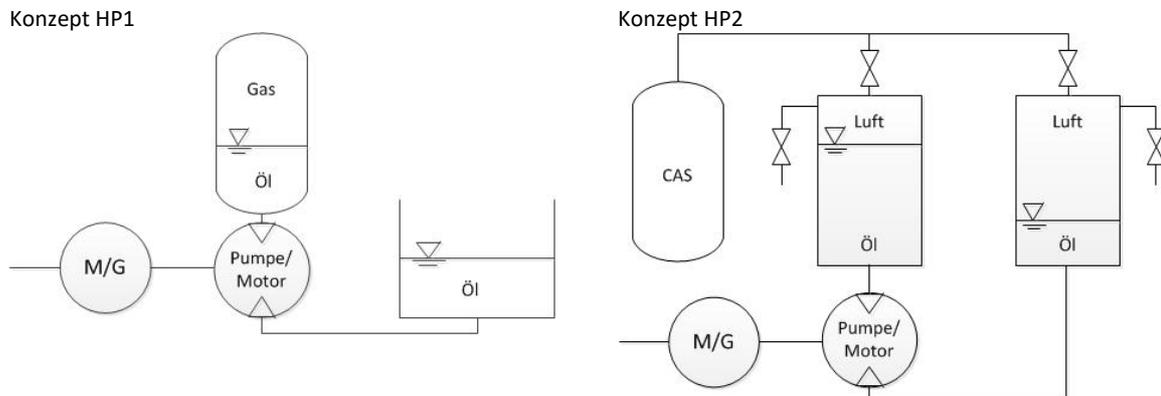
Sobald dagegen ein TES vor der ersten Expansion eingesetzt wird, verliert ein Rekuperator dadurch an Attraktivität, dass der TES die Nutzung der Abgasenergie durch den Rekuperator erheblich einschränkt. Aus gleichem Grund bietet sich auch die Kombination von TES und Gasturbine nicht an.

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. Mögliche technische Auslegungen sind in Abbildung 7 dargestellt. 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 [11].

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“-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 7: Schaltbilder der hydropneumatischen Konzepte**

Prinzip zu verdichten [11], und benötigen somit ein wesentlich geringeres Ölvolumen. In der weiteren Bewertung wurde zunächst das geschlossene System näher betrachtet, da es aufgrund höherer Ausgangsdrücke und eines dem isothermen Verlauf näheren Prozess bei ansonsten weniger aufwendigem 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.

## 4.2 Methodik zur Konzeptvorauswahl

Die Auswahl der aussichtsreichsten technischen Konzepte zur Druckluftspeicherung erfordert im ersten Schritt wie auch bei der Standortauswahl die Anwendung einer multikriteriellen Bewertungsmethodik.

Dazu erfolgt die Aufstellung von entscheidungsrelevanten Bewertungskriterien eines DLSK-Konzeptes hinsichtlich der Standorterfordernisse, der technologischen Erfordernisse und Charakteristika sowie der Effizienz (siehe Tabelle 4). Die DLSK Konzepte können bezüglich der jeweiligen Kriterien mit Werten zwischen 0 – 10 evaluiert werden. Mithilfe eines Gewichtungsschemas und unter Berücksichtigung übergeordneter Metakriterien führt die Bewertung zur Auswahl der aussichtsreichsten Druckluftspeicherkonzepte. Details zur Bepunktung der jeweiligen Kriterien befinden sich im Anhang C. In den folgenden Absätzen werden die Grundsätze bei der Vergabe der Punkte erläutert.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 4: Kriterien zur DLSK-Konzeptbewertung**

<b>Standorterfordernisse</b>	Geologische Erfordernisse	Solependelbecken
		Erforderlichkeit einer Kaverne
		Energiedichte der Kaverne
	Infrastrukturelle Erfordernisse	Erdgasanschluss
		Fernwärmeanschluss
		Industrieabwärmeanschluss
<b>Technologische Erfordernisse</b>		Allg. Machbarkeit
		Komponentenverfügbarkeit
		Systementwicklungsstatus
		Anlaufzeit
		Betrieb als Kraftwerk
		Brennstoffeinsatz
		Kapazitätsbegrenzung
	Kosten	
<b>Effizienz</b>		Effizienz nach Restwertmethode
		Exergetische Effizienz

### **Standorterfordernisse**

Die dargestellten Konzepte zur Druckluftspeicherung bedürfen unterschiedlicher Voraussetzungen hinsichtlich des Standortes. Je mehr Anforderungen von einem Konzept an den Standort gestellt werden, desto höher gestaltet sich der Realisierungsaufwand und desto geringer wird die allgemeine Eignung eingestuft. Die standorttechnischen Voraussetzungen betreffen dabei insbesondere geologische und infrastrukturelle Erfordernisse.

Die geologischen Erfordernisse werden mittels dreier Kriterien bewertet, die für die Konzepte jeweils auf die notwendige Beschaffenheit des Untergrundes abzielen. Für die angestrebten Leistungsklassen kann eine isobare Prozessführung beispielsweise nur mithilfe eines Solependelbeckens realisiert werden. Auch die generelle Erforderlichkeit einer Kaverne als Massenspeicher sowie die Energiedichte als Indiz für das benötigte Speichervolumen werden für alle Konzepte separat bewertet.

Infrastrukturelle Anforderungen ergeben sich aus zum Teil benötigten Erdgasanschlüssen für diabate DLSK Konzepte oder bei Nutzung von industrieller Abwärme im Ausspeicherprozess. Die Nutzung der abgeführten Wärme während der Verdichtung erfordert einen Anschluss an die Verbraucher z.B. über das Fernwärmenetz.

### **Technologische Erfordernisse**

In der Kategorie der technologischen Erfordernisse zählt zum einen die allgemeine Machbarkeit der Prozessführung, die aufgrund thermodynamischer und kraftwerkstechnischer Aspekte zumindest für

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

einige Konzepte als eingeschränkt eingestuft werden kann. Ebenso wichtig für die praktische Realisierbarkeit sind die Komponentenverfügbarkeit sowie der Systementwicklungsstatus. Unterschiede treten hier beispielsweise bei bereits umgesetzten Konzepten, umfassend erforschten Ansätzen und Konzepten in der Grundlagenforschung auf. Je höher der Entwicklungsstand des spezifischen Konzeptes in diesen Bereichen ist, desto interessanter ist die Technologie für die folgenden Untersuchungen.

Als weiteres Kriterium dient die Anlaufzeit des DLSK, die die Betriebsflexibilität beeinflusst und entscheidend auch den Betrieb am Regelleistungsmarkt ermöglicht. Einige Konzepte können zudem theoretisch auch als Kraftwerk betrieben werden, was wiederum eine gesteigerte Betriebsflexibilität bedeutet. Als weiterhin positiv bewertet wird ein geringer spezifischer Brennstoffverbrauch sowie ein weiter realisierbarer Leistungsbereich. Die Investitionskosten sind ein erstes Indiz für die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Konzepte. Betriebskosten werden dabei bezüglich der Vorauswahl vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass Brennstoffkosten den größten Anteil ausmachen und diese bereits indirekt im spezifischen Verbrauch eingeflossen sind.

### **Effizienz**

Die Effizienz kann für Kraftwerksprozesse generell nach verschiedenen Wirkungsgradansätzen bewertet werden. Für die Technologievorauswahl wird die Effizienzbewertung bei Volllast und maximalem Druck im Massenspeicher durchgeführt. Daher werden Ansätze mit Bezug auf Wärmeströme und Leistungen angewendet.

Im Zuge der dargestellten Arbeiten wird zum einen die Speicherbewertung nach der Exergiemethode, welche den qualitativen Unterschied zwischen Wärmeströmen und Leistungen erfasst, nach der folgenden Formel gewählt.

$$\zeta = \frac{\dot{E}x_{exp}}{\dot{E}x_{cmp} + \dot{E}x_{exp\_in}}$$

Zum anderen wird ein energetischer Restwertansatz herangezogen. Dieser geht davon aus, dass die zugeführte Brennstoffenergie auch in einem anderen Referenzkraftwerk mit einem Referenzwirkungsgrad nutzbar gewesen wäre. Daher wird die Ausspeicherleistung um die Leistung aus dem Referenzkraftwerk reduziert [9].

$$\eta_{CAES_{ref}} = \frac{P_{exp} - \eta_{pp\_ref} \cdot \dot{Q}_{exp\_in}}{P_{cmp}}$$

Die oben definierten Effizienzkennzahlen werden aus einer ersten thermodynamischen Berechnung abgeleitet. Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wird zunächst das stationäre Betriebsverhalten der

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Kraftwerkskonzepte bei Vollast und maximalem Betriebsdruck untersucht. Als Arbeitsmedium wird trockene Luft als ideale Mischung realer Gase verwendet. Verdichter und Turbinen werden mithilfe isentroper Wirkungsgrade innerhalb der technisch möglichen Temperaturgrenzen und typischen Druckstufungen analysiert. Die Brennkammern werden zunächst durch eine externe Wärmezufuhr ersetzt. Betriebsgrenzen der Kaverne bezüglich Maximaltemperatur und –druck sowie Druckverluste in sonstigen Einbauten werden berücksichtigt. Die detaillierte Beschreibung der zu Grunde gelegten thermodynamischen und kraftwerkstechnischen Gesetzmäßigkeiten befindet sich darüber hinaus im Anhang D.

### 4.3 Ergebnisse der Konzeptvorauswahl

Die beschriebenen Konzepte zur Druckluftspeicherung wurden hinsichtlich der zuvor skizzierten Kriterien zu den Kategorien Standort, der Technologie und der Effizienz beurteilt. Tabelle 5 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 5: Konzeptbewertung bezüglich der Standorterfordernisse

	Geologische Erfordernisse			Infrastrukturelle Erfordernisse				100 %
	Solependel- becken	Kaverne		Anschluss an:				
		Erforderlich- keit	Energie- dichte	Erdgas	Fernwärme	Industrie- abwärme		
	10 %	25 %	25 %	20 %	10 %	10 %		
<b>A1a</b>	10	0	5	7	10	10	<b>5,65</b>	
<b>A1b</b>	10	0	6	7	10	10	<b>5,90</b>	
<b>A2</b>	10	0	0	7	10	10	<b>4,40</b>	
<b>D1a</b>	10	0	6	0	10	10	<b>4,50</b>	
<b>D1b</b>	10	0	10	0	10	10	<b>5,50</b>	
<b>D2a</b>	10	0	6	0	10	10	<b>4,50</b>	
<b>D2b</b>	10	0	10	0	10	10	<b>5,50</b>	
<b>D2c</b>	10	0	6	0	10	10	<b>4,50</b>	
<b>D2d</b>	10	0	10	0	10	10	<b>5,50</b>	
<b>D2e</b>	10	0	10	0	10	10	<b>5,50</b>	
<b>HP1a</b>	10	2	1	10	10	10	<b>5,75</b>	
<b>HP1b</b>	10	2	0	10	10	10	<b>5,50</b>	

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Ein deutlich abweichendes Bild ergibt sich bei der Bewertung der Kategorie Technologie (Tabelle 6), 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 Forschungsaufwand bedeutet und den alleinigen Kraftwerksbetrieb im adiabaten System ausschließt, hat, wie in Tabelle 6 zu sehen ist, einen negativen Einfluss auf die betreffenden Konzepte.

**Tabelle 6: Konzeptbewertung bezüglich der Technologiekriterien**

	Allg. Machbarkeit	Komp.-verfügbarkeit	Systementwicklungstatus	Anlaufzeit	Betrieb als Kraftwerk	Brennstoffeinsatz	Kapazitätsbegrenzung	Kosten	
	20 %	20 %	20 %	5 %	10 %	10 %	5 %	10 %	100 %
<b>A1a</b>	6	5	6	3	0	10	8	4	<b>5,35</b>
<b>A1b</b>	6	5	5	3	0	10	8	4	<b>5,15</b>
<b>A2</b>	3	2	2	3	0	10	6	6	<b>3,45</b>
<b>D1a</b>	6	5	4	3	0	9	6	5	<b>4,85</b>
<b>D1b</b>	6	5	4	3	0	4	6	6	<b>4,45</b>
<b>D2a</b>	10	10	10	3	10	7	6	7	<b>8,85</b>
<b>D2b</b>	10	10	10	3	10	3	6	8	<b>8,55</b>
<b>D2c</b>	10	10	2	3	10	1	6	7	<b>6,65</b>
<b>D2d</b>	10	7	4	3	10	1	6	7	<b>6,45</b>
<b>D2e</b>	10	7	0	3	10	0	6	7	<b>5,55</b>
<b>HP1a</b>	10	10	6	6	0	10	10	0	<b>7,00</b>
<b>HP1b</b>	10	10	6	6	0	10	10	0	<b>7,00</b>

Die Effizienzkriterien umfassen Wirkungsgrade nach der energetischen Restwertmethode mit angenommenen Referenzwirkungsgraden von typischen Spitzenlastkraftwerken. 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. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des exergetischen Wirkungsgrades weisen die adiabaten Konzepte mit thermischem Speicher deutliche Effizienzvorteile gegenüber den übrigen Konzepten auf.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 7: Konzeptbewertung bezüglich der Effizienzkriterien**

	Wirkungsgrad nach energetischer Restwertmethode			Exergetischer Wirkungsgrad	
	$\eta_{ref} =$			40%	100 %
	0,4	0,5	0,6		
	10 %	40 %	10 %		
<b>A1a</b>	8	8	8	9	<b>8,40</b>
<b>A1b</b>	9	9	9	10	<b>9,40</b>
<b>A2</b>	6	6	6	9	<b>7,20</b>
<b>D1a</b>	8	8	7	8	<b>7,90</b>
<b>D1b</b>	10	9	6	4	<b>6,80</b>
<b>D2a</b>	4	2	1	3	<b>2,50</b>
<b>D2b</b>	8	3	0	3	<b>3,20</b>
<b>D2c</b>	8	2	0	3	<b>2,80</b>
<b>D2d</b>	9	4	0	4	<b>4,10</b>
<b>D2e</b>	10	4	0	0	<b>2,60</b>
<b>HP1a</b>	8	8	8	8	<b>8,00</b>
<b>HP1b</b>	4	4	4	4	<b>4,00</b>

Zusammenfassend resultiert eine Rangfolge der Systeme, welche in Tabelle 8 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 polytrophen Prozesses von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

**Tabelle 8: Rangfolge der Konzepte zur Druckluftspeicherung**

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

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

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 A1a für die weitere Analyse und Simulation im Energieversorgungssystem. Ebenso werden das diabate DLSK mit thermischem Speicher D1a wie auch das diabate Konzept mit Rekuperator D2b 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.

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 5 Betriebsmodell für Druckluftspeicherkraftwerke

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Schritte der Modellentwicklung für die Betriebsoptimierung von Druckluftspeicherkraftwerken beschrieben. Dafür werden in der Vorplanung der Modellentwicklung zunächst die Ziele und zu erfüllenden Anforderungen definiert. Darauf aufbauend wird im nächsten Schritt ausführlich auf die Modellierung eingegangen. Die entwickelten Modelle werden anschließend durch eine geeignete Softwarelösung implementiert und auf Plausibilität überprüft.

### 5.1 Methodik

In einem Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien stellt sich zunehmend die Frage, wie dieses System auf technischer und ökonomischer Ebene optimiert werden kann. So ist innerhalb der letzten 20 Jahre die Anzahl wissenschaftlicher Artikel, in denen Optimierungsalgorithmen auf das Themenfeld der erneuerbaren Energien angewandt wurden, überproportional gestiegen [12]. Dabei hängt die Auswahl des eingesetzten Verfahrens stark vom Einzelfall ab. Dennoch haben sich in verschiedenen Bereichen mit ähnlichen Fragestellungen gewisse Standardverfahren etabliert.

Für die Betriebsoptimierung oder auch Einsatzplanung (auf Englisch Unit Commitment (UC)) von Kraftwerken und Speichern am Markt existieren diverse Verfahren. Ein breiter Überblick über die verschiedenen Methoden wird in [13] gegeben, während [14] verschiedene Verfahren mit dem Fokus auf der kurzfristigen Betriebsoptimierung untersucht. Neben der Anwendung regelbasierter Verfahren (Heuristiken) und dynamischer Programmierung, wie sie beispielsweise in [15] verwendet werden, kommt in der Betriebsoptimierung häufig die lineare, gemischt-ganzzahlige und nichtlineare Programmierung zum Einsatz [16] [17].

Dabei ist der Aufwand zur Lösung eines gemischt-ganzzahligen Problems höher als bei einem rein linearen Problem. Kommen zusätzlich noch Nichtlinearitäten hinzu, erhöht sich dieser nochmals [18]. Häufig können nichtlineare Probleme jedoch durch spezielle Ansätze oder vereinfachende Annahmen linear hinreichend genau abgebildet werden [19]. Aufgrund der häufigen Anwendung im Bereich der Kraftwerkeinsatzplanung und der guten Verfügbarkeit von übertragbarer Fachliteratur [20] [21] soll im Rahmen dieses Projekts für die Betriebsoptimierung das Verfahren der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung verwendet werden.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 5.2 Modellierung

### 5.2.1 Prozess der Modellentwicklung

Die Modellentwicklung soll innerhalb einer klar strukturierten, inkrementellen Vorgehensweise erfolgen. Daher wird der Entwicklungsprozess in drei aufeinander aufbauende Schritte aufgeteilt. Im ersten Schritt werden die Ziele und Anforderungen für die Modellentwicklung definiert. Anschließend wird das Modell abstrakt in mathematischer Form dargelegt und abschließend praktisch implementiert sowie auf Plausibilität getestet.

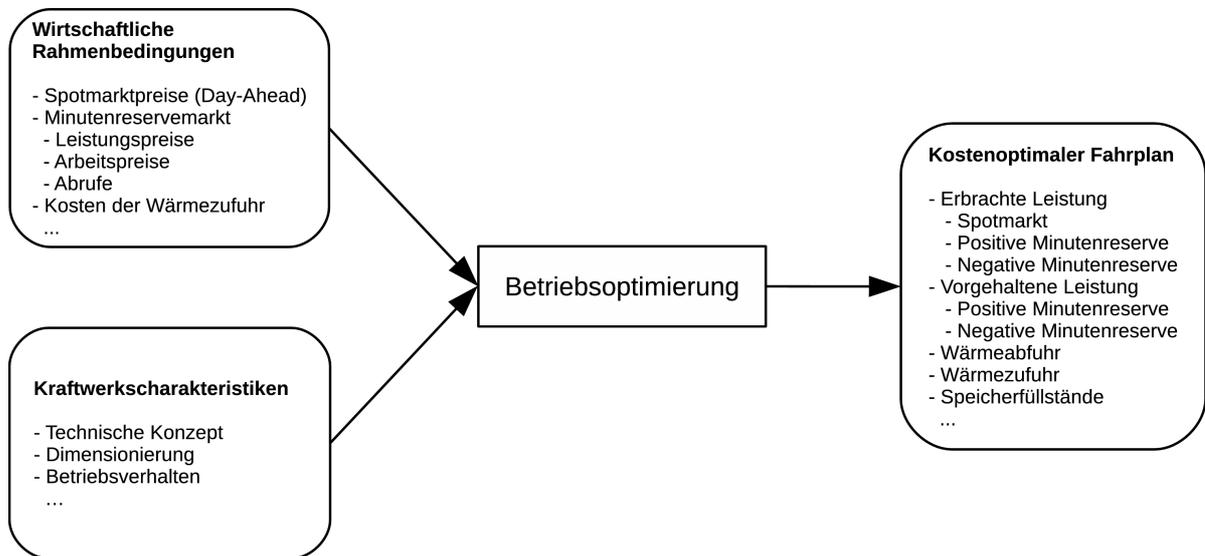
Die Trennung der Schritte ermöglicht es die allgemeingültige mathematische Beschreibung des Modells auf Basis der zuvor definierten Ziele und Anforderungen, unabhängig von der späteren Implementierung, vorzunehmen und zu beschreiben. So könnte das formulierte Modell beispielsweise von Außenstehenden unabhängig unter Zuhilfenahme einer anderen Modellierungsumgebung implementiert werden. Die gewählte Vorgehensweise unterstützt somit eine gute wissenschaftliche Praxis im Bereich des Scientific Computing [22].

### 5.2.2 Zielsetzung und Anforderungen

Das Modell soll es erlauben verschiedene Druckluftspeicherkonzepte in ihrem Betriebsverhalten am Spot- und Regelleistungsmarkt abzubilden. Dabei soll das Betriebsergebnis durch die Zwischenspeicherung und anschließende Vermarktung von Strom sowie durch die Bereitstellung von Regelleistung maximiert werden. Als konkrete Betriebsszenarien sollen die Vermarktung der Leistung am Day-Ahead Spotmarkt sowie die Teilnahme am Markt für positive und negative Minutenreserve abgebildet werden. Der Terminmarkt wird hingegen vernachlässigt, da dieser größtenteils von den erwarteten Preisentwicklungen des Spotmarktes abhängt und somit von keinem monetären Zusatznutzen auszugehen ist [23]. Die Teilnahme an den verschiedenen Märkten soll zudem sowohl einzeln als auch parallel möglich sein.

Als Eingangsdaten des Modells werden die Parameter eines konkreten Kraftwerks und Preiszeitreihen für die verschiedenen Märkte verwendet. Die Kraftwerksparameter können dabei aus thermodynamischen Berechnungen oder einschlägiger Fachliteratur stammen, während die Preiszeitreihen entweder durch historischen Quellen, Prognosen oder übergeordneten Energiesystems Simulationsmodelle vorgegeben werden. Zudem müssen anfallende Brennstoffkosten der Wärmezufuhr und etwaige Zusatzkosten für den Bezug von Strom berücksichtigt werden. Als Ausgangsdaten sollen Zeitreihen für einen

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 8: Skizzierung des Modells zur Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks**

kostenoptimalen Fahrplan des Kraftwerks an verschiedenen Märkten generiert werden. Abbildung 8 zeigt eine Skizzierung des Modells nach dem Prinzip der Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe (EVA-Prinzip).

Für die Optimierung an den Märkten soll zunächst von einer perfekten Voraussicht (perfect foresight) auf die zukünftigen Preise ausgegangen werden. 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. Auch Handelsstrategien, wie etwa Gebotsstrategien am Regelleistungsmarkt, werden vorerst nicht betrachtet.

Neben der grundsätzlichen Erfüllung der Zielsetzung werden noch weitere Anforderungen an das Modell gestellt. Diese betreffen die Umsetzung des Modells im Hinblick auf die konkrete Modellierung und die Wiederverwendbarkeit. Daher werden sie im folgenden Abschnitt getrennt von der eigentlichen Zielsetzung erläutert.

Die Modellierung soll so generisch erfolgen, dass verschiedene Konzepte dargestellt werden können. Dies bedeutet, dass die Modellierung nicht bis auf die Komponentenebene erfolgt, sondern die einzelnen Teile des Kraftwerks als eine Schaltung verschiedener Komponenten betrachtet werden. Zusätzlich soll das Modell ausgehend von dieser Abbildungsart einfach erweiterbar sein. So sollen ohne tiefgreifende Anpassungen auch andere Energiespeicherkonzepte integriert werden können.

Die mathematische Beschreibung und Erstellung des Modells soll dabei strikt vom nachgelagerten Lösen des Problems getrennt werden. Dies stellt sicher, dass das Problem im ersten Schritt unabhängig von der verwendeten Software formuliert wird. Weiterhin soll die Trennung der Modellerstellung vom

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

späteren Lösen die Anwendung verschiedener Solver erlauben. Dadurch soll beispielsweise beim Auftreten etwaiger Nichtlinearitäten die Verwendung eines Solvers für quadratische Probleme möglich sein.

Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Zeitaufösungen stellt eine wesentliche Anforderung an das Modell dar. Diese ergibt sich unter anderem daraus, dass diverse an den entsprechenden Märkten handelbare Produkte dargestellt werden müssen. So erfolgt beispielsweise die Leistungsvorhaltung am deutschen Markt für Minutenreserve in vierstündigen Intervallen, während die Abrufe innerhalb eines Viertelstundenrasters erfolgen. In anderen Ländern gelten am Regelleistungsmarkt hingegen andere Verbindlichkeiten für die gehandelten Produkte. Weiterhin bietet auch der Spotmarkt die Möglichkeit mit verschiedenen Produkten zu handeln. Auch wenn ein Speicherkraftwerk in erster Linie auf kurze Produkte zu Spitzenlastzeiten abzielen wird, sollte die Möglichkeit vorbehalten werden auch andere Produkte zu platzieren.

Die im Rahmen der Modellierung zu erfassenden Kosten und Erlöse sollen sich lediglich auf den Betrieb des Kraftwerks beziehen. Hier fallen sowohl Kosten für die zugeführte Wärme, als auch für den am Spotmarkt bezogenen Strom an. Weiterhin sind für den aus dem Netz bezogenen Strom, auch im Falle der Lieferung negativer Regelleistung, Letztverbraucherabgaben zu entrichten. Den Kosten gegenüber stehen die Erlöse für den am Spotmarkt verkauften Strom und der Vorhaltung sowie Erbringung von Minutenreserve.

Neben der Möglichkeit einer manuellen Parametrierung soll die Übergabe der benötigten Eingangszeitreihen an das Modell sowie das Speichern der Optimierungsergebnisse über eine Datenschnittstelle erfolgen. Diese soll Flexibilität hinsichtlich der verwendeten Datenformate bieten. So könnte es beispielsweise für ein Projekt von Vorteil sein, die Eingangsdaten im CSV-Format bereitzustellen, während in einem anderen Projekt eine relationale Datenbank präferiert wird. Beide Fälle sollen im Rahmen der Modellerstellung beachtet werden, was voraussetzt, dass das Modell und die Daten strikt voneinander getrennt werden. Über diese Datenschnittstelle soll gleichermaßen der Datenaustausch mit übergeordneten Energiesystemmodellen möglich sein. So wäre es beispielsweise möglich die für zukünftige Szenarien eines Energiesystems berechneten Preiszeitreihen als Eingangsparameter des Modells zu verwenden.

Die einfache Benutzbarkeit und Zugänglichkeit des Modells stellt eine weitere wesentliche Anforderung dar. Demnach sollen auch Benutzer ohne tiefgehende Modellierungs- und Programmierkenntnisse das Modell nach kurzer Einarbeitungszeit benutzen und mit den Ergebnissen weiterarbeiten können. Zudem soll der Quelltext für etwaige Änderungen oder Erweiterungen zugänglich gestaltet sein. Daher wird als zu verwendende Sprache für die Programmierung sowie ausführliche Kommentierung und Dokumentation Englisch festgelegt.

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Weiterhin soll die Implementierung des Modells durch frei verfügbare und nutzbare Software erfolgen. Dies schließt wiederum nicht aus, dass für Teilkomponenten des Modells auf kommerzielle Produkte zurückgegriffen wird. Trotzdem sollte für die Grundfunktionalität stets eine freie Variante zur Verfügung stehen. So wird sichergestellt, dass das Modell auch in anderen Projekten am Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) oder externen Projekten ohne entsprechende Lizenzmodelle genutzt und angepasst werden kann.

### 5.2.3 Allgemeiner Modellaufbau

Aus den im vorigen Abschnitt definierten Anforderungen ergibt sich der logische Aufbau für die Gesamtstruktur des Modells zur Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks. Diese setzt sich aus Einzelkomponenten des Modells sowie den zwischen diesen notwendigen Datenflüssen zusammen. Abbildung 9 zeigt die aus den Modellanforderungen resultierende Gesamtstruktur.

Es wird deutlich, dass der Optimierungsteil aus vier Einzelschritten besteht. Zunächst werden die Eingangsdaten aus der manuellen Parametrierung und den über die Datenschnittstelle geladenen Zeitreihen aggregiert. Diese werden dann an das Modell übergeben, das wiederum aus der mathematischen Beschreibung hervorgeht. Das mit den Daten parametrisierte, mathematische Modell wird an-

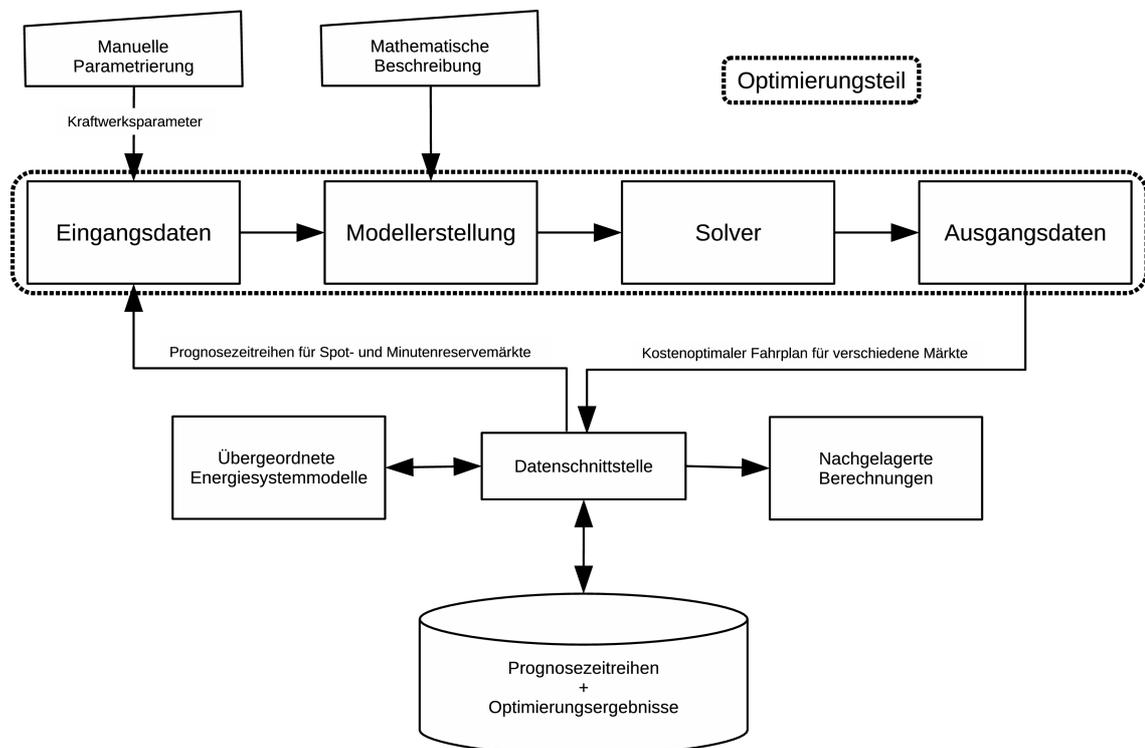


Abbildung 9: Gesamtstruktur des Modells mit den Einzelkomponenten und Datenflüssen

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

schließlich zum Lösen an den Solver übergeben. Im letzten Schritt erstellt der Solver die Ausgangsdaten bzw. Optimierungsergebnisse. Diese können dann über die Datenschnittstelle gespeichert werden. Weiterhin können über die Datenschnittstelle Marktpreise aus übergeordneten Energiesystemmodellen importiert oder Daten für nachgelagerte Berechnungen, wie etwa die Bestimmung von wirtschaftlichen Betriebsergebnissen, exportiert werden.

### 5.2.4 Abstraktes Modell der Technologie

Der vereinfachte Speicherzyklus eines Druckluftspeicherkraftwerks besteht für alle Konzepte aus dem Kompressionsvorgang, dem Expansionsvorgang sowie der mechanischen Massenspeicherung und optional der thermischen Speicherung. Unter der Prämisse, dass der Fokus des Modells auf einer Betriebsoptimierung liegt und lediglich die wesentlichen physikalischen Restriktionen der Kraftwerkskonzepte abgebildet werden müssen, basiert die weitere Modellierung auf der Aufteilung des Speicherzyklus in diese Elemente.

Im nächsten Schritt wird die benötigte Abbildungstiefe des Modells definiert. Hier ist eine Abbildung des Kraftwerks über Energiebilanzen und Massenströme wie bei anderen thermische Kraftwerken [19] zwar generell möglich, aber entsprechend aufwändig. Vor allem ist diese aber ungünstig im Hinblick auf die Anwendung des Modells auf andere Speicher. Stattdessen werden die einzelnen Teile des Kraftwerks abstrahiert und damit eine einheitliche Basis für die mathematische Modellierung geschaffen. Das abstrakte Kraftwerksmodell ist Abbildung 10 dargestellt.

Der abstrahierte Prozess beschreibt zunächst den Bezug elektrischer Leistung zum Antrieb des Kompressionsteils  $P_{cmp}$  aus dem Netz. Dieser teilt sich zum einen in den aus dem Kompressionsteil abgeführten Verlust-  $\dot{Q}_{cmp\_out}$  sowie einen für den thermischen Speicher nutzbaren Wärmestrom  $\dot{Q}_{tes\_in}$  und zum anderen in einen in einen abstrahierten Einspeicherexergiestrom für den Massenspeicher  $\dot{E}x_{cas\_in}$  auf. Aus dem Speicherteil kann wiederum der abstrahierte Ausspeicherexergiestrom  $\dot{E}x_{cas\_out}$  entnommen werden. Dieser geht zusammen mit dem zugeführten Wärmestrom  $\dot{Q}_{exp\_in}$  bzw. im Falle eines thermischen Speicheranteils mit dem Wärmestrom  $\dot{Q}_{tes\_out}$  aus dem thermischen Speicher, in

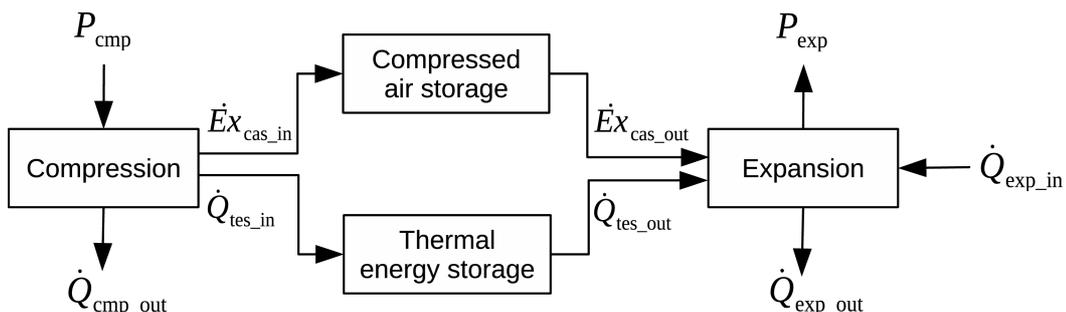


Abbildung 10: Abstraktes Kraftwerksmodell als Grundlage der mathematischen Beschreibung

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

den Expansionsteil ein, aus dem wiederum ein Verlustwärmestrom  $\dot{Q}_{exp\_out}$  abgeführt wird. Als weitere Ausgangsgröße des Expansionsteils kann wiederum die elektrische Leistung des Generators  $P_{exp}$  in das Netz eingespeist werden. Die Zusammenhänge der einzelnen Größen untereinander werden detailliert innerhalb des nächsten Abschnitts erläutert.

### 5.2.5 Mathematische Modellierung

Nach der Abstraktion der einzelnen Teile des Kraftwerks wurde ein mathematisches Modell für die Betriebsoptimierung an den verschiedenen Märkten entwickelt. Hierfür müssen sowohl das Kraftwerk als auch die Märkte beschrieben werden. Dafür werden alle mit Kosten behafteten Größen in die Zielfunktion aufgenommen. Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Größen können in entsprechenden Nebenbedingungen (auf Englisch „Constraints“) formuliert werden. Zur besseren Übersicht wird nachfolgend nur eine Auswahl aller im Modell verwendeten Formulierungen erarbeitet. Diese werden ausführlich erläutert und zeigen exemplarisch das Vorgehen im Rahmen der Modellierung.

In der Regel ist das Ziel einer Betriebsoptimierung eine Minimierung der betriebsgebundenen Kraftwerkskosten. Enthält die zu minimierende Zielfunktion zusätzliche Erlösterme, entspricht dies einer Maximierung des zu erzielenden Kraftwerksdeckungsbeitrags an den entsprechenden Märkten. Als Kosten gehen die Brennstoffkosten und Kosten für bezogenen Strom mitsamt der zu entrichtenden Letztverbraucherabgaben ein. Diesen gegenüber stehen Erlöse durch vorgehaltene Leistung und erbrachte Arbeit am Markt für negative und positive Minutenreserve sowie Erlöse am Spotmarkt. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass alle verwendeten Kostenterme energiespezifische Kosten darstellen. Dies bedeutet, dass beispielsweise auch die für eine Zeitscheibe von vier Stunden gezahlten Leistungspreise am Minutenreservemarkt entsprechend umgerechnet werden. Im Folgenden ist die Zielfunktion des Modells mit ihren einzelnen Termen beschrieben.

$$\begin{aligned}
& \min \sum_t (C_{fuel} \dot{Q}_{exp\_in}(t) \tau \\
& + (C_{spot}(t) + C_{charges}) P_{cmp\_spot}(t) \tau \\
& - C_{spot}(t) P_{exp\_spot}(t) \tau \\
& - C_{tcr\_neg\_pro}(t) P_{tcr\_neg\_pro}(t) \\
& - (C_{tcr\_neg\_del}(t) - C_{charges}) P_{tcr\_neg\_del}(t) \tau \\
& - C_{tcr\_pos\_pro}(t) P_{tcr\_pos\_pro}(t) \\
& - C_{tcr\_pos\_del}(t) P_{tcr\_pos\_del}(t) \tau)
\end{aligned}$$

Weiterhin müssen durch das Modell alle marktbedingten und physikalischen Restriktionen abgebildet werden. So wird beispielsweise die physikalisch verfügbare Leistung der Kompression bzw. Expansion

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

über entsprechende Gleichungen beschrieben. Die Aufteilung der Leistungen für den Kompressionsteil wird beispielsweise durch die folgende Gleichung beschrieben. Dies stellt sicher, dass die Summe der an den verschiedenen Märkten platzierten Leistung nicht die insgesamt physikalisch verfügbare Leistung überschreitet.

$$P_{cmp}(t) = P_{cmp\_spot}(t) + P_{cmp\_tcr\_del}(t) \quad \forall t \in T$$

Detaillierte thermodynamische Zusammenhänge können in der Regel nur in komplexen, nichtlinearen Modellen abgebildet werden. Um entsprechende Zusammenhänge trotzdem innerhalb eines linearen, gemischt-ganzzahligen Modells abzubilden, ist in verschiedenen Teil des Modells eine Reduktion der Komplexität erforderlich. In der folgenden Gleichung wird exemplarisch die Linearisierung der maximal verfügbaren Kompressionsleistung in Abhängigkeit des Druckluftspeichers beschrieben.

$$P_{exp\_max}(t) = m_{exp\_max} CAS_{fil}(t-1) + b_{exp\_max} \quad \forall t \in [1, t_{max}]$$

Die maximal verfügbare Leistung wird mit einer linearen Funktion durch Verwendung eines konzept-spezifischen Multiplikators und einer entsprechenden minimalen Leistung bei Volllast approximiert, die den Fall eines nominal leeren Massenspeichers berücksichtigt.

Die folgende Abbildung veranschaulicht exemplarisch den Einfluss der entsprechenden Linearisierung auf die Abbildungsgenauigkeit. In den meisten Fällen sind die berechneten Abweichungen zwischen exakter Simulation und linearisierter Funktion vernachlässigbar gering.

Neben der Abbildung verschiedener Kostentypen können innerhalb des Modells verschiedene Druckluftspeicherkonzepte spezifisch parametrisiert werden. Dies erlaubt beispielsweise die Definition von individuellen Lastbereichen für die verschiedenen Teile des Kraftwerks sowie die konzeptspezifische

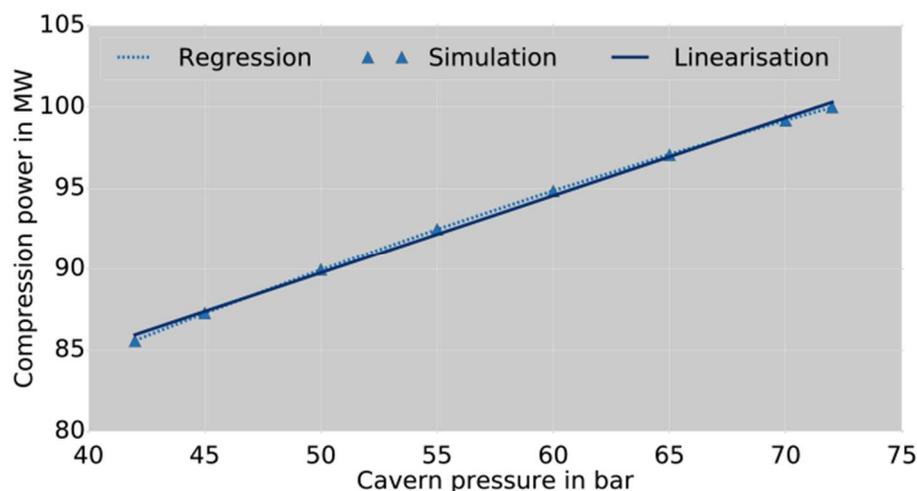


Abbildung 11: Exemplarische Linearisierung einer Kraftwerkscharakteristik

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Aufteilung der auftretenden Wärme- und Exergieströme. Für jedes der untersuchten Konzepte wird ein Satz der folgenden Relationen abgebildet:

#### *Kompressionsteil*

- Kompressionsleistung-Füllstand-Charakteristik
- Wärmeabfuhr-Kompressionsleistung-Charakteristik
- Einspeicherexergiestrom-Kompressionsleistung-Charakteristik

#### *Expansionsteil*

- Expansionsleistung-Füllstand-Charakteristik
- Wärmezufuhr-Expansionsleistung-Charakteristik
- Ausspeicherexergiestrom-Expansionsleistung-Charakteristik

Dabei entspricht der Füllstand dem Kavernendruck.

Eine vollständige Beschreibung des Modells mitsamt aller Gleichungen kann dem Anhang I entnommen werden. Zudem zeigt ein beispielhafter Satz von Kraftwerkscharakteristiken im Anhang E die grundsätzliche Darstellung des physikalischen Betriebsverhaltens.

### **5.2.6 Implementierung**

Nach der Festlegung des Modellaufbaus und der mathematischen Modellierung wird eine geeignete Sprache für die Implementierung und Modellierung gewählt. Hier fällt die Wahl auf Python. Dies begründet sich in der Verfügbarkeit umfassender Bibliotheken für die Optimierung und Datenanalyse, der geforderten Flexibilität des Moduls hinsichtlich der Erweiterungsfähigkeit und des offenen Lizenzmodells. Für die mathematische Beschreibung des Optimierungsproblems wird das Paket Pyomo (Python Optimization Modeling Objects) [24] verwendet. Pyomo ist ein in Python geschriebenes Open Source Softwarepaket für die Formulierung und Analyse von verschiedensten Optimierungsproblemen und wird unter einer freien Lizenz veröffentlicht. So können unter anderem lineare, quadratische, nichtlineare und gemischt ganzzahlige lineare Probleme algebraisch beschrieben und anschließend unter Verwendung verschiedener Standardsolver gelöst werden. 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.

Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt sowohl mit dem kommerziellen Solver gurobi [25] als auch mit der freien Alternative gpsol aus dem GNU Linear Programming Kit (GLPK) [26]. Beide bieten

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten, sind verhältnismäßig einfach zu installieren und können direkt aus Pyomo adressiert werden. Neben der Realisierung einer freien Variante des Modells erlaubt die Verwendung von zwei Solvern eine bessere Einschätzung des Rechenaufwandes zur Lösung des Problems. So können Laufzeiten miteinander verglichen und daraus Schlüsse für die Verbesserung der Modellformulierung gezogen werden.

Um die in den möglichen Betriebsszenarien ermittelten Märkte hinreichend abbilden zu können, müssen umfangreiche Preiszeitreihen für den Spot- und Regelleistungsmarkt berechnet und gespeichert werden. Für die Aufbereitung der Daten wird das Python-Paket pandas (Python Data Analysis Library) [27] verwendet. Dies stellt einfach zu nutzende Datenstrukturen und Werkzeuge bereit, um die Rohdaten in ein einheitliches Format zu überführen, und ist dabei umfassend dokumentiert.

Das auf diese Weise implementierte Einsatzmodell findet sich auf dem beiliegenden Datenträger und ist online verfügbar [28].

### 5.3 Modellvalidierung

Die Plausibilitätsprüfung des Modells erfolgt durch die Generierung von Zufallspreiszereihen. So werden in jedem Optimierungslauf für die einzelnen Kostenpositionen des Kraftwerks Zufallszahlen innerhalb der üblichen Bandbreite generiert. Weiterhin werden als Restriktionen exemplarische Leistungen für den Kompressions-, Expansions- und Speicherteil angenommen. Die Optimierungsergebnisse werden dann anschließend in einem Plot visualisiert und kontrolliert. Zusätzlich überprüft eine dafür entwickelte Funktion die Gültigkeit der Ergebnisse. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn der Optimierungshorizont nicht mehr visuell darstellbar ist oder die Ergebnisse ohne visuelle Ausgabe gespeichert werden sollen.

Die Plausibilität des Modells konnte in zahlreichen Testläufen sichergestellt werden. Die Ergebnisse entsprechen dabei durchgehend dem erwarteten Verhalten des Kraftwerks. So erfolgt die Einspeicherung von Strom in Zeiten niedriger Strompreise, während die Rückverstromung stattfindet, wenn der Stromverkaufspreis möglichst weit über den Kosten liegt. Weiterhin wird bei einem Abruf von Regelleistung in der jeweiligen Zeitscheibe die Leistung vorgehalten und der Abruf erbracht. Zudem werden die für die Komponenten definierten Restriktionen in jedem Zeitschritt eingehalten. So bewegen sich die Leistungen des Kompressions-, Expansions- und Speicherteils in jedem Zeitschritt innerhalb des zulässigen Wertebereichs. Ein exemplarischer, kostenoptimaler Fahrplan ist in Abbildung 12 zu sehen.

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

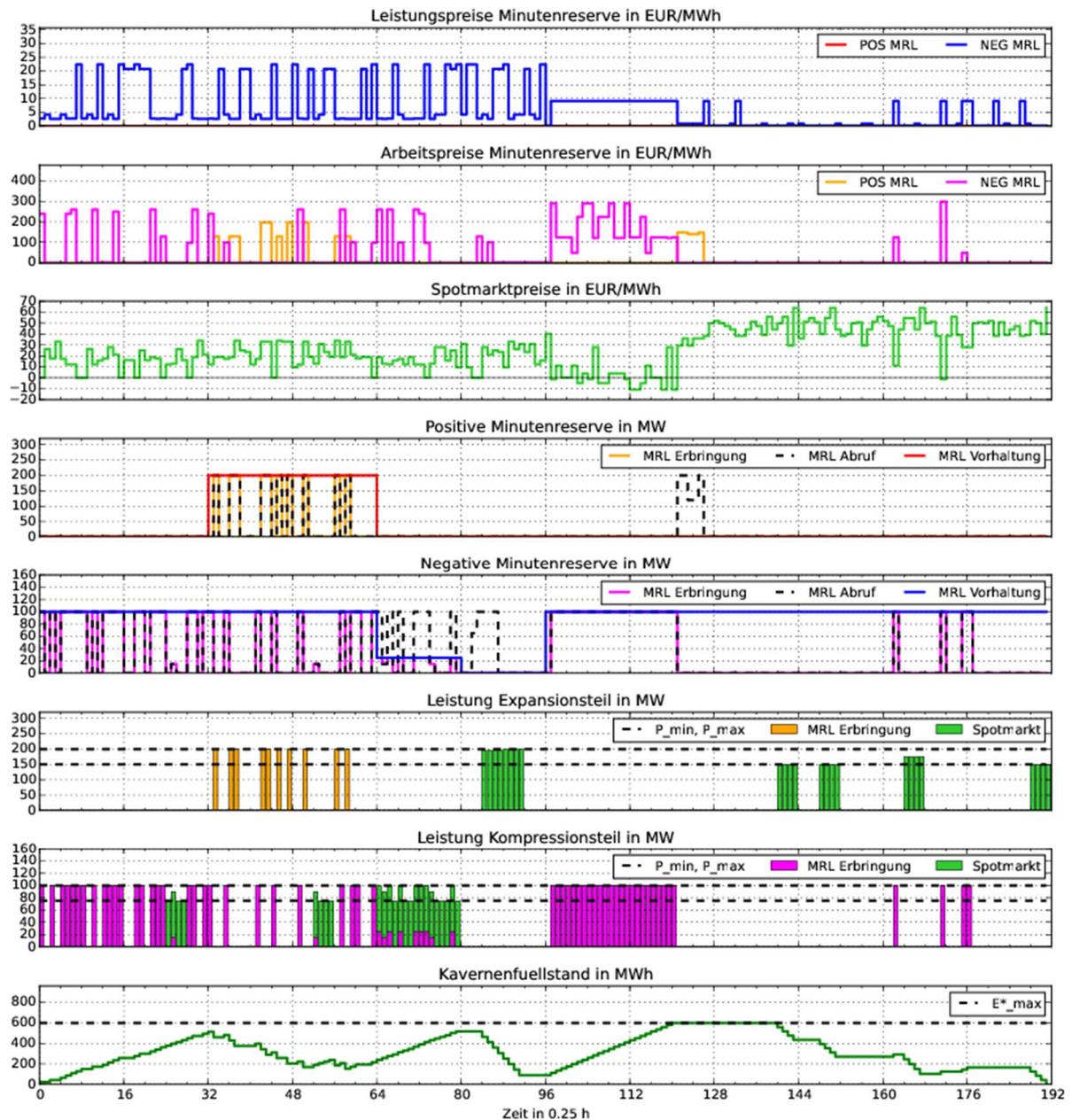


Abbildung 12: Exemplarischer kostenoptimaler Fahrplan als Ergebnis des Betriebsoptimierungsmodells

Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten Modells zur Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks wurde somit nachgewiesen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 6 Abbildung des Versorgungssystems

Im folgenden Kapitel werden die Abbildung des Versorgungssystems und die Modellierung seiner Entwicklung innerhalb zukünftiger Szenarien beschrieben. Dafür wird zunächst die allgemeine Methodik dargelegt. Anschließend wird auf die konkrete Modellierung eingegangen und die Datenbasis dargelegt. Abschließend erfolgt nach einer umfangreichen Modellvalidierung die Darstellung der ermittelten Day-Ahead-Marktpreiszeitreihen, die gleichzeitig die Eingangsdaten für das in Kapitel 5 beschriebene Betriebsmodell darstellen.

### 6.1 Methodik

#### 6.1.1 Aktuelle Marktteilnahme von Speicherkraftwerken

Um die aktuelle Marktteilnahme von Speicherkraftwerken abzubilden, werden historische Zeitpreisreihen der jüngeren Vergangenheit verwendet. Hierbei sind sowohl die Marktteilnahme am Spot- als auch am Regelleistungsmarkt zu berücksichtigen. Dadurch wird einerseits eine aktuelle und realitätsnahe Abbildung des das Druckluftspeicherkraftwerk umgebenden Versorgungssystems gewährleistet. Darüber hinaus kann so andererseits auch grundsätzlich der Einfluss von stochastisch auftretenden Nichtverfügbarkeiten von Einzelanlagen oder anderer Unvorhersehbarkeiten auf die Preisbildung berücksichtigt werden, der sich für die zukünftige Entwicklung schwer vorhersagen und daher schlecht abbilden lässt. Schließlich gewährleistet die Verwendung konsistenter Spot- und Regelmarktdaten auch die gegenseitigen Wechselwirkungen dieser Märkte untereinander.

Die historischen Marktdaten werden außerdem auch benutzt, um Unterschiede zwischen realen Marktdaten und solchen Zeitpreisreihen zu diskutieren, die zukünftige Entwicklungen des Versorgungssystems abbilden sollen. Darauf wird im Zusammenhang mit der Validierung des für die Abbildung zukünftiger Versorgungssysteme verwendeten Energiesystemmodells im betreffenden Abschnitt noch genauer eingegangen.

#### 6.1.2 Entwicklung des Versorgungssystems

Um Zeitpreisreihen zu generieren, die eine Weiterentwicklung des Versorgungssystems abbilden, wird ein numerisches Marktmodell verwendet. Für die Marktintegration erneuerbarer Energien ist insbesondere der Day-Ahead-Markt von großer Bedeutung, da die Vermarktung hier kurzfristig auf Basis entsprechender Vortagsprognosen für deren wetterabhängige volatile Einspeisung erfolgt. Mit einem

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien ist somit auch von einer stärkeren Relevanz des Spotmarktes auszugehen. Daher gewinnt dessen Modellierung für die Bewertung zukünftiger Entwicklungen des Energiesystems zunehmend an Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die wirtschaftliche Bewertung von Großspeichertechnologien, wie beispielsweise von Druckluftspeicherkraftwerken, die ihre Erlöse aus dem kurzfristigen Kauf und Verkauf von Strom erzielen. Für die Fortschreibung des Versorgungssystems werden daher Preiszeitreihen für den Spotmarkt generiert.

Ursprünglich sollte dazu das am Zentrum für nachhaltige Systeme mit Open-Source-Software entwickelte Simulationsmodell renpass (Renewable Energy Pathways Simulation System) verwendet werden. Mit Hilfe dieses Modells können zeitlich hochaufgelöste Daten zum Einsatz und Status unterschiedlicher Erzeuger im betrachteten Energieversorgungssystem sowie über den Im- und Export zwischen einzelnen Netzregionen und resultierende Preise gewonnen werden. Diese Daten sind für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer konkreten Kraftwerksanlage unverzichtbar. Mittlerweile wurde jedoch das Nachfolgemodell des ursprünglichen Modells „renpass“ innerhalb des ebenfalls neu entwickelten Open Energy Modelling Frameworks (oemof) „renpassGIS“ entwickelt. Die Endung „GIS“ ergibt sich durch die Erweiterung des Funktionsumfangs, der neuerdings auch die Nutzung eines Geoinformationssystems (GIS) umfasst. Dieses neuere und umfangreichere Modell wird nun auch im Projekt DLSK-SH für Berechnungen von Zeitpreisreihen zukünftiger Versorgungssysteme benutzt.

Zur gesonderten Berücksichtigung der in Verbindung mit der Modellierung von Energieversorgungssystemen auftretenden Unsicherheiten sollen neben zwei Basisszenarien für die Modelljahre 2025 und 2035 die Einflüsse zentraler fundamentaler Größen auf die Preisbildung untersucht werden. Auf Basis der so generierten Preispfade kann im weiteren Verlauf der Arbeit eine integrierte Bewertung der Druckluftspeichertechnologie hinsichtlich verschiedener Entwicklungspfade des Energieversorgungssystems erfolgen.

Der Einfluss der folgenden Eingangsgrößen auf den Kraftwerkseinsatz und die Preisbildung soll im Rahmen der Arbeit überprüft werden:

- Preise für Emissionszertifikate (Szenario „co2“)
- Höhe der Stromnachfrage (Szenario „demand“)
- Installierte Leistung an Windkraft & Photovoltaik (Szenario „ee“)
- Preise für Brennstoffe (Szenario „fuel“)
- Kapazität des deutsch-norwegischen Seekabels (Szenario „nordlink“)

Dafür wird, ausgehend vom jeweiligen Szenario, die jeweilige Größe um 25 % verringert bzw. erhöht und anschließend der Einfluss durch die Berechnung eines entsprechenden Szenarios quantifiziert.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Dies ermöglicht die Prüfung des Einflusses einer großen Bandbreite verschiedener möglicher Entwicklungspfade des Energieversorgungssystems auf den wirtschaftlichen Betrieb von Druckluftspeicherkraftwerken.

Zur Wahrung der Flexibilität bezüglich des Einsatzes verschiedener Energiemarktmodelle wurde die Schnittstelle zum entwickelten Modell zur Betriebsoptimierung durch die Verwendung von Preiszeitreihen bewusst offen und universell nutzbar gestaltet. Diese werden vom übergeordneten Modell in geeigneten Szenarien generiert und können automatisiert an das Modell der Betriebsoptimierung übergeben werden.

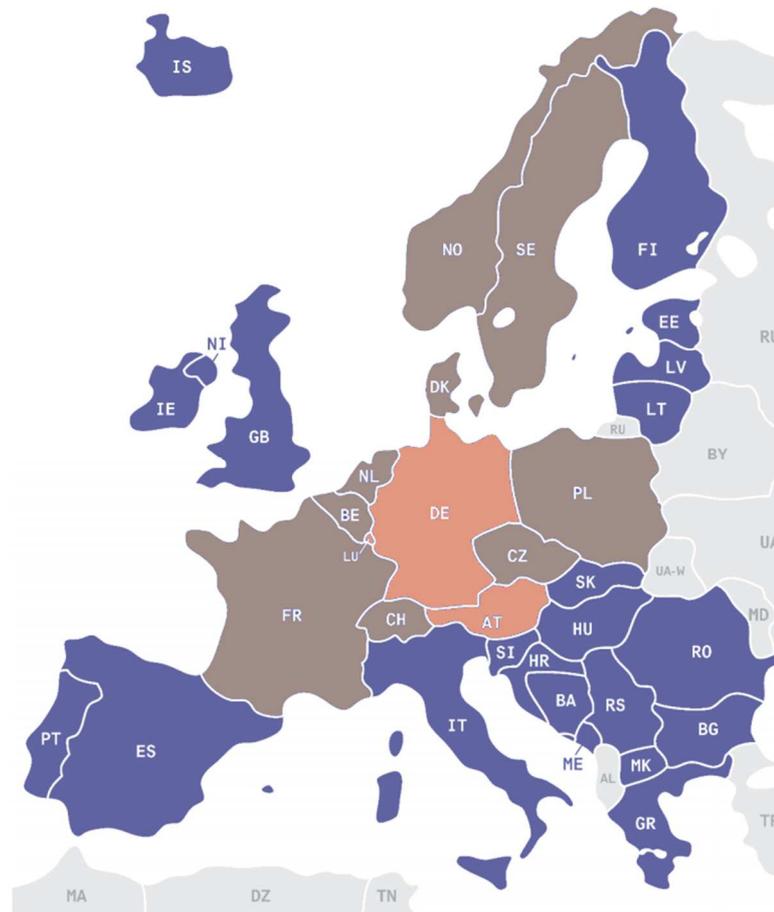
## 6.2 Modellierung mit renpassG!S

Modelle für die Abbildung und Analyse von Energiesystemen haben häufig keinen öffentlich zugänglichen Quelltext, keine frei nutzbaren Daten und sind schlecht dokumentiert. Diese Intransparenz verlangsamt den wissenschaftlichen Diskurs hinsichtlich der Modellqualität im Hinblick auf bestimmte Aufgabenstellungen. Zudem werden im Bereich der Energiesystemanalyse Modelle häufig nur für eine bestimmte Anwendung entworfen und erlauben keine bzw. nur eine aufwendige Anpassung an andere Anforderungen.

Um dem entgegen zu treten, wird im Rahmen des Projekts das Marktmodell renpassG!S verwendet. Dieses integriert in Teilbereichen vorhandene Ansätze des Vorgängermodells „renpass“ [29] und wurde mittlerweile unter einer offenen und freien Lizenz veröffentlicht [30]. Bei renpassG!S handelt es sich um ein Fundamentalmodell auf Basis des Frameworks oemof. Im Anhang J finden sich eine ausführlichere Darstellung des zugrunde liegenden Frameworks, eine Diskussion zur Verwendung von Fundamentalmodellen in der Marktmodellierung sowie eine kritische Reflektion der mit deren Anwendung verbundenen Unsicherheiten.

Das Modell berechnet, regional und temporal aufgelöst, den kostenoptimalen Einsatz der Kraftwerke in der gemeinsamen Marktregion Deutschland/Österreich/Luxemburg sowie den deutschen Anrainerstaaten unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Nebenbedingungen in stündlicher Auflösung. Dabei wird der Kraftwerkseinsatz durch Minimierung aller Variablen, d. h. mit dem Kraftwerksbetrieb verbundenen Erzeugungskosten, optimiert. Abbildung 13 zeigt die geographische Auflösung des Modells.

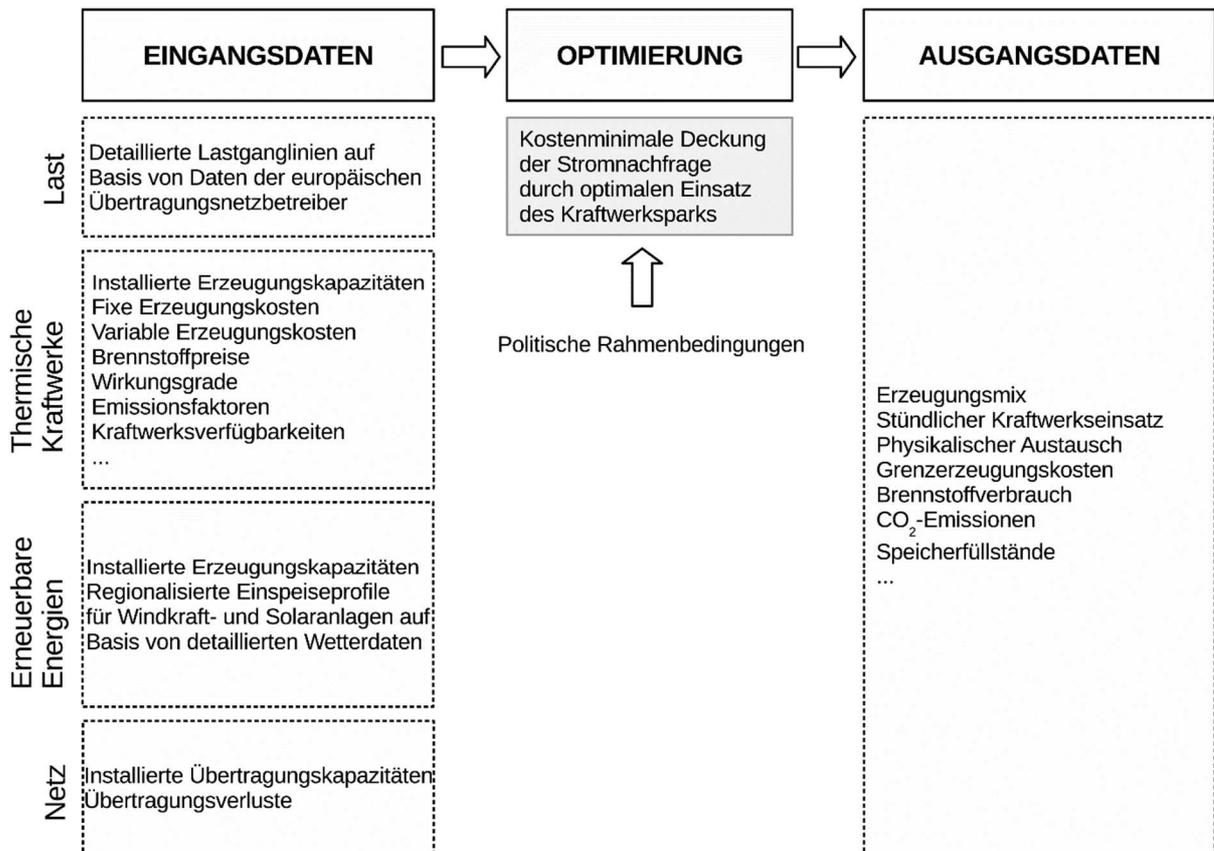
<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 13: Modellerte Marktregionen auf Basis von [31]**

Als Eingangsdaten gehen stündlich aufgelöste Lastdaten, thermische Kraftwerke mit technischen und ökonomischen Parametern, stündlich aufgelöste Einspeisezeitreihen erneuerbarer Energien, sowie die nutzbaren Austauschkapazitäten in die Optimierung ein. Politische Rahmenbedingungen könnten, neben der Annahme szenariospezifischer Kosten bzw. technischer Parameter, durch die Implementierung geeigneter Nebenbedingungen (Constraints) implementiert werden. So wäre es beispielsweise auch möglich die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerksparks auf einen exogen vorgegebenen Maximalwert zu beschränken. Nach Ablauf der Optimierung liefert das Modell als Ausgangsdaten den regional aufgelösten, stündlichen Einsatz der verschiedenen Kraftwerke, den physikalischen Austausch zwischen einzelnen Energieregionen, die Grenzerzeugungskosten, die als Day-Ahead-Marktpreise interpretiert werden, sowie weitere Parameter des berechneten Energiesystems. Abbildung 14 veranschaulicht die Funktionsweise und den Gesamtumfang des Modells.

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 14: Funktionsweise des Modells zur Berechnung von Spotmarktpreisen**

Auf die Definition als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem, wie sie für die ausführliche Berücksichtigung von beispielsweise Mindeststillstands- bzw. Laufzeiten nötig wäre, wird im Rahmen der Modellierung von möglichen zukünftigen Marktpreisen bewusst verzichtet, da viele der Fundamentalfaktoren entweder schwierig prognostizierbar oder mit großen Unsicherheiten belegt sind. Eine Berücksichtigung des Wärmemarktes wird im Rahmen der Modellierung ebenfalls nicht vorgenommen, da die Entwicklung geeigneter Annahmen den Rahmen dieses Projektes sprengen würde und der Mehrwert hinsichtlich der generierten Preise fraglich ist.

Die rein lineare Formulierung lässt eine direkte Interpretation der Preise zu. So können in rein linearen Optimierungsmodellen die dualen Variablen der elektrischen Lastdeckungsgleichung als sich einstellende Grenzpreise am Markt interpretiert werden [32] [33]. Für eine  $\geq$  Ungleichung in einem Minimierungsproblem (Maximierungsproblem) gilt, dass ein positiver dualer Wert einen Zuwachs der Zielfunktion (also eine Verschlechterung) bei jeder Einheitserhöhung des Wertes der rechten Seite der Nebenbedingung verursacht [21]. Da die Lastdeckungsgleichung im Modell intern durch zwei äquivalente Ungleichungen („ $\geq$ “ und „ $\leq$ “ entspricht „ $=$ “) repräsentiert ist, entspricht dieser Wert der nächsten Einheit Strom, die für einen bestimmten Preis produziert wird und damit dem Grenzpreis am Markt.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Die Modellierung zielt ab, die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den fundamentalen Preistreibern adäquat zu modellieren und deren Einfluss im Rahmen geeigneter Sensitivitätsanalysen abzubilden. Die daraus generierten Ergebnisse ermöglichen eine Analyse der wesentlichen systemischen Zusammenhänge in zukünftigen Energieversorgungssystemen und deren Quantifizierung im Hinblick auf den Einfluss auf die Marktpreisbildung. Die Definition als rein lineares Programm ermöglicht zudem eine vertretbare Laufzeit. Durch die lineare Formulierung des Problems ist es weiterhin möglich, die regionale Auflösung auf Deutschland mitsamt angrenzender Nachbarländer zu erweitern. Dies ermöglicht die Betrachtung von Entwicklungspfaden innerhalb des gesamten europäischen Energiesystems. Folglich können durch die Verwendung dieses Ansatzes auch komplexe, länderübergreifende technische und wirtschaftliche Wechselwirkungen analysiert werden.

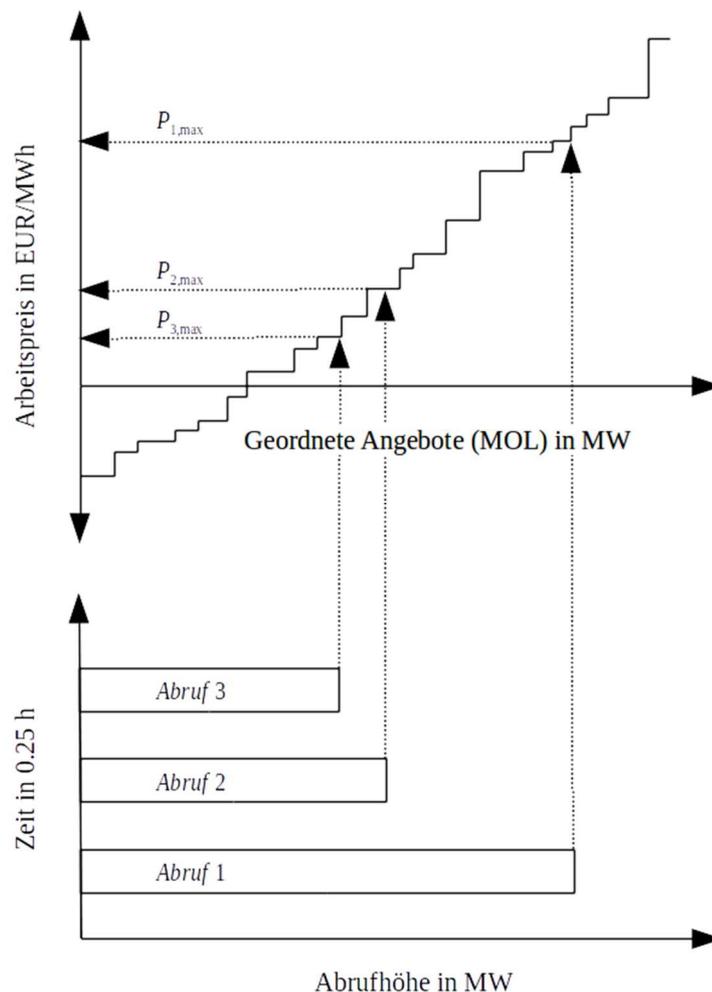
## 6.3 Datengrundlage

### 6.3.1 Historische Marktdaten

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird auf historische Daten der EEX und des Regelleistungsmarktes aus den Jahren 2012 bis 2014 zurückgegriffen, da in diesen Jahren eine starke Zunahme des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, mit einem entsprechenden Einfluss auf den Markt, zu verzeichnen war [34]. Die Börsendaten stammen von der Transparenzplattform der EEX [35], während die Daten des Regelleistungsmarktes für den gesamten Netzregelverbund von der gemeinsamen Internetplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zur Ausschreibung von Regelleistung [36] bezogen wurden.

Die Aufbereitung und Speicherung der Daten erfolgt automatisiert über entsprechende 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. Alle weiteren Berechnungen auf Basis des mit etwa 4,5 Millionen Auktionsgeboten relativ umfangreichen Datensatzes wurden datenbankseitig durch den Einsatz von SQL (Structured Query Language) realisiert. Für die stündlichen Preise des Day-Ahead-Marktes mussten keine zusätzlichen Berechnungen vorgenommen werden. Die Leistungs- und Arbeitspreise für Minutenreserve wurden hingegen nach dem Import aus den zugrundeliegenden Auktionsdaten ermittelt. So wurde über Datenbankabfragen für alle Zeitscheiben positiver und negativer MRL der jeweilige Grenzpreis, Median, Mittelwert und Minimalpreis für die zur Verfügung gestellte Leistung (Leistungspreis) und Arbeit (Arbeitspreis) berechnet. Die Abbildung 15 zeigt schematisch die Ermittlung der Preise.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 15: Exemplarische Ermittlung der Grenzarbeitspreise innerhalb einer Zeitscheibe**

Die statistischen Lageparameter für die Leistungspreise gehen aus den veröffentlichten Auktionsdaten hervor, während für die Arbeitspreise die Abrufhöhe in der jeweiligen Zeitscheibe berücksichtigt werden muss, da der Arbeitspreis nur für die physische Lieferung von Strom gezahlt wird. Die Parameter des jeweiligen Abrufs wurden aus allen Angeboten bis zum Grenzangebot (letztes abgerufenes Angebot) berechnet. Die für eine gesamte Zeitscheibe von vier Stunden ermittelten Leistungspreise werden zudem in stündliche Preise umgerechnet. Anschließend werden die berechneten Daten in einer gemeinsamen Tabelle gespeichert. Alle Berechnungen sind in detailliert in kommentierter Form [37] zu entnehmen.

Im Anschluss wird das allgemeine Vorgehen bei der Preisberechnung durch einen Vergleich mit den auf der gemeinsamen Internetplattform der Übertragungsnetzbetreiber veröffentlichten mittleren Leistungspreisen und Grenzleistungspreisen validiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die berechneten und veröffentlichten Grenzleistungspreise identisch sind, während die ermittelten mittleren

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Leistungspreise leichte Abweichungen aufweisen. Diese sind im Wesentlichen auf zwei mögliche Fehlerquellen zurückzuführen. Zum einen tritt durch die in einer Genauigkeit von drei Nachkommastellen vorliegende, anonymisierte Angebotsliste mit jeweils über 200 Preis-Mengen-Kombinationen pro Produkt und Tag eine gewisse Fehlerfortpflanzung auf. Zum anderen tritt eine Ungenauigkeit bei der Berücksichtigung des Grenzangebots auf, da dieses in der Realität auch eingekürzt bezuschlagt werden kann [38], was aus den vorliegenden Rohdaten aber nicht zu entnehmen ist. Trotz der leichten Abweichungen stellen die ermittelten Preise ein ausreichend genaues Ergebnis auf Basis der verfügbaren Datengrundlage dar. Da die Arbeitspreise, erweitert um die Berücksichtigung der Abrufhöhe, auf die gleiche Weise ermittelt wurden, sind diese ebenfalls als repräsentativ einzustufen.

### 6.3.2 Entwicklung des Versorgungssystems

Im Rahmen der Modellierung wurden die installierten Kraftwerkskapazitäten für Deutschland und alle netztechnisch verbundenen Anrainerstaaten aus dem Szenario B („Best estimate“) der Versorgungssicherheitsprognose für die Jahre 2014 und 2025 verwendet. Dieses Szenario stellt zugleich die Basis für die Modellierung des deutschen Netzentwicklungsplans (NEP) durch die Bundesnetzagentur dar [39]. Für das Jahr 2035 wurden hingegen die Erzeugungskapazitäten des Szenarios „Vision 3: Green Transition“ aus dem 10-Jahres-Netzentwicklungsplans herangezogen. Wie bereits zuvor beschrieben stellt dieses einen möglichen Entwicklungspfad des europäischen Energiesystems dar, der unter anderem durch hohe CO<sub>2</sub>-Preise und niedrige Primärenergiepreise geprägt ist, dabei aber von einer progressiven Durchdringung des Energiesektors durch erneuerbare Energien bis ins Jahr 2030 ausgeht. Die Verwendung der für das Jahr 2030 progressiven Annahmen für das Szenariojahr 2035 kann somit als ein in der Tendenz moderateres Szenario im Hinblick auf die Integration erneuerbarer Energien interpretiert werden. Eine Ausführliche Diskussion zur Wahl des Szenariorahmens findet sich im Anhang J.

Tabelle 9 zeigt die in Deutschland installierten Kapazitäten innerhalb der Basisszenarien. Es wird deutlich, dass der Anteil fossiler Energieträger zukünftig abnimmt und die durch die Bundesregierung beschlossene Abschaltung der Kernkraft im Jahr 2022 innerhalb der Szenarien erwartungsgemäß berücksichtigt wird. Zudem wird die Flexibilität, die für den Ausgleich eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien benötigt wird, durch die Installation von Gas-, Biomasse-, Speicherwasser-, Laufwasser und Pumpspeicherkraftwerken bereitgestellt. Dies ist trotz installierter Überkapazitäten an erneuerbaren Energieträgern zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendig, da diese durch ihren dargebotsabhängigen, volatilen Charakter unter Umständen - beispielsweise bei langer Windflaute – zeitweise nicht zur Verfügung stehen. Alle installierten Kapazitäten können dem der Arbeit beigefügten Datenträger entnommen werden und entsprechen den öffentlich zugänglichen Szenariodaten [31].

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 9: Innerhalb der Basisszenarien installierte Kapazitäten innerhalb Deutschlands**

Technologie	Installierte Kapazität in GW		
	2014	2025	2035
Kernkraft	12,97	0	0
Braunkohle	21,24	15,43	13,17
Steinkohle	30	24,94	22,63
Gas	28,46	27,23	41,26
Öl	3,45	1,65	1,2
Sonstige Brennstoffe	0	0	0
Biomasse	5,88	8,7	11,1
Windkraft	36,61	67,7	85
Photovoltaik	38,07	56	68,8
Lauf-/Speicherwasser	4,4	4,7	5,1
Pumpspeicher	6,35	10,71	10,55

Die Abbildung zukünftiger länderübergreifender Austauschkapazitäten (NTCs) für die Jahre 2025 und 2035 erfolgt durch die Verwendung der NTC-Matrix der ENTSO-E für das Jahr 2030, da diese die einzige geschlossene Informationsquelle zur zukünftigen Entwicklung der länderübergreifenden Übertragungskapazitäten darstellt. Innerhalb der NTC-Matrix werden sowohl mittelfristige als auch langfristige Bauvorhaben innerhalb Europas auf Übertragungsnetz- und Hochspannungsebene berücksichtigt [31]. Abbildung 72 im Anhang J zeigt einen Ausschnitt der mittelfristig geplanten Bauvorhaben innerhalb des europäischen Stromnetzes, deren Fertigstellung vor 2019 terminiert ist. Daraus wird deutlich, dass sowohl die geplante direkte Verbindung des deutschen und norwegischen Stromnetzes durch eine bidirektionale Hochspannungs -Gleichstrom-Übertragung bis ins Jahr 2017 („Nordlink-Kabel“), als auch länderübergreifende Erweiterungen des Übertragungsnetzes berücksichtigt werden.

Für die Abbildung von nicht innerhalb der TYNDP-Szenarien aufgeführten bzw. sensiblen Parametern wurden weitere Literaturquellen und eigene Annahmen herangezogen. So werden beispielsweise zukünftige Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Preise sowie variable und fixe Kraftwerkskosten auf Basis von Literaturwerten angenommen. Hierbei sei zu erwähnen, dass alle technologiespezifischen Parameter als zeitlich und geographisch konstant angenommen werden, also zukünftig mit konstanten Wirkungsgraden, Emissionsfaktoren, spezifischen Kosten und Verfügbarkeiten gerechnet wird. Standortabhängige Kosten, wie beispielsweise Transportkosten für Braun- oder Steinkohle, werden somit nicht erfasst. Tabelle 10 zeigt die im Rahmen der Modellierung verwendeten technologiespezifischen Parameter.

Mit Blick auf die Problemgröße und die damit verbundene Rechenzeit wurden Vereinfachungen bezüglich der Modellierungstiefe vorgenommen. Für die Anrainerstaaten wurde jeweils nur ein Block pro Energieträger (z. B. Braunkohle) mit konstantem Wirkungsgrad angenommen, der durch das arithmetische Mittel der ENTSO-E Wirkungsgradspannbreite pro Energieträger vorgegeben ist.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 10: Technologiespezifische Parameter innerhalb der Basisszenarien**

Technologie	Wirkungsgrade in %	Emissionsfaktor in tCO <sub>2</sub> /GJ	Fixe Kosten in €/MW	Variable Kosten * in €/MWh	Verfügbarkeit in %
Kernkraft	30 - 35	0,03168	55.000	0,5	85
Braunkohle	30 - 46	0,37836	39.000	4,4	85
Steinkohle	30 - 46	0,33624	35.000	4	85
Gas	25 - 60	0,20124	19.000	2	85
Öl	25 - 43	0,26388	6.000	1,5	85
Sonstige Brennstoffe	26	0,33012	16.500	23	85
Biomasse	38	0,0072	29.000	3,9	85
Lauf-/Speicherwasser	100	-	-	-	65
Pumpspeicher	90 / 90	-	-	-	85

\* Sonstige variable Kosten ohne Kosten für Brennstoffe und CO<sub>2</sub>-Zertifikate

Bei der Modellierung der deutschen Kraftwerke wurde hingegen die pro Energieträger installierte Leistung - bis auf Biomassekraftwerke, die aufgrund der EEG-Vergütung gesondert behandelt werden - auf fünf gleich große Blöcke verteilt, deren Wirkungsgrade aus der gleichverteilten Wirkungsgradspannbreite (s. o.) ermittelt wurden. Dies stellt einen Kompromiss zwischen vertretbarer Rechenzeit und Abbildungsgenauigkeit dar und erlaubt eine feinere Abstufung der sich ausbildenden Marktpreise.

Die Entwicklung zukünftiger Preispfade für Brennstoffe und Emissionszertifikate erfolgt, aufgrund des großen Einflusses auf die Ausbildung von Marktpreisen, auf Basis umfangreicher Literaturrecherchen. Die für das mittel- bzw. langfristige Szenario verwendeten Preise stellen im Vergleich mit den Prognosen anderer Studien insgesamt eine durchschnittliche prognostizierte Ausprägung dar und können Tabelle 11 entnommen werden. Weiterhin wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl der Einfluss der Brennstoffpreise als auch der Einfluss der Zertifikatspreise getrennt innerhalb einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse quantifiziert, um etwaige Veränderungen zukünftiger Rahmenbedingungen zu erfassen.

**Tabelle 11: Brennstoff und Zertifikatspreise innerhalb der Basisszenarien**

Technologie	Brennstoffpreis in €/GJ			CO <sub>2</sub> -Preis in €/t		
	2014	2025	2035	2014	2025	2035
Kernkraft	1,11	1,11	1,11			
Braunkohle	1,15	0,42	0,42			
Steinkohle	2,49	2,85	2,88			
Gas	8,09	8,86	9,36	5,91	21	31
Öl	10,54	14,89	16,44			
Sonstige Brennstoffe	1,86	1,86	1,86			
Biomasse	5,56	7,58	7,58			

Zudem werden Annahmen über die Dimensionierung von Speichern getroffen. So wird davon ausgegangen, dass die Kapazität von Pumpspeicherkraftwerken immer dem Zehnfachen der installierten Pumpleistung entspricht. Dies stellt eine vereinfachende Annahme dar, da die genaue Ermittlung aller installierten Kapazitäten aufgrund der bereits beschriebenen Probleme sehr aufwändig, wenn nicht

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

gar aufgrund der schlechten Datenlage in anderen Ländern unmöglich wäre. Weiterhin werden Wetterdaten zur Berechnung der zukünftigen Einspeisung durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen integriert [40], deren Eignung für die Modellierung bereits in entsprechenden Studien geprüft wurde [41] [42]. Alle weiteren im Rahmen der Modellierung getroffenen Annahmen sind, unter Angabe der verwendeten Literaturquellen, ausführlich in der dem Modell beiliegenden Dokumentation unter [43] beschrieben.

## 6.4 Modellvalidierung

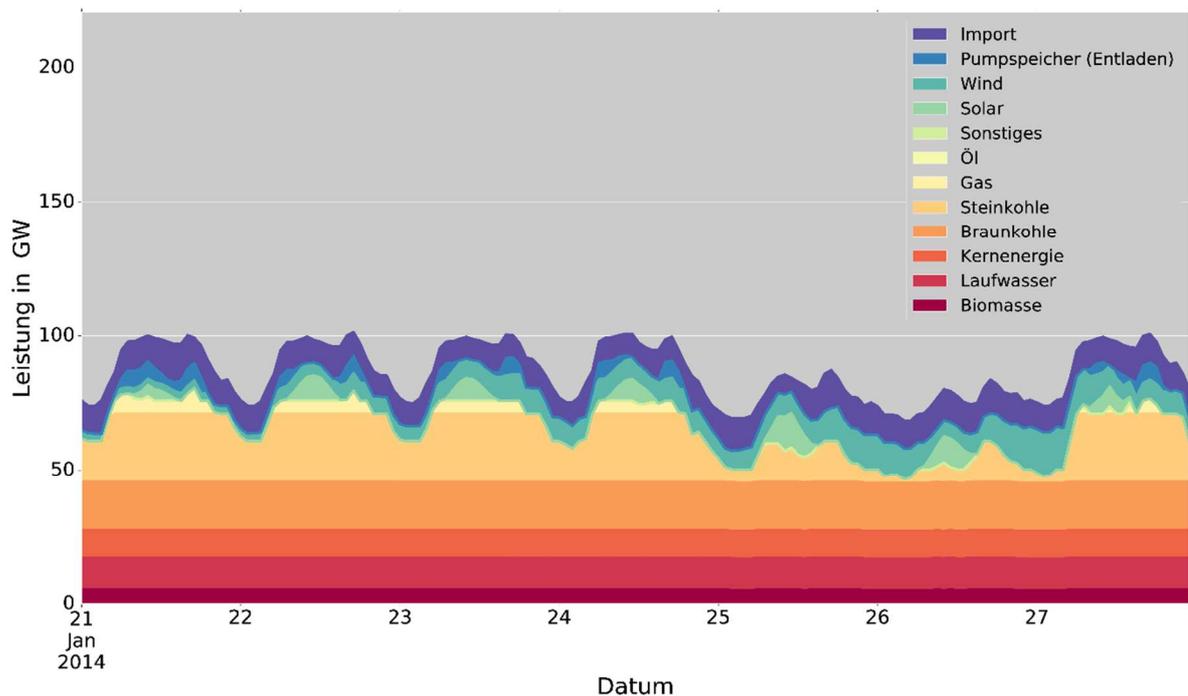
Die Validierung des Modells erfolgt durch eine Parametrierung auf Basis historischer Daten und dem anschließenden Vergleich der Modellergebnisse mit dem tatsächlichen Einsatz bzw. den historischen Marktpreisen. Da der Fokus auf dem sich in Deutschland einstellenden Einsatz bzw. den resultierenden Day-Ahead-Preisen in der gemeinsamen Marktregion Deutschland-Österreich-Luxemburg liegt, werden an dieser Stelle nur die darauf bezogenen Ergebnisse analysiert.

### 6.4.1 Kraftwerkseinsatz

Die grundlegende Funktionsweise des Modells wurde durch die Visualisierung des Anlageneinsatzes zur Deckung der anliegenden Netzlast analysiert. Dafür wurden die einzelnen Kraftwerksblöcke in der gemeinsamen Marktregion nach Energieträgern aggregiert und zur Deckung der anliegenden Nachfrage gestapelt. Die daraus resultierende Gesamtleistung kann somit als Elektrizitätsnachfrage im jeweiligen Zeitpunkt abzüglich der Einspeicherleistung von Pumpspeicherkraftwerken interpretiert werden. Abbildung 16 zeigt den Kraftwerkseinsatz in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU im Januar 2014.

Es wird deutlich, dass der Einsatz thermischer Kraftwerke nach den jeweiligen Grenzkosten erfolgt, d. h. die einzelnen Technologien zu jedem Zeitpunkt sukzessive nach ihren jeweiligen Grenzkosten eingesetzt werden. Da Laufwasserkraftwerke als Must-Run-Kapazitäten modelliert wurden, erfolgt deren Einsatz zusammen mit der aus Windkraft und Photovoltaik generierten Leistung zuerst. Zudem wurden für das Jahr 2014 die Biomassekraftwerke in Deutschland, neben anderen erneuerbaren Energien, innerhalb des Must-Run-Sockels modelliert, da die Anlagen bis 2014 hauptsächlich innerhalb der EEG- bzw. KWK-G-Vergütung betrieben wurden. Innerhalb der Zukunftsszenarien werden diese jedoch flexibel als Spitzenlastkraftwerke betrieben. Wie bereits zuvor erläutert, wird die gewählte Art der Modellierung erneuerbarer Energien durch entsprechende marginale Grenzkosten bzw. die Vergütung der

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 16: Modellierter Kraftwerkseinsatz in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU im Januar 2014**

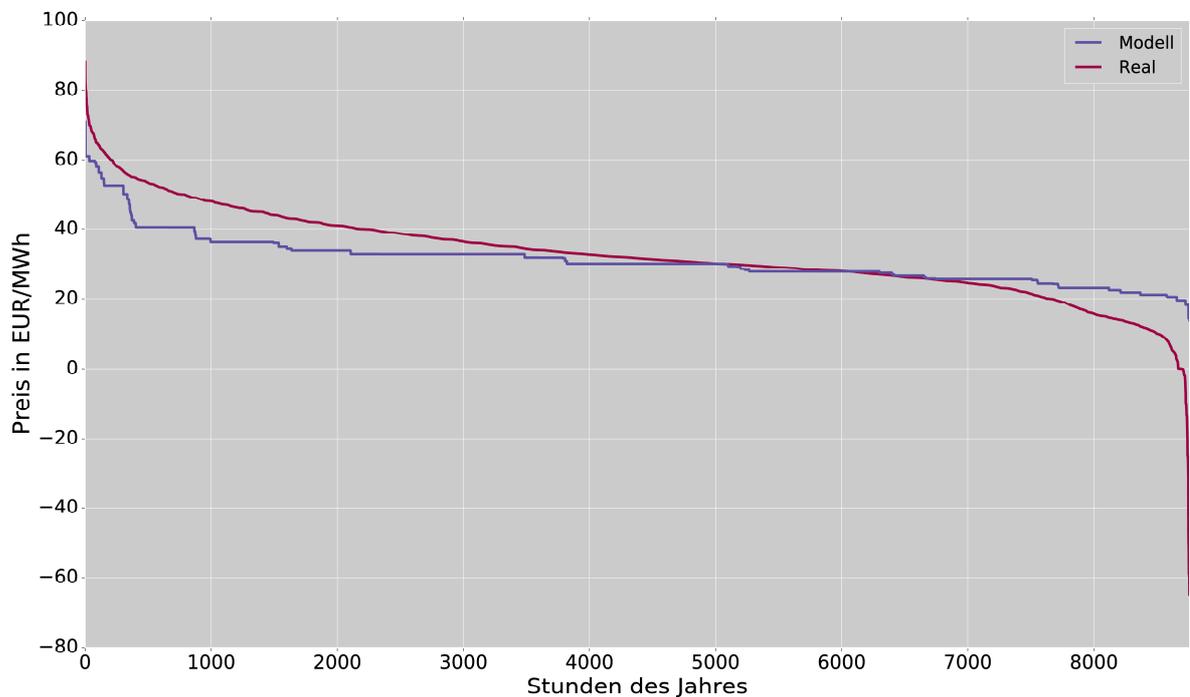
Anlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz begründet. Der Einsatz thermischer Kraftwerke erfolgt erst im Anschluss, wobei teure Spitzenlastkraftwerke, wie beispielsweise Gaskraftwerke, nur in Situationen mit besonders hoher Netzlast zum Einsatz kommen. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist der Einsatz von flexiblen Pumpspeicherkraftwerken in Zeiten hoher Nachfrage sowie der permanente Import von Strom aus günstigen Nachbarländern.

Hinsichtlich des Kraftwerkseinsatzes zeigt sich also ein plausibles Verhalten des Energiesystemmodells. Weitere Analysen zum Kraftwerkseinsatz, unter anderem auf Basis von Jahresdauerlinien der einzelnen Kraftwerkstypen, sind Anhang J zu entnehmen.

#### 6.4.2 Preisbildung

Die Preisbildung innerhalb des Modells wurde anhand geeigneter historischer Daten verifiziert. Hierfür wurden die Preise des EEX Day-Ahead-Spotmarktes herangezogen und mit den Schattenpreisen (duale Variablen) der Lastdeckungsgleichung der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU im linearen Programm verglichen. Für eine Analyse der Abweichungen wurden die geordneten Dauerlinien der Real- und Modellpreise herangezogen. Diese geben Auskunft über die Häufigkeit der jeweiligen Preisausprägungen und die Güte der Korrelation im jeweiligen Segment. Abbildung 17 zeigt einen Vergleich der realen und modellierten geordneten Dauerlinien für das Jahr 2014.

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 17: Geordnete Jahresdauerlinien der Real- und Modellpreise für das Jahr 2014**

Es ist deutlich zu erkennen, dass die fundamentale Modellierung im mittleren Preisbereich zwischen ca. 25 €/MWh und 35 €/MWh, der in mehr als 3.500 Stunden der 8.760 Stunden eines Jahres auftritt, eine gute bis sehr gute Abbildung der Preise erzielt. Lediglich in den oberen bzw. unteren Preissegmenten wird unter bzw. überschätzt. Außerdem treten im Modell keine negativen Preise auf, die sich in den Realdaten beispielsweise in Mittagsstunden mit hoher solarer Einstrahlung, allerdings in sehr geringem Ausmaß, finden.

Weitere Analysen zum Vergleich von Modell- und Realpreisen sind Anhang J zu entnehmen. Dort ist zu erkennen, dass durchaus merkliche Abweichungen zwischen diesen Größen auftreten können. Es zeigt sich, dass die Abweichungen im mittleren Preisbereich gering ausfallen, während die Preise in Zeiten hoher bzw. geringer Residuallast tendenziell unter bzw. überschätzt werden. Da entsprechende „Preis-spreads“ jedoch - durch den durch die Zwischenspeicherung erzielbaren Deckungsbeitrag - für den wirtschaftlichen Betrieb von Speichertechnologien maßgeblich sind, werden diese im Rahmen einer nachgelagerten Sensitivitätsanalyse näher betrachtet. Daher kann auch darauf verzichtet werden, in die Modellierung mit dem Ziel einzugreifen, die Abweichung des Modells von den Realdaten zu verringern. Dies wäre zwar für das Jahr 2014 möglich, würde jedoch für die Berechnung zukünftiger Marktpreise nicht zwangsläufig zu besseren Prognosen führen.

Eine Eignung des entwickelten Fundamentalmodells zur Abbildung des zukünftigen Kraftwerkseinsatzes und daraus resultierender Marktpreise konnte somit nachgewiesen werden.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 6.5 Resultierende Rahmendaten

### 6.5.1 Historische Marktdaten

Nach der in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Datenaufbereitung und -validierung erfolgt eine grobe statistische Analyse der Zeitreihen. So wird auf jährlicher Basis der Median, das untere und obere Quartil, der arithmetische Mittelwert und der Minimal- bzw. Maximalwert berechnet. Bei den Minutenreserverpreisen wird hierfür auf den berechneten Preismedian zurückgegriffen, da davon ausgegangen wird, dass dieser weniger durch Bieterstrategien bei den Auktionen beeinflusst ist als der jeweilige Mittelwert. Die Abbildung 18 zeigt die grobe statistische Analyse der Zeitreihen, die gleichzeitig die Eingangsdaten der Modellierung darstellen in Form von Boxplots.

Ein Boxplot fasst verschiedene statistische Streuungs- und Lagemaße in einer kompakten Darstellung zusammen. Die Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen und wird durch das obere und das untere Quartil begrenzt. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand, welcher ein Maß für die Streuung der Daten darstellt. Der Median wird als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet und teilt die Beobachtungswerte in zwei Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen. Die Lage des Medians innerhalb der Box gibt zudem einen Eindruck über die Schiefe der den Daten zugrundeliegenden Verteilung. Die der Antennen (Whisker) sind auf Höhe des 1,5-Fachen des Interquartilsabstands angeordnet. Darüber hinaus werden Ausreißer, die außerhalb der Whisker liegen, angezeigt.

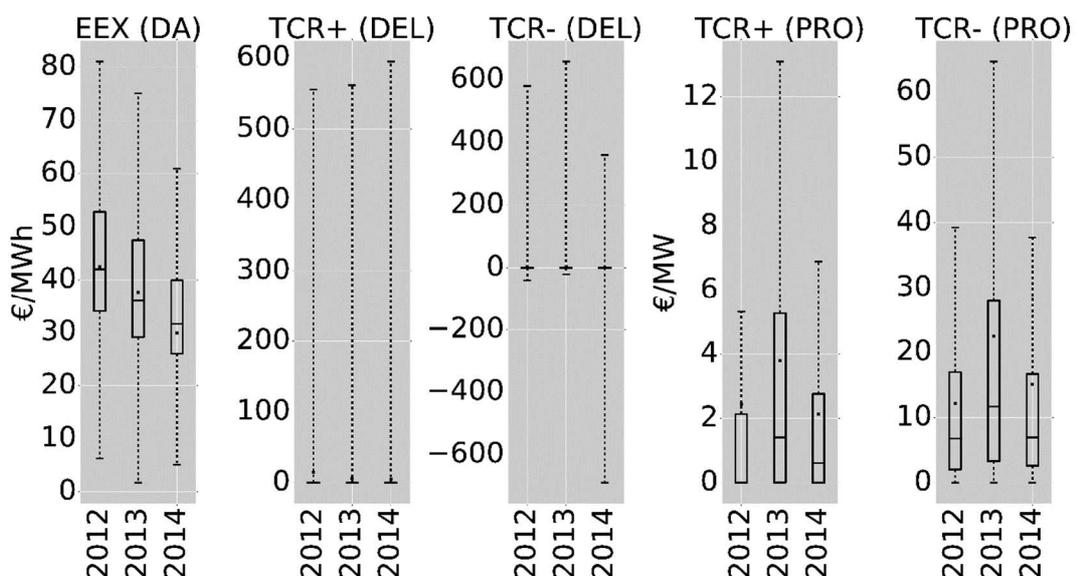


Abbildung 18: Statistische Analyse der Zeitreihen 2012 - 2014

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Es wird deutlich, dass die EEX Day-Ahead-Preise eine ähnliche Charakteristik aufweisen. So zeigen die Zeitreihen eine verhältnismäßig starke Streuung in positiver und negativer Richtung, bei insgesamt fallender Tendenz des Medians und Mittelwerts. Die Leistungspreise für Minutenreserve weisen eine wesentlich stärkere Streuung in positiver Richtung auf, wobei die Preise für negative MRL im Durchschnitt höher als für positive MRL ausfallen. Zudem waren sowohl die Preise für positive, als auch für negative Leistungsvorhaltung im Jahr 2013 höher als in den Jahren 2012 und 2014. Verglichen mit den Spotmarktpreisen erweisen sich die Preise für Leistungsvorhaltung als verhältnismäßig gering. Demgegenüber steht die Tatsache, dass deren Zahlung nicht zwangsläufig eine physische Stromlieferung und damit verbundene Betriebskosten voraussetzt. Eine genauere Betrachtung der Arbeitspreise zeigt, dass starke Ausreißer sowohl in positiver Richtung und im Falle negativer MRL im Jahr 2014 auch in negativer Richtung auftreten. Während die Preise für positive MRL mit leicht fallender Tendenz durchschnittlich im einstelligen Preisbereich lagen, tendieren die Preise für negative MRL im Mittel gegen Null. Dieser Preisunterschied spiegelt auch die in der Regel für die Erbringung positiver MRL anfallenden Betriebskosten wider.

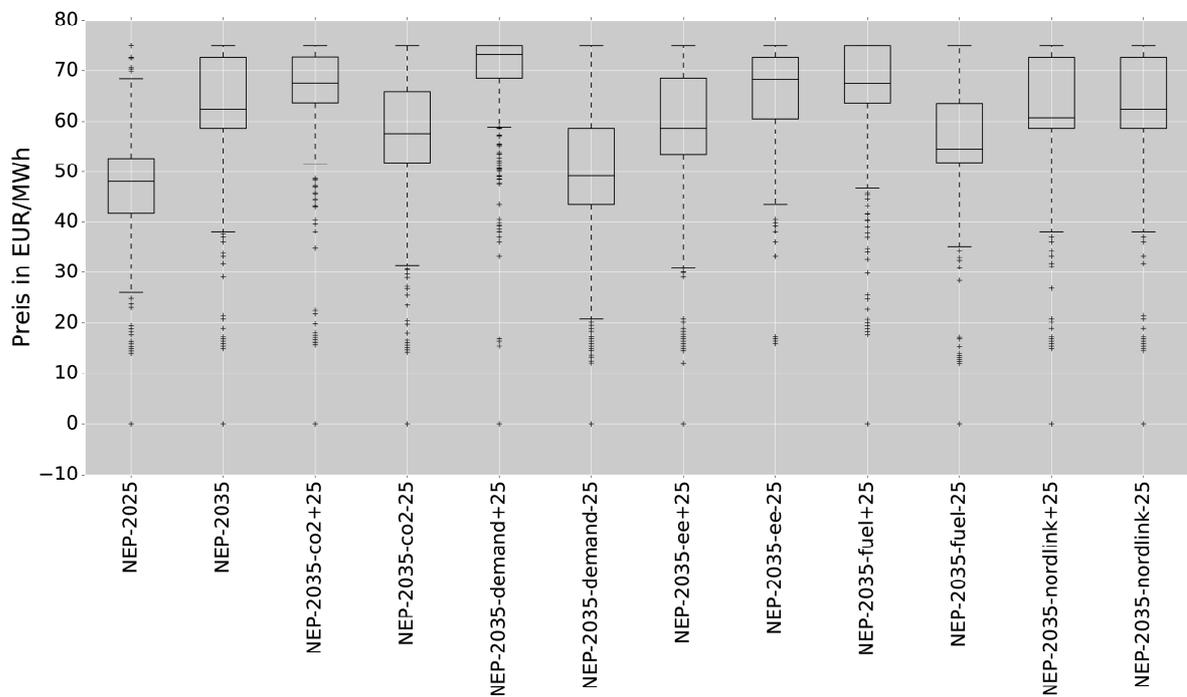
## 6.5.2 Entwicklung des Versorgungssystems und Erweiterung des Szenariorahmens

Für die Entwicklung des Versorgungssystems innerhalb der unter 6.3.2 beschriebenen Szenarien und die unter 0 beschriebene Behandlung von Unsicherheiten können abschließend der berechnete Kraftwerkseinsatz und die sich daraus ergebenden Marktpreise ermittelt werden. Letztere stellen die Eingangsdaten des unter 5 beschriebenen Modells für die Betriebsoptimierung dar. Daher werden diese im Folgenden hinsichtlich ihrer statistischen Lageparameter unter Zuhilfenahme von Boxplots analysiert.

Abbildung 19 zeigt einen Boxplot mit den Preisen, die aus einer Veränderung der Rahmenbedingungen hervorgehen. Der entsprechende Kraftwerkseinsatz wurde ebenfalls ermittelt und kann dem Anhang entnommen werden.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass vor allem eine Erhöhung der Nachfrage und der variablen Kosten zu deutlich höheren Preisen und einer Verringerung des Preisspreads und vice versa zu einem gegenteiligen Effekt führt. Eine Variation der installierten Wind- bzw. Photovoltaikleistung oder der Übertragungskapazität zu norwegischen Wasserkraftwerken wirkt sich ebenfalls auf den Preis aus, während der Spread weniger beeinflusst wird. So führt eine Steigerung bzw. Verringerung des Anteils erneuerbarer Energien in beiden Fällen zu in Summe niedrigen bzw. höheren Strompreisen. Der Effekt der variierten Übertragungsleistung nach Norwegen fällt durch die, verglichen mit der installierten Kraftwerksleistung, verhältnismäßig niedrige Leistung erwartungsgemäß gering aus. Dennoch zeigt eine Verschiebung des Medians, dass sich in Tendenz niedrigere Preise ausbilden.

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 19: Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen des Energieversorgungssystems auf die Preisbildung**

Durch die umfassende Betrachtung der Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen des Energieversorgungssystems konnten zudem einige der zuvor beschriebenen Abbildungsungenauigkeiten berücksichtigt werden. So hat beispielsweise ein Vergleich der wöchentlichen Preise (und damit des wöchentlichen Spreads) des Basisszenarios NEP-2035 mit dem Szenario „NEP-2035-ee+25“ gezeigt, dass deutlich höhere Schwankungen auftreten. Somit konnte zumindest das Problem von im Rahmen der Modellierung unterschätzter zukünftiger Preisspitzen ausreichend adressiert werden. Die entsprechende Analyse kann dem Anhang entnommen werden.

Zur Einordnung der berechneten zukünftigen Marktpreise wurde ein Studienvergleich herangezogen, in dem die im Jahresmittel prognostizierten Großhandelspreise verschiedener Studien miteinander verglichen wurden [44]. Eine entsprechende Abbildung, die kurz-, mittel- und langfristig prognostizierten Großhandelspreise für Strom verschiedener Studien zeigt, findet sich im Anhang J. Es wird deutlich, dass sämtliche durch das Modell berechneten Marktpreise innerhalb der Prognosen anderer Studien liegen. Damit sind sie insgesamt als valide einzustufen und eignen sich zur Abbildung möglicher zukünftiger Entwicklungspfade des Energiesystems. Folglich können sie als Eingangsparameter des Modells zur Betriebsoptimierung verwendet werden und erlauben eine integrierte, investorzentrierte Speicherbewertung innerhalb zukünftiger Energieversorgungssysteme.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 7 Simulationsbasierte Technologiebewertung

Als Ergebnis der multikriteriellen Technologiebewertung in Kapitel 4 werden für die folgenden Simulationen grundsätzlich vier Druckluftspeicherkonzepte in Betracht gezogen:

- Adiabates DLSK mit thermischem Speicher: A\_TES
- Diabates DLSK mit thermischem Speicher: D\_TES
- Diabates DLSK mit Rekuperator: D\_Rek
- Diabates DLSK mit thermischem Speicher und Dampfteil: D\_TES\_Dampf

Die Attraktivität dieser realisierungsrelevanten Druckluftspeicherkraftwerke wird mithilfe der anschließenden Methodik (7.1) in den darauffolgenden Unterkapiteln bewertet.

### 7.1 Methodik

Übergeordnet wird die Evaluation des Potentials von Druckluftspeicherkraftwerken in Schleswig-Holstein auf Basis betriebswirtschaftlicher Auswertungen vorgenommen. Hierfür werden die klassischen Investitionsrechenmethoden des Kapitalwertes  $K_0$  und des internen Zinssatzes  $i$  genutzt. Der Kapitalwert  $K_0$  berechnet sich nach folgender Formel [45]:

$$K_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t}$$

Der interne Zinssatz  $i$  ist dahingegen die Verzinsung, bei welcher der Kapitalwert einer Investition zu 0 wird. Mithilfe dieser Investitionsrechenmethoden können die in Kapitel 2 formulierten Forschungsfragen 5 – 11 adressiert werden.

Die Anwendung dieser Methoden erfordert jedoch zunächst die Simulation der unterschiedlichen technischen DLSK-Konzepte im Energieversorgungssystem. Im ersten Schritt werden daher Kraftwerkscharakteristiken für spezifische Auslegungsfälle in Anlehnung an die jeweiligen Fragestellungen erzeugt. Diese werden folgend an das Einsatzmodell übergeben, welches die Einsatzzeitreihen der Ein- und Ausspeicherung im jeweiligen Marktumfeld generiert. Die resultierenden jährlichen Volllaststunden bzw. Jahresdauerlinien für Kompression und Expansion geben bereits einen ersten Eindruck zum Potential der DLSK. Dazu ist anzumerken, dass die Summe der Volllaststunden theoretisch größer als 8.760 sein kann, da Kompressions- und Expansionsteil simultan betrieben werden können.

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Zusätzliche Informationen zur Charakterisierung der technologischen Unterschiede der Druckluftspeicher können über eine technische Bewertung gewonnen werden. Diese orientiert sich an der Natur des spezifischen DLSK als Kombination von Speicher- und Spitzenlastkraftwerk. Die Gewichtung dieser beiden Anteile wird durch die Kraftwerksindikatoren dargestellt. Der Speicheraufwand  $\gamma$  beschreibt den Anteil der eingespeicherten Energie zur ausgespeicherten Energie. Dagegen impliziert der Wärmearbeit  $\delta$  den Anteil der externen Wärmezufuhr zur ausgespeicherten Energie. Das Verhältnis dieser beiden Indikatoren beschreibt demzufolge die Relation der Energiezufuhr aus dem Speicher und der externen Zuführung und wird als Speicherkoeffizient  $\epsilon$  definiert [9].

$$\gamma = \frac{W_{cmp}}{W_{exp}}$$

$$\delta = \frac{Q_{exp\_in}}{W_{exp}}$$

$$\epsilon = \frac{W_{cmp}}{Q_{exp\_in}}$$

Schließlich erfolgt die technische Bewertung der Kraftwerkskonzepte durch die Berechnung der Zyklenwirkungsgrade als Verhältnis von Output zu Input durchführt. Die Energieeffizienz  $\eta$  bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den energetischen Wert der Ströme. Da dieser Indikator jedoch die unterschiedliche Qualität der Ströme unberücksichtigt lässt, wird zusätzlich die Exergieeffizienz  $\zeta$  hinzugezogen.

$$\eta = \frac{W_{exp}}{W_{cmp} + Q_{exp\_in}}$$

$$\zeta = \frac{Ex_{exp}}{Ex_{cmp} + Ex_{exp\_in}}$$

Die definierten Wirkungsgrade bewerten das DLSK insgesamt und vernachlässigen dabei die kombinierte Natur dieser Kraftwerke. Mit dem Ziel der Bewertung des Speicheranteils ist die Definition eines weiteren Speicherwirkungsgrades notwendig. Der sogenannte Wirkungsgrad nach der energetischen Restwertmethode  $\eta_{CAES\_ref}$  nimmt an, dass die externe Energiezufuhr auch zur Energiebereitstellung in einem Referenzkraftwerk mit einem bestimmten Referenzwirkungsgrad genutzt hätte werden können. Aus diesem Grund wird die Energieabgabe des Speichers um die potentiell im Referenzkraftwerk erzeugte Energie reduziert [9].

$$\eta_{CAESref} = \frac{W_{exp} - \eta_{pp\_ref} \cdot Q_{exp\_in}}{W_{cmp}}$$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### 7.1.1 Konzeptvergleich

Die Bewertung der vier DLSK-Konzepte erfolgt anhand der jeweiligen technischen Kennzahlen, des Betriebsverhaltens, der Einnahmen und der Betriebswirtschaftlichkeit für die Jahre 2012 bis 2014. Das attraktivste DLSK-Konzept wird entsprechend dem letztgenannten Kriterium ausgewählt. Im Zuge dessen ist sicherzustellen, dass eine direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Varianten gewährleistet ist. Dies wird durch eine analoge technische Auslegung erfüllt (siehe Anhang F).

Die Ein- und Ausspeichernennleistungen werden auf je 100 MW sowie der Ausspeicherzeitraum auf 8 h festgelegt. Zusätzlich wird eine Anpassung einzelner Parameter an das spezifische Konzept vorgenommen, um den Einsatzzwecken der verschiedenen Konzepten Rechnung zu tragen. In diesem Zusammenhang wird das Druckspiel des A\_TES beispielsweise mit 25 bis 50 bar festgelegt. Im Zuge der betriebswirtschaftlichen Bewertung wird von einem Betriebszeitraum von 30 Jahren ausgegangen, für die jeweils auf Basis der Bewertungsjahre äquivalente Gewinne angenommen werden.

### 7.1.2 Kraftwerksdimensionierung

Mit dem Ziel der Bewertung des betriebswirtschaftlichen Potentials von DLSK in Schleswig-Holstein ist neben der Auswahl des aussichtsreichsten Schaltungskonzeptes der Einfluss der entsprechenden Dimensionierung des Kraftwerks zu analysieren. Zum diesem Zweck sind folgende Parameter in der Variantenprüfung vorgesehen:

- Leistungsklassen
- Leistungsverhältnisse Einspeicherung / Ausspeicherung
- Speicherkapazität
- Kavernendruck
- Zufeuerungstemperatur

DLSK können in unterschiedlichsten Leistungsklassen von 1 MW bis hin zu 10.000 MW umgesetzt werden [7]. Typischerweise werden allerdings Kraftwerke mit bis zu einigen hundert MW betrieben bzw. erforscht. Daher wird der Einfluss der Leistungsklasse des DLSK in diesem Bereich geprüft. Zudem sind aufgrund der technischen Konstruktion gleiche Einspeicher- und Ausspeicherleistungen nicht erforderlich, sodass hier unterschiedliche Leistungsverhältnisse zu beleuchten sind. Ein weiterhin wichtiger Parameter in der Variationsrechnung ist die Speicherkapazität, die direkten Einfluss auf das Kavernenvolumen nimmt. Wie in den bisherigen Arbeiten wird die Speicherkapazität in Relation zum Ausspeicherzeitraum angegeben. Dabei sind nach [7] Zeiträume von 1 – 100 Stunden denkbar, wobei der prakti-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

sche Fokus bei 2 – 24 h liegt. Zudem beeinflusst auch das Druckspiel in Form des minimalen und maximalen Druckes in der Kaverne dessen Volumen. In Abhängigkeit der geologischen Gegebenheiten und der technischen Konstruktion sind Drücke zwischen 20 und 200 bar ( [46] [47]) realisierbar. Schließlich wird die Wirkung der Zufeuerungstemperatur während der Expansion untersucht. Somit wird insbesondere für das Konzept D\_TES das Gewicht von Speicher- und Spitzenlastanteil variiert.

Die Dimensionierung wird zunächst für das Jahr 2014 überprüft. Die Bezeichnungen der einzelnen Dimensionierungen orientieren sich folgend an der Einspeicherleistung, der Ausspeicherleistung sowie des Ausspeicherzeitraumes. Beispielhaft bezeichnet D\_Rek 100/100/8 ein diabates DLSK-Konzept mit Rekuperator mit einer Einspeicherleistung von 100 MW, einer Ausspeicherleistung von 100 MW sowie einen Ausspeicherzeitraum in Nennlast von 8 Stunden.

### 7.1.3 Bedeutung der Märkte

Wie bereits zuvor skizziert können DLSK an verschiedenen Märkten agieren. Als technisch realisierbar wird in diesem Projekt der Einsatz am Spot- und tertiären Regelleistungsmarkt gesehen. Daher ist zu klären, welche wirtschaftliche Bedeutung den jeweiligen Märkten zukommt, um einen optimalen Einsatz zu generieren.

### 7.1.4 Entwicklung des Energiesystems

Der hohe Investitions- und Realisierungsaufwand für DLSK sind grundsätzlich durch einen langen Betriebszeitraum zu rechtfertigen. Typischerweise werden Nutzungsdauern von über 30 Jahren vorgesehen. Aus diesem Grund ist speziell zu prüfen, inwiefern sich zukünftige Entwicklungen im Energiesystem auf den wirtschaftlichen Betrieb auswirken. Die im vorherigen Kapitel dargestellten Szenarien bilden diesbezüglich mögliche zukünftige Tendenzen beispielhaft für die Jahre 2025 und 2035 ab. Beide Szenarien sind durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energien sowie eine veränderte Netzstruktur mit einer Austauschkapazität nach Norwegen gekennzeichnet. Der durchschnittliche Spotmarktpreis steigt von etwa 32 €/MWh auf 48 €/MWh im Szenario 2025 bzw. 63 €/MWh im Szenario 2035. Der durchschnittliche Spread repräsentiert durch das obere und untere Quartil bleibt im Vergleich zu 2014 annähernd konstant (siehe auch Abbildung 19). Es wird angenommen, dass das Einsatzpotential am Regelleistungsmarkt zukünftig nicht mehr gegeben ist.

Um die Robustheit dieser Aussage für die zukünftige Entwicklung zu prüfen und außerdem wichtige Einflussfaktoren herauszustellen, werden weitere Szenarien für das Jahr 2035 in die Simulationen ein-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

bezogen. In diesen werden insbesondere die mit hohen Unsicherheiten behafteten Größen des Energieversorgungssystems im Vergleich zu den Basisannahmen des Jahres 2035 verändert und geprüft (siehe Kapitel 6.5).

### 7.1.5 Systemischer Nutzen

Neben der betriebswirtschaftlichen Bewertung eines DLSK geben die Simulationsergebnisse bereits einen ersten Hinweis auf die Systemdienlichkeit derartiger Kraftwerke. Speziell in Schleswig-Holstein ist die weitere Integration der erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie, von hoher Bedeutung. Speicher unterstützen dies indem sie bei einer Überschussproduktion möglicherweise Abschaltarbeit verhindern. Eine Analyse der Ein- und Ausspeicherzeiträume im Vergleich mit den jeweils abgerufenen Kraftwerkskapazitäten zeigt, ob DLSK in diesem Zusammenhang fördernd im Energiesystem agieren können.

## 7.2 Konzeptvergleich

### 7.2.1 Technische Kennzahlen

Tabelle 12 zeigt die Kraftwerksindikatoren und Wirkungsgrade für die vier ausgewählten Konzepte. Durch einen Wärmearaufwand von null und einen Speicherkoeffizienten, welcher gegen unendlich strebt, wird deutlich, dass A\_TES eine reine Speichertechnologie bezeichnet. Einen vergleichsweise hohen Speicheranteil weist auch das D\_TES auf. Gewichtige Spitzenlastanteile repräsentieren dagegen die beiden übrigen diabaten Konzepte D\_Rek und D\_TES\_Dampf. Somit ist innerhalb der vorliegenden Konzeptauswahl eine technologische Breite gegeben, die sich durch signifikante Unterschiede in der Gewichtung von Speicher- und Spitzenlastanteil ergeben.

**Tabelle 12: Kraftwerksindikatoren und Wirkungsgrade für ausgewählte Konzepte**

	D_Rek	A_TES	D_TES	D_TES_Dampf
Speicheraufwand	0,578	1,385	1,306	0,639
Wärmearaufwand	1,098	0,000	0,184	1,037
Speicherkoeffizient	0,527	$\infty$	7,098	0,616
Energetischer Wirkungsgrad	0,60	0,72	0,67	0,60
Exergetischer Wirkungsgrad	0,59	0,72	0,67	0,59
Restwertansatz ( $\eta_{ref} = 0,4$ )	0,97	0,72	0,71	0,92
Restwertansatz ( $\eta_{ref} = 0,6$ )	0,59	0,72	0,68	0,59

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Ein Vergleich der Wirkungsgrade verdeutlicht, dass das A\_TES nach energetischen und exergetischen Maßstäben die höchste Effizienz mit 72 % erreicht. Das D\_TES folgt mit 67 %. Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei Betrachtung der Referenzwirkungsgrade, welche eine alternative Brennstoffnutzung in einem Referenzkraftwerk miteinbeziehen. Eine hohe Sensitivität weist diesbezüglich das D\_Rek aufgrund des vergleichsweise hohen spezifischen Brennstoffeinsatzes auf. Zusammengefasst offenbart jedoch das A\_TES die besten technischen Voraussetzungen resp. Effizienz.

### 7.2.2 Betriebsverhalten

Die Simulation der vier DLSK-Konzepte resultiert in betriebswirtschaftlich optimierten Einsatzzeitreihen für die Jahre 2012 bis 2014. Die daraus kalkulierbaren Volllaststunden sind für die jeweiligen Konzepte und Jahre in Abbildung 20 dargestellt. Hier wird außerdem weiterhin differenziert nach den Volllaststunden der Kompression und Expansion am Spot- und Regelleistungsmarkt. Somit können mithilfe dieser Abbildung Aussagen zur Entwicklung des Kraftwerkseinsatzes über den betrachteten Zeitraum, zum direkten Konzeptvergleich und zum differenzierten Einsatz an verschiedenen Märkten getroffen werden.

Insgesamt wird deutlich, dass die Anzahl der Volllaststunden für alle Konzepte zwischen 2012 und 2014 bedeutend sinkt. Offenbar nimmt das sich verändernde Marktumfeld während dieser kurzen Zeitspanne von drei Jahren bereits einen starken Einfluss auf den Kraftwerkseinsatz.



Abbildung 20: Volllaststunden der DLSK-Konzepte 2012 - 2014

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Ein Vergleich der Kraftwerkseinsätze zwischen den einzelnen Konzepten zeigt zudem, dass die meisten Volllaststunden von den Konzepten A\_TES und D\_TES erreicht werden. Diese Konzepte, die einen hohen Speicheranteil ausdrücken, weisen ähnliche Mengen und Zusammensetzungen der Volllaststunden auf. So erreichen A\_TES und D\_TES im Jahr 2012 etwa 4.000 bzw. 3.600 Volllaststunden, wohingegen die Konzepte mit einem hohen Brennstoffbedarf bei 2.700 – 2.900 Stunden liegen. Deutliche Rückgänge der Volllaststunden können für das Jahr 2013 nur für die Konzepte mit hoher Spitzenlast verzeichnet werden. Dies wird bedingt durch den gesunkenen Spotmarktpreis bei etwa konstanten Ausgaben für Brennstoffe und Emissionszertifikate. Die negative Marktpreisentwicklung führt im Jahr 2014 jedoch für alle Konzepte zu einer drastischen Abnahme von etwa 800 bis 900 Volllaststunden. Nichtsdestotrotz weist A\_TES nun mehr als doppelt so viele Volllaststunden wie D\_Rek auf.

Zusätzlich zeigt sich, dass die vier Konzepte in den jeweiligen Jahren trotz der technologischen Unterschiede nahezu identisch in Bezug auf die Volllaststunden am Regelleistungsmarkt agieren. Dies indiziert, dass die Kraftwerke ihren Betrieb an den Chancen des Regelleistungsmarktes ausrichten. Um den technologischen Restriktionen gerecht zu werden, wird unterstützend am Spotmarkt agiert, wobei die Speicherkonzepte auch weitere Chancen an diesem nutzen.

Im Anhang H befinden sich ergänzend die Jahresdauerlinien für die vier simulierten DLSK-Konzepte im Jahr 2014. Deren Analyse gibt einen Anhaltspunkt über das grundsätzliche Betriebsverhalten. Hier wird deutlich, dass die marktbedingte Teillast, d.h. die Leistungsreduktion in Folge der Marktanpassung, eine untergeordnete Rolle spielt. Somit ist die Rangfolge, die sich aus den Volllaststunden ergibt, auch auf die gesamten Betriebsstunden übertragbar. Dabei sind die Werte lediglich geringfügig höher. Vorgehend ist dieser Zusammenhang insbesondere für die technische Konstruktion der Kraftwerke relevant. Die Jahresdauerlinien zeigen, dass eine Teillastfähigkeit des Kompressionsteils von maximal 20 % und des Expansionsteils von ca. 50 % für den wirtschaftlichen Betrieb optimal sind.

Die Speicherzyklen (siehe Anhang H) erstrecken sich im Jahr 2014 von einem Tag bis hin zu vier Wochen. Dabei ist anzumerken, dass der Betrieb stark schwankt. Einspeicher- und Ausspeichervorgänge wechseln sich häufig ab und führen meistens nicht zur vollständigen Befüllung bzw. Leerung der Kaverne. Es besteht außerdem ein Unterschied zwischen den Konzepten mit hohem Speicheranteil und denjenigen mit hohem Spitzenlastanteil. Die ersteren zeigen einen deutlich volatileren Betrieb und damit auch vergleichsweise kürzere Speicherzyklen. Zudem treten kürzere Speicherzyklen von einigen Tagen deutlich häufiger im Winterhalbjahr auf, in welchem die Strompreise durchschnittlich höher und volatil sind. Im Sommerhalbjahr präsentieren insbesondere die Konzepte mit hohem Spitzenlastanteil einen geringeren Betrieb und deutlich längere Speicherzyklen von mehr als einer Woche.

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

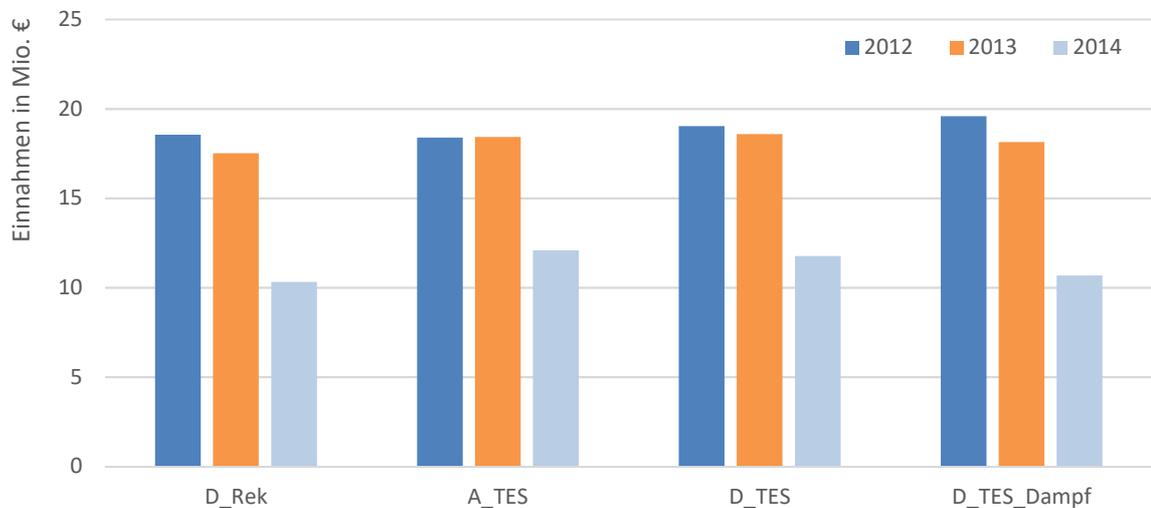


Abbildung 21: Einnahmen der DLSK-Konzepte 2012 - 2014

### 7.2.3 Einnahmen

In eindeutigem Zusammenhang mit den Volllaststunden stehen die erwirtschafteten Einnahmen für die historischen Jahre 2012 – 2014. Die durchschnittlichen Spotmarkt- bzw. Minutenreservepreise sind ergänzend für betrachteten Zeitraum in Abbildung 18 dargestellt. Hier zeigt sich ebenso die abnehmende Tendenz (Abbildung 21). Interessanterweise liegen die Einnahmen für die Jahre 2012 und 2013 für alle Konzepte trotz der deutlich divergierenden Volllaststunden auf etwa gleichem Niveau.

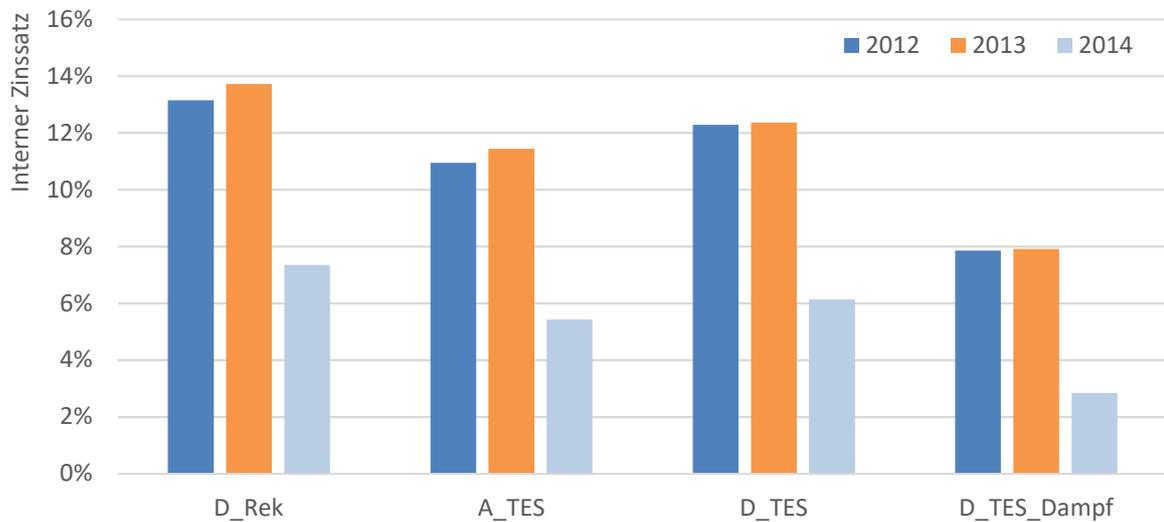
In 2012 erzielt D\_TES\_Dampf mit 19,6 Mio. € die höchsten Einnahmen. Die niedrigsten Einnahmen mit 18,4 Mio. werden durch A\_TES erreicht. Unter Berücksichtigung der Struktur der Volllaststunden, die konzeptübergreifend bezüglich des Regelleistungsmarktes gleichverteilt sind, deutet dies darauf hin, dass der Betrieb an diesem entscheidend für die Einnahmensituation der DLSK-Konzepte ist.

Im Jahr 2013 sind die trotz des gesunkenen Spotmarktpreises etwa konstanten Einnahmen auf den gestiegenen Leistungspreis zurückzuführen. Für 2014 bedingen dagegen insgesamt sinkende Preise am Spot- und Regelleistungsmarkt wesentlich geringere Einkünfte. Zu diesem Zeitpunkt kann das A\_TES mit 12 Mio. € die höchsten Einnahmen erzielen.

### 7.2.4 Betriebswirtschaftlichkeit

Entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb sind zudem die Investitions- und Betriebskosten. Eine Übersicht der angenommenen Beträge sowie deren Diskussion kann im Anhang eingesehen werden. Abbildung 22 zeigt diesen entsprechend die internen Zinssätze als Maß des betriebswirtschaftlichen Potentials der Kraftwerke. Auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit wird nach einem stabilen Niveau in

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 22: Interner Zinssatz der DLSK-Konzepte 2012 - 2014**

den Jahren 2012 und 2013 ein deutlicher Abfall in 2014 ersichtlich, der sich sogar in einer Halbierung der Werte ausdrückt. Daher ist anzumerken, dass die Kraftwerke sehr sensibel gegenüber Preisschwankungen generell und insbesondere dieser am Regelleistungsmarkt reagieren.

Im Gegensatz zur Einnahmensituation ist hier anhand des internen Zinssatzes eine eindeutige Konzeptrangfolge auszumachen. Während des gesamten Zeitraumes bietet das D\_Rek die höchsten internen Zinssätze mit etwa 13 % in 2012 und 7 % in 2014. Trotz des Brennstoffeinsatzes und den damit verbundenen vergleichsweise höheren Betriebskosten führt somit ein Konzept mit signifikantem Spitzenlastanteil. Ausschlaggebend sind hier die relativ niedrigen Investitionskosten aufgrund der marktreifen und technologisch weniger aufwendigeren Komponenten.

Schlussfolgernd stellt sich D\_Rek als das wirtschaftlich attraktivste DLSK-Konzept für einen Betreiber heraus. Dabei ist anzumerken, dass sich dieses Kraftwerk bezüglich der technischen Effizienz lediglich auf Platz 3 befindet. Die Marktsituation 2012 – 2014 führt demnach zu einer Diskrepanz zwischen der Bewertung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

Auf Rang zwei der Investitionsbewertung folgt mit einem internen Zinssatz von 6 % D\_TES, ein DLSK-Konzept mit hohem Speicheranteil. In diesem Falle jedoch sind auch die Wirkungsgrade vergleichsweise positiv. Zudem birgt das Konzept gravierende Freiheiten bezüglich der Dimensionierung, die den Speicher- und Spitzenlastanteil betreffen. Somit bietet eine Variationsrechnung der D\_TES-Dimensionierung eine interessante Grundlage für die weitere Analyse des Einflusses der Gewichtung der Kraftwerksanteile. Daher wird D\_TES als Konzept mit der hier etwas geringeren betriebswirtschaftlichen Attraktivität für weitere Untersuchungen herangezogen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 7.3 Kraftwerksdimensionierung

### 7.3.1 D\_Rek

Ein Auszug aus den Ergebnissen der Investitionsbewertung auf Basis der Simulation verschiedener Dimensionierungen des Konzeptes D\_Rek ist in Tabelle 13 ersichtlich. Es werden zunächst die Ein- und Ausspeicherleistungen sowie Ausspeicherzeiträume variiert, wobei Zufeuerungstemperaturen und Druckspiel zunächst aus Anhang F übernommen werden.

Insgesamt erweist sich der interne Zinssatz für alle betrachteten Varianten als positiv. Ein Vergleich der Varianten 10/10/8, 100/100/8 und 400/400/8 zeigt, dass mittlere Leistungsklassen von etwa 100 MW eine geringfügig höhere Wirtschaftlichkeit erreichen. Der Unterschied erweist sich jedoch als wenig signifikant. Des Weiteren zeigt die Gegenüberstellung der Varianten 100/100/8, 50/100/8 und 200/100/8, dass Verhältnisse von Verdichter- zu Turbinenleistung von größer eins zu einem deutlichen wirtschaftlichen Vorteil führen. Die Simulation der Variationen mit unterschiedlichen Speicherkapazitäten von 1 h, 8 h und 24 h ergibt außerdem, dass sich das Optimum im mittleren Kapazitätsbereich befindet.

**Tabelle 13: Wirtschaftlicher Ergebnisse für D\_Rek mit Variation der Leistungsklassen, des Leistungsverhältnisses und der Speicherkapazität im Jahr 2014**

Einspeicherleistung in MW	Ausspeicherleistung in MW	Speicherkapazität in h	Investitionskosten in T€	Einnahmen in T€	Ausgaben in T€	Gewinn in T€	Interner Zinssatz
10	10	8	7.754	1.032	503	528	7,34%
50	100	8	58.786	7.537	4.046	3.491	6,14%
100	100	1	71.990	7.934	3.565	4.368	6,32%
100	100	8	77.536	10.322	5.035	5.287	7,35%
100	100	24	90.172	11.499	6.000	5.499	6,36%
200	100	8	115.027	14.994	6.720	8.274	7,84%
400	400	8	310.145	41.203	20.076	21.127	7,34%

Auf Basis der analysierten Zusammenhänge in Tabelle 13 wurden weitere Varianten ausgewählt, berechnet und überprüft (siehe Anhang H). Aus dieser strukturierten Variantenanalyse können zwei vergleichsweise vorteilhafte Dimensionierungen mit einem internen Zinssatz von 7,96 % ausgemacht werden. Diese in Tabelle 14 aufgeführten Dimensionierungen unterscheiden sich deutlich in ihren Leistungsklassen und können daher für verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden. Auch die Speicherkapazitäten zeigen mit 9 h für das kleinere DLSK und 13 h für das leistungsstärkere Konzept Un-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

terschiede auf. Nichtsdestotrotz können sie dem Segment der mittleren Speicherkapazitäten zugeordnet werden. Dagegen zeigen beide Dimensionierungen, dass ein Leistungsverhältnis von Einspeicherung zu Ausspeicherung von ca. 2 vorzusehen ist.

**Tabelle 14: Wirtschaftlich optimale Dimensionierungen hinsichtlich Leistungsklasse, Leistungsverhältnis und Speicherkapazität von D\_Rek im Jahr 2014**

Einspeicherleistung in MW	Ausspeicherleistung in MW	Speicherkapazität in h	Investitionskosten in T€	Einnahmen in T€	Ausgaben in T€	Gewinn in T€	Interner Zinssatz
10	5	9	5.751	761	342	419	7,96%
100	40	13	55.099	7.219	3.204	4.015	7,96%

Zusätzlich zu den bisher analysierten Parametern der Leistungsklassen, dem Leistungsverhältnis und der Speicherkapazität zeigt Tabelle 15 die wirtschaftlichen Ergebnisse bei der Variation der Zufeuerungstemperatur und des Druckspiels für ein D\_Rek Konzept mit jeweils 100 MW Ein- und Ausspeicherleistung sowie 8 h Speicherkapazität. Für das Jahr 2014 wird deutlich, dass eine Reduktion der Zufeuerungstemperatur zu einer Verschlechterung des internen Zinssatzes führt. Aus diesem Grund wird festgehalten, dass das wirtschaftliche Optimum für das Jahr 2014 die komponententechnisch maximal mögliche Zufeuerungstemperatur bedarf. Diese ist in den zuvor erläuterten Varianten implementiert.

**Tabelle 15: Wirtschaftliche Ergebnisse für D\_Rek (100/100/8) mit Variation der Zufeuerungstemperatur und dem Druckspiel im Jahr 2014**

Variante	Investitionskosten in T€	Einnahmen in T€	Ausgaben in T€	Gewinn in T€	Interner Zinssatz
Zufeuerungstemperatur – 200 K	77.437	10.274	4.841	5.433	7,61%
Zufeuerungstemperatur - 400 K	77.380	9.828	4.410	5.418	7,59%
Druckspiel 42 – 82 bar	75.376	9.772	4.733	5.040	7,17%
Druckspiel 25 -50 bar	79.461	9.491	4.687	4.804	6,29%
Druckspiel 80 – 120 bar	75.132	10.832	5.100	5.733	8,40%

Außerdem zeigt sich, dass eine Erhöhung des maximalen Kavernendruckes auf 82 bar bei konstantem Minimaldruck von 42 bar die Wirtschaftlichkeit erhöht. Eine nochmalige Erhöhung der Wirtschaftlichkeit wird erreicht, wenn die Differenz zwischen Minimal- und Maximaldruck zwar gleich gehalten, das Niveau jedoch auf 80 bis 120 bar gehoben wird. Im Gegensatz dazu sinkt der interne Zinssatz bei einer geringeren Differenz auf niedrigem Niveau von 25 bis 50 bar. Der beschriebene Zusammenhang kann eindeutig auf das nötige Kavernenvolumen sowie dessen Kosten zurückgeführt werden. Je größer die Differenz zwischen Minimal- und Maximaldruck sowie je höher das absolute Niveau dieser Größen ist, desto höher gestaltet sich die Speicherdichte. Folglich verringert sich das benötigte Kavernenvolumen

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

bei konstant gehaltener Speicherkapazität. Da die Investitionskosten als Kosten pro m<sup>3</sup> angenommen wurden und aufgrund von hohen verbundenen Unsicherheiten keine Anpassung an das Druckniveau erfolgt, bedeuten grundsätzlich höhere Speicherdichten einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Für die Praxis ist dieser Punkt projektspezifisch zu prüfen.

Alles in allem können für das Jahr 2014 mit Berücksichtigung der tertiären Regelleistung zwei optimale Dimensionierungen mit einer internen Verzinsung von ca. 8 % gefunden werden. Sie repräsentieren zwei verschiedene Leistungsklassen und unterscheiden sich dadurch im Anwendungsgebiet. Gemeinsam sind ihnen jedoch die deutlich höheren Einspeicherleistungen im Verhältnis zur Ausspeicherleistung (Verhältnis ca. 2:1) sowie die Speicherkapazitäten im mittleren Bereich von 8 h bzw. 13 h.

### 7.3.2 D\_TES

Das DLSK-Konzept D\_TES, welches im Rahmen der ersten simulationsbasierten Konzeptanalyse zusätzlich zur weiteren Bearbeitung ausgewählt wurde, zeigt für die Jahre 2012 bis 2014 eine etwas geringe betriebswirtschaftliche Eignung als das Konzept D\_Rek. Die Bewertung verschiedener Parametrierungen dieses Konzeptes weisen jedoch zum Teil auf größere wirtschaftliche Potentiale hin.

In Tabelle 16 sind exemplarisch D\_TES-Dimensionierungen aufgeführt, die sich hinsichtlich Leistungsklassen, Leistungsverhältnissen und Speicherkapazitäten unterscheiden. Bezüglich der Leistungsklassen sind nahezu keine Differenzen des internen Zinssatzes zu erkennen (10/10/8, 100/100/8, 400/400/8). Jedoch zeigt sich ebenso wie bei D\_Rek, dass Verhältnisse von Einspeicher- zu Ausspeicherleistung von größer eins deutlich wirtschaftliche Vorteile bringen. Im Kontrast zur optimalen Dimensionierung von D\_Rek erweisen sich dabei geringe Speicherkapazitäten von 1 h als positiv.

**Tabelle 16: Wirtschaftlicher Ergebnisse für D\_TES mit Variation der Leistungsklassen, des Leistungsverhältnisses und der Speicherkapazität im Jahr 2014**

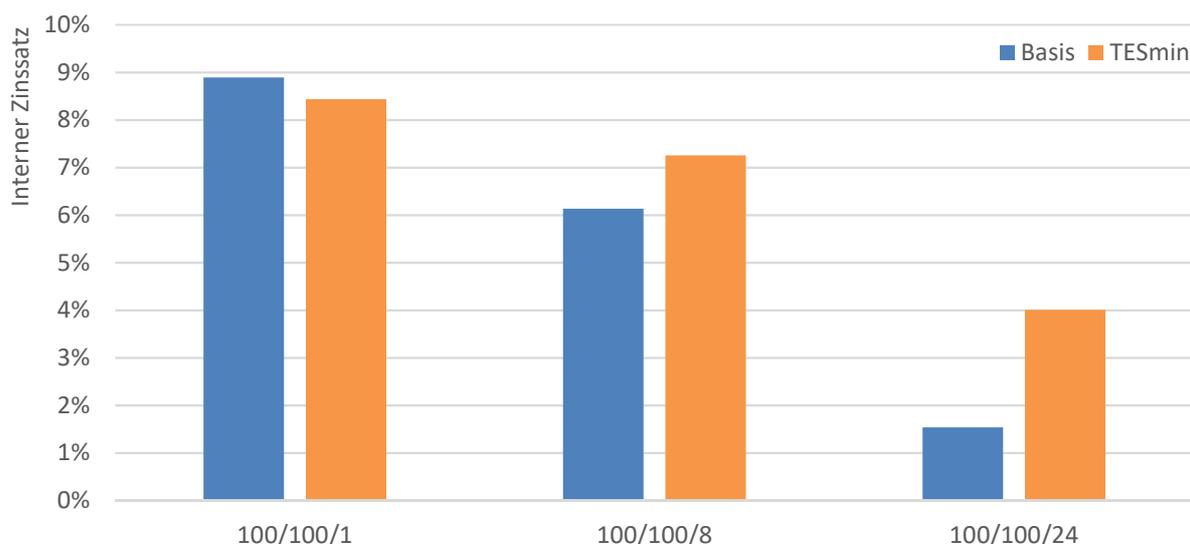
Einspeicherleistung in MW	Ausspeicherleistung in MW	Speicherkapazität in h	Investitionskosten in T€	Einnahmen in T€	Ausgaben in T€	Gewinn in T€	Interner Zinssatz
10	10	8	10.569	1.175	529	646	6,14%
50	100	8	89.210	8.240	4.108	4.132	4,17%
100	100	1	72.845	8.512	2.669	5.843	8,89%
100	100	8	108.356	11.805	5.374	6.431	6,13%
100	100	24	189.309	13.214	7.222	5.992	1,54%
200	100	8	147.482	17.202	6.575	10.626	7,85%
400	400	8	432.729	47.201	21.471	25.730	6,15%

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

In diesem Bereich übertrifft die Dimensionierung D\_TES 100/100/1 mit einem internen Zinssatz von 8,9 % die Wirtschaftlichkeit des zuvor als aussichtsreichstes Konzept identifizierte D\_Rek. Folglich erfordert der Vergleich verschiedener DLSK-Konzepte wie in AP-2.2 auch das Einbeziehen verschiedener Parametrierungen zur Festlegung einer wirtschaftlichen Rangfolge. Je nach Anwendungsfall kann die Wahl des wirtschaftlich attraktivsten Konzepts abweichen. Im Rahmen der Projektarbeiten wurden deswegen zusätzlich abweichende Parametrierungen für die Konzepte A\_TES und D\_TES\_Dampf überprüft. Jegliche Dimensionierungen führen dabei zu einem wirtschaftlichen Nachteil im Vergleich zu D\_Rek und D\_TES, womit die vorherige Konzeptauswahl bestätigt wird.

Die Besonderheit des D\_TES ist die Möglichkeit durch verschiedene Parametrierungen den Speicher- und Spitzenlastanteil zu variieren und somit den Einfluss dessen zu analysieren. Als Ansatzpunkt dient die Dimensionierung des TES, welcher den benötigten Brennstoff in der Zufeuerung substituiert. Bisherige Dimensionierungen beziehen sich grundsätzlich auf die in Tabelle 12 dargestellte Gewichtung mit einem hohen Speicheranteil. Für weitere Simulationen wird Zwischenkühlungstemperatur während der Kompression von 527 °C auf 227 °C reduziert und die TES-Kapazität somit auf ein Drittel minimiert. Damit steigen der Bedarf der Zufeuerung und somit der Spitzenlastanteil signifikant an (Speicheraufwand: 0,99; Wärmeaufwand: 0,76; Speicherkoeffizient: 1,31).

Die Abbildung 23 stellt die Varianten mit einer Ein- und Ausspeicherleistung von 100 MW und verschiedenen Speicherkapazitäten für die beiden geschilderten TES-Dimensionierungen gegenüber. Es wird deutlich, dass sich je nach Kavernendimensionierung (Bezug Ausspeicherzeitraum) die optimale TES-



**Abbildung 23: Einfluss der Gewichtung von Speicher- und Spitzenlastanteil auf die Wirtschaftlichkeit in 2014**

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Dimensionierung unterscheidet. Bei geringen Speicherkapazitäten der Kaverne agiert die Dimensionierung mit größerem TES vorteilhafter am Markt. Das heißt für die kurzfristige Speicherung sind hohe Speicheranteile zu bedenken. Bei mittleren bis hohen Kapazitäten erscheint es sinnvoll die Größe des TES in Relation dazu geringer zu gestalten und somit den Spitzenlastanteil zu erhöhen.

Zusammenfassend ergeben sich für D\_TES optimale Dimensionierungen nahezu unabhängig von der Leistungsklasse mit einem Leistungsverhältnis von 2 sowie einem geringen Ausspeicherzeitraum von 1 h. In diesen Fällen erreicht der interne Zinssatz das Maximum mit 9,4 %, womit die Verzinsung des optimal dimensionierten D\_Rek um 1,4 % überschritten wird. Die Wahl des Konzeptes ist also dem Anwendungsfall anzupassen. Dies gilt genauso für die Dimensionierung des thermischen Speichers für das Konzept D\_TES.

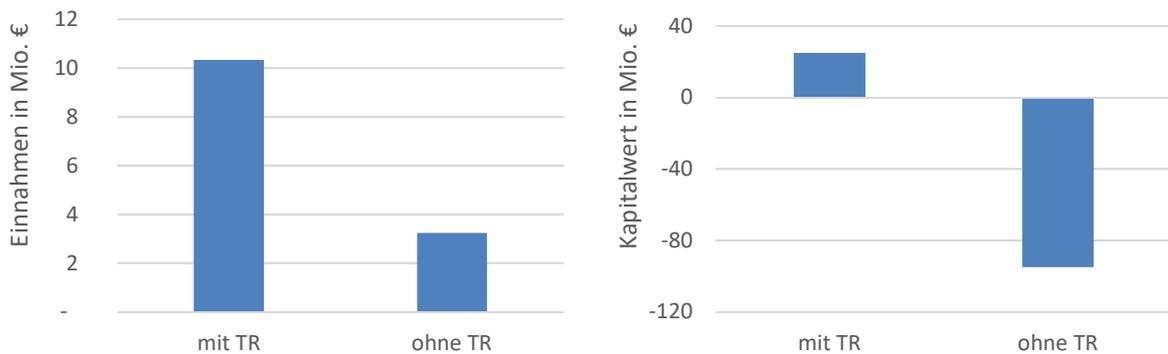
## 7.4 Bedeutung der Märkte

In Abschnitt 7.2 konnte bereits festgestellt werden, dass die simulierten vier DLSK-Konzepte bezüglich ihrer Volllaststunden trotz gravierender technologischer Differenzierungen nahezu identisch am positiven wie auch negativen Regelleistungsmarkt agieren. Deutliche Unterschied werden jedoch beim Kraftwerkseinsatz am Spotmarkt beobachtet (siehe Abbildung 20). Dieses Verhalten signalisiert, dass die im Optimierungsmodell simulierten DLSK ihren Betrieb primär am Regelleistungsmarkt ausrichten. In der Konsequenz wird dem Regelleistungsmarkt ein höheres wirtschaftliches Potential als dem Spotmarkt zugeschrieben. Der Betrieb am Spotmarkt unterstützt den optimierten Einsatz am Regelleistungsmarkt, wobei zusätzliche Ertragspotentiale genutzt werden.

Weiterhin wird die Bedeutung des Regelleistungsmarktes auch an der Entwicklung der Einnahmen während der Jahre 2012 bis 2014 deutlich. Aus Abbildung 21 kann eine insgesamt sinkende Tendenz der Einnahmen während dieses Zeitraumes abgeleitet werden. Dabei zeigt sich ein geringfügiger Rückgang der Einnahmen zwischen 2012 und 2013 bei jedoch stärker abnehmenden Volllaststunden. Dieser vergleichsweise überproportionale Rückgang der Volllaststunden zusammen mit den gesunkenen Spotmarktpreisen werden jedoch durch die gestiegenen Arbeitspreise am Regelleistungsmarkt kompensiert, sodass die Einnahmen insgesamt fast konstant bleiben. Im Jahr 2014 sinken dann neben den Spotmarktpreisen auch die Arbeitspreise des tertiären Regelleistungsmarktes. Dies führt zu einem starken Einnahmeneinbruch für die DLSK-Konzepte. Insgesamt zeichnet sich also auch hier ab, dass dem Regelleistungsmarkt eine hohe wirtschaftliche Bedeutung zukommt.

Weitaus eindeutiger wird die Relevanz des tertiären Regelleistungsmarktes im direkten Vergleich der Kraftwerkssimulationen mit Anbindung an beide Märkte bzw. nur an den Spotmarkt. Abbildung 24 zeigt die resultierenden Einnahmen sowie die Kapitalwerte im Jahr 2014 vergleichend für ein D\_Rek

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 24: Vergleich der Einnahmen und des Kapitalwerts mit und ohne Einsatz am tertiären Regelleistungsmarkt (TR) für D\_Rek 100/100/h im Jahr 2014**

100/100/8. Ohne Einsatz am tertiären Regelleistungsmarkt nimmt das DLSK lediglich ein Drittel der realisierbaren Einnahmen an beiden Märkten ein. Dies wirkt sich bezüglich der Wirtschaftlichkeit drastisch aus: Der Kapitalwert, der in diesem Beispiel eine betriebswirtschaftliche Machbarkeit unter Berücksichtigung beider Märkte zeigt, fällt in den deutlich negativen Bereich bei ausschließlichem Handel am Spotmarkt. Dieser Sachverhalt ist auch bei jeglichen geprüften DLSK-Konzepte bzw. Dimensionierungen erkennbar. Folglich wird festgehalten, dass die wirtschaftliche Darstellbarkeit eines DLSK unter historischen Preisen nur durch den Regelleistungsmarkt gegeben ist.

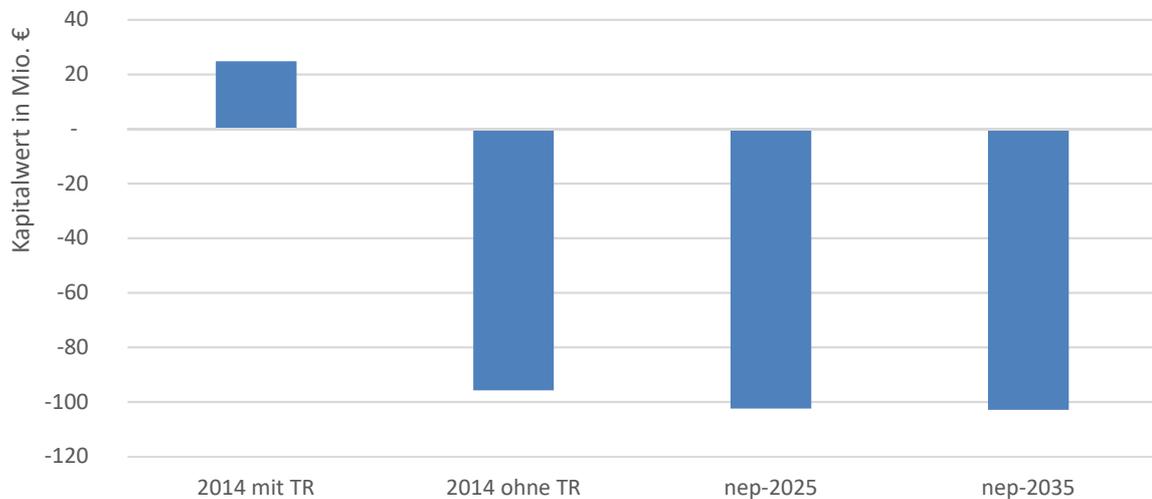
Für die zukünftige Entwicklung wird erwartet, dass der Regelleistungsmarkt keine Einsatzpotentiale für DLSK bietet. Für diesen Fall bedarf es einer anderweitigen monetären Honorierung des systemischen und netzdienlichen Nutzens, falls die Integration von DLSK im Energiesystem angestrebt wird.

## 7.5 Entwicklung des Energiesystems

### 7.5.1 Szenarien für 2025 und 2035

Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Simulationsergebnisse eines D\_Rek 100/100/8 nochmals für das Jahr 2014 mit und ohne Berücksichtigung des Regelleistungsmarktes sowie für die Szenarien 2025 und 2035. Die deutliche Divergenz der Wirtschaftlichkeit im Jahr 2014 bei Einsatz an einem bzw. an zwei Märkten wurde bereits im vorherigen Abschnitt dargelegt. Ohne Handlungsspielraum am tertiären Regelleistungsmarkt fällt der Kapitalwert in einen deutlich negativen Bereich von etwa - 95 Mio. €. Für die angenommene zukünftige Entwicklung verringert sich der Kapitalwert erneut. In beiden Szenariojahren werden Werte von etwa – 102 Mio. € gleichermaßen erreicht. Die skizzierte Entwicklung ist ebenso für andere Dimensionierungen als auch für das Konzept D\_TES feststellbar (siehe Anhang H).

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 25: Vergleich der Kapitalwerte 2014 mit den Szenarien 2025 und 2035 für D\_Rek 100/100/8**

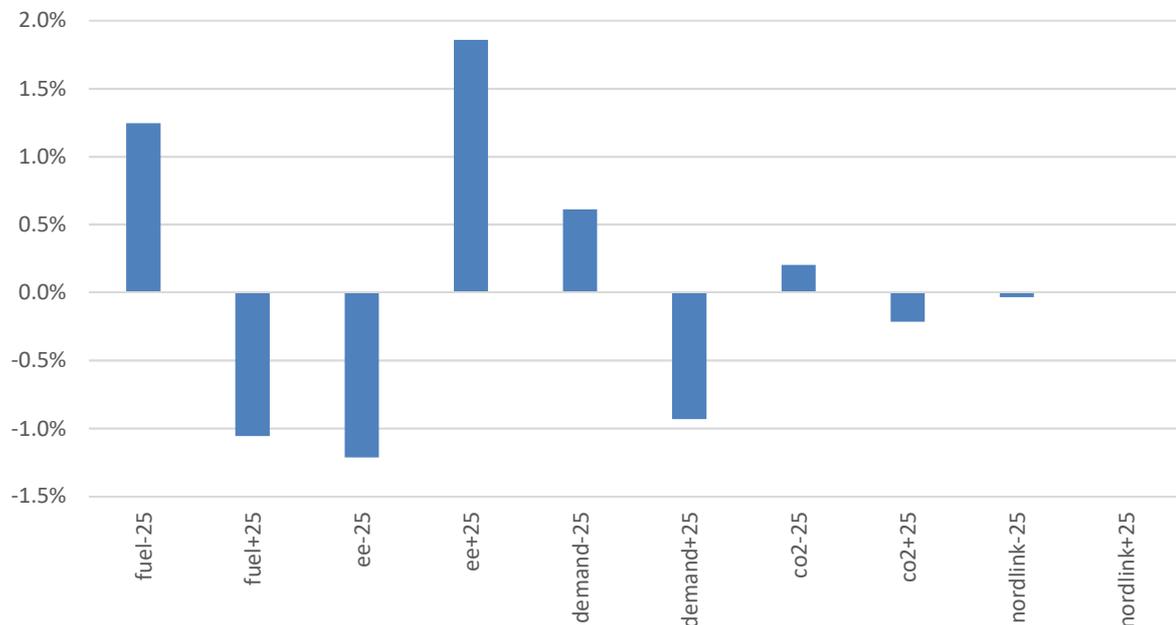
Hieraus kann gefolgert werden, dass die veränderte Netzstruktur sowie der gestiegene Anteil erneuerbarer Energien im Energiesystem für die dargestellten Szenarien keine erhöhten wirtschaftlichen Potentiale für DLSK bedingen. Die u.a. daraus resultierenden durchschnittlich steigenden Spotmarktpreise beeinflussen die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes in der Tendenz negativ. Im Vergleich wird weiterhin deutlich, dass die Anbindung an den Regelleistungsmarkt einen weitaus größeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nimmt als die grundsätzlich veränderte Struktur des Energieversorgungssystems.

Zusammenfassend kann zwar historisch eine wirtschaftliche Darstellbarkeit eines DLSK unter Berücksichtigung des Regelleistungsmarktes festgestellt werden, jedoch erweist sich die Perspektive zukünftig als problematisch. Dies resultiert insbesondere aus fehlenden Einnahmequellen an der Minutenreserve, welche die systemischen Dienstleistungen des Kraftwerkes honoriert. Die alleinigen strukturellen Veränderungen im zukünftigen Energiesystem führen zu keinem Business Case für Kraftwerksbetreiber.

## 7.5.2 Erweiterter Szenariorahmen

Die Abweichungen der Kapitalwerte aus den Simulationen mit veränderten Rahmenbedingungen im Vergleich zum Basisszenario 2035 sind der Abbildung 26 zu entnehmen. Insgesamt wird deutlich, dass die untersuchten Größen das Ergebnis nur geringfügig um knapp 2 % gegenüber dem Basisszenario 2035 (Kapitalwert – 102 Mio. €) verändern. Somit verhält sich die Wirtschaftlichkeit des simulierten DLSK relativ robust gegenüber veränderten Rahmenbedingungen im Energiesystem. Zudem wird kein Umstand nachgewiesen, in welchem das Kraftwerk rentabel betrieben werden kann.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



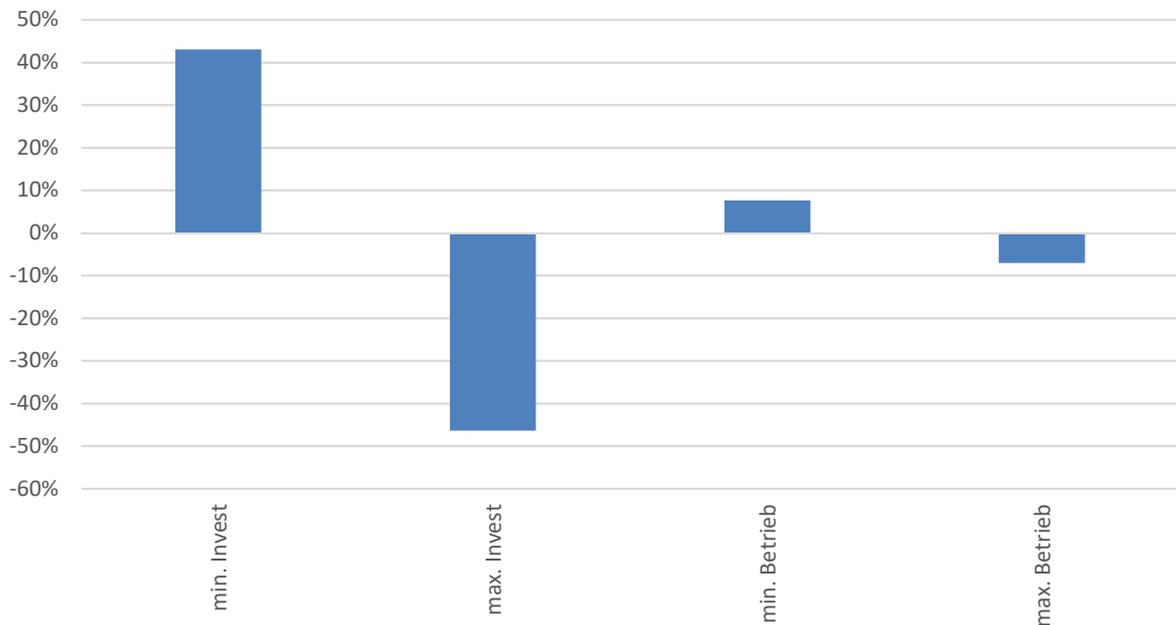
**Abbildung 26: Abweichungen des Kapitalwertes zum Szenario 2035 durch veränderte Rahmenbedingungen im Energieversorgungssystem für D\_Rek 100/100/8**

Wie erwartet jedoch verbessert sich die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks bei sinkenden Brennstoffkosten und Emissionskosten. Nichtsdestotrotz bleiben Gewinne und Kapitalwert deutlich negativ. Einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit präsentieren weiterhin das Szenario mit einem um 25 % gesteigerten Anteil erneuerbarer Energien als auch das Szenario mit einer um 25 % gesenkten Marktnachfrage. Mit Bezug auf die unterstellten Spotmarktpreise der jeweiligen Jahre zeigt sich, dass die positiv beeinflussenden Szenarien tendenziell einen niedrigeren durchschnittlichen Spotmarktpreis sowie einen größeren Spread aufweisen. Die Veränderung der Import- und Exportkapazitäten nach Norwegen hat dagegen einen vernachlässigbar geringen negativen Einfluss auf den Kapitalwert.

Neben den Unsicherheiten, die aus den Rahmenbedingungen des Energiesystems resultieren, bestehen aufgrund geringer Erfahrungswerte zusätzlich Risiken in den angenommenen Investitions- und Betriebskosten. Auf Basis verschiedener Literaturquellen werden jeweils minimale und maximale Grenzen erarbeitet und analysiert (siehe Anhang F). In der Abbildung 27 ist zu erkennen, dass die Investitionskosten einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nehmen. Dennoch kann eine Verbesserung des Kapitalwertes von ca. 40 % durch geringere Investitionskosten die Wirtschaftlichkeit nicht in einen positiven Bereich wenden. Die Betriebskosten beeinflussen das Ergebnis im Vergleich dazu im geringeren Maß, wobei ein höherer Einfluss als bei den systemischen Rahmenbedingungen vorliegt.

Es kann somit abschließend festgehalten werden, dass die systemischen Rahmenbedingungen lediglich einen geringen Einfluss auf die Betriebswirtschaftlichkeit eines DLSK nehmen. Hervorzuheben ist der

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



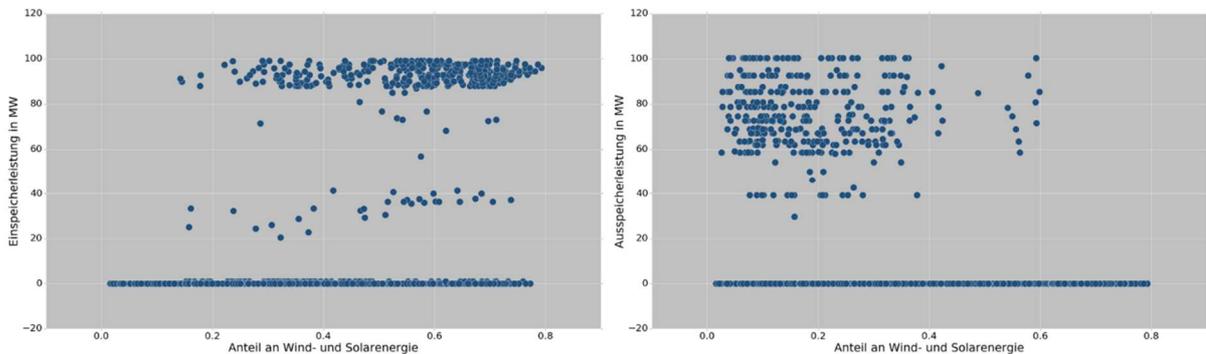
**Abbildung 27: Abweichungen des Kapitalwertes zum Szenario 2035 durch Annahme minimaler/maximaler Investitions- und Betriebskosten für D\_Rek 100/100/8**

Einfluss der Investitionskosten, welche daher für die Praxis einer eindringlichen Prüfung unterliegen sollten. Ohne eine Honorierung des systemischen Nutzens in Form des Einsatzes am Regelleistungsmarktes oder einer Speicherförderung ist insgesamt die Perspektive von DLSK als betriebswirtschaftlich problematisch zu bewerten.

## 7.6 Systemischer Nutzen

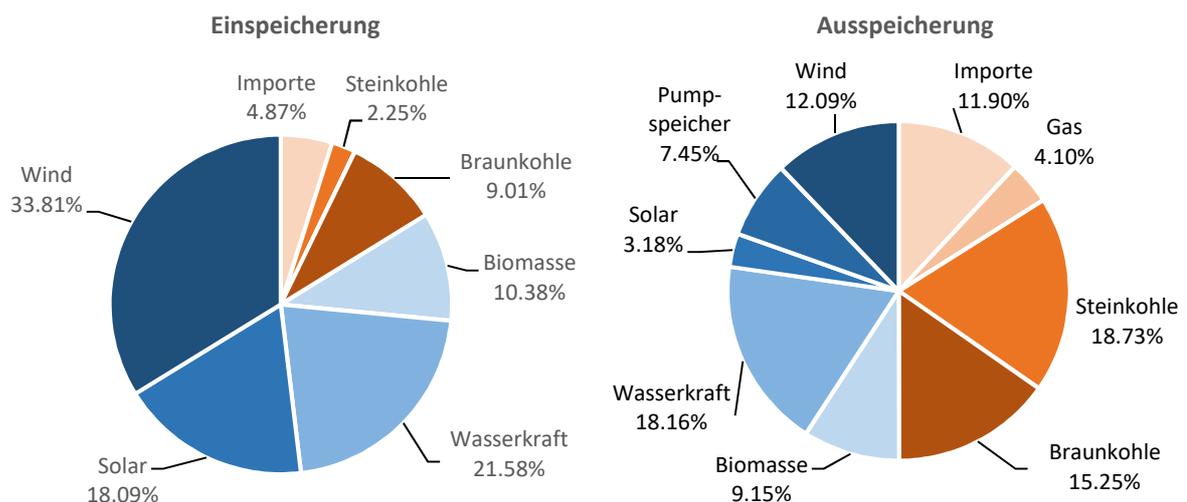
Neben der betriebswirtschaftlichen Bewertung eines DLSK geben die Simulationsergebnisse bereits einen ersten Hinweis auf die Systemdienlichkeit derartiger Kraftwerke. Speziell in Schleswig-Holstein ist die weitere Integration der erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie, von hoher Bedeutung. Speicher unterstützen dies indem sie bei einer Überschussproduktion möglicherweise Abschaltarbeit verhindern. Eine Analyse der Ein- und Ausspeicherzeiträume im Vergleich mit den jeweils abgerufenen Kraftwerkskapazitäten zeigt, dass DLSK in diesem Zusammenhang fördernd im Energiesystem agieren können.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



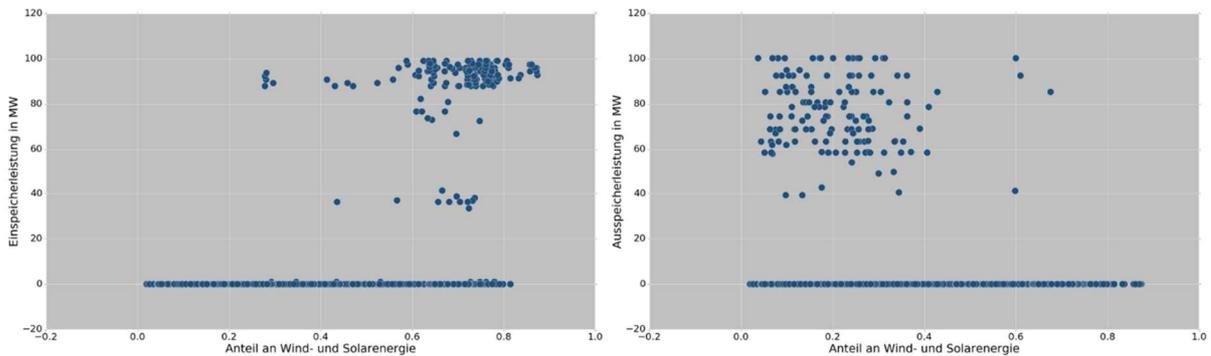
**Abbildung 28: Einspeicher- und Auspeicherleistung im Verhältnis zum Anteil von Wind- und Solarenergie an der gesamten abgerufenen Leistung im Jahr 2025**

Abbildung 28 präsentiert für D\_TES im Jahr 2025 beispielhaft, dass das Kraftwerk tendenziell in Zeiten mit einem hohen Anteil von Wind- und Solarenergie an den abgerufenen Kapazitäten Energie einspeichert. In diesen Zeiten treten bereits heute häufig Abregelungen durch das Einspeisemanagement seitens der Netzbetreiber auf. Im Gegensatz dazu erfolgen Auspeicherprozesse eher bei niedrigem Anteil erneuerbarer Wind- und Solarleistung. Zur Hervorhebung dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 29 nochmals die charakteristische Zusammensetzung der Stromerzeugung während Ein- und Auspeicherprozessen dargestellt. Während des Ladevorgangs liegt der Anteil der erneuerbaren Energien bei etwa 84 % im Jahr 2025. Dagegen erfolgt die Strombereitstellung eher in Zeiten mit geringem Angebot der fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen. Im Jahr 2025 liegt der Anteil hier bei etwa 50 % (bei Ladung der Pumpspeicher mit erneuerbaren Energien).



**Abbildung 29: Durchschnittliche Zusammensetzung der Stromerzeugung im Jahr 2025 während der Ein- und Auspeicherung**

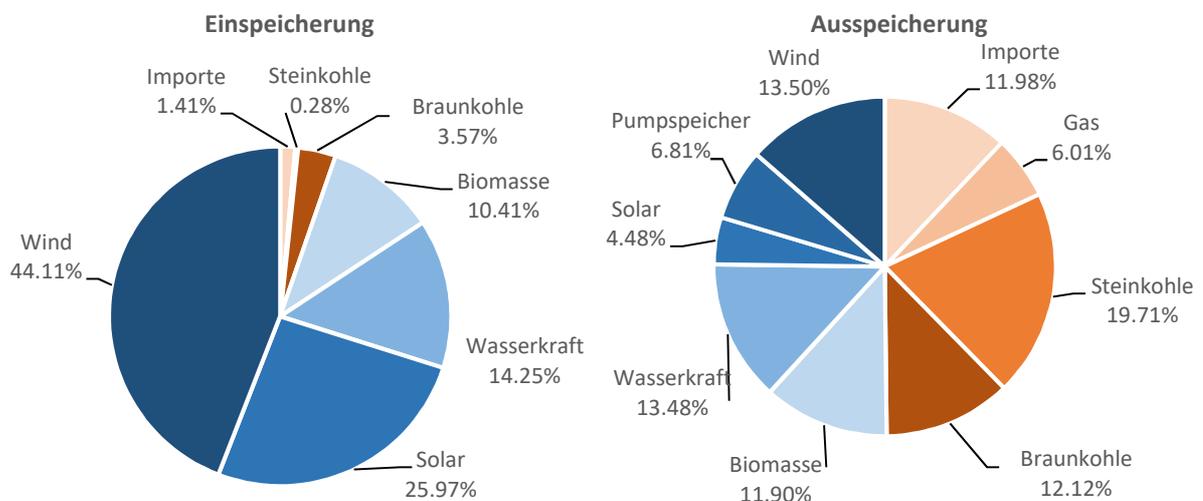
Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 30: Einspeicher- und Ausspeicherleistung im Verhältnis zum Anteil von Wind- und Solarenergie an der gesamten abgerufenen Leistung im Jahr 2035**

Noch stärker erweist sich dieser Zusammenhang in den Simulationsergebnissen für das Jahr 2035 (Abbildung 30 -Abbildung 31) aufgrund der weiterhin gestiegenen installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien. Die durchschnittliche Zusammensetzung der Stromerzeugung während der Einspeicherung verfügt über einen Anteil von 95 % der regenerativen Energien. Während der Ausspeicherung dagegen bleibt dieser wie auch schon im Jahr 2025 bei etwa 50 %. Damit kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Speicherprozessen und dem jeweiligen Strommix nachgewiesen werden.

Der Anteil der erneuerbaren Energien im Energiesystem führt zu einem eindeutigen Preissignal, welches wiederum ausschlaggebend für das Verhalten eines DLSK ist. Schlussfolgernd unterstützt der Betrieb eines Speichers im Energiesystem die Integration erneuerbarer Energien bereits marktgeführt ohne direkte konzeptionelle Anbindung. Zudem ersetzt ein DLSK ansonsten notwendige reine Spitzenlastkraftwerke in Zeiten geringer Anteile erneuerbarer Energien und reduziert somit die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gesamtsystems.



**Abbildung 31: Durchschnittliche Zusammensetzung der Stromerzeugung im Jahr 2035 während der Ein- und Ausspeicherung**

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 8 Diskussion der Ergebnisse

### 8.1 Schlussfolgerungen

Im folgenden Abschnitt werden die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und spezifisch auf die in Abschnitt 2.2 formulierten Leitfragen zur Bewertung der Attraktivität eines Druckluftspeicherkraftwerkes in Schleswig-Holstein bezogen. Somit kann schließlich übergeordnet die Technologieperspektive skizziert werden.

*Leitfrage 1: Welche Standorte in Schleswig-Holstein eignen sich für Druckluftspeicherkraftwerke?*

Schleswig-Holstein weist generell potentielle Standorte zur Errichtung und Betrieb eines DLSK auf. In Anlehnung an geologische Salzformationen existieren 14 Standorte, die als untersuchungswürdig einzustufen sind. Eine qualitative Bewertung dieser Gebiete mittels der Kriterien Salzstruktur, Nutzungsrechte, Netzanbindung, Stromerzeugungsanlagen, Anbindung an das Gasnetz, Abtransport der Sole und weitere Standortfaktoren führt jedoch zu einer Rangfolge in ihrer Eignung. Dabei wird als wichtiger Faktor die Entfernung zur Nord- und Ostsee, die zur Entsorgung der Sole eine bedeutende Rolle spielt, identifiziert. Das höchste Potential weisen die vier Standorte Belmhusen-Kuden-Süderhastedt, Marne-Heide-Süderstapel, Oldenswort Nord und Osterby auf. Daraus ist ersichtlich, dass Schleswig-Holstein auch bei Prüfung weiterer realisierungsrelevanter Kriterien ein großes Potential für ein DLSK aufweist.

*Leitfrage 2: Welche Schritte sind zur Erschließung dieser Standorte notwendig?*

Die wichtigsten planungstechnischen Schritte werden in der Standortgrobplanung identifiziert. Das diesbezüglich gewählte Vorgehen verfolgt einen universell gültigen Ansatz, welcher auf verschiedene spezifische Standorte anwendbar ist. Grundsätzlich sind die Bereiche der bergbaurechtlichen Fragestellungen und Belange, des Netzanschlussverfahrens und die Verfahrensschritte zur Kavernenherstellung notwendigerweise für den Planungs- und Genehmigungsprozess zu bedenken. Zusätzlich sind Interdependenzen mit der technischen Kraftwerksplanung ersichtlich und weitere baurechtliche Aspekte zu erfassen. Der erarbeitete Fahrplan zur Standortgrobplanung dient dazu, die Eignung der potentiellen Standorte nochmals einzugrenzen und eventuell relevante planungs- und genehmigungstechnische Faktoren miteinzubeziehen und somit den Planungsprozess zu vereinfachen.

*Leitfrage 3: Wie lang sind die zur Erschließung einzuplanenden Zeiträume?*

Aus einer Einzelbetrachtung der Bereiche bergbaurechtlicher Anträge und Fragestellungen, Netzanschlussverfahren und Verfahrensschritte bei der Kavernenherstellung ergibt sich ein Fahrplan, der den Planungs- und Genehmigungsprozess in logischer Abfolge zusammenfasst. Die Realisierung eines DLSK

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

umfasst laut diesem einen theoretischen Zeitraum von 8 Jahren zwischen Vorarbeiten zur Standortwahl bis hin zum Beginn der Kavernenherstellung und des Kraftwerksbaus, welcher wiederum mit 5 Jahren angenähert wird. Innerhalb des ersteren Abschnittes sind dem Fahrplan die benötigten Zeiträume für einzelne Prozessschritte, Fristen und Meilensteine zu entnehmen.

*Leitfrage 4: Welche Druckluftspeicherkraftwerke kommen für eine Realisierung in Betracht?*

Grundsätzlich können DLSK in verschiedenen technischen Konzepten dargestellt werden. Diese unterscheiden sich vornehmlich in ihrer Komplexität und ihrer Gewichtung von Speicher- und Spitzenlastanteil. Nach einer ersten qualitativen, multikriteriellen Bewertung erweisen sich vier Konzepte als besonders realisierungsrelevant:

1. Adiabates DLSK mit TES (A\_TES)
2. Diabates DLSK mit TES (D\_TES)
3. Diabates DLSK mit Rekuperator (D\_Rek)
4. Diabates DLSK mit TES und Dampfkreislauf (D\_TES\_Dampf)

*Leitfrage 5: Welches technische Konzept hat für den Betreiber derzeit die größte Attraktivität?*

Im Rahmen der Simulation des Kraftwerksbetriebes im Spot- und tertiären Regelleistungsmarkt für die Jahre 2012 bis 2014 zeigt sich, dass die ausgewählten Konzepte mit einem optimierten Einsatz aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten darstellbar sind. Insgesamt werden jährlich signifikant sinkende Einnahmen für die vier betrachteten Konzepte nachgewiesen, wobei das Niveau konzeptübergreifend gleich ist. In der Folge sind die Investitionskosten ausschlaggebend für die betriebswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit im Konzeptvergleich. Als besonders aussichtsreich in diesem Zusammenhang werden das D\_Rek sowie das D\_TES identifiziert. Das Erstere ist gekennzeichnet durch einen hohen Spitzenlastanteil, das Letztere durch eine flexibel gestaltbare Gewichtung von Speicher und Spitzenlast. Das reine Speicherkonzept des adiabaten DLSK setzt sich in der betriebswirtschaftlichen Bewertung vor allem aufgrund hoher Investitionskosten nicht durch.

*Leitfrage 6: Wie groß sollten installierte Leistungen und Speicherkapazitäten von Einzelanlagen sein?*

Die attraktivsten Konzepte D\_Rek und D\_TES weisen je nach Dimensionierung unterschiedliche betriebswirtschaftliche Potentiale auf. Dabei zeigt sich, dass Verhältnisse von Einspeicher- zu Ausspeicherleistung von etwa 2 im aktuellen Marktumfeld beste Ergebnisse erwirtschaften. Bezüglich des Konzeptes D\_Rek stellen sich optimale Dimensionierungen im Bereich kleiner (10 MW) und mittlerer Leistungsklassen (100 MW) heraus, die verschiedenen Anwendungsbereichen zuzuordnen sind. Darüber hinaus sind mittlere Speicherkapazitäten von 9 – 13 h Ausspeicherdauer (Volllast) vorzusehen. Insgesamt erreicht das D\_Rek mit einer optimierten Dimensionierung eine interne Verzinsung von 8 % für

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

das Jahr 2014. Das Konzept D\_TES kann diesen Wert speziell für Speichieranwendungen, in denen eine geringe Speicherkapazität von etwa 1 h unabhängig von der Leistungsklasse, mit 9 % übertreffen. Konsequenterweise muss die praktische Auswahl des jeweils aussichtsreicheren der beiden technischen Konzepte am konkreten Anwendungsfall ausgerichtet werden.

*Leitfrage 7: Führt ein betriebswirtschaftlich orientierter Betrieb zum gewünschten Systemeffekt?*

Speziell für den Standort Schleswig-Holstein ist die Netzintegration der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energien von hoher Bedeutung. Speicher können in diesem Sinne systemdienlich agieren, indem sie Strom in Zeiten hoher Produktion aus erneuerbaren Energien dem Netz entziehen und speichern bis die Nachfrage das Angebot übersteigt. Dieser fördernde Systemeffekt kann bei dem betriebswirtschaftlich optimierten Betrieb eines DLSK qualitativ beobachtet werden. Der durchschnittliche Strommix während eines Einspeicherprozesses weist einen überdurchschnittlich hohen Anteil erneuerbaren Energien auf, et vice versa. Daraus wird gefolgert, dass durch den Betrieb des Speichers die erneuerbaren Energien z.B. durch vermiedene Abregelungen vermehrt in das Energiesystem integriert werden.

*Leitfrage 8: Welche Märkte sind für einen wirtschaftlichen Betrieb von Bedeutung?*

Bereits anhand der DLSK-Simulationen mit Bezug auf die historische Preiszeitreihen 2012 – 2014 kann eine differenzierte Bedeutung des Spot- und tertiären Regelleistungsmarktes erwiesen werden. Konzeptübergreifend richten DLSK ihren Betrieb primär am Regelleistungsmarkt und unterstützen diesen durch Einsätze am Spotmarkt. Preisentwicklungen am Regelleistungsmarkt haben daher einen vergleichsweise hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Ohne Berücksichtigung dieses Marktes kann für kein DLSK-Konzept bzw. keine Dimensionierung eine betriebswirtschaftliche Darstellbarkeit allein am Spotmarkt nachgewiesen werden. Die fehlende Honorierung des systemdienlichen Effektes des DLSK durch den Spotmarkt wird auch in beispielhaften Zukunftsszenarien deutlich. Die Technologieperspektive hängt also zwangsläufig von einem zusätzlichen Markt oder Mechanismus ab, welcher die systemdienliche Wirkung von Speichern belohnt.

*Leitfrage 9 + 10: Wie verändert sich die Bewertung durch einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien? Wie beeinflusst eine sich entwickelnde Netzstruktur den Speichereinsatz?*

Mit dem Ziel das zukünftige Potential der Technologien im veränderten Energiesystem darzustellen, wird der Betrieb von DLSK in Szenarien untersucht, die die systemischen Veränderungen im Bereich der Erzeuger- und Netzinfrastruktur in Form von Einsatz- und Marktpreiszeitreihen repräsentativ für die Jahre 2025 und 2035 ausdrücken. Dabei wird das Einsatzpotential am tertiären Regelleistungsmarkt zukünftig als sehr gering eingestuft, sodass dieser für die Einsatzplanung nicht berücksichtigt

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

wird. In der Konsequenz wächst die Bedeutung des Spotmarktes für den Einsatz von DLSK. Insgesamt skizzieren die Szenarien ein steigendes durchschnittliches Preisniveau bei einem in der Tendenz ebenfalls steigendem Spread am Spotmarkt. Die Simulationen von D\_Rek und D\_TES ergeben unter Berücksichtigung dieser Szenarien im Vergleich zu den Jahren 2012 – 2014 deutlich abweichende wirtschaftliche Ergebnisse. Historisch durchaus darstellbar, erweist sich die Investition in DLSK in der Zukunft als unwirtschaftlich. Insbesondere der Wegfall des tertiären Regelleistungsmarktes führt zu jährlichen betrieblichen Verlusten für alle geprüften Dimensionierungen. Der erhöhte Anteil erneuerbarer Energien bzw. die veränderte Netzstruktur beeinflussen die Betriebsergebnisse lediglich in einem geringen positiven Maß. Alles in allem ist die zukünftige Technologieperspektive als problematisch zu erachten.

*Leitfrage 11: Wie robust ist die Bewertung hinsichtlich der Unsicherheiten zukünftiger Szenarien?*

Die zukünftige Entwicklung des Energiesystems kann lediglich mit hohen Unsicherheiten angenähert werden. Aus diesem Grund ist es von besonderem Interesse, die einflussreichsten Faktoren für die Technologieperspektive eines DLSK zu identifizieren. Die Veränderung der Betriebswirtschaftlichkeit durch unterschiedliche Randbedingungen im Energiesystem sowie abweichende Kostenstrukturen implizieren die Robustheit der vorliegenden Bewertung. Die Sensitivitätsanalyse der Randbedingungen im Energiesystem zeigt, dass steigende Spotmarktpreise vor allem durch einen Anstieg der Stromnachfrage und Brennstoffpreise verursacht werden. Sinkende Preise prägen sich hingegen durch einen zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien aus. Zudem hat die Anbindung an die norwegischen Wasserkraftwerke einen preismildernden Effekt bestätigt. Grundsätzlich bedingen systemische Randbedingungen, die zu einem niedrigen Preisniveau bei hohem Spread führen, eine verbesserte wirtschaftliche Situation. Dennoch können keine bedeutenden Veränderungen der Einkommenssituation festgestellt werden. Die Sensitivitätsanalyse unterstreicht daher nochmals die wirtschaftlich problematische Situation für DLSK aufgrund jährlicher Betriebsverluste.

Übergeordnet erweist sich die Technologieperspektive aus standorttechnischer Sicht für Schleswig-Holstein als durchaus positiv. Es existieren potentielle Standorte, die mittels identifizierter Planungs- und Genehmigungsschritte erschlossen werden können. Dabei unterstützt der entwickelte Fahrplan zur Standortgrobplanung. Auch aus technischer Sicht ist die Machbarkeit von DLSK gegeben. Problematisch hingegen erweist sich die wirtschaftliche Perspektive. Aktuelle Rahmenbedingungen implizieren zwar einen rentablen Betrieb, zukünftige Entwicklungen können jedoch insbesondere durch fehlende Vergütung der systemdienlichen Wirkung zu einer wirtschaftlich problematischen Situation führen. Vor dem Hintergrund der langfristigen Planungshorizonte zur Errichtung eines DLSK ist die wirtschaftliche Unsicherheit durch zukünftige Entwicklungen ein hohes Risiko für einen potentiellen Betreiber.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, dass die zukünftigen Veränderungen im Energiesystem für DLSK eine große wirtschaftliche Herausforderung darstellen. Unter den angenommenen Bedingungen ist ein rentabler Betrieb nicht möglich. Daher ist eine Anpassung der optimierten Kraftwerksdimensionierungen an zukünftige Bedingungen momentan nicht zielführend. Nichtsdestotrotz erscheint der Speicherbetrieb für die Integration erneuerbarer Energien systemisch förderlich.

## 8.2 Methodische Kritik

Grundsätzlich zeigen die ausführlich dargestellten Arbeitsergebnisse, dass die Ziele des Projektes „Druckluftspeicherkraftwerke in Schleswig-Holstein (DLSK-SH)“ umfassend erfüllt wurden. Die Evaluierung der Potentiale von DLSK in Schleswig-Holstein erfolgte sowohl bezüglich potentieller Standorte, der technischen Machbarkeit als auch bezüglich des Einsatzes im Energiesystem.

Die Standortbewertung basiert auf einer qualitativen Evaluation von relevanten Kriterien. Die im Zuge dessen benötigten Daten sind jedoch zum Teil unzureichend verfügbar und mit Unsicherheiten behaftet. Dieser Sachverhalt wird in der Auswertung durch die Anpassung der Kriteriengewichtung berücksichtigt. Nichtsdestotrotz sind im Rahmen spezifischer Standortbewertungen genauere Analysen zur Bewertung heranzuziehen, die größtenteils mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden sind. Die dargestellte Rangfolge dient somit als Grundlage für eine Einschätzung der generellen Machbarkeit sowie als Entscheidungshilfe für einen Standort in Schleswig-Holstein. Eine ähnliche Gültigkeit besteht für den Fahrplan zur Standortgrobplanung, welcher die wichtigsten Planungsschritte identifiziert und methodisch universell beschreibt. Aufgrund dessen ist zudem eine partielle Übertragbarkeit auf Standorte im gesamten Gebiet Deutschlands zu vermuten.

Die technische Machbarkeit von DLSK ist durch umfangreiche Literaturrecherchen, durch Anlegung qualitativer Kriterien und durch thermodynamische Prozesssimulationen geprüft. Gemäß der Zielsetzung des Projektes sind praktische Untersuchungen unterblieben. Insgesamt zeigen die bisher operierenden DLSK, dass eine grundsätzliche Machbarkeit gegeben ist. Hinsichtlich komplexerer Konzepte, die beispielsweise TES oder Dampfkreisläufe beinhalten, ist jedoch zu prüfen inwieweit markt-reife Komponenten verfügbar, anzupassen und weiterzuentwickeln sind.

Das wirtschaftliche Potential der DLSK wird auf Basis von Simulationen im Energiesystem überprüft. Die an das Modell zu übergebende Beschreibung des Betriebsverhalten der einzelnen Technologien erfolgt vereinfacht in linearen Zusammenhängen. Die Überprüfung dieses Vorgehens ergibt jedoch, dass die dadurch entstehenden Abweichungen in der Simulation einen unbedeutenden Einfluss haben. Des Weiteren wird mit diesem Vorgehen verhindert, dass die Gültigkeit nur für spezifische Komponentendesigns nachgewiesen wird.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Dagegen ist die Modellierung zukünftiger Energieversorgungssysteme grundsätzlich mit hohen Unsicherheiten verbunden, da die Komplexität großer, länderübergreifender Systeme stets eine Reduktion der Problemstellung auf die wichtigsten Fundamentalfaktoren erfordert und zukünftige Entwicklungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht genau prognostizierbar sind. Somit stellen die in Form von Szenarien angenommenen zukünftigen Entwicklungspfade eine strukturelle Unsicherheit dar und sollten vielmehr als Indiz interpretiert werden, wie sich die jeweilige energiewirtschaftliche Entwicklung auf den Speicherbetrieb auswirken würde.

### 8.3 Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen die standortbezogenen, technischen und wirtschaftlichen Potentiale von DLSK auf. Aufgrund der jährlichen Betriebsverluste unter Berücksichtigung der Zukunftsszenarien stellt die betriebswirtschaftliche Machbarkeit für DLSK perspektivisch gesehen eine Herausforderung dar. Aus den Analysen wird deutlich, dass insbesondere die Konzepte mit hohem Speicheranteil finanzielle Probleme bedingen. Es wird vermutet, dass anderweitige Energiespeicher durch die zukünftige Entwicklung vor den gleichen Herausforderungen stehen wie DLSK.

Daher steht im Zentrum weiterer Untersuchungen die Frage, inwiefern die positive Wirkung auf die Integration erneuerbarer Energien bzw. die Systemdienlichkeit eines Energiespeichers durch politische Maßnahmen und Anpassung der Randbedingungen gefördert werden sollte. Ist der Betrieb aus Systemsicht sinnvoll, ist zu klären, welche Rahmenbedingungen einen wirtschaftlichen Betrieb aus Sicht der Akteure erlauben. Eine Förderung des Einsatzes am Regelleistungsmarktes bzw. auch ein Speicherbonus sind Beispiele für derartige Maßnahmen, welche die Integration von Speichern unterstützen können. Weil davon auszugehen ist, dass sich andere Speichertechnologien im gleichen Spannungsfeld bewegen, ist auch auf die Positionierung von DLSK im Vergleich zu diesen und anderen Flexibilität- und Besicherungsoptionen zu untersuchen.

Insbesondere für den norddeutschen Raum ist es von übergeordnetem Wert die Netzdienlichkeit eines möglichen DLSK zu bewerten. Im Zuge dessen ist die ausführliche Abbildung der Netzinfrastruktur als lineares DC-Modell zu implementieren. Unter dieser Voraussetzung sind zudem Analysen zu alternativen zukünftigen Betriebszenarien, wie beispielsweise der Nutzung als netzentlastender Pufferspeicher, möglich.

Im Falle eines positiven Beitrages sowie der betriebswirtschaftlichen Darstellbarkeit kann in den nächsten Schritten der Fahrplan zur Standortplanung in die Praxis umgesetzt werden. Dabei sind spezifische geologische Voraussetzungen für die jeweiligen Standorte sind zu prüfen. Außerdem kann möglicherweise auch die Übertragbarkeit auf deutschlandweite Bereiche relevant sein.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Literaturverzeichnis

- [1] C. Doetsch, A. Kanngießler, D. Wolf, S. Schinz, M. Sperling, H. Frey und A. Kaptue Kamga, „Netzintegrierte Stromspeicher zur Integration fluktuierender Energie - Technologische Anforderungen, ökonomischer Nutzen, reale Einsatzszenarien,“ Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, 2011.
- [2] P. Moser, R. Marquardt, S. Freund, M. Klafki und P. Pijanovic, „Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung - Der nächste Schritt: ADELE-ING,“ in *Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 4*, Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, pp. 803 - 814.
- [3] 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].
- [4] Schleswig-Holstein Netz AG, [Online]. Available: <https://www.sh-netz.com/cps/rde/xchg/sh-netz/hs.xsl/136.htm>.
- [5] P. L. Horvath, Interviewee, *Dipl.-Geol.*. [Interview]. 25 September 2014.
- [6] E.ON Netz, „Kraftwerks-Netzanschlussverfahren - Unterlagenliste,“ 30 04 2008. [Online]. Available: [https://www.sh-netz.com/cps/rde/xbcr/sh-netz/Unterlagenliste\\_f\\_KW-Anschlussprfg\\_nach\\_KraftNAV.pdf](https://www.sh-netz.com/cps/rde/xbcr/sh-netz/Unterlagenliste_f_KW-Anschlussprfg_nach_KraftNAV.pdf). [Zugriff am 20 10 2016].
- [7] D. Wolf, „Methods for Design and Application of Adiabatic Compressed Air Energy Storage Based on Dynamic Modeling,“ Verlag Karl Maria Laufen, Bochum, 2010.
- [8] 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.
- [9] I. Tuschy, „Druckluftspeicherkraftwerke als Option zur Netzintegration erneuerbarer Energiequellen: Ein Vergleich der Konzepte,“ in *40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium*, Dresden, 2008.
- [10] C. Schlitzberger, R. Leithner und L. Nielsen, „Isobares GuD - Druckluftspeicherkraftwerk mit Wärmespeicher,“ in *40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2008*, Dresden, 2008.
- [11] S. Lemofouet-Gatsi, „Investigation and Optimisation of Hybrid Electricity Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors,“ École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2006.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [12] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde und J. Gómez, „Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001.
- [13] G. Sheble und G. Fahd, „Unit Commitment Literature Synopsis,“ IEEE Transactions on Power Systems, 1994.
- [14] F. Salgado und P. Pedrero, „Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey,“ Electric Power Systems Research, 2008.
- [15] H. Lund, G. Salgi, B. Elmegaard und A. N. Andersen, „Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices,“ Applied Thermal Engineering, 2009.
- [16] J. Kallrath, Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis (2. Auflage), Springer-Verlag, 2014.
- [17] M. Steck, „Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke (Dissertation),“ Technische Universität München, 2012.
- [18] T. Ommen, W. Brix Markussen und B. Elmegaard, „Comparison of linear, mixed integer and non-linear programming methods in energy system dispatch modelling,“ Energy, 2014.
- [19] P. Havel und T. Šimovič, „Optimal planning of cogeneration production with provision of ancillary services,“ Electric Power Systems Research, 2013.
- [20] L. Suhl und T. Mellouli, Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen, Springer-Verlag, 2009.
- [21] J. Kallrath, Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [22] G. Wilson, D. Aruliah, C. Brown, N. Chue Hong, M. Davis und R. Guy, „Best Practices for Scientific Computing,“ PLoS Biology, 2014.
- [23] E. Thorin, H. Brand und C. Weber, „Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment,“ Applied Energy, 2005.
- [24] W. E. Hart, C. Laird, J.-P. Watson und D. L. Woodruff, Pyomo - Optimization Modeling in Python, Springer-Verlag, 2012.
- [25] „Gurobi Optimization: Der State-of-the-Art Löser für mathematische Programme.,“ [Online]. Available: <http://www.gurobi.com>.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [26] „Free Software Foundation (FSF): GLPK (GNU Linear Programming Kit),“ [Online]. Available: <http://www.gnu.org/software/glpk>.
- [27] „pandas: Python Data Analysis Library,“ [Online]. Available: <http://pandas.pydata.org>.
- [28] C. Kaldemeyer und C. Boysen, „A Python Unit Commitment Model for Different Concepts of CAES Power Plants,“ [Online]. Available: <https://osf.io/vkrh6/>.
- [29] F. Wiese, „renpass (Renewable Energy Pathways Simulation System),“ 2016. [Online]. Available: <http://renpass.eu/>.
- [30] C. Kaldemeyer, M. Söthe, S. Hilpert und C. & Wingenbach, „renpassGIS - A Free and Open Python Tool for Simulating Energy Supply Systems. Retrieved from osf.io/kp4mh,“ Open Science Framework, 2016.
- [31] ENTSOE-E, „European Network of Transmission System Operators (ENTSO-E). Ten-Year Network Development Plan 2014,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/major-projects/ten-year-network-development-plan/tyndp-2014/Pages/default.aspx>.
- [32] P. R. Gribik, W. W. Hogan und S. L. Pope, „Market-Clearing Electricity Prices and Energy Uplift,“ *Fifth Conference on "The Economics of Energy Markets"*, 2007.
- [33] R. Loulou, G. Goldstein und K. Noble, „Documentation for the MARKAL Family of Models,“ 2004. [Online]. Available: [http://iea-etsap.org/MrkIDoc-I\\_StdMARKAL.pdf](http://iea-etsap.org/MrkIDoc-I_StdMARKAL.pdf).
- [34] C. Kaldemeyer, C. Boysen und I. Tuschy, „Compressed Air Energy Storage in the German Energy System – Status Quo & Perspectives. In: Energy Procedia. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.120>,“ Elsevier, 2016.
- [35] E. T. Platform, 2016. [Online]. Available: <https://www.eex.com/de/about/eex/transparency-in-energy-markets>.
- [36] „Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.regelleistung.net/ext/>.
- [37] C. Kaldemeyer, „Betriebsoptimierung von Druckluftspeicherkraftwerken am Spot- und Regelleistungsmarkt (Masterthesis),“ Europa-Universität Flensburg, 2015.
- [38] Regelleistung.net, „Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.regelleistung.net/ext/>.
- [39] Bundesnetzagentur (BNetzA), „Netzentwicklungsplan Strom 2025, Version 2015,“ 2016. [Online]. Available: [http://www.netzentwicklungsplan.de/\\_NEP\\_file\\_transfer/NEP\\_2025\\_1\\_Entwurf\\_Teil1.pdf](http://www.netzentwicklungsplan.de/_NEP_file_transfer/NEP_2025_1_Entwurf_Teil1.pdf).

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [40] Renewables.ninja, „About,“ 2016. [Online]. Available: <https://beta.renewables.ninja/about>.
- [41] I. Staffell und S. Pfenninger, „Using Bias-Corrected Reanalysis to Simulate Current and Future Wind Power Output (in review),“ *Energy*, 2016.
- [42] S. Pfenninger und I. Staffell, „Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data (in review),“ *Energy*, 2016.
- [43] M. Christ, W.-D. Bunke, M. Söthe und C. Kaldemeyer, „(Fl)ensburg (En)ergy (S)cenarios - NEP Scenarios for 2014/2025/2035,“ [Online]. Available: <https://osf.io/rz7fq/>.
- [44] Agentur für erneuerbare Energien, „Entwicklung der Stromgroßhandels- und der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise,“ 17 12 2013. [Online]. Available: <http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/entwicklung-der-stromgrosshandels-und-der-co2-zertifikatspreise-1.html>. [Zugriff am 20 10 2016].
- [45] G. Wöhe, Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, München: Vahlen, 2010.
- [46] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [47] Evonik, „Druckluftspeicher zur Energiespeicherung in stillgelegten Salzbergwerken und Stabilisierung der Grubenhohlräume,“ Evonik, Saarbrücken, 2009.
- [48] B. Stöver, C. Bergins, A. Alekseev und C. Stiller, „Flüssigenergiespeicher (LAES): ein flexibles System für großtechnische Anwendungen,“ in *Kraftwerkstechnik 2014*, 2014.
- [49] I. Cyphelly, P. Brückmann, W. Menhardt und A. Reller, „Einsatz von Druckluftspeichersystemen,“ Bundesamt für Energie, Les Brenets, 2004.
- [50] P. Konstantin, Praxis Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, Springer, VDI, 2007.
- [51] B. Zakeri und S. Syri, „Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [52] F.-E. Jordt, J. Jürgensen und J. M. Thomsen, „Untersuchung zum Einsatz eines Druckluftspeicherkraftwerkes für die Region Schleswig-Holstein,“ Flensburg, 2014.
- [53] E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello und D. G. Friend, „Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa,“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Nr. 29, pp. 331-385, jan 2000.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [54] H.-J. Kretzschmar, I. Stoecker, I. Jaehne, K. Knobloch, M. Kunick, T. Hellriegel, L. Kleemann und D. Seibt, *Property Library for Humid Air Calculated as Ideal Mixture of Real Fluids - FluidEXL Graphics with LibHuAir for Excel*, Zittau/Görlitz: Zittau/Görlitz University of Applied Sciences, Department of Technical Thermodynamic.
- [55] A. Stodola, *Dampf- und Gasturbinen*, Berlin: Springer Verlag, 1922.
- [56] W. Bohl, *Strömungsmaschinen 1 - Aufbau und Wirkungsweise*, 6. Hrsg., Würzburg: Vogel (Vogel-Fachbuch) (Kamprath-Reihe), 1994.
- [57] D. W. Boyd, O. E. Buckley und C. E. Clark Jr., „Assessment of Market Potential of Compressed Air Energy Storage Systems,“ *Journal of Energy*, pp. 549-556, Nov.-Dec. 1983.
- [58] Evonik New Energies GmbH, „Druckluftspeicher zur Energiespeicherung in stillgelegten Salzbergwerken und Stabilisierung der Grubenhohlräume,“ Evonik Industries, Saarbrücken, 2009.
- [59] K. Burges, M. Döring, C. Nabe, P. Härtel, M. Jentsch und C. Pape, „Untersuchung Energiespeicher in Schleswig-Holstein Kurzfassung,“ Ecofys, Berlin, 2014.
- [60] R. Madlener und J. Latz, „Centralized and Decentralized Compressed Air Energy Storage for Enhanced Grid Integration of Wind Power,“ E.ON Energy Research Center; RWTH Aachen, Aachen, 2010.
- [61] H. Lund und G. Salgi, „The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems,“ *Energy Conversion and Management*, pp. 1172-1179, March 2009.
- [62] D. J. Swider, „Compressed Air Energy Storage in an Electricity System With Significant Wind Power Generation,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 95-102, March 2007.
- [63] Energinet.dk und E. Styrelsen, „Technology Data for Energy Plants,“ Energinet.dk; Energi Styrelsen, 2012.
- [64] EPRI, „EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications,“ EPRI; U.S. Department of Energy, Palo Alto; Washington, 2003.
- [65] S. M. Schoenung, „Characteristics and Technologies for Long- vs. Short-Term Energy Storage,“ Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2001.
- [66] J. B. Greenblatt, S. Succar, D. C. Denkenberger, R. H. Williams und R. H. Socolow, „Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation,“ *Energy Policy*, pp. 1474-1492, June 2007.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [67] R. B. Schainker und Abhi Rao, „Compressed Air Energy Storage Scoping Study for California,“ California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program, Palo Alto, 2008.
- [68] G. Schaumann und K. W. Schmitz, Kraft-Wärme-Kopplung, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- [69] „Open Energy Modelling Framework - A modular open source framework to model energy supply systems,“ 2016. [Online]. Available: <http://github.com/oemof>.
- [70] S. Pfenninger, A. Hawkes und J. Keirstead, „Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [71] R. Weron, „Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future,“ *International Journal of Forecasting*, 2014.
- [72] C. Batlle und J. Barquin, „A strategic production costing model for electricity market price analysis,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005.
- [73] M. Ventosa, A. Baillo, A. Ramos und M. Rivier, „Electricity market modeling trends,“ *Energy Policy*, 2005.
- [74] N. Bowden und J. E. Payne, „Short term forecasting of electricity prices for MISO hubs: Evidence from ARIMA-EGARCH models,“ *Energy Economics*, 2008.
- [75] J. C. Cuaresma, J. Hlouskova, S. Kossmeier und M. Obersteiner, „Forecasting electricity spot-prices using linear univariate time-series models,“ *Applied Energy*, 2004.
- [76] A. Cruz, A. Muñoz, J. L. Zamora und R. Espínola, „The effect of wind generation and weekday on Spanish electricity spot price forecasting,“ *Electric Power Systems Research*, 2011.
- [77] D. R. a. H. M. R. Biggar, *The Economics of Electricity Markets*, John Wiley & Son, 2014.
- [78] S. Borenstein, J. Bushnell und F. Wolak, „Measuring Market Inefficiencies in California's Restructured Wholesale Electricity Market,“ *American Economic Review*, 2002.
- [79] P. Joskow und E. Kahn, „A Quantitative Analysis of Pricing Behavior In California's Wholesale Electricity Market During Summer 2000,“ *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000.
- [80] C. Pape, S. Hagemann und C. Weber, „Are fundamentals enough? Explaining price variations in the German day-ahead and intraday power market,“ *Energy Economics*, 2016.
- [81] A. Eydeland und K. Wolyniec, *Energy and power risk management: New developments in modeling, pricing, and hedging*, John Wiley & Sons, 2003.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [82] M. R. Lyle und R. J. Elliot, „A ‘simple’ hybrid model for power derivatives,“ *Energy Economics*, 2009.
- [83] V. Gonzalez, J. Contreras und D. W. Bunn, „Forecasting power prices using a hybrid fundamental-econometric model,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012.
- [84] N. V. a. B. D. W. Karakatsani’, „Forecasting electricity prices: The impact of fundamentals and time-varying coefficients,“ *International Journal of Forecasting*, 2008.
- [85] I. Vehviläinen und T. Pyykkönen, „Stochastic factor model for electricity spot price—the case of the Nordic market,“ *Energy Economics*, 2005.
- [86] I. Ellersdorfer, M. Hundt, N. Sun und A. Voß, „Preisbildungsanalyse des deutschen Elektrizitätsmarktes,“ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart, 2008.
- [87] C. Von Hirschhausen, H. Weigt und G. Zachmann, „Preisbildung und Marktmacht auf den Elektrizitätsmärkten in Deutschland: grundlegende Mechanismen und empirische Evidenz,“ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Public Sector Management, Technische Universität Berlin, Berlin, 2007.
- [88] C. Graf und D. Wozabal, „Measuring competitiveness of the EPEX spot market for electricity,“ *Energy Policy*, 2013.
- [89] C. Elberg und S. Hagspiel, „Spatial dependencies of wind power and interrelations with spot price dynamics,“ *European Journal of Operational Research*, 2015.
- [90] L. Ehrlich, J. Klamka und A. Wolf, „The potential of decentralized Power-to-Heat as a flexibility option for the German electricity grid: a microeconomic perspective,“ Hamburg Institute of International Economics (HWWI). ForschungskollegSiegen (FoKoS), 2015.
- [91] D. J. Swider, I. Ellersdorfer, M. Hundt und A. Voß, „Anmerkungen zu empirischen Analysen der Preisbildung am deutschen Spotmarkt für Elektrizität,“ Universität Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart, 2008.
- [92] M. H. E. Steck, „Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke. (Dissertation),“ Technische Universität München, 2012.
- [93] O. Richard, P. Sotkiewicz, B. Hobbs, M. Rothkopf und W. Stewart, „Efficient market-clearing prices in markets with nonconvexities,“ *European Journal of Operational Research*, 2004.
- [94] M. Bjørndal und K. Jörnsten, „Equilibrium prices supported by dual price functions in markets with non-convexities,“ *European Journal of Operational Research*, 2008.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [95] Bundesnetzagentur, „Kraftwerksliste,“ 10 05 2016. [Online]. Available: [http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html). [Zugriff am 20 10 2016].
- [96] Umweltbundesamt, „Datenbank - Kraftwerke in Deutschland,“ 25 08 2016. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland>. [Zugriff am 20 10 2016].
- [97] Open Power System Data, „A free and open data platform for power system modelling,“ 2016. [Online]. Available: <http://open-power-system-data.org/>.
- [98] VGB Power Tch, „Verfügbarkeit von Wärmekraftwerken 2003-2012,“ Essen, 2013.
- [99] „OpenMod Initiative. Promoting open energy modelling in Europe,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.openmod-initiative.org/>.
- [100] T. Gobmaier, W. Mauch, M. Beer, S. von Roon, T. Schmid, T. Mezger, J. Habermann und S. Hohlenburger, „Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens,“ Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2012.
- [101] 50hertz; Amprion; Tennet; Transnet BW, „Bericht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zur Leistungsbilanz 2015 nach EnWG § 12 Abs. 4 und 5,“ 30 09 2015. [Online]. Available: <http://www.amprion.net/sites/default/files/Leistungsbilanbericht%202015.pdf>. [Zugriff am 20 10 2016].
- [102] M. Robinius, F. t. Stein, S. Schiebahn und D. Stolten, „Lastmodellierung und -visualisierung mittels Geoinformationssystemen,“ 13. *Symposium Energieinnovation, Graz*, 2014.
- [103] M. Schumacher und L. Hirth, „How much Electricity do we Consume? A Guide to German and European Electricity Consumption and Generation Data (Working Paper),“ *Climate Change and Sustainable Development*, 2015.
- [104] EnBW-Transportnetze, „Allgemeines Modell zur Berechnung der Gesamtübertragungskapazität und der Sicherheitsmarge der ENBW Transportnetze AG,“ 2015.
- [105] C. Brancucci Martínez-Anido, „Electricity Without Borders. The need for cross-border transmission investment in Europe (Dissertation),“ Technische Universität Delft, 2013.
- [106] N. Koch, S. Fuss, Grosjean, Godefroy und O. Edenhofer, „Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a bit of everything?—New evidence,“ *Energy Policy*, 2014.
- [107] BMWi, „Zahlen und Fakten,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/zahlen-fakten.html>.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- [108] L. Perridon, M. Steiner und A. W. Rathgeber, Finanzwirtschaft der Unternehmung, München: Vahlen, 2014.
- [109] N. Bowden und J. E. Payne, „Short term forecasting of electricity prices for \{MISO\} hubs: Evidence from ARIMA-EGARCH models,“ *Energy Economics*, 2008.
- [110] N. V. Karakatsani und D. W. Bunn, „Forecasting electricity prices: The impact of fundamentals and time-varying coefficients,“ *International Journal of Forecasting*, 2008.
- [111] D. R. Biggar und M. R. Hesamzadeh, The Economics of Electricity Markets, John Wiley & Son, 2014.
- [112] M. Bjørndal und K. Jörnsten, „Equilibrium prices supported by dual price functions in markets with non-convexities,“ *European Journal of Operational Research*, 2008.
- [113] E. Thorin, H. Brand und C. Weber, „Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment,“ *Applied Energy*, Bd. 81, pp. 152-169, 2005.
- [114] Gurobi optimization, „Gurobi optimization,“ [Online]. Available: <http://www.gurobi.com>. [Zugriff am 2016].
- [115] GLPK, „GLPK,“ [Online]. Available: <http://www.gnu.org/software/glpk/>. [Zugriff am 2016].
- [116] Pandas, „Pandas,“ [Online]. Available: <http://pandas.pydata.org>.
- [117] Pyomo, „Pyomo,“ [Online]. Available: <http://www.pyomo.org>. [Zugriff am 2016].

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines Druckluftspeicherkraftwerks .....	7
Abbildung 2: Dimensionen der Bewertung im Projekt DLSK-SH .....	9
Abbildung 3: Modellübersicht zur Einsatzplanung eines DLSK .....	11
Abbildung 4: Klassifizierung der Druckluftspeicherkonzepte .....	33
Abbildung 5: Schaltbilder der adiabaten Konzepte.....	34
Abbildung 6: Schaltbilder der diabaten DLSK.....	35
Abbildung 7: Schaltbilder der hydropneumatischen Konzepte .....	37
Abbildung 8: Skizzierung des Modells zur Betriebsoptimierung eines Druckluftspeicherkraftwerks ..	46
Abbildung 9: Gesamtstruktur des Modells mit den Einzelkomponenten und Datenflüssen .....	48
Abbildung 10: Abstraktes Kraftwerksmodell als Grundlage der mathematischen Beschreibung .....	49
Abbildung 11: Exemplarische Linearisierung einer Kraftwerkscharakteristik.....	51
Abbildung 12: Exemplarischer kostenoptimaler Fahrplan als Ergebnis des Betriebsoptimierungsmodells .....	54
Abbildung 13: Modellierte Marktregionen auf Basis von [31].....	58
Abbildung 14 Funktionsweise des Modells zur Berechnung von Spotmarktpreisen.....	59
Abbildung 15: Exemplarische Ermittlung der Grenzarbeitspreise innerhalb einer Zeitscheibe .....	61
Abbildung 16: Modellierter Kraftwerkseinsatz in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU im Januar 2014 .....	66
Abbildung 17: Geordnete Jahresdauerlinien der Real- und Modellpreise für das Jahr 2014.....	67
Abbildung 18: Statistische Analyse der Zeitreihen 2012 - 2014 .....	68
Abbildung 19: Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen des Energieversorgungssystems auf die Preisbildung.....	70
Abbildung 20: Volllaststunden der DLSK-Konzepte 2012 - 2014 .....	76
Abbildung 21: Einnahmen der DLSK-Konzepte 2012 - 2014 .....	78
Abbildung 22: Interner Zinssatz der DLSK-Konzepte 2012 - 2014 .....	79

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Abbildung 23: Einfluss der Gewichtung von Speicher- und Spitzenlastanteil auf die Wirtschaftlichkeit .....	83
Abbildung 24: Vergleich der Einnahmen und des Kapitalwerts mit und ohne Einsatz am tertiären Regelleistungsmarkt (TR) für D_Rek 100/100/h im Jahr 2014.....	85
Abbildung 25: Vergleich der Kapitalwerte 2014 mit den Szenarien 2025 und 2035 für D_Rek 100/100/8 .....	86
Abbildung 26: Abweichungen des Kapitalwertes zum Szenario 2035 durch veränderte Rahmenbedingungen im Energieversorgungssystem für D_Rek 100/100/8.....	87
Abbildung 27: Abweichungen des Kapitalwertes zum Szenario 2035 durch Annahme minimaler/maximaler Investitions- und Betriebskosten für D_Rek 100/100/8 .....	88
Abbildung 28: Einspeicher- und Ausspeicherleistung im Verhältnis zum Anteil von Wind- und Solarenergie an der gesamten abgerufenen Leistung im Jahr 2025 .....	89
Abbildung 29: Durchschnittliche Zusammensetzung der Stromerzeugung im Jahr 2025 während der Ein- und Ausspeicherung.....	89
Abbildung 30: Einspeicher- und Ausspeicherleistung im Verhältnis zum Anteil von Wind- und Solarenergie an der gesamten abgerufenen Leistung im Jahr 2035 .....	90
Abbildung 31: Durchschnittliche Zusammensetzung der Stromerzeugung im Jahr 2035 während der Ein- und Ausspeicherung.....	90
Abbildung 32: Potentialkarte zur Druckluftspeicherung in Schleswig-Holstein .....	113
Abbildung 33: Schaltbild Adiabates DLSK mit thermischem Speicher A1a.....	121
Abbildung 34: Schaltbild Adiabates DLSK mit mehreren thermischen Speichern A1b.....	122
Abbildung 35: Schaltbild Adiabates DLSK ohne thermischen Speicher A2 .....	122
Abbildung 36: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher D1a.....	123
Abbildung 37: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher und Dampfteil D1b .....	123
Abbildung 38: Schaltbild Diabates DLSK D2a .....	124
Abbildung 39: Schaltbild Diabates DLSK mit Rekuperator D2b.....	124
Abbildung 40: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage D2c.....	125
Abbildung 41: Schaltbild Diabates DLSK mit Dampfteil D2d.....	125
Abbildung 42: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage und Dampfteil D2e .....	126
Abbildung 43: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK isotherm HP1a.....	126

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Abbildung 44: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK adiabat + isochor HP1b .....	126
Abbildung 45: Modell des thermischen Speichers.....	131
Abbildung 46: Lastfälle eines Druckluftspeicherkraftwerkes.....	133
Abbildung 47: Kompressionsleistung-Füllstand-Charakteristik für D_TES.....	135
Abbildung 48: Wärmeabfuhr-Kompressionsleistung-Charakteristik für D_TES.....	135
Abbildung 49: Einspeicherexergiestrom-Kompressionsleistung-Charakteristik für D_TES .....	136
Abbildung 50: Expansionsleistung-Füllstand-Charakteristik für D_TES .....	136
Abbildung 51: Wärmezufuhr-Expansionsleistung-Charakteristik für D_TES .....	137
Abbildung 52: Ausspeicherexergiestrom-Expansionsleistung-Charakteristik für D_TES.....	137
Abbildung 53: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D_Rek 2014 .....	140
Abbildung 54: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D_Rek 2014 .....	140
Abbildung 55: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für A_TES 2014.....	141
Abbildung 56: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für A_TES 2014.....	141
Abbildung 57: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D_TES 2014 .....	142
Abbildung 58: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D_TES 2014 .....	142
Abbildung 59: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D_TES_Dampf 2014.....	143
Abbildung 60: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D_TES_Dampf 2014.....	143
Abbildung 61: Exergetischer Kavernenfüllstand für D_Rek im Jahr 2014.....	144
Abbildung 62: Exergetischer Kavernenfüllstand für A_TES im Jahr 2014 .....	144
Abbildung 63: Exergetischer Kavernenfüllstand für D_TES im Jahr 2014.....	145
Abbildung 64: Exergetischer Kavernenfüllstand für D_TES_Dampf im Jahr 2014 .....	145
Abbildung 65: Konzept des Energiesystemmodellierungsframeworks.....	168
Abbildung 66 Modellierung eines einfachen Energiesystems innerhalb des Frameworks .....	169
Abbildung 67: Politische und ökonomische Entwicklungspfade innerhalb der ENTSO-E Szenarien ..	180
Abbildung 68: Geordnete Jahresdauerlinien einzelner Technologien in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU für das Modelljahr 2014.....	182

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Abbildung 69: Modellerte Stromerzeugung für die gemeinsame Marktregion DE/AT/LU und reale Stromerzeugung der einzelnen Länder im Jahr 2014 .....	183
Abbildung 70: Streudiagramm der Real- und Modellpreise für das Jahr 2014 mit Regressionspolynom dritter Ordnung.....	185
Abbildung 71: Real- und Modellpreise im März 2014.....	186
Abbildung 72: Ausschnitt der berücksichtigten mittelfristigen (<2019) Bauvorhaben innerhalb des europäischen Stromnetzes .....	187
Abbildung 73: Kraftwerkseinsatz unter Veränderung der Rahmenbedingungen des Energieversorgungssystems.....	188
Abbildung 74: Analyse der wöchentlichen Preise im Szenario „NEP-2035-ee+25“ .....	188
Abbildung 75: Entwicklung des Strompreises im Stromgroßhandelsmarkt in verschiedenen Studien .....	189

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der bewerteten Salzformationen.....	15
Tabelle 2: Übersicht der Bewertungskriterien .....	16
Tabelle 3: Ergebnis der Standortbewertung .....	27
Tabelle 4: Kriterien zur DLSK-Konzeptbewertung.....	38
Tabelle 5: Konzeptbewertung bezüglich der Standorterfordernisse .....	40
Tabelle 6: Konzeptbewertung bezüglich der Technologiekriterien .....	41
Tabelle 7: Konzeptbewertung bezüglich der Effizienzkriterien .....	42
Tabelle 8: Rangfolge der Konzepte zur Druckluftspeicherung.....	42
Tabelle 9: Innerhalb der Basisszenarien installierte Kapazitäten innerhalb Deutschlands .....	63
Tabelle 10: Technologiespezifische Parameter innerhalb der Basisszenarien .....	64
Tabelle 11: Brennstoff und Zertifikatspreise innerhalb der Basisszenarien .....	64
Tabelle 12: Kraftwerksindikatoren und Wirkungsgrade für ausgewählte Konzepte .....	75
Tabelle 13: Wirtschaftlicher Ergebnisse für D_Rek mit Variation der Leistungsklassen, des Leistungsverhältnisses und der Speicherkapazität im Jahr 2014.....	80

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Tabelle 14: Wirtschaftlich optimale Dimensionierungen hinsichtlich Leistungsklasse, Leistungsverhältnis und Speicherkapazität von D_Rek im Jahr 2014.....	81
Tabelle 15: Wirtschaftliche Ergebnisse für D_Rek (100/100/8) mit Variation der Zufeuerungstemperatur und dem Druckspiel im Jahr 2014.....	81
Tabelle 16: Wirtschaftlicher Ergebnisse für D_TES mit Variation der Leistungsklassen, des Leistungsverhältnisses und der Speicherkapazität im Jahr 2014.....	82
Tabelle 17: Ausführliche Bewertung der potentiellen Standorte in Schleswig-Holstein.....	114
Tabelle 18: Zeitplan.....	115
Tabelle 19: Annahmen der technischen Simulation in der multikriteriellen Bewertung.....	119
Tabelle 20: Wirkungsgrade der überprüften DLSK-Konzepte in der Vorauswahl.....	120
Tabelle 21: Ausführliche Darstellung der multikriteriellen Konzeptbewertung.....	127
Tabelle 22: Technische Parametrierung der vier ausgewählten DLSK-Konzepte.....	138
Tabelle 23: Angenommene Kostenstruktur für die DLSK-Komponenten.....	139
Tabelle 24: Simulationsergebnisse für D_Rek 2014.....	146
Tabelle 25: Simulationsergebnisse für D_Rek in den Szenarien 2025 und 2035.....	149
Tabelle 26: Simulationsergebnisse für D_TES in 2014.....	152
Tabelle 27: Simulationsergebnisse für D_TES in den Szenarien 2025 und 2035.....	154

## Abkürzungsverzeichnis

A	adiabat
A	Ausgaben (Kontext Wirtschaftlichkeit/Kapitalwert)
AT	Österreich
A_TES	Adiabates DLSK mit thermischem Speicher
BBergG	Bundesberggesetz
cas	Massenspeicher (compressed air storage)
cmp	Kompression
D	diabat
DA	Day Ahead Markt
Dampf	Dampfkreislauf
DE	Deutschland

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

DEL	Leistungspreis
DLSK	Druckluftspeicherkraftwerk
D_Rek	Diabetes DLSK mit Rekuperator
D_TES	Diabetes DLSK mit thermischem Speicher
D_TES_Dampf	Diabetes DLSK mit thermischem Speicher und Dampfteil
E	Einnahmen
$\dot{E}$	Exergiestrom
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
exp	Expansion
I	Investitionskosten
i	interner Zinssatz
in	eintretender Strom
K	Kapitalwert
KraftNAV	Kraftwerks-Netzanschlussverordnung
KWK-G	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
LU	Luxemburg
MRL	Minutenreserveleistung
NEP	Netzentwicklungsplan
NTC	Länderübergreifende Austauschkapazitäten
out	austretender Strom
P	Leistung
pp_ref	Referenzkraftwerk
PRO	Arbeitspreis
$\dot{Q}$	Wärmetrom
Rek	Rekuperator
SH	Schleswig-Holstein
Spot	Spotmarkt
t	Zeitindex
TCR+	positive Tertiärregelleistung
TCR-	negative Tertiärregelleistung
TES	Thermischer Speicher
TR	Tertiärregelleistung
TYNDP	Ten-year network development plan der ENTSO-E
UC	Unit commitment

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

UVP                    Umweltverträglichkeitsprüfung

$\gamma$                     Speicheraufwand

$\delta$                     Wärmearaufwand

$\varepsilon$                 Speicherkoeffizient

$\zeta$                     Exergetischer Wirkungsgrad

$\eta$                     Energetischer Wirkungsgrad

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Anhang

### A. Übersicht und Bewertung potentieller Standorte

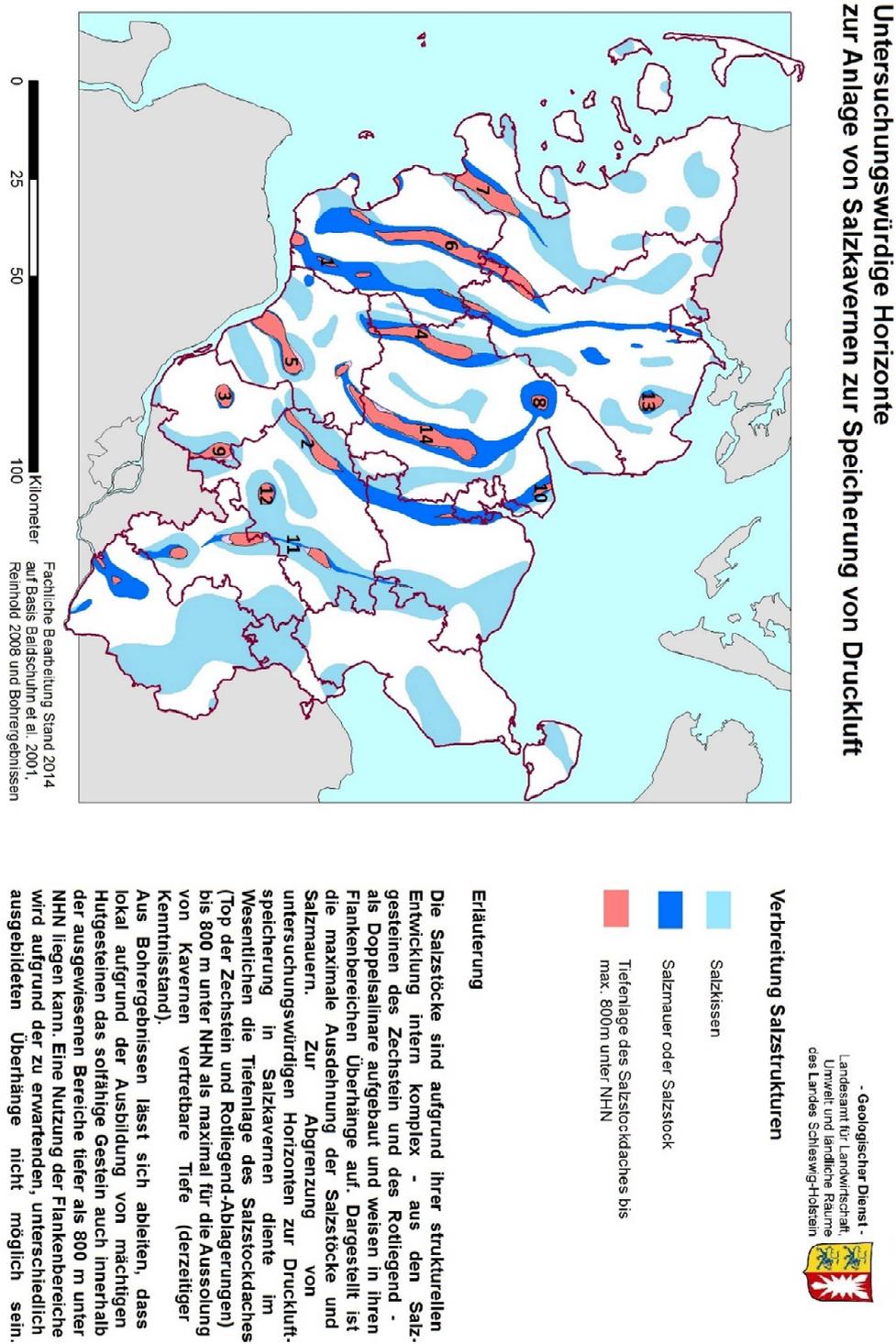


Abbildung 32: Potentialkarte zur Druckluftspeicherung in Schleswig-Holstein

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 17: Ausführliche Bewertung der potentiellen Standorte in Schleswig-Holstein**

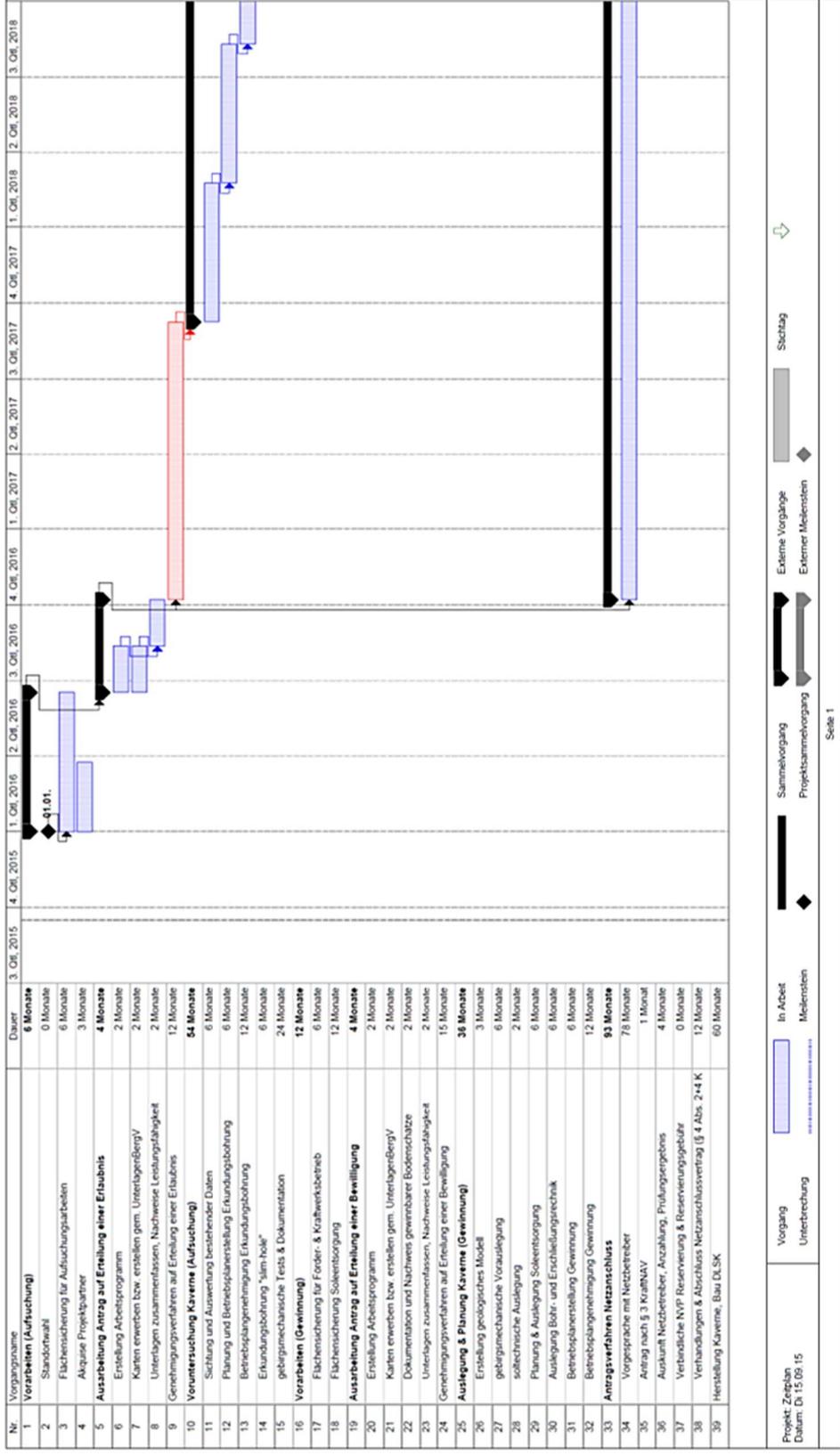
Kriterium	Gewichtung	Standorte						
		1	2	3	4	5	6	7
Salzstruktur	2,0	8	6	5	7	8	9	7
Nutzungsrechte Salzstock	1,5	7	6	6	10	8	7	10
Netzanbindung	2,0	8	5	6	8	7	8	8
Erzeugungsanlagen Strom	2,5	9	4	6	5	8	9	7
Anbindung Gasnetz	1,0	3	1	1	1	1	3	1
Abtransport Sole	3,0	9	2	3	2	4	8	8
weitere Standortfaktoren	1,0	8	7	6	7	7	8	4
Summe Bewertung		103,0	55,0	62,0	71,5	82,0	102,0	91,5

Kriterium	Gewichtung	Standorte						
		8	9	10	11	12	13	14
Salzstruktur	2,0	8	5	4	5	5	5	8
Nutzungsrechte Salzstock	1,5	10	7	5	8	9	7	8
Netzanbindung	2,0	7	5	3	5	5	6	9
Erzeugungsanlagen Strom	2,5	3	2	3	4	3	5	4
Anbindung Gasnetz	1,0	1	1	1	1	1	1	1
Abtransport Sole	3,0	10	2	10	6	1	10	4
weitere Standortfaktoren	1,0	4	7	4	6	7	4	4
Summe Bewertung		87,5	49,5	64,0	67,0	52,0	80,0	73,0

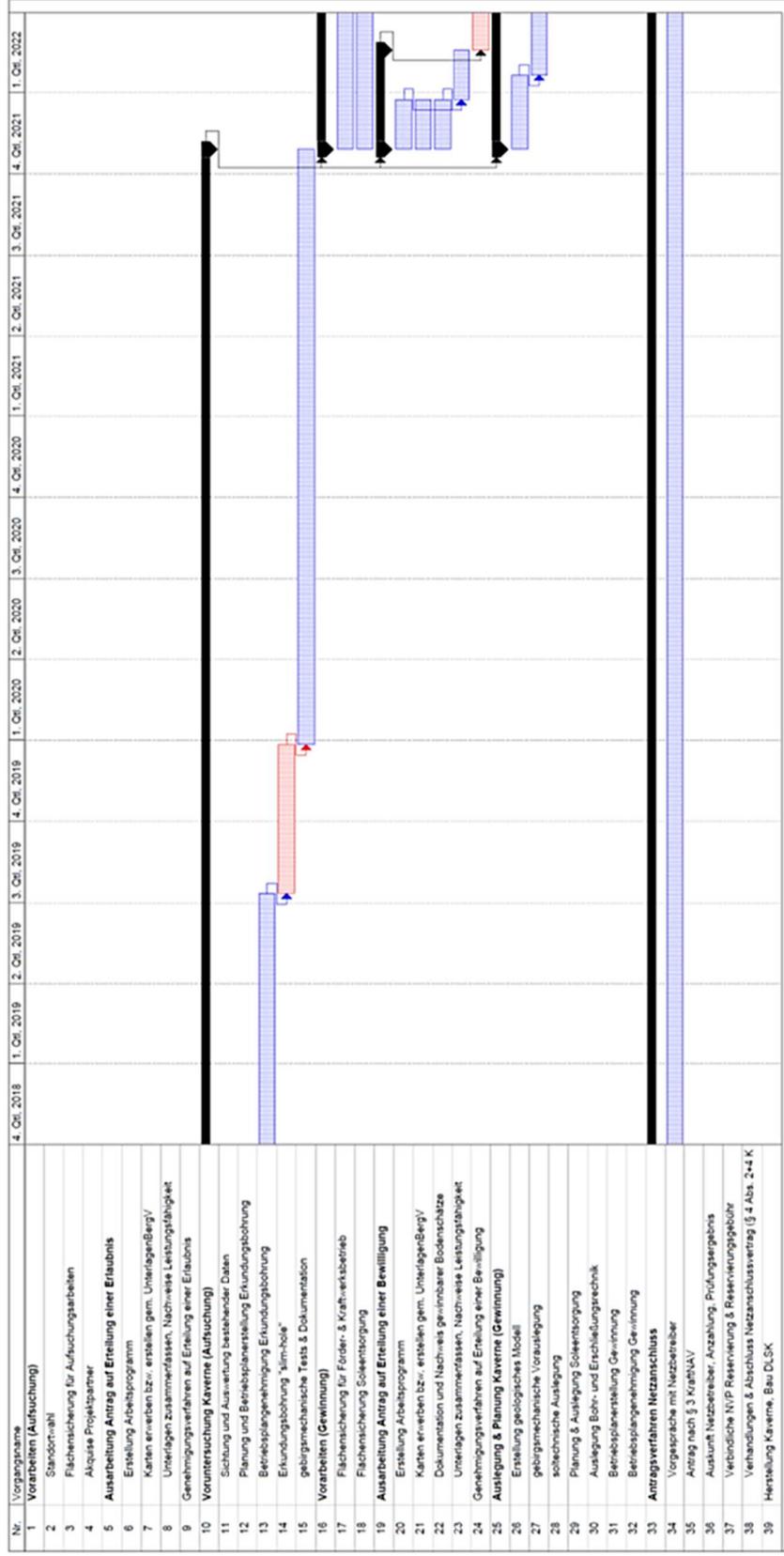
<u>Berichtreihe:</u> <b>Forschungsergebnisse</b>	<u>Nr.:</u> <b>5</b>	<u>Autoren:</u> <b>Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy</b>	<u>Datum:</u> <b>26.01.2018</b>
<u>Titel:</u> <b>Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein</b>			

## B. Zeitplan der Standortplanung

Tabelle 18: Zeitplan



**Titel**  
**Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein**



Projekt-Zeitraum  
 Datum: Di 15.09.15

Vorgang  
 Unterbrechung

In Arbeit  
 Meilenstein

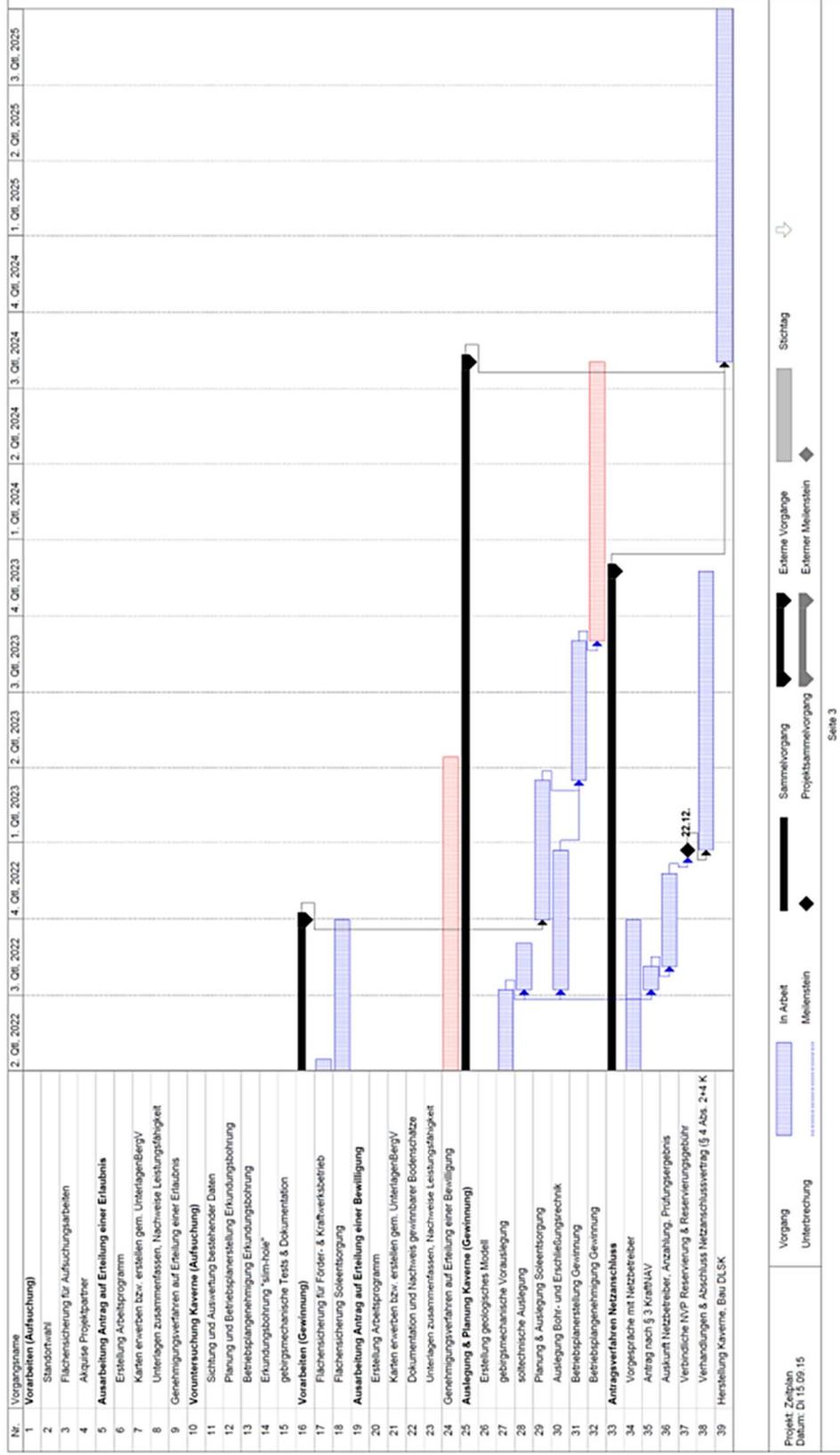
Sammelvorgang  
 Projektstartmeilenstein

Externe Vorgänge  
 Externer Meilenstein

Sichttag

Seite 2

**Titel:**  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein



**Titel:**  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

Nr.	Vorgangname	1. OI.	2. OI.	3. OI.	4. OI.	5. OI.	6. OI.	7. OI.	8. OI.	9. OI.	10. OI.
1	Vorbereiten (Aufsichtung)										
2	Standortwahl										
3	Flächensicherung für Aufschichtarbeiten										
4	Aktuelle Projektpartner										
5	Ausarbeitung Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis										
6	Erstellung Arbeitsprogramm										
7	Karten erwerben bzw. erstellen gem. UntertageBergV										
8	Unterlagen zusammenfassen, Nachweise Leistungsfähigkeit										
9	Genehmigungsverfahren auf Erteilung einer Erlaubnis										
10	Vonuntersuchung Kaverne (Aufsichtung)										
11	Sichtung und Auswertung bestehender Daten										
12	Planung und Betriebsplanerstellung Erkundungsbohrung										
13	Betriebsplangenehmigung Erkundungsbohrung										
14	Erkundungsbohrung "Jumb-hole"										
15	gebergmechanische Tests & Dokumentation										
16	Vorarbeiten (Gewinnung)										
17	Flächensicherung für Förder- & Kraftwerksbetrieb										
18	Flächensicherung Sohleinstützung										
19	Ausarbeitung Antrag auf Erteilung einer Bewilligung										
20	Erstellung Arbeitsprogramm										
21	Karten erwerben bzw. erstellen gem. UntertageBergV										
22	Dokumentation und Nachweis genehmigter Bodenschätze										
23	Unterlagen zusammenfassen, Nachweise Leistungsfähigkeit										
24	Genehmigungsverfahren auf Erteilung einer Bewilligung										
25	Auslegung & Planung Kaverne (Gewinnung)										
26	Erstellung geologisches Modell										
27	gebergmechanische Vorauslegung										
28	sootechnische Auslegung										
29	Planung & Auslegung Sohleinstützung										
30	Auslegung Bohr- und Erschließungstechnik										
31	Betriebsplanerstellung Gewinnung										
32	Betriebsplangenehmigung Gewinnung										
33	Antragsverfahren Netzananschluss										
34	Vorgespräche mit Netzbetreiber										
35	Antrag nach § 3 KraftIAV										
36	Auskunft Netzbetreiber, Anzahlung, Prüfungsergebnis										
37	Verbindliche NYP Reservierung & Reservierunggebühr										
38	Verhandlungen & Abschluss Netzananschlussvertrag (§ 4 Abs. 2-4 K										
39	Herstellung Kaverne, Bau DLSK										

Projekt-Zustitus  
Datum: 01.15.09.15

Vorgang:  In Arbeit  Meilenstein  Stichtag

Unterbrechung:  Sammelvorgang  Externe Vorgänge  Externer Meilenstein

Seite 4

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## C. Grundlagen zur Konzeptvorauswahl

Tabelle 19: Annahmen der technischen Simulation in der multikriteriellen Bewertung

Wert	Einheit	Wert
<b>Allgemeines</b>		
Arbeitsmedium		Trockene Luft als ideales Gas
Umgebungsdruck	bar	1,0135
Umgebungstemperatur	K	288,15
Bezugstemperatur Enthalpie	K	273,15
Bezugstemperatur Entropie	K	298,15
Bezugsdruck Entropie	bar	1
<b>Verdichter</b>		
Wirkungsgrad	%	87,5
Maximaltemperatur	K	800
Massenstrom Ladung	kg/s	100
<b>Turbine</b>		
Wirkungsgrad	%	92,5
Maximaltemperatur der Hochdruckturbine	K	873,15
Maximaltemperatur der Niederdruckturbine	K	1473,15
Massenstrom der Entladung	kg/s	100
<b>Kaverne</b>		
Maximaler Kavernendruck	bar	75
Druckverlust		vernachlässigt
Maximaltemperatur	K	323,15
<b>Sonstige Einbauten</b>		
Druckverluste in Einbauten & Brennkammern	%	3
Minimale Kühltemperatur	K	293,15
Rekuperator-Grädigkeit	K	5
Wirkungsgrad des thermischen Speichers	%	98
Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen	%	98
Modellierung der Verbrennung		Wärmezufuhr von außen
Eigenbedarf der Anlage		vernachlässigt
<b>Dampfteil</b>		
Wirkungsgrad der Dampfturbine	%	85
Maximale Dampftemperatur Dampfturbine	K	873,15
Dampfdruck	bar	80
Pinch Point	K	20
Kesseldruckverluste	%	16,7
Kondensatordruck	bar	0,1
Wirkungsgrad Speisewasserpumpe	%	75

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### Hydropneumatisches Konzept

Volumen Behälter	m <sup>3</sup>	200.000
Volumenverhältnis Behälter/Volumen Gas		0,7
Ausgangsdruck Gas	bar	100
Wirkungsgrad Hydraulikpumpe	%	95
Wirkungsgrad Hydraulikmotor	%	95
Wirkungsgrad Hydraulischer Kreislauf	%	95
Be- / Entladezeit	h	5

**Tabelle 20: Wirkungsgrade der überprüften DLSK-Konzepte in der Vorauswahl**

	Wirkungsgrad nach energetischer Restwertmethode; $\eta_{ref} =$			Exergetischer Wirkungsgrad
	0,4	0,5	0,6	
<b>A1a</b>	0.77	0.77	0.77	0.87
<b>A1b</b>	0.81	0.81	0.81	0.90
<b>A2</b>	0.67	0.67	0.67	0.82
<b>D1a</b>	0.77	0.76	0.74	0.80
<b>D1b</b>	1.00	0.83	0.66	0.66
<b>D2a</b>	0.59	0.49	0.39	0.54
<b>D2b</b>	0.77	0.53	0.30	0.53
<b>D2c</b>	0.80	0.49	0.18	0.55
<b>D2d</b>	0.87	0.59	0.30	0.55
<b>D2e</b>	1.09	0.60	0.10	0.27
<b>HP1a</b>	0.78	0.78	0.78	0.78
<b>HP1b</b>	0.560	0.560	0.560	0.560

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

### Schaltbilder

Erklärung: 

Temperatur in K	Druck in MPa
Enthalpie in kJ/kg	Entropie in kJ/kgK

Leistung in MW

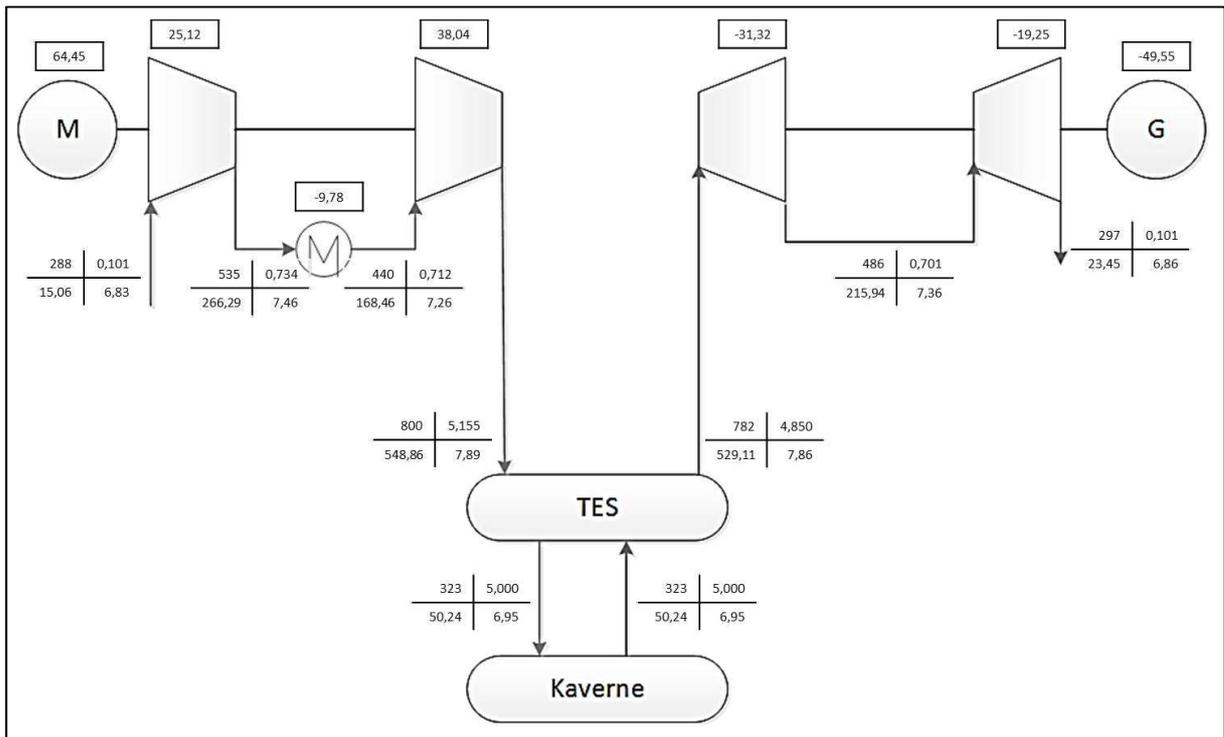


Abbildung 33: Schaltbild Adiabates DLSK mit thermischem Speicher A1a

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

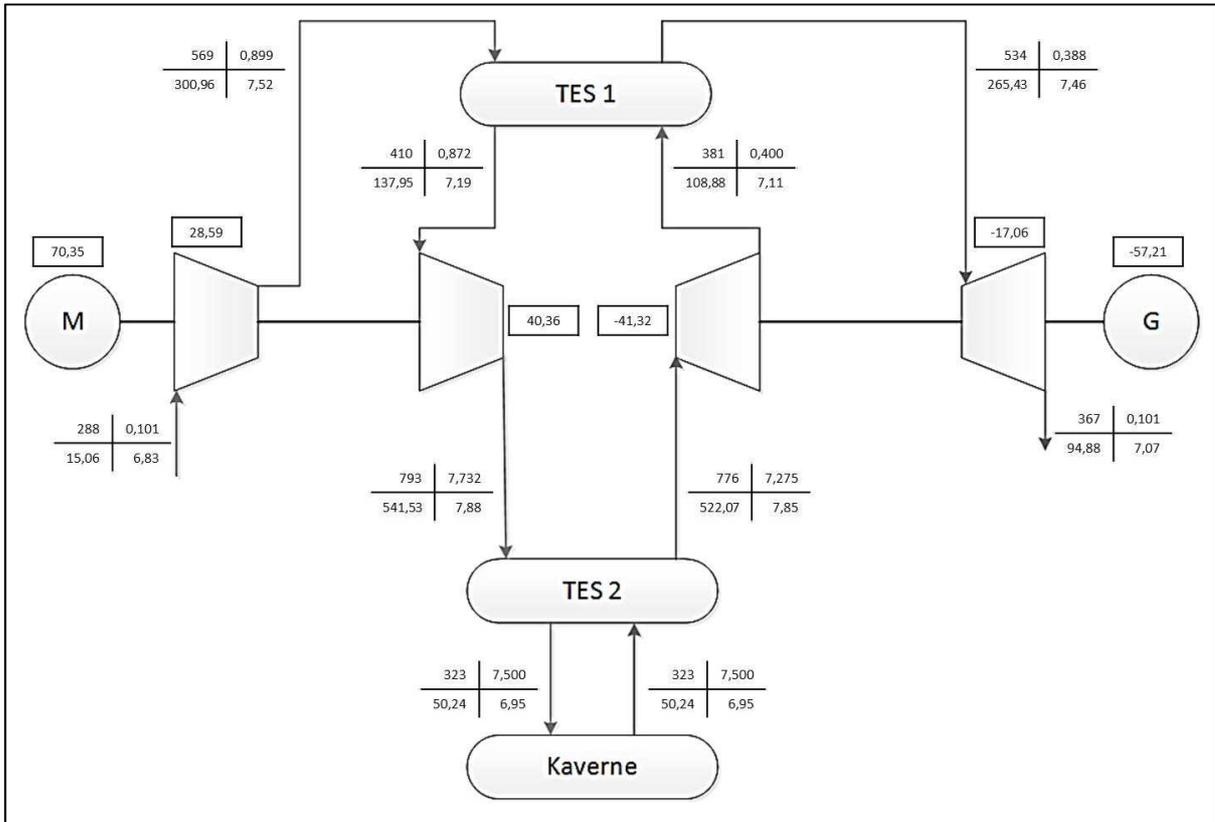


Abbildung 34: Schaltbild Adiabates DLSK mit mehreren thermischen Speichern A1b

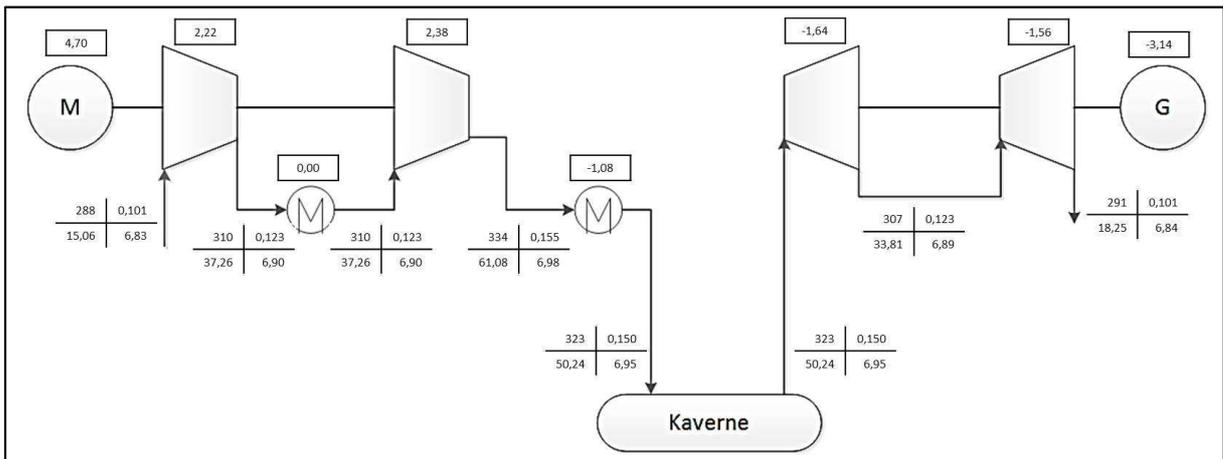


Abbildung 35: Schaltbild Adiabates DLSK ohne thermischen Speicher A2

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

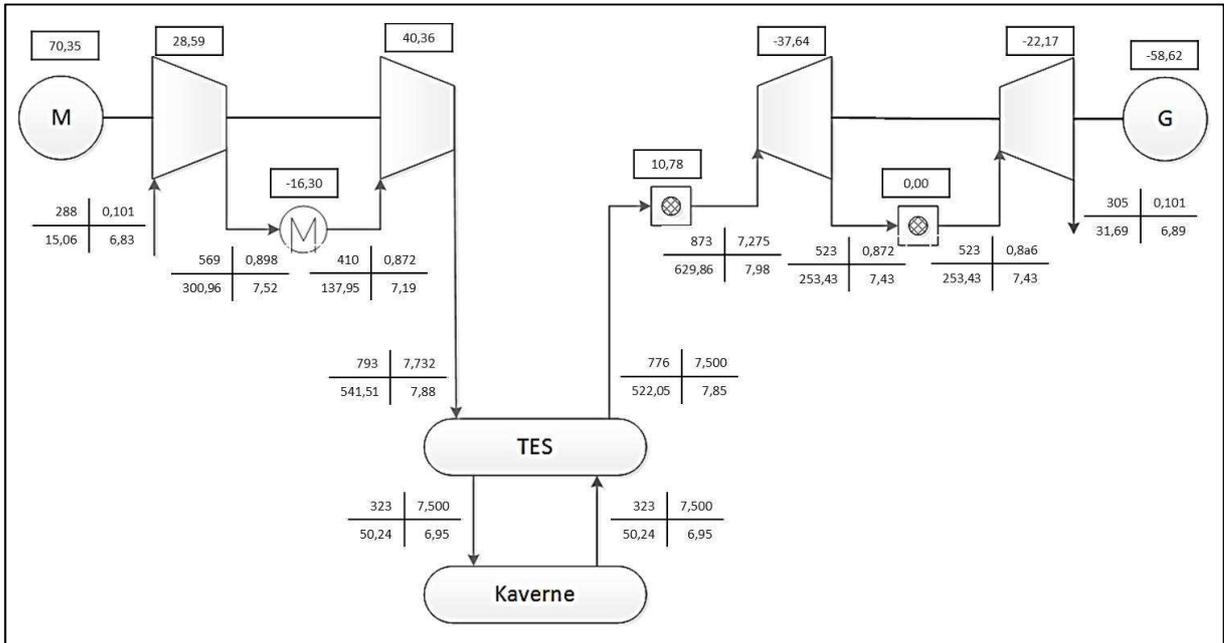


Abbildung 36: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher D1a

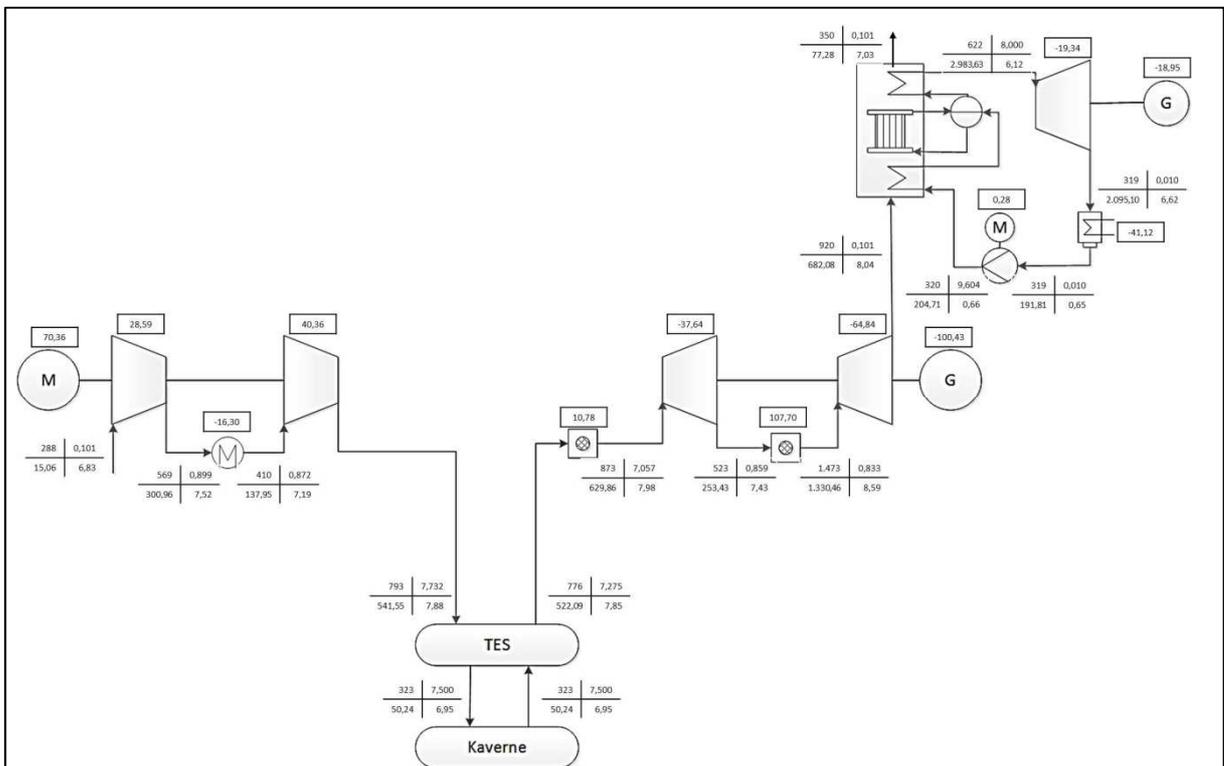


Abbildung 37: Schaltbild Diabates DLSK mit thermischem Speicher und Dampfteil D1b

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

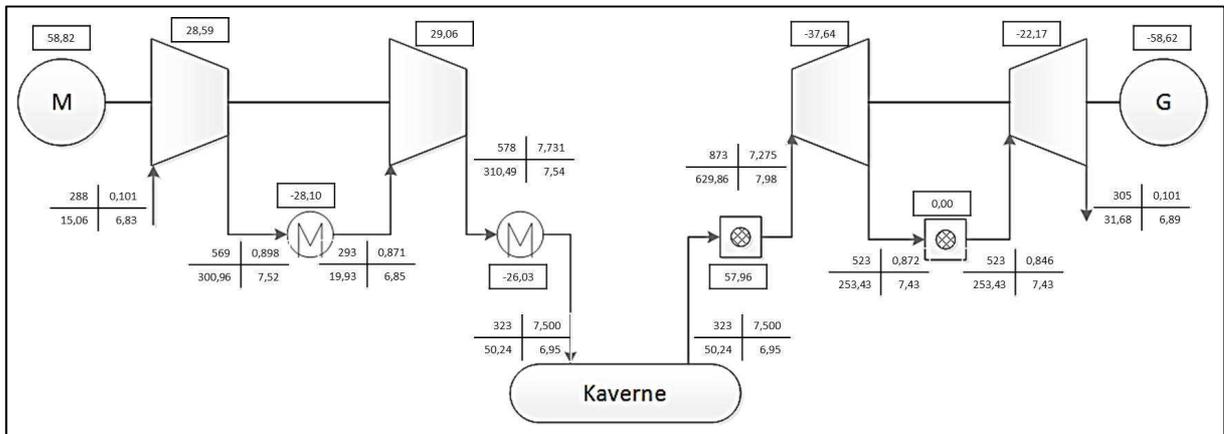


Abbildung 38: Schaltbild Diabates DLSK D2a

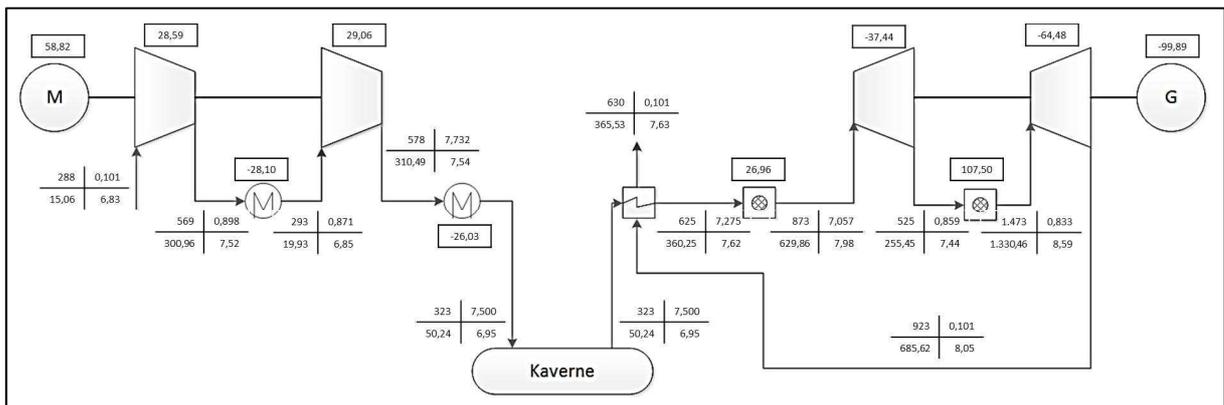


Abbildung 39: Schaltbild Diabates DLSK mit Rekuperator D2b

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

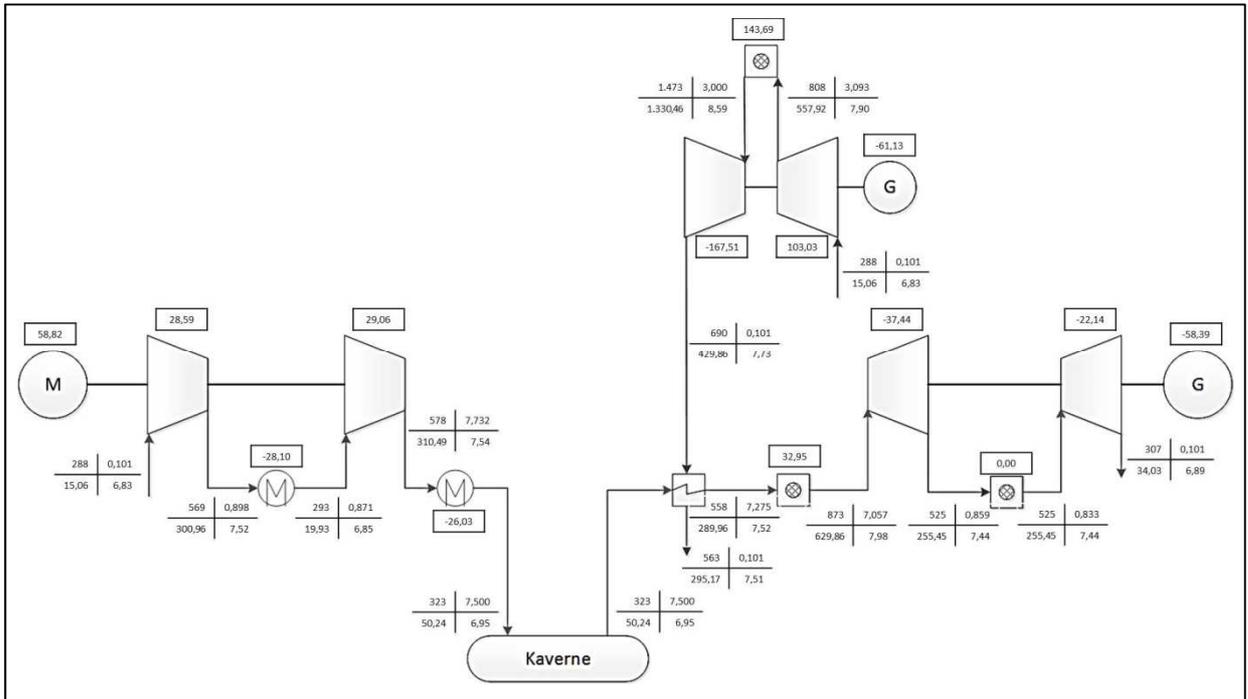


Abbildung 40: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage D2c

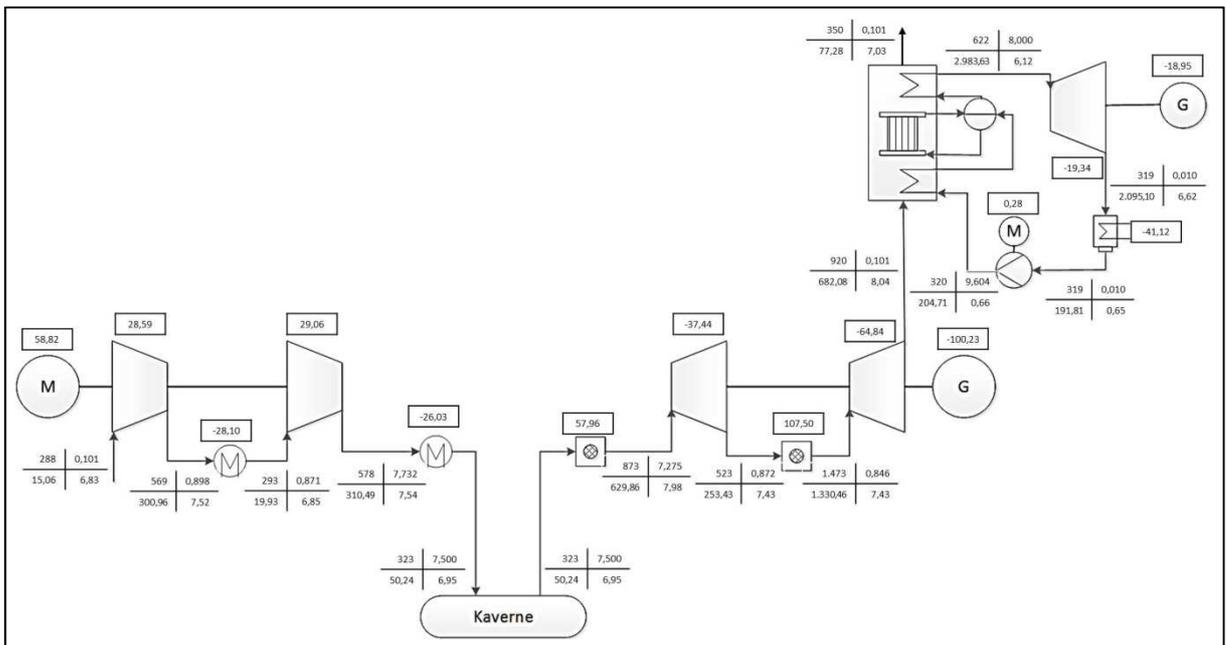


Abbildung 41: Schaltbild Diabates DLSK mit Dampfteil D2d

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

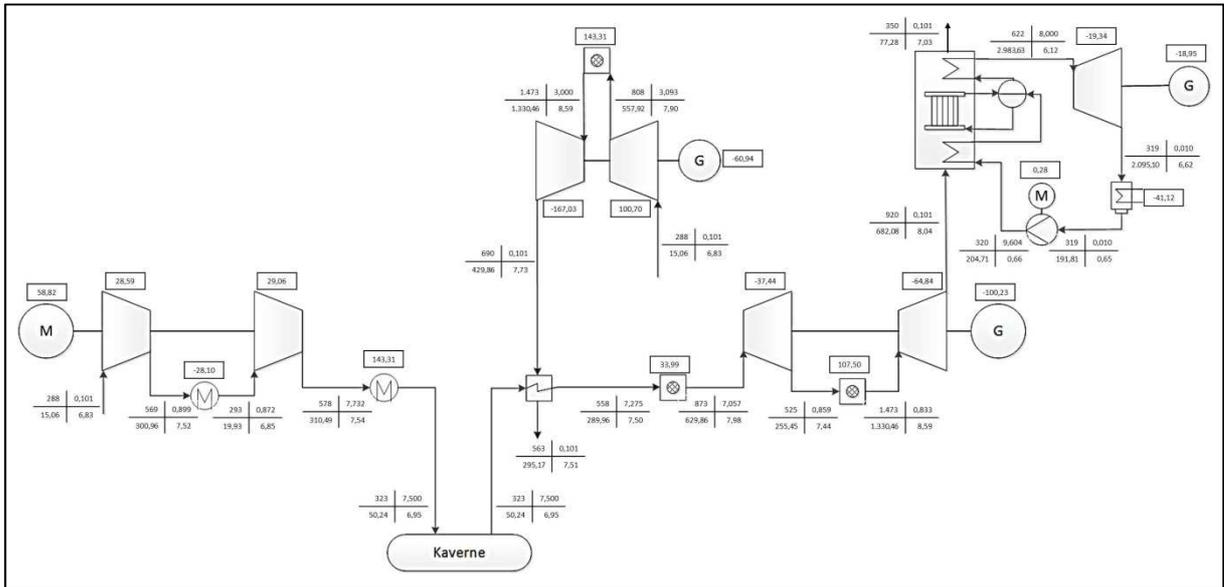


Abbildung 42: Schaltbild Diabates DLSK mit Gasturbinenanlage und Dampfteil D2e

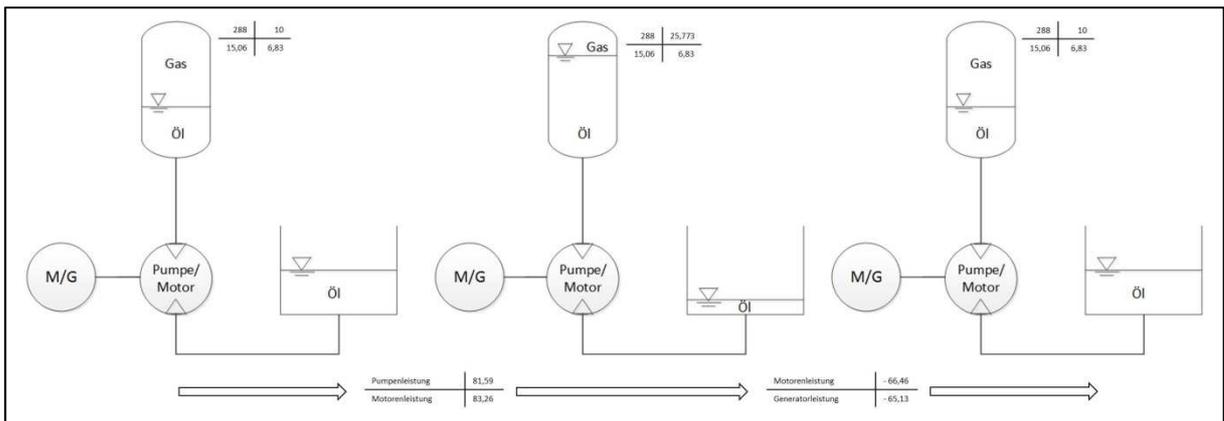


Abbildung 43: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK isotherm HP1a

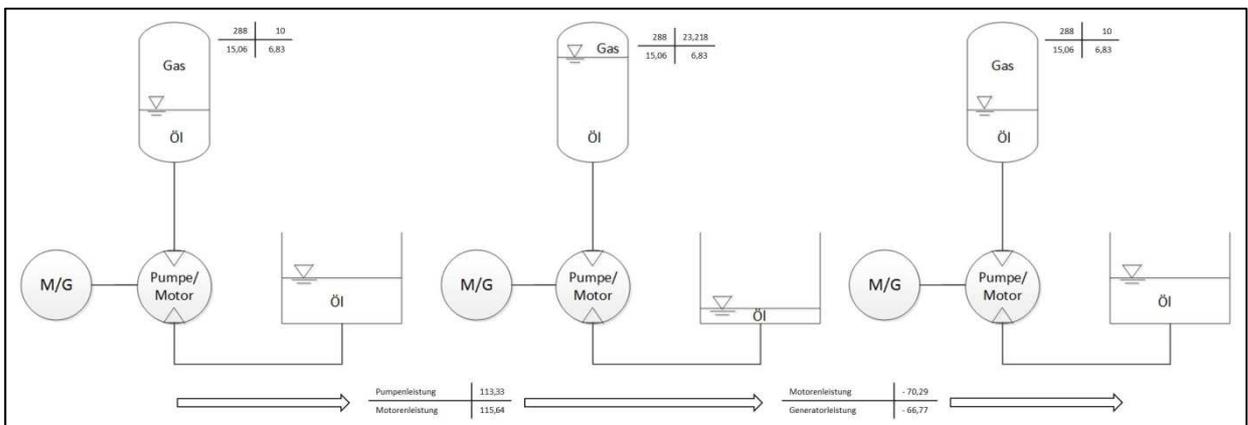


Abbildung 44: Schaltbild Hydropneumatisches DLSK adiabat + isochor HP1b

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 21: Ausführliche Darstellung der multikriteriellen Konzeptbewertung**

	Geologische Erfordernisse				Infrastrukturelle Erfordernisse			
	Solepindelbecken	Kaverne		Energiedichte	Erdgas	Anschluss an:		Industrieabwärme
		Erforderlichkeit <sup>a</sup>	Erforderlichkeit <sup>a</sup>			Fernwärme	10 %	
	10 %	25 %	25 %	25 %	20 %	10 %	10 %	10 %
A1a	10	0	0	5	7 <sup>c</sup>	10	10	10
A1b	10	0	0	6	7 <sup>c</sup>	10	10	10
A2	10	0	0	0	7 <sup>c</sup>	10	10	10
D1a	10	0	0	6	0	10	10	10
D1b	10	0	0	10	0	10	10	10
D2a	10	0	0	6	0	10	10	10
D2b	10	0	0	10	0	10	10	10
D2c	10	0	0	6	0	10	10	10
D2d	10	0	0	10	0	10	10	10
D2e	10	0	0	10	0	10	10	10
HP1a	10	2 <sup>b</sup>	1	1	10	10	10	10
HP1b	10	2 <sup>b</sup>	0	0	10	10	10	10
	0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich	0 := Zwingend erforderlich 10 := Nicht erforderlich	In kWh/m <sup>3</sup> 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				

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

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

c) Gasanschluss oder Brennstoffvorratsbehälter wird zum Durchfahren schwieriger Betriebszustände benötigt

<u>Berichtreihe:</u>	<u>Nr.:</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018

Titel  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

	Allg. Machbarkeit 20%	Komponentenverfügbarkeit 20%	Systementwicklungsstatus 20%	Anlaufzeit <sup>a</sup> 5%	Betrieb als Kraftwerk <sup>b</sup> 10%	Brennstoffeinsatz 10%	Kapazitätsbegrenzung <sup>a</sup> 5%	Kosten <sup>c</sup> 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 machbar 3 := Eingeschränkt 6 := Theoretisch gegeben 10 := Gegeben	0 := Komponenten nicht verfügbar 5 := Komponenten mit Forschungsaufwand verfügbar 10 := Komponenten verfügbar	0 := Keine aktive Forschung 2 := Grundlagenforschung 5 := Umfassendere Forschung 7 := Demonstrationsanlage realisiert 10 := Bereits realisiert	0 := >15 m 3 := 5 m - 15 m 6 := 30 s - 5 s 10 := < 30 s	0 := Nicht möglich 10 := Möglich	0 := > 4,5 1 := 4,0 - 4,5 2 := 3,5 - 4,0 3 := 3,0 - 3,5 4 := 2,5 - 3,0 5 := 2,0 - 2,5 6 := 1,5 - 2,0 7 := 1,0 - 1,5 8 := 0,5 - 1,0 9 := 0 - 0,5 10 := 0	10 := 5 kW - 1 GW 8 := 1 MW - 1 GW 6 := 5 MW - 1 GW	0 := >1.000 1 := 900 - 1.000 2 := 800 - 900 3 := 700 - 800 4 := 600 - 700 5 := 500 - 600 6 := 400 - 500 7 := 300 - 400 8 := 200 - 300 9 := 100 - 200 10 := < 100	

a) Quelle: [7]

b) Quelle: [48]

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: [49] [7] [50] [51] [52]

<u>Berichtreihe:</u>	<u>Nr.:</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018

Titel  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

	Wirkungsgrad nach energetischer Restwertmethode; $\eta_{ref} =$			Exergetischer Wirkungsgrad	
	0,4 10%	0,5 40%	0,6 10%		
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 1 := 0,3 - 0,4 2 := 0,4 - 0,5 3 := 0,5 - 0,55 4 := 0,55 - 0,6 5 := 0,6 - 0,65 6 := 0,65 - 0,7 7 := 0,7 - 0,75 8 := 0,75 - 0,8 9 := 0,8 - 0,9 10 := > 0,9	0 := <0,3 1 := 0,3 - 0,4 2 := 0,4 - 0,5 3 := 0,5 - 0,55 4 := 0,55 - 0,6 5 := 0,6 - 0,65 6 := 0,65 - 0,7 7 := 0,7 - 0,75 8 := 0,75 - 0,8 9 := 0,8 - 0,9 10 := > 0,9	0 := <0,3 1 := 0,3 - 0,4 2 := 0,4 - 0,5 3 := 0,5 - 0,55 4 := 0,55 - 0,6 5 := 0,6 - 0,65 6 := 0,65 - 0,7 7 := 0,7 - 0,75 8 := 0,75 - 0,8 9 := 0,8 - 0,9 10 := > 0,9	0 := <0,3 1 := 0,3 - 0,4 2 := 0,4 - 0,5 3 := 0,5 - 0,55 4 := 0,55 - 0,6 5 := 0,6 - 0,65 6 := 0,65 - 0,7 7 := 0,7 - 0,75 8 := 0,75 - 0,8 9 := 0,8 - 0,9 10 := > 0,9	

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## D. Thermodynamische und kraftwerkstechnische Grundlagen

Folgend werden grundlegende Annahmen und angewandte Gesetzmäßigkeiten der technischen Modellierung des Arbeitsmediums und der Kraftwerkskomponenten vorgestellt.

- Arbeitsmedium

Die technischen Berechnungen basieren auf der Annahme von trockener Luft als Arbeitsmedium. Trockene Luft wird referenziert als ideale Mischung realer Gase. Die thermodynamischen Eigenschaften werden nach den Gleichungen von [53] gewonnen, welche in der hier verwendeten Software FluidEXL der Hochschule Zittau in der Datenbank LibHuAir (Property Software for Humid Air Calculated as Ideal Mixture of Real Fluids) [54] angewandt werden.

- Verdichtungsteil

Die Einspeicherung wird durch drei Verdichterstufen mit gleichem Druckverhältnis in Nennlast und jeweiliger Zwischenkühlung realisiert. Das Teillastverhalten von Verdichtern wird in der Praxis durch spezifische Verdichterkennfelder (Compressor Maps, kurz CM) beschrieben. Zumeist stellen diese Kennfelder dimensionslose Zusammenhänge zwischen Druckverhältnissen, Durchsatzvolumenströmen, Drehzahlen und Maschinenwirkungsgraden für einen bestimmten Verdichtertyp dar. Grundsätzlich besteht also eine eindeutige Abhängigkeit des Prozessverhaltens von der gewählten Komponentenauslegung (z.B. axiale Bauweise, radiale Bauweise, Verwendung von variablen Eintrittsleitschaufeln, anderweitige Regelungsmechanismen) und dem frei wählbarem Nennarbeitspunkt. Die Komponentenauslegung sowie der Nennbetriebspunkt werden in der Praxis an die Erfordernisse der füllstand- und marktbedingten Teillast optimal angepasst und durch Regelungen ergänzt.

Eine genaue Auslegung kann aufgrund konstruktionstechnischer Unsicherheiten hier nicht erfolgen und ist nicht Ziel dieser Untersuchung. Ein spezifisch hinterlegtes Verdichterkennfeld birgt somit Berechnungsunsicherheiten. Zusätzlich erhöhen hinterlegte Verdichterkennfelder die Komplexität der Berechnungen enorm. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass das füllstandbedingte Teillastverhalten der Verdichter mit konstanten Wirkungsgraden und Massenströmen angenähert werden kann. Die Anpassung der Leistung an den Markt erfolgt durch eine perfekte Massenstromvariabilität als Folge einer nicht näher erläuterten technischen Konstruktion. Die Auswirkungen dieser Annahme werden als unwesentlich eingestuft und können im Anhang eingesehen werden.

Des Weiteren werden aufgrund der mit der Last variierenden Temperaturverläufe während der Verdichtung die Zwischenkühltemperaturen gegebenenfalls angepasst, um temperaturbedingte Betriebsgrenzen einzuhalten und konstante Eingangstemperaturen in den thermischen Speicher zu gewährleisten.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

- Expansionsteil

Die Ausspeicherung wird durch zwei Turbinenstufen mit gleichem Druckverhältnis und jeweils vorgehalteter Wärmezufuhr dargestellt. Die füllstandbedingte Teillast der Expansion ist gekennzeichnet durch variierende Drücke am Turbineneintritt. Das Kegelgesetz nach Stodola [55] schätzt diesbezüglich die Veränderung des Massenstromes in Abhängigkeit des Ein- und Austrittszustandes des Gases ab und wird daher in der technischen Berechnung der Expansion angewandt [56].

Die marktbedingte Teillast kann lediglich durch konstruktive Maßnahmen erfüllt werden. Zu diesem Zweck existieren verschiedene technische Möglichkeiten, von welchen die Mengenregelung mittels Düsengruppe in der vorliegenden Modellierung aufgrund der geringsten Verluste ausgewählt wird. Prinzipiell schwankt der Wirkungsgrad einer Turbine geringfügiger als derjenige eines Verdichters (siehe z.B. [7]). Da im letzteren Fall nachgewiesen wurde, dass Wirkungsgradschwankungen einen unwesentlichen Einfluss auf das Prozessverhalten ausüben, wird auch der Expansionsteil mit konstantem Wirkungsgrad modelliert. Dies führt zu einer somit konsistenten Vorgehensweise.

Die Brennkammer der diabaten DLSK wird bislang als externe Wärmezufuhr abgebildet. Austrittstemperaturen in Teillastbereichen werden gegebenenfalls angepasst, um technische Betriebsgrenzen einzuhalten und in wichtigen Prozesspunkten konstante Temperaturen einzustellen.

- Thermischer Speicher

Der thermische Speicher (TES) speichert die während der Verdichtung anfallende thermische Energie ein und gibt diese bei der Ausspeicherung wieder an die Luft ab. Auch in diesem Falle wird von einer genauen konstruktiven Auslegung abgesehen, weswegen eine nach Abbildung 45 skizzierte Darstellungsform gewählt wird. Es werden jeweils die Temperaturen nach der Verdichtung  $T_1$  und nach Kavernenaustritt  $T_3$  vorgegeben sowie die Grädigkeit zwischen  $T_1$  und  $T_4$ , der Temperatur nach dem TES im Expansionsteil, festgelegt. Die Temperatur  $T_2$  wird durch eine Bilanz der spezifischen Wärmeströme im Nennbetrieb definiert. Folglich ergeben sich geringfügige Änderungen der spezifischen Ein- und

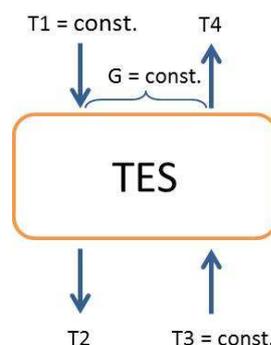


Abbildung 45: Modell des thermischen Speichers

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Ausspeicherwärmeströme nur aufgrund von füllstandbedingten Druckänderungen. Zusätzlich wird vor Kaverneneintritt die verdichtete Luft nochmals gekühlt, um Instabilitäten des thermischen Speicherprozesses zu verhindern.

- Druckluftspeicher

Der Druckluftspeicher ist ein Massenspeicher, der in diesem Projekt als Salzkaverne vorgesehen ist. Eine perfekte Dichtheit verhindert dabei Druckverluste. Des Weiteren tritt das Arbeitsmedium mit der Temperatur der geologischen Formation ein, wodurch die Kavernentemperatur als homogen angenommen wird [7]. Aus Stabilitätsgründen müssen bestimmte Druck- und Temperaturgrenzen eingehalten werden.

- Weitere Komponenten

Weitere Komponenten kennzeichnen die unterschiedlichen DLSK-Konzepte. Ein Rekuperator wird als Gegenstrom-Wärmeübertrager mit konstanter Übertragungsfähigkeit beschrieben. Die zur Nutzung des heißen Gasturbinenabgases angeschlossene Dampfkraftanlage ist als einfacher Kreislauf mit Festdruckregelung umgesetzt.

### ***Lastfälle***

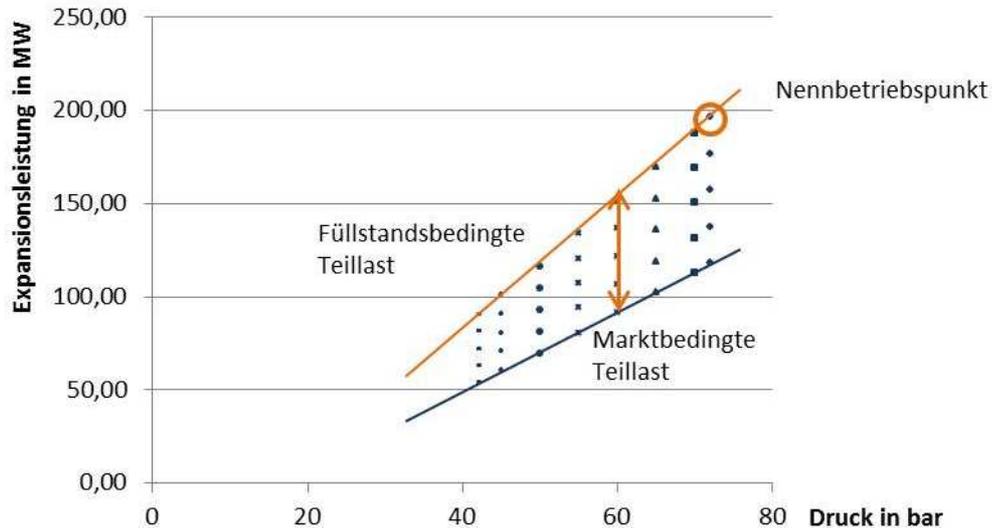
Die bisherigen technischen Berechnungen, die im Rahmen des AP 2.1 durchgeführt wurden, zeigen das thermodynamische Prozessverhalten der DLSK-Konzepte im Nennbetriebspunkt bei maximalem Kavernendruck. Praktisch ist diese Betrachtungsweise unzureichend sobald detailliertere Aussagen über ein Kraftwerksverhalten getroffen werden sollen.

Die Basiskomponenten eines Druckluftspeicherkraftwerkes weisen eine hohe prinzipielle Nähe zu denen einer Gasturbinenanlage auf, jedoch unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer konstruktiven Koppung. Räumlich getrennte Kompressions- und Expansionsteile können zeitlich unabhängig voneinander betrieben werden, wodurch sich abweichende und für die Energiespeicherung charakteristische Lastfälle ergeben. Diese Lastfälle sind gesondert für Kompression und Expansion zu analysieren.

Neben dem Nennbetrieb bei festem, maximalem Kavernendruck sind Ladungs- bzw. Entladungsvorgänge zu unterscheiden. Während der Ladung des Druckluftspeichers arbeitet der Verdichterstrang gegen mit dem Füllstand steigende Enddrücke (Kavernendrucke), wohingegen die Entladung des Speichers sinkende Eingangsdrücke für den Expansionsteil bedeutet. Diese Lastfälle werden im Folgenden als füllstandabhängige Teillast behandelt und spiegeln die im jeweiligen Betriebspunkt maximal realisierbare Leistung wider. Des Weiteren ergeben sich aus Sicht des Versorgungssystems optimale Betriebspunkte, die unterhalb der maximal realisierbaren Leistung liegen. Um diese Marktchancen zu

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

nutzen, wird mittels konstruktiver Maßnahmen eine schwankende, marktabhängige Teillast für jeden Betriebspunkt realisiert. Abbildung 46 verdeutlicht die beschriebenen Lastfälle graphisch.



**Abbildung 46: Lastfälle eines Druckluftspeicherkraftwerkes**

Das Teillastbetriebsverhalten kann konstruktiv durch eine Drosselung in Kompression sowie Expansion an das Nennlastverhalten angeglichen werden. Aufgrund der dabei entstehenden hohen Drosselverluste wird dieses Prinzip hier nicht verfolgt. Weitere Lastfälle werden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## E. Beispielhafte Darstellung der Kraftwerkscharakteristiken

Die Kraftwerkscharakteristiken werden für DLSK mit einer Einspeichernennleistung von 100 MW, einer Ausspeichernennleistung von 100 MW und einem Ausspeicherzeitraum von 8 Stunden. Die Dimensionierung des TES lehnt sich an die Kavernenkapazität an. Der Kavernendruck variiert zwischen 42 bar und 72 bar.

Die Abbildung 47 -Abbildung 52 zeigen die Charakteristiken für ein D\_TES. Orange Punkte und Linien stellen füllstandbedingte Lastabhängigkeiten dar, wohingegen blaue Markierungen auf die marktbedingte Teillast hinweisen. Es wird deutlich (Abbildung 47), dass die maximale Verdichterleistung in einer linearen Abhängigkeit vom Kavernenfüllstand genügend genau beschrieben werden kann. Je nach Marktnachfrage und Komponentendesign sind vertikale Abweichungen zu geringeren Leistungen möglich.

Die Wärme, die während und nach der Verdichtung zur Einhaltung der Temperaturgrenzen abgeführt werden muss, wird im konstanten Verhältnis an die Umgebung (0,48) und den TES (0,52) abgegeben. Wie in Abbildung 48 ersichtlich, ist die Wärmeabfuhr linear von der Kompressionsleistung abhängig. Die Besonderheit hierbei ist jedoch, dass die marktbedingten Teillasten als Funktion eindeutig zu trennen sind und dem jeweiligen Füllstand zugeordnet werden müssen. Im verwendeten DLSK-Modell ist dieser Zusammenhang nicht explizit abgebildet. Dies führt in den folgenden Berechnungen zu Überschätzungen des Wärmestromes, der bei der Kompression abgeführt werden muss. Folge dieses Vorgehens ist eine unklare Aussagefähigkeit über die benötigte Kapazität des TES. Die TES-Kapazität wird daher auf Basis von Vollastberechnungen definiert. In Abhängigkeit der Kompressionsleistung wird ein Exergiestrom in die Kaverne eingeführt. Anhand der Abbildung 49 wird deutlich, dass das Teillastverhalten in einer linearen Funktion mit Schnittpunkt im Ursprung angenähert werden kann.

Ähnliche Zusammenhänge gelten für den Ausspeicherungsvorgang und können in den Abbildung 50 - Abbildung 52 eingesehen werden. Daher werden diese nachfolgend nicht genauer erläutert. Die Wärmezufuhr während der Expansion wird zu 82,5 % durch den TES und zu 17,5% durch Brennstoff gedeckt.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

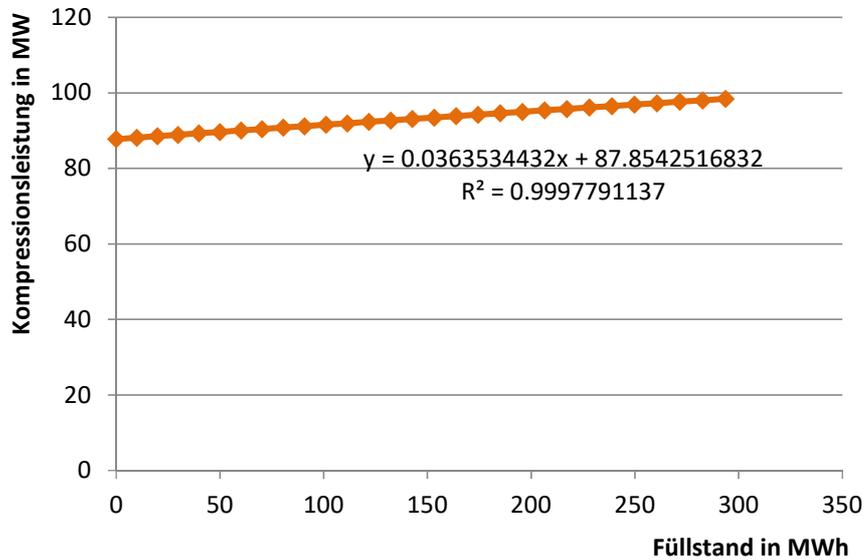


Abbildung 47: Kompressionsleistung-Füllstand-Charakteristik für D\_TES

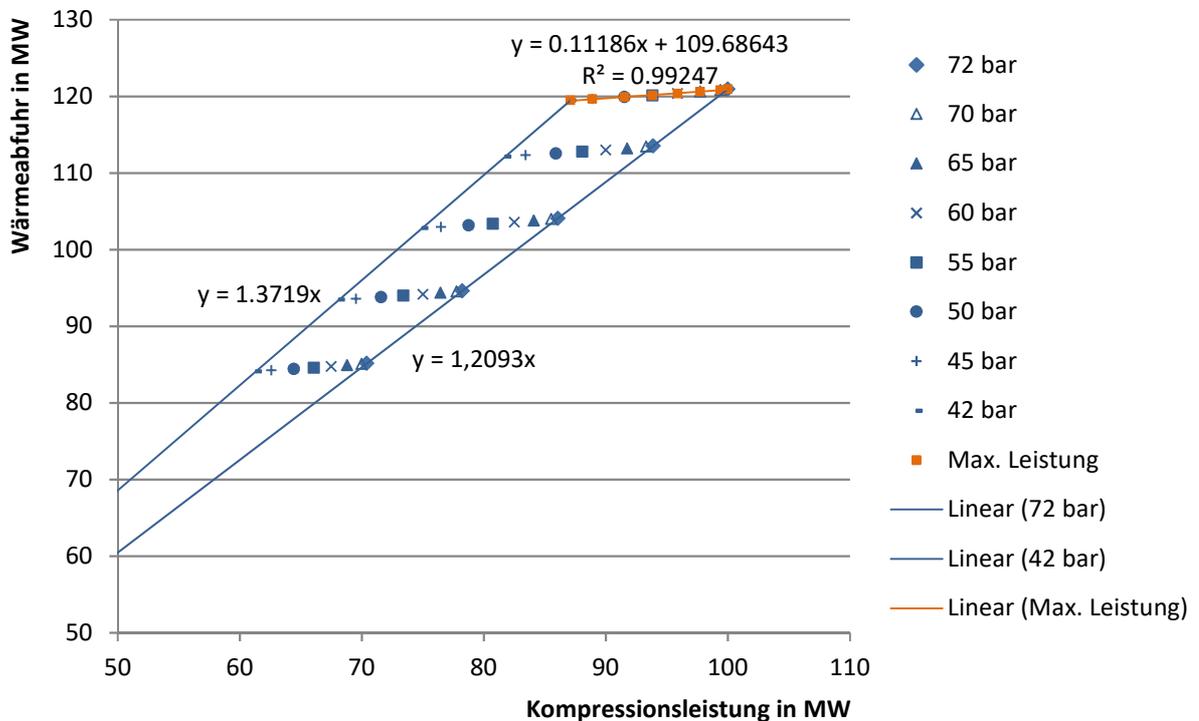


Abbildung 48: Wärmeabfuhr-Kompressionsleistung-Charakteristik für D\_TES

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

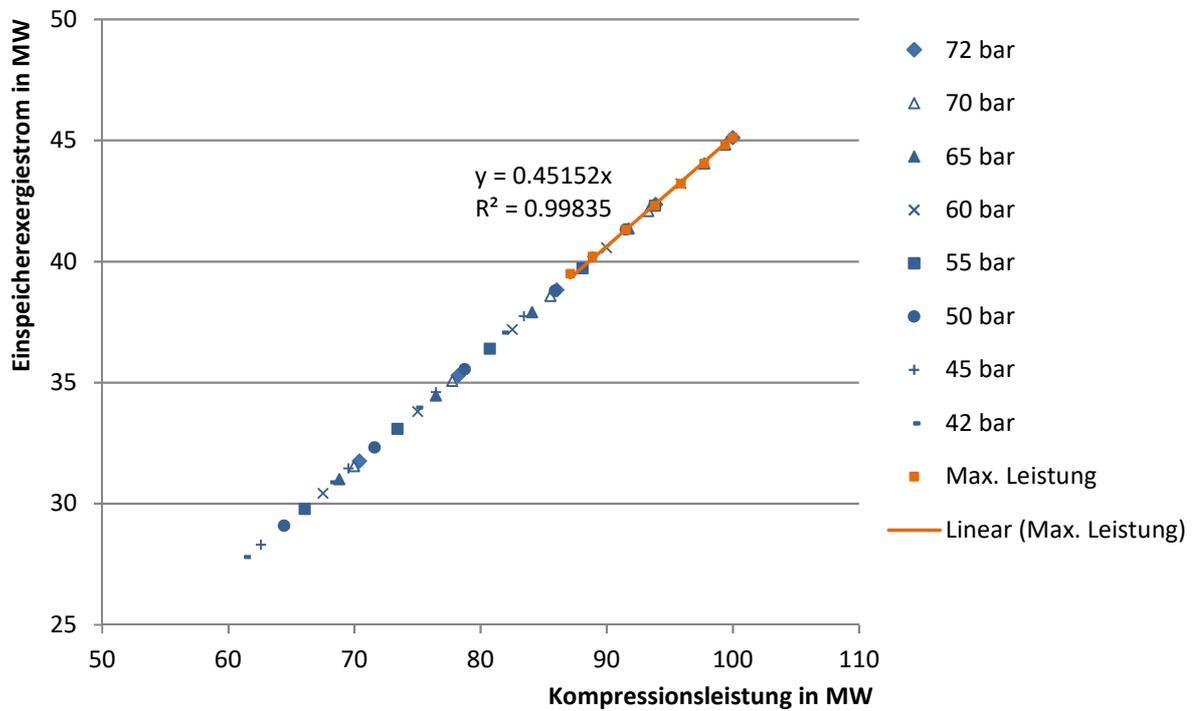


Abbildung 49: Einspeicherexergiestrom-Kopressionsleistung-Charakteristik für D\_TES

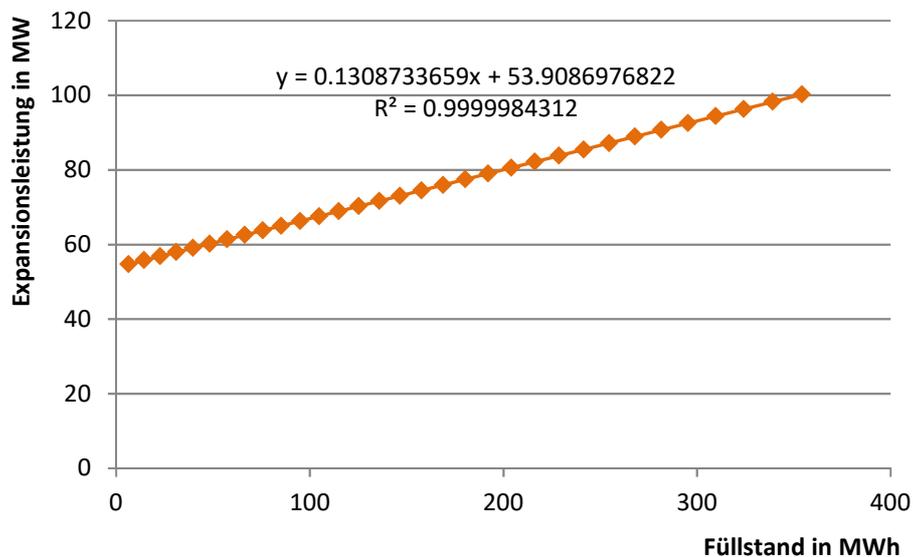


Abbildung 50: Expansionsleistung-Füllstand-Charakteristik für D\_TES

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

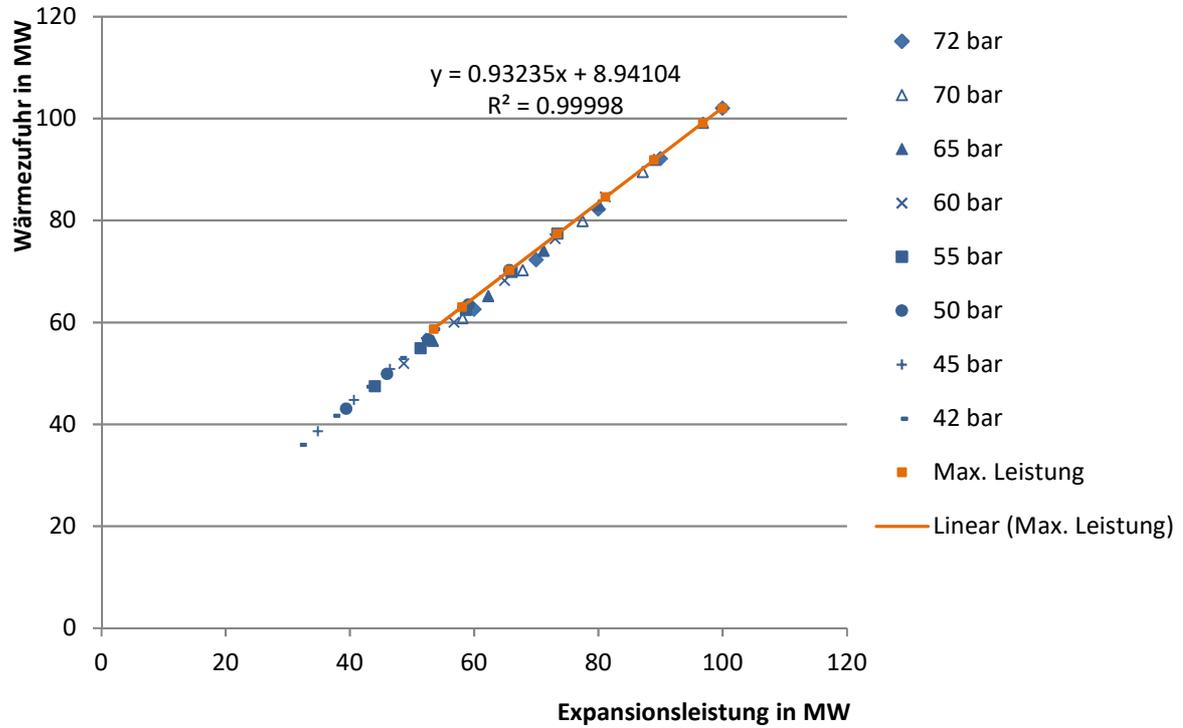


Abbildung 51: Wärmezufuhr-Expansionsleistung-Charakteristik für D\_TES

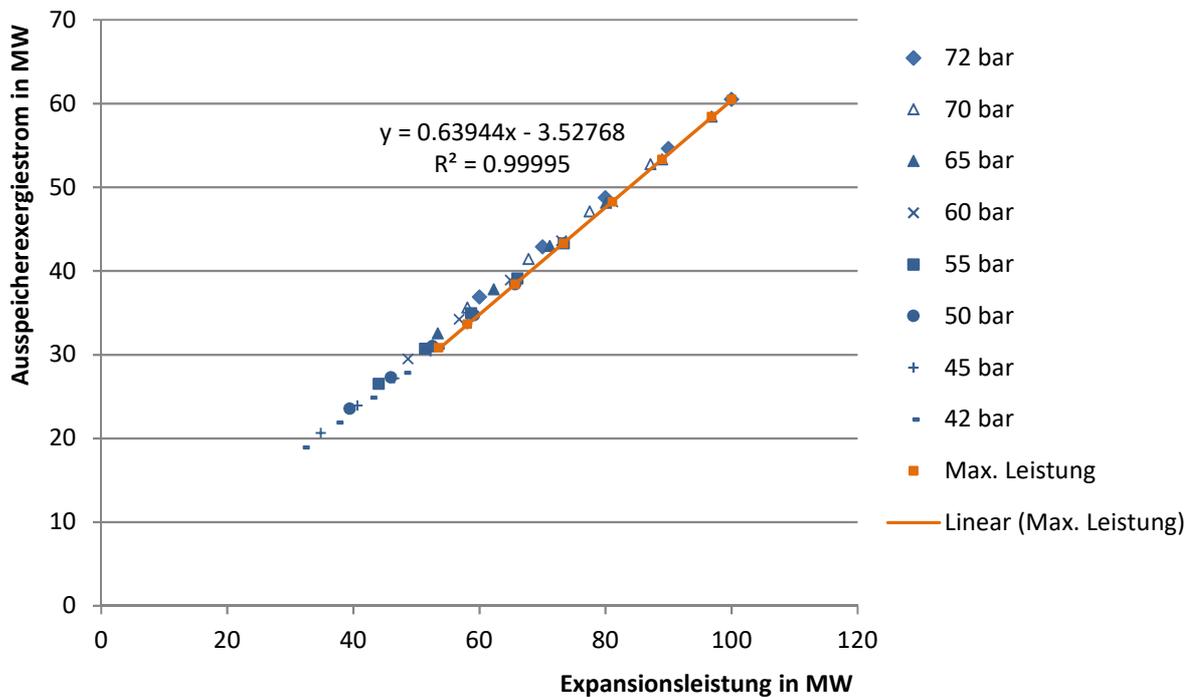


Abbildung 52: Ausspeicherexergiestrom-Expansionsleistung-Charakteristik für D\_TES

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## F. Technische und wirtschaftliche Parametrierung der Kraftwerkskonzepte

Tabelle 22: Technische Parametrierung der vier ausgewählten DLSK-Konzepte

Parameter	Einheit	Wert
<b>Allgemeines</b>		
Umgebungsdruck	bar	1,0135
Umgebungstemperatur	K	288,15
<b>Kompression</b>		
Nennleistung	MW	100
Isentroper Wirkungsgrad	%	85
Maximaltemperatur	K	800
<b>Expansion</b>		
Nennleistung	MW	100
Isentroper Wirkungsgrad Regelstufe	%	70
Isentroper Wirkungsgrad HD- & ND-Stufen	%	92,5
Maximaltemperatur HD-Stufe	K	873,15
Maximaltemperatur ND-Stufe	K	1473,15
Druckverhältnis Regelstufe		0,8
<b>Speicher</b>		
Druckspiel	bar	diabat: 42 – 72; adiabat: 25 – 50
Ausspeicherdauer ohne marktbedingte Leistungsreduktion	h	8
Druckverlust		vernachlässigt
TES Kapazität		angelehnt an Kavernenkapazität
TES Grädigkeit	K	20
<b>Dampfkreislauf</b>		
Maximale Dampftemperatur	K	900
Dampfdruck Nennlast	bar	80
Kesseldruckverlust	%	16,7
Wirkungsgrad Dampfturbine	%	85
Wirkungsgrad Speisewasserpumpe	%	75
Kondensatordruck	bar	0,1
<b>Andere Komponenten</b>		
Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen	%	98
Druckverlust Kühlung, Brennkammer, Wärmetauscher	%	3

### Investitions- und Betriebskosten

Die Investitions- und Betriebskosten, die als Grundlage für die ersten beispielhaften Simulationen der vier DLSK-Konzepte verwendet werden, sind in Tabelle 23 dargestellt. Die Datenlage erweist sich dabei aus vielerlei Gründen als schwierig. Zum einen bestehen grundlegende Uneinigigkeiten der Literatur zur

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Zusammensetzung und Angabe der Investitions- und Betriebskosten. Einige Autoren weisen die Kosten jeweils separat nach Komponenten und bezogen auf deren Leistungen aus. Andere stellen lediglich die Kosten für das gesamte DLSK dar, wobei nicht eindeutig definiert ist, auf welche Leistung sich bezogen wird. Weitere Quellen beziehen sich auf Komponentengruppen. Aus diesem Vorgehen resultieren gravierende Unterschiede in der Höhe der Summen für Investition und Betrieb. Zusätzlich erschwert wird die Diskussion durch die Vermutung stark projektspezifischer Kosten und fehlender Erfahrungswerte insbesondere bei modifizierten, aber praxisüblichen Turbinenanlagen.

Um dem Untersuchungsziel der Bewertung unterschiedlicher DLSK-Konzepte gerecht zu werden, wird hier eine Kostenstruktur nach der Aufschlüsselung der Tabelle 23 unterstellt. Die Daten ergeben sich aus einer umfassenden Literaturrecherche mit anschließender Analyse und Gruppierung der einzelnen Faktoren [7] [50] [51] [52] [57] [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68]. Um die Schwankungsbreite abzuschätzen, sind neben den mittleren Kosten untere und obere Grenzen festgelegt. Somit wird eine erste Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

**Tabelle 23: Angenommene Kostenstruktur für die DLSK-Komponenten**

Parameter	Einheit	Bezug	Wert		
			Min	Med	Max
<b>Investitionskosten</b>					
Verdichter	€/kW	Verdichterleistung	150	250	350
Turbine	€/kW	Turbinenleistung	125	200	275
Kaverne	€/m <sup>3</sup>	Kavernenvolumen	40	60	80
Rekuperator	€/kW	Rekuperatorleistung	20	40	60
TES	€/kWh	TES-Kapazität	20	35	50
Dampfkreislauf Abhitzeessel	€/kW	Abhitzeesselleistung	200	400	600
Dampfkreislauf Turbinenanlage	€/kW	Dampfturbinenleistung	460	530	600
BOP	%	Investitionskosten s.o.	40	50	60
<b>Betriebskosten</b>					
Personalkosten	%/a	Kosten Turbine & Verdichter	0,75	1,00	1,25
Versicherungskosten	%/a	von Gesamtkosten ohne BOP	0,60	0,85	1,10
Wartung & Instandhaltung fix	%/a	von Gesamtkosten ohne BOP	0,75	1,00	1,25
Wartung & Instandhaltung var.	€/kWh	Expansionsarbeit	0,0020	0,0035	0,0050
	€/kWh	Expansionsarbeit (mit Dampfteil)	0,0015	0,0030	0,0045
<b>Sonstiges</b>					
Nutzungsdauer	a			30	
Kalkulationszinssatz	%			5	

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## G. Jahresdauerlinien und Speicherzyklen der vier DLSK-Konzepte 2014

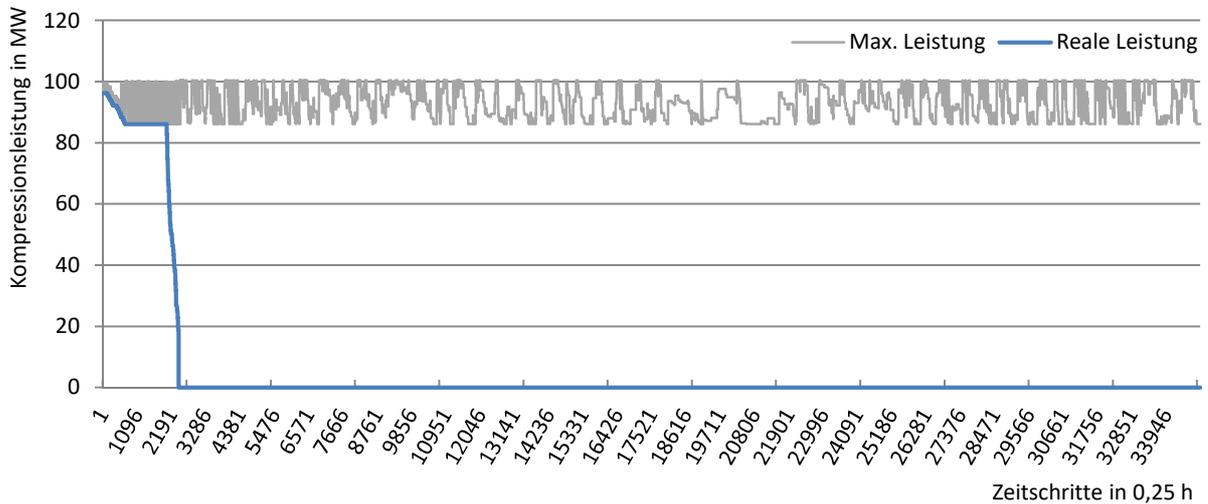


Abbildung 53: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D\_Rek 2014

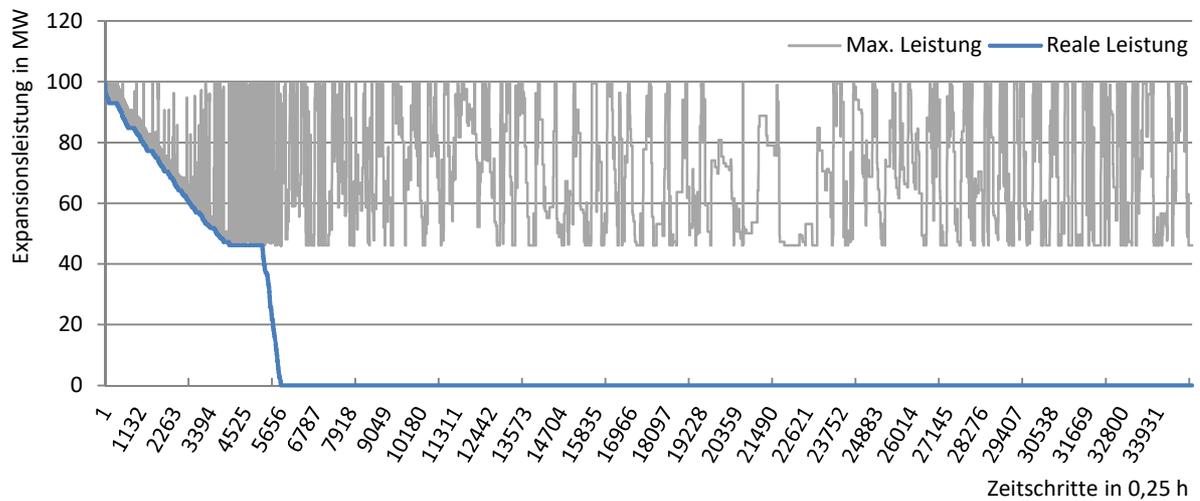


Abbildung 54: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D\_Rek 2014

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

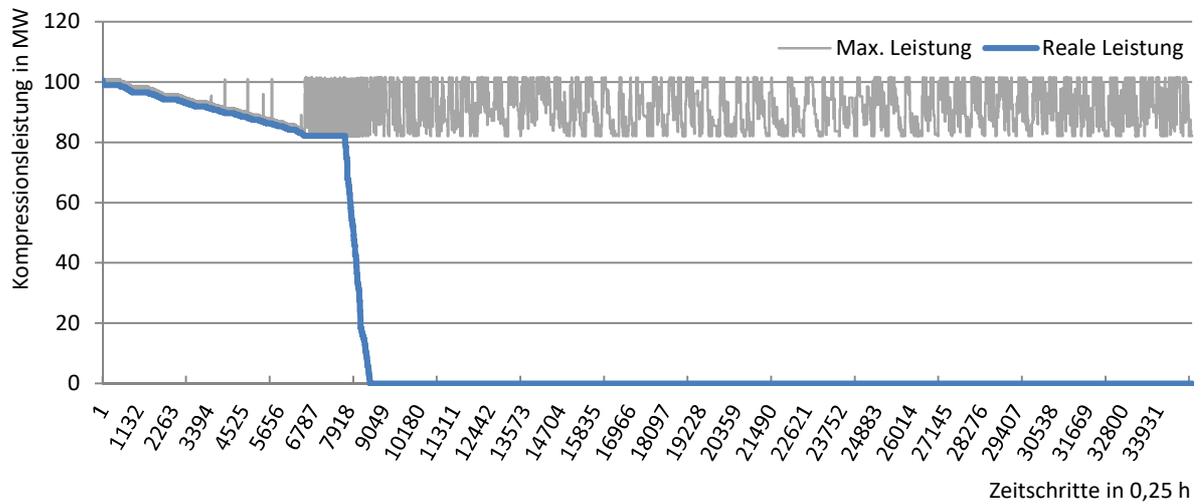


Abbildung 55: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für A\_TES 2014

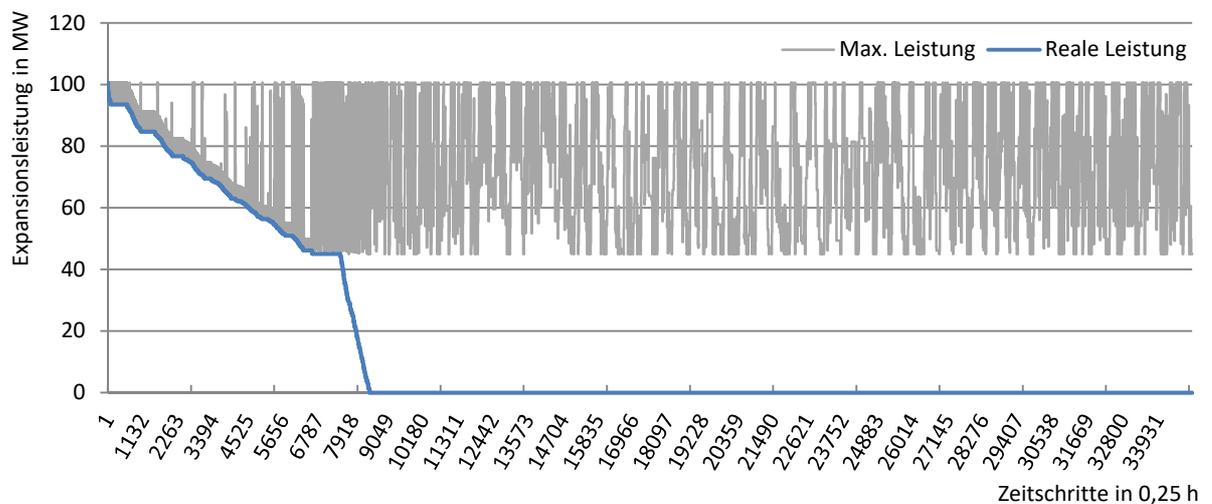


Abbildung 56: Jahresdauerlinie der Auspeicherleistung für A\_TES 2014

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

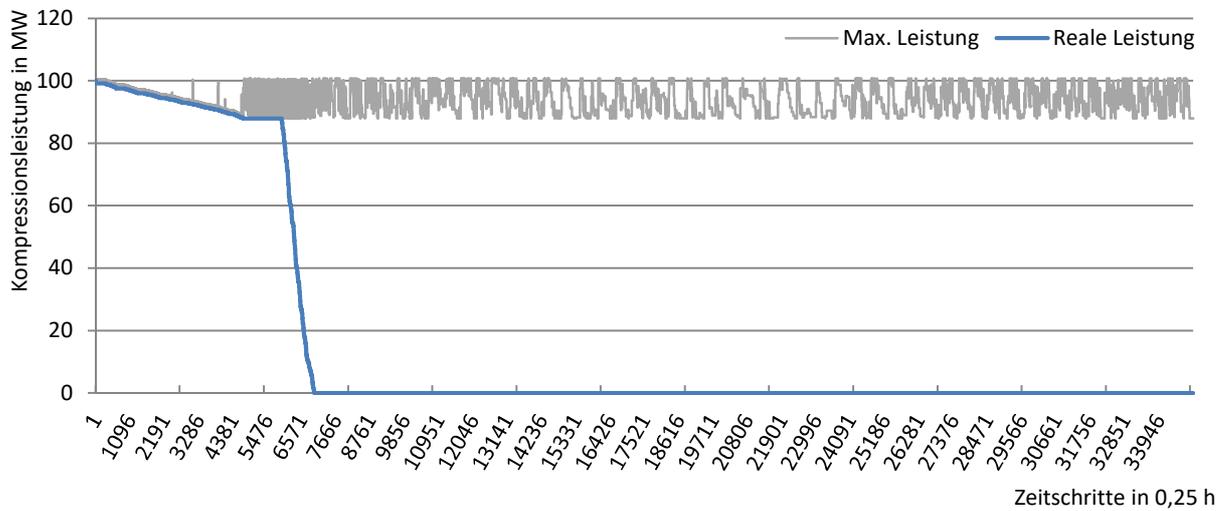


Abbildung 57: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D\_TES 2014

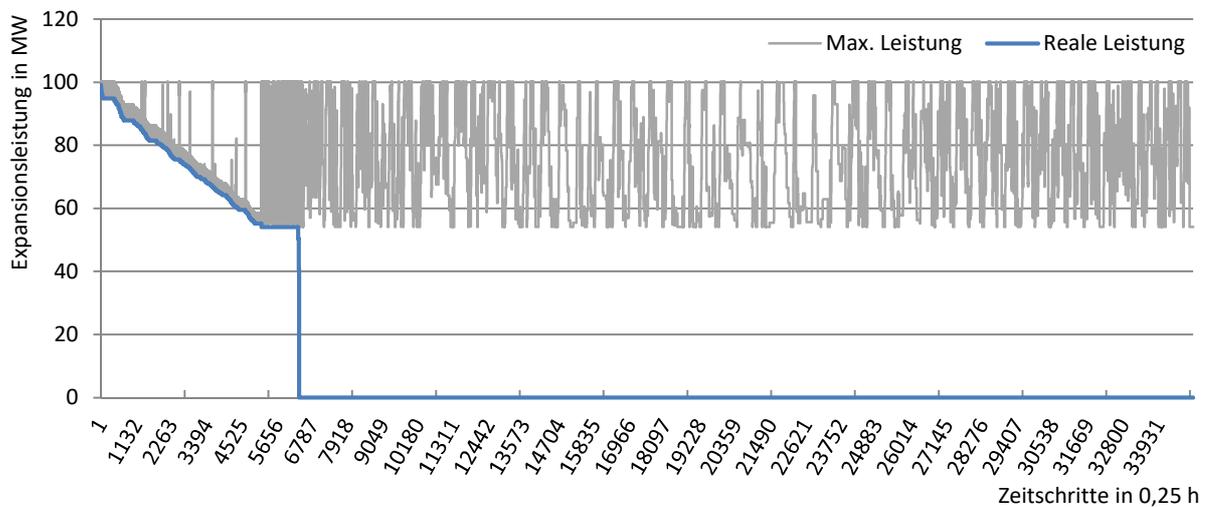


Abbildung 58: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D\_TES 2014

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

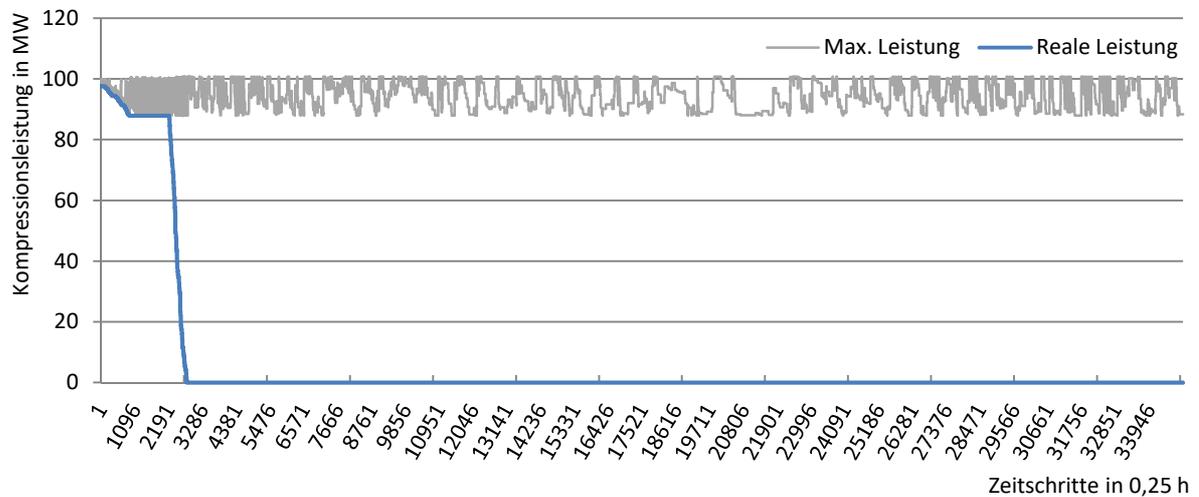


Abbildung 59: Jahresdauerlinie der Einspeicherleistung für D\_TES\_Dampf 2014

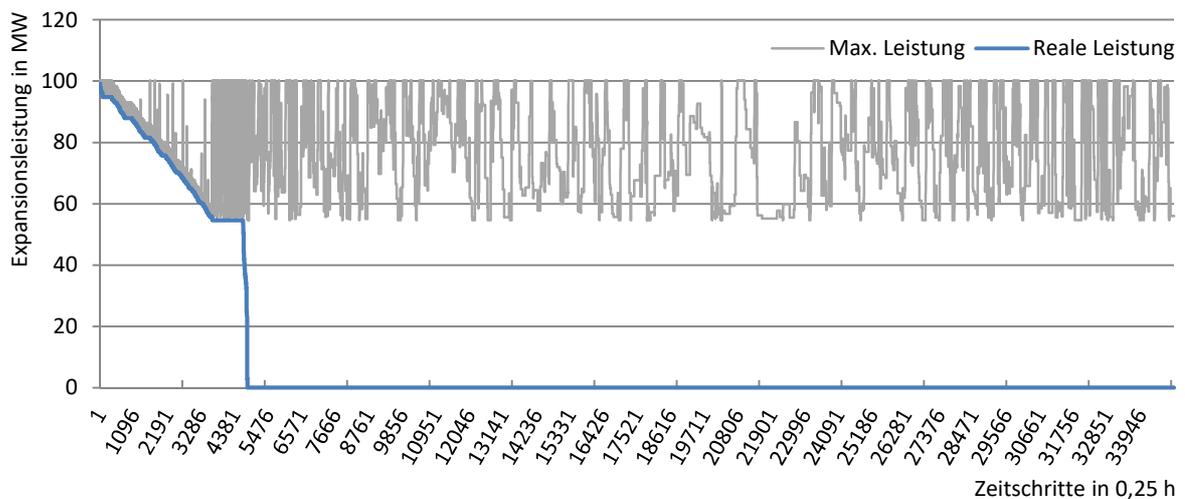


Abbildung 60: Jahresdauerlinie der Ausspeicherleistung für D\_TES\_Dampf 2014

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

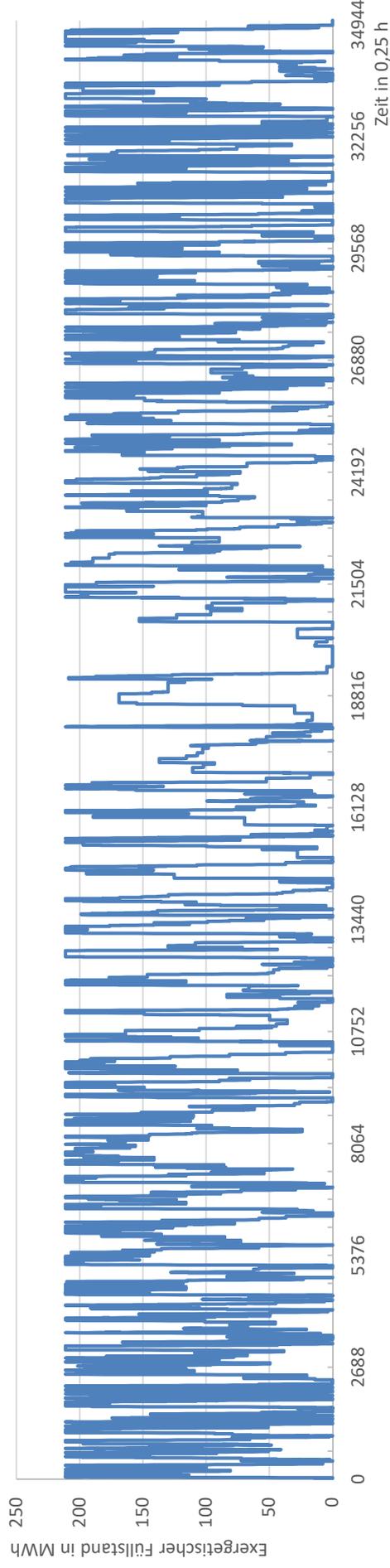


Abbildung 61: Exergetischer Kavernenfüllstand für D\_Rek im Jahr 2014

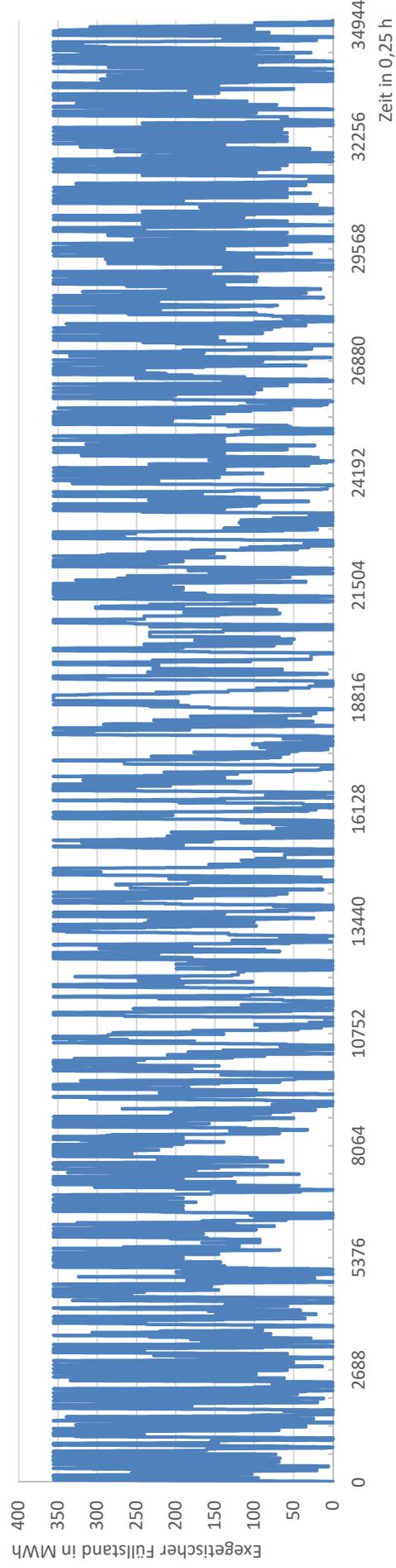


Abbildung 62: Exergetischer Kavernenfüllstand für A\_TES im Jahr 2014

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

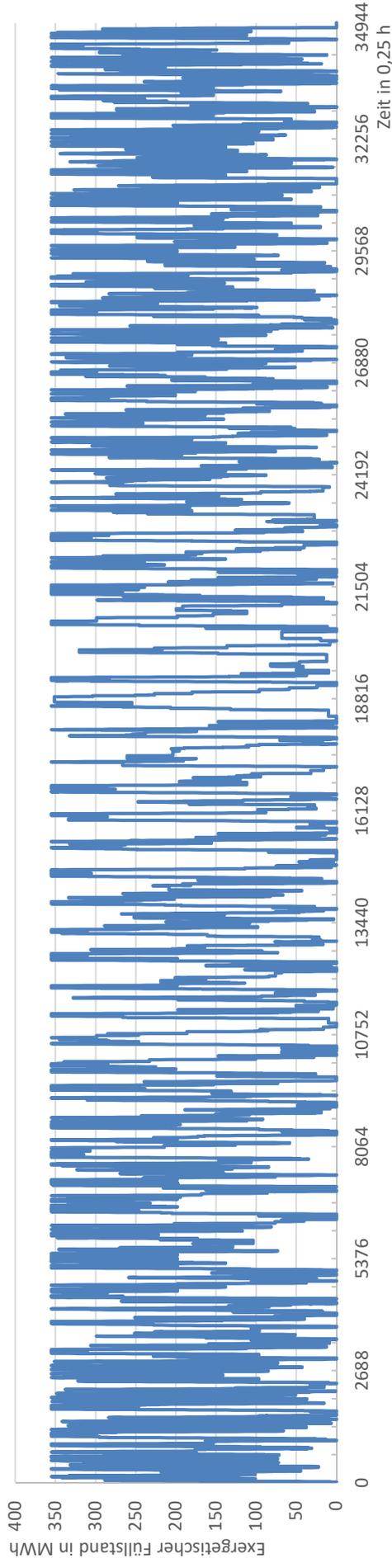


Abbildung 63: Exergetischer Kavernenfüllstand für D\_TES im Jahr 2014

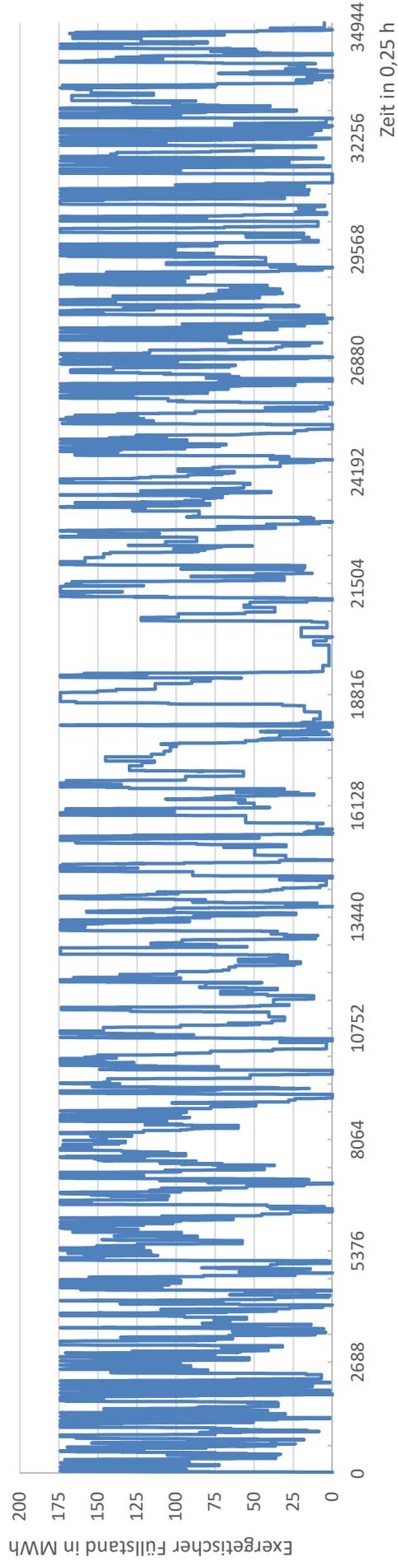


Abbildung 64: Exergetischer Kavernenfüllstand für D\_TES\_Dampf im Jahr 2014

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## H. Detaillierte Simulationsergebnisse für D\_Rek und D\_TES 2014, 2025 und 2035

Tabelle 24: Simulationsergebnisse für D\_Rek 2014

	Investitions- kosten in T€	Volllaststunden in h		Einnahmen in T€			Ausgaben in T€			Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Interner Zinssatz
		Einspeicherung	Ausspeicherung	h	h	Einspeicherung	Zufueuerung	O & M				
1/1/1	720	302	523	79	17	15	44	125	6,31%			
1/10/8	4.379	2.368	408	458	136	91	182	- 854	3,38%			
2/10/8	4.754	1.490	514	554	171	102	229	- 328	4,45%			
5/10/8	5.879	779	672	755	224	129	350	904	6,16%			
7/10/8	6.629	618	748	867	249	145	424	1.579	6,77%			
10/1/8	4.150	99	1.716	391	57	84	246	616	6,13%			
10/2/8	4.551	177	1.532	507	102	96	303	1.316	7,13%			
10/4/8	5.351	289	1.250	681	167	117	383	2.069	7,80%			
10/5/7	5.711	322	1.112	737	185	125	407	2.175	7,76%			
10/5/8	5.751	335	1.157	752	193	126	413	2.245	7,82%			
10/5/9	5.751	340	1.177	761	196	127	419	2.364	7,96%			
10/5/10	5.830	346	1.194	769	199	128	422	2.346	7,90%			
10/6/8	6.151	370	1.066	813	213	135	441	2.385	7,80%			
10/7/8	6.552	397	979	865	228	144	464	2.437	7,70%			
10/9/8	7.352	468	898	980	269	162	509	2.507	7,49%			
10/11/8	8.153	527	827	1.081	303	179	547	2.445	7,20%			
10/10/1	7.196	298	517	785	172	152	434	1.203	6,26%			
10/10/4	7.436	427	739	948	246	163	502	2.286	7,26%			
10/10/8	7.754	499	861	1.032	287	171	528	2.479	7,34%			

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018

<u>Titel</u>
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

	Investitions- kosten in T€	Volllaststunden in h		Einnahmen in T€		Ausgaben in T€		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Interner Zinssatz
		Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Zufeuerung			
10/10/12	8.069	537	926	1.074	308	177	539	2.369	7,16%	
10/10/24	9.018	616	1.053	1.147	350	193	550	1.631	6,36%	
50/25/10	29.151	346	1.194	3.844	995	639	2.111	11.732	7,90%	
50/100/8	58.786	778	672	7.537	2.238	1.285	3.491	8.808	6,14%	
100/50/4	55.934	277	961	6.806	1.602	1.208	3.826	18.148	7,37%	
100/50/8	57.518	331	1.144	7.493	1.905	1.260	4.133	22.516	7,83%	
100/50/9	57.914	340	1.177	7.614	1.960	1.270	4.186	23.138	7,88%	
100/50/10	58.301	345	1.192	7.683	1.985	1.278	4.222	23.457	7,90%	
100/50/11	58.697	350	1.209	7.742	2.014	1.286	4.240	23.405	7,88%	
100/50/12	59.093	363	1.254	7.876	2.088	1.298	4.284	23.864	7,91%	
100/40/13	55.099	322	1.387	7.219	1.847	1.204	4.015	22.643	7,96%	
100/50/13	59.489	370	1.273	7.955	2.119	1.306	4.324	24.233	7,94%	
100/60/13	63.898	413	1.186	8.622	2.370	1.407	4.584	24.854	7,81%	
100/50/14	59.885	369	1.270	7.957	2.113	1.311	4.329	23.943	7,89%	
100/100/1	71.990	303	529	7.934	1.766	1.523	4.368	12.593	6,32%	
100/100/8	77.536	499	862	10.322	2.871	1.708	5.287	24.830	7,35%	
100/100/24	90.172	615	1.060	11.499	3.532	1.933	5.499	16.300	6,36%	
200/100/8	115.027	331	1.144	14.994	3.810	2.519	8.274	45.181	7,84%	
200/100/9	115.819	340	1.177	15.226	3.921	2.540	8.370	46.242	7,88%	
400/200/9	231.603	340	1.176	30.438	7.833	5.079	16.735	92.435	7,88%	
400/400/8	310.145	497	859	41.203	11.445	6.828	21.127	98.946	7,34%	

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018

Titel  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

	Investitions- kosten in T€	Volllaststunden in h		Einnahmen in T€		Ausgaben in T€		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Interner Zinssatz
		Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Zuführung			
800/400/9	463.295	341	1.178	60.925	1.583	15.696	10.163	33.483	185.035	7,88%
800/400/12	472.835	364	1.256	63.028	1.639	16.731	10.390	34.268	190.689	7,91%
800/400/14	479.135	376	1.294	64.145	1.631	17.225	10.521	34.768	194.080	7,92%
Varianten mit DRek 100/100/8										
Druckspiel 25-50b bar	79.461	451	780	9.491	387	2.597	1.703	4.804	13.555	6,29%
Druckspiel 42-82 bar	75.376	469	802	9.772	403	2.670	1.660	5.040	22.211	7,17%
Druckspiel 80-120 bar	75.132	528	880	10.832	480	2.936	1.684	5.733	35.870	8,40%
Zufuerungs- temp. -200	77.437	495	809	10.274	426	2.727	1.688	5.433	27.754	7,61%
Zufuerungs- temp. -400	77.380	475	706	9.828	357	2.402	1.651	5.418	27.529	7,59%
Zufuerungs- temp. min.	79.414	416	408	8.382	110	1.500	1.572	5.200	21.265	6,98%

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 25: Simulationsergebnisse für D\_Rek in den Szenarien 2025 und 2035**

	2025				2035			
	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€
	Einspeicherung	Ausspeicherung			Einspeicherung	Ausspeicherung		
1/1/1	23	40	- 13	- 975	10	17	- 13	- 976
1/10/8	823	142	- 67	- 5.685	395	68	- 72	- 5.766
2/10/8	472	163	- 73	- 6.176	225	78	- 77	- 6.247
5/10/8	221	191	- 94	- 7.689	116	100	- 96	- 7.740
7/10/8	170	205	-107	- 8.706	94	113	- 110	- 8.753
10/1/8	14	247	- 77	- 5.640	7	129	- 77	- 5.644
10/2/8	29	248	- 83	- 6.150	15	129	- 83	- 6.157
10/4/8	57	245	- 94	- 7.171	30	129	- 95	- 7.186
10/5/7	62	214	-100	- 7.644	33	113	- 101	- 7.664
10/5/8	70	241	-100	- 7.681	37	129	- 101	- 7.700
10/5/9	77	266	- 99	- 7.717	41	143	- 101	- 7.739
10/5/10	84	292	- 99	- 7.753	46	160	- 100	- 7.775
10/6/8	82	711	- 78	- 6.054	45	128	- 107	- 8.216
10/7/8	94	233	-111	- 8.702	51	127	- 113	- 8.733
10/9/8	118	226	-123	- 9.726	65	125	- 125	- 9.766
10/11/8	138	217	-134	- 10.749	78	122	- 137	- 10.801
10/10/1	23	39	-132	- 9.751	9	16	- 132	- 9.758
10/10/4	76	132	-130	- 9.951	38	65	- 131	- 9.979
10/10/8	128	220	-128	- 10.238	71	123	- 131	- 10.285
10/10/12	171	296	-127	- 10.535	96	166	- 130	- 10.594
10/10/24	275	471	-127	- 11.480	151	258	- 134	- 11.604

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

	2025				2035			
	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€
	Einspeicherung	Ausspeicherung			Einspeicherung	Ausspeicherung		
50/25/10	84	291	-497	-38.765	46	160	-502	-38.876
50/100/8	224	193	-935	-76.891	116	100	-961	-77.401
100/50/4	39	136	-1.005	-75.393	19	65	-1.012	-75.533
100/50/8	70	242	-996	-76.813	37	129	-1.007	-77.012
100/50/9	77	266	-994	-77.168	41	143	-1.006	-77.387
100/50/10	84	292	-993	-77.531	46	160	-1.005	-77.753
100/50/11	91	316	-992	-77.902	51	175	-1.004	-78.135
100/50/12	97	336	-990	-78.266	55	189	-1.003	-78.518
100/40/13	86	368	-933	-73.170	48	207	-943	-73.364
100/50/13	104	358	-989	-78.648	59	204	-1.003	-78.908
100/60/13	121	347	-1.045	-84.134	70	200	-1.062	-84.467
100/50/14	110	377	-989	-79.028	63	217	-1.002	-79.294
100/100/1	24	43	-1.319	-97.533	10	17	-1.323	-97.606
100/100/8	127	220	-1.283	-102.376	71	123	-1.307	-102.845
100/100/24	284	489	-1.270	-114.769	151	260	-1.332	-115.957
200/100/8	70	241	-1.993	-153.616	37	129	-2.014	-154.015
200/100/9	77	266	-1.989	-154.328	41	143	-2.011	-154.765
400/200/9	76	263	-3.980	-308.658	41	143	-4.023	-309.493
400/400/8	127	220	-5.131	-409.503	71	123	-5.228	-411.382
800/400/9	77	266	-7.955	-617.327	41	143	-8.045	-619.080
800/400/12	98	337	-7.921	-626.214	55	190	-8.025	-628.228
800/400/14	110	377	-7.906	-632.215	63	217	-8.018	-634.391

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

	2025		2035		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€
	Volllaststunden in h	Einspeicherung	Volllaststunden in h	Einspeicherung		
Varianten mit DRek 100/100/8						
Druckspiel 25-50b bar	116	200	64	110	-1.341	-105.421
Druckspiel 42-82 bar	115	197	67	114	-1.288	-100.307
Druckspiel 80-120 bar	126	210	75	125	-1.275	-99.819
Zufuehrungstemp. -200	110	180	58	94	-1.308	-102.755
Zufuehrungstemp. -400	100	148	55	82	-1.320	-102.934
Zufuehrungstemp. min.	47	46	44	43	-1.392	-106.365

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 26: Simulationsergebnisse für D\_TES in 2014**

	Investitions- kosten in T€	Volllaststunden in h		Einnahmen in T€	Ausgaben in T€		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Interner Zinssatz	
		Einspeicherung	Ausspeicherung		Einspeicherung	Zuführung				O & M
10/5/1	5.503	437	661	639	41	19	114	465	3.499	9,42%
10/10/1	7.234	633	481	845	85	28	151	580	716	5,56%
10/10/4	8.674	1.175	894	1.060	194	51	183	632	1.561	6,15%
10/10/8	10.569	1.477	1.124	1.175	253	61	215	646	1.625	6,14%
10/10/12	12.458	1.583	1.205	1.219	268	68	241	643	1.355	5,91%
10/10/24	18.134	1.863	1.419	1.329	324	79	318	607	35	5,02%
50/100/8	89.210	2.076	790	8.240	1.974	432	1.702	4.132	-9.195	4,17%
100/50/1	55.025	435	659	6.373	407	190	1.144	4.631	34.647	9,38%
100/50/4	62.116	740	1.125	7.743	930	318	1.313	5.182	9.941	5,89%
100/50/8	71.576	950	1.446	8.555	1.332	406	1.486	5.332	11.816	6,03%
100/100/1	72.845	647	490	8.512	873	276	1.520	5.843	40.300	8,89%
100/100/8	108.356	1.493	1.136	11.805	2.569	620	2.184	6.431	16.166	6,13%
100/100/24	189.309	1.847	1.406	13.214	3.182	763	3.277	5.992	-73.285	1,54%
200/100/1	110.048	438	663	12.770	823	372	2.289	9.287	69.770	9,41%
200/100/2	114.772	438	663	13.957	1.176	480	2.410	9.891	69.770	9,41%
200/100/8	147.482	966	1.470	17.202	2.741	801	3.033	10.626	58.277	7,85%
200/200/1	145.093	618	468	16.808	1.617	530	3.017	11.645	80.382	8,90%
200/200/8	211.314	1.479	1.126	23.513	5.065	1.229	4.294	12.924	38.943	6,39%
200/400/8	347.316	2.071	788	32.924	7.871	1.725	6.687	16.641	-25.100	4,42%

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018

Titel  
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein

	Investitions- kosten in T€	Volllaststunden in h		Einnahmen in T€		Ausgaben in T€		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Interner Zinssatz
		Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Ausspeicherung	Einspeicherung	Zuführung			
400/200/1	220.096	442	669	25.631	1.673	754	4.583	18.622	140.481	9,44%
400/200/8	286.304	957	1.457	34.306	5.407	1.588	5.951	21.360	127.298	8,18%
400/200/24	437.667	1.234	1.886	38.377	6.869	2.047	8.118	21.342	- 24.416	4,55%
400/400/1	290.185	648	490	34.044	3.482	1.108	6.065	23.388	162.677	8,94%
400/400/8	432.729	1.493	1.136	47.201	10.263	2.480	8.727	25.730	65.478	6,15%
400/400/24	725.353	1.872	1.431	53.241	12.987	3.106	12.749	24.399	- 252.920	1,93%
800/400/1	440.191	434	657	51.033	3.254	1.518	9.149	37.112	278.416	9,40%
800/400/8	572.609	957	1.457	68.611	10.813	3.176	11.901	42.720	254.588	8,18%
100/100/8/ 25-50	109.296	1.481	1.198	11.688	2.652	738	2.217	6.081	8.453	5,60%
100/100/8/ +200	103.385	1.117	937	10.952	1.644	1.224	2.053	6.031	13.390	5,99%
100/100/1 TESmin	70.153	480	479	8.464	475	1.135	1.483	5.371	33.851	8,43%
100/100/8 TESmin1	93.496	931	821	10.519	1.140	1.429	1.891	6.059	23.834	6,89%
100/100/8 TESmin2	87.552	747	752	10.248	799	1.746	1.793	5.911	26.894	7,26%
100/100/24 TESmin	127.328	1.017	1.024	11.624	1.112	2.360	2.379	5.773	- 15.545	4,01%

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlischen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

**Tabelle 27: Simulationsergebnisse für D\_TES in den Szenarien 2025 und 2035**

	2025				2035			
	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€	Volllaststunden in h		Gewinn in T€	Kapitalwert in T€
	Einspeicherung	Ausspeicherung			Einspeicherung	Ausspeicherung		
10/10/8	353	269	-140	-13.286	143	108	-151	-13.485
50/100/8	575	219	-1.133	-111.147	249	95	-1.210	-110.374
100/100/1	65	49	-1.282	-97.674	28	21	-1.299	-97.693
100/100/8	351	267	-1.436	-136.158	142	108	-1.506	-134.812
100/100/24	771	587	-1.960	-219.287	328	249	-2.215	-224.218
200/100/8	205	313	-2.101	-188.166	95	144	-2.153	-184.873
400/400/8	348	265	-5.607	-531.203	140	106	-6.023	-539.255
100/100/8/ 25-50 bar	348	281	-1.409	-134.347	136	110	-1.520	-136.494

<u>Berichtreihe.</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## I. Mathematische Beschreibung des Betriebsmodells

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

# 1 Modellübersicht

Das Modell erlaubt es eine Vielzahl von technisch realisierbaren Konzepten für Druckluftspeicherkraftwerke hinsichtlich ihres Einsatzes am Spot- und Minutenreservemarkt zu optimieren.

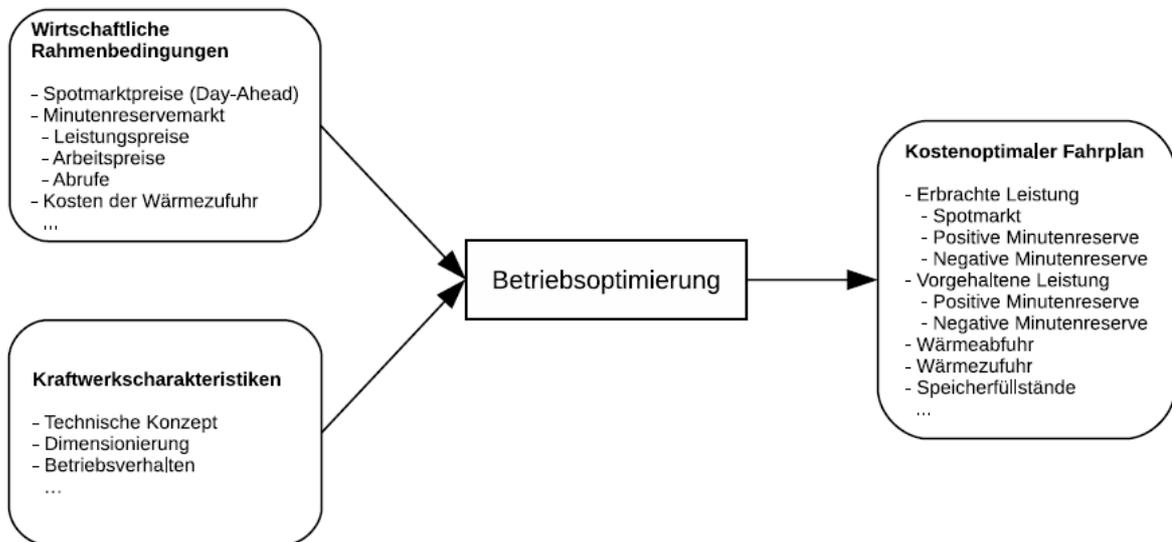


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Modells zur Einsatzoptimierung

## 2 Zielfunktion

Das Modell minimiert 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-Markt. Zudem werden anfallende Letztverbraucherabgaben für Strom berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
 \min \sum_t & (C_{fuel} \dot{Q}_{exp\_in}(t) \tau & (2.1) \\
 & + (C_{spot}(t) + C_{charges}) P_{cmp\_spot}(t) \tau \\
 & - C_{spot}(t) P_{exp\_spot}(t) \tau \\
 & - C_{tcr\_neg\_pro}(t) P_{tcr\_neg\_pro}(t) \\
 & - (C_{tcr\_neg\_del}(t) - C_{charges}) P_{tcr\_neg\_del}(t) \tau \\
 & - C_{tcr\_pos\_pro}(t) P_{tcr\_pos\_pro}(t) \\
 & - C_{tcr\_pos\_del}(t) P_{tcr\_pos\_del}(t) \tau
 \end{aligned}$$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 3 Verdichtung

### 3.1 Elektrische Leistung

Die realisierbare Maximalleistung ist abhängig vom Füllstand der Kaverne.

$$P_{cmp\_max}(t) = m_{cmp\_max}CAS_{fil}(t-1) + b_{cmp\_max} \forall t \in [1, t_{max}] \quad (3.1)$$

$$P_{cmp\_max}(t) = b_{cmp\_max} \forall t \notin [1, t_{max}] \quad (3.2)$$

Die Leistung darf nur Werte zwischen der Minimalleistung und Maximalleistung annehmen.

$$P_{cmp\_min}ST_{cmp}(t) \leq P_{cmp}(t) \leq P_{cmp\_max}(t) \forall t \in T \quad (3.3)$$

### 3.2 Wärmeströme

Der insgesamt austretende Wärmestrom hängt von der elektrischen Leistung ab.

$$\dot{Q}_{cmp}(t) = m_{cmp\_q}P_{cmp}(t) + b_{cmp\_q}ST_{cmp}(t) \forall t \in T \quad (3.4)$$

Der insgesamt austretende Wärmestrom teilt sich in einen Abwärmestrom und einen Eingangswärmestrom des thermischen Energiespeichers auf.

$$\dot{Q}_{cmp}(t) = \dot{Q}_{cmp\_out}(t) + \dot{Q}_{tes\_in}(t) \forall t \in T \quad (3.5)$$

Der Abwärmestrom und Eingangswärmestrom des thermischen Energiespeichers stehen in einem fixen Verhältnis zueinander.

$$r_{cmp\_tes}\dot{Q}_{cmp\_out}(t) = (1 - r_{cmp\_tes})\dot{Q}_{tes\_in}(t) \forall t \in T \quad (3.6)$$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 4 Expansion

### 4.1 Elektrische Leistung

Die realisierbare Maximalleistung ist abhängig vom Füllstand der Kaverne.

$$P_{exp\_max}(t) = m_{exp\_max}CAS_{fil}(t-1) + b_{exp\_max} \quad \forall t \in [1, t_{max}] \quad (4.1)$$

$$P_{exp\_max}(t) = b_{exp\_max} \quad \forall t \notin [1, t_{max}] \quad (4.2)$$

Die Leistung darf nur Werte zwischen der Minimalleistung und Maximalleistung annehmen.

$$P_{exp\_min}ST_{exp}(t) \leq P_{exp}(t) \leq P_{exp\_max}(t) \quad \forall t \in T \quad (4.3)$$

### 4.2 Wärmeströme

Der insgesamt eintretende Wärmestrom hängt von der elektrischen Leistung ab.

$$\dot{Q}_{exp}(t) = m_{exp\_q}P_{exp}(t) + b_{exp\_q}ST_{exp}(t) \quad \forall t \in T \quad (4.4)$$

Der insgesamt austretende Wärmestrom teilt sich in einen externen Wärmestrom und einen Ausgangswärmestrom des thermischen Energiespeichers auf.

$$\dot{Q}_{exp}(t) = \dot{Q}_{exp\_in}(t) + \dot{Q}_{tes\_out}(t) \quad \forall t \in T \quad (4.5)$$

Der externe Wärmestrom und Ausgangswärmestrom des thermischen Energiespeichers stehen in einem fixen Verhältnis zueinander.

$$r_{exp\_tes}\dot{Q}_{exp\_in}(t) = (1 - r_{exp\_tes})\dot{Q}_{tes\_out}(t) \quad \forall t \in T \quad (4.6)$$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 5 Speicherung

### 5.1 Druckluftspeicher

Der eintretende Exergiestrom hängt von der elektrischen Leistung der Kompression ab.

$$\dot{E}x_{cas\_in}(t) = m_{cas\_in}P_{cmp}(t) \quad \forall t \in T \quad (5.1)$$

Der austretende Exergiestrom hängt von der elektrischen Leistung der Kompression ab.

$$\dot{E}x_{cas\_out}(t) = m_{cas\_out}P_{exp}(t) \quad \forall t \in T \quad (5.2)$$

Die exergetische Speicherbilanz unter Berücksichtigung temporaler Verluste ergibt sich durch die intertemporale zweier aufeinanderfolgender Speicherfüllstände.

$$\eta_{cas\_tmp}CAS_{fil}(t) = CAS_{fil}(t-1) + \tau(\dot{E}x_{cas\_in}(t) - \dot{E}x_{cas\_out}(t)) \quad \forall t \in [1, t_{max}] \quad (5.3)$$

$$\eta_{cas\_tmp}CAS_{fil}(t) = \tau(\dot{E}x_{cas\_in}(t) - \dot{E}x_{cas\_out}(t)) \quad \forall t \notin [1, t_{max}] \quad (5.4)$$

### 5.2 Thermischer Energiespeicher

Die Speicherbilanz unter Berücksichtigung temporaler Verluste ergibt sich durch die intertemporale zweier aufeinanderfolgender Speicherfüllstände.

$$\eta_{tes\_tmp}TES_{fil}(t) = TES_{fil}(t-1) + \tau(\dot{Q}_{tes\_in}(t) - \dot{Q}_{tes\_out}(t)) \quad \forall t \in [1, t_{max}] \quad (5.5)$$

$$\eta_{tes\_tmp}TES_{fil}(t) = \tau(\dot{Q}_{tes\_in}(t) - \dot{Q}_{tes\_out}(t)) \quad \forall t \notin [1, t_{max}] \quad (5.6)$$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## 6 Marktintegration

### 6.1 Leistungsallokation

Die Leistung der Kompression und Expansion teilt sich auf die jeweiligen Märkte auf.

$$P_{cmp}(t) = P_{cmp\_spot}(t) + P_{cmp\_tcr\_del}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.1)$$

$$P_{exp}(t) = P_{exp\_spot}(t) + P_{exp\_tcr\_del}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.2)$$

### 6.2 Spotmarkt

Am Spotmarkt können Blöcke mit unterschiedlicher Lieferhöhe und -dauer gehandelt werden. Wird ein Block gehandelt, muss die Leistung (beispielsweise die negative Kompressionsleistung am Spotmarkt  $P_{cmp\_spot}(t)$ ) über die Anzahl der Zeitschritte eines Spotmarktproduktes  $l_{spot\_max}$  ab dem jeweiligen Produktstartzeitpunkt (beschrieben durch den Term  $l_{spot\_max} s_{spot}$ ) konstant gehalten werden. Analog gilt dies für die positive Expansionsleistung  $P_{exp\_spot}(t)$ . Der gesamte Zusammenhang wird für die Kompression und Expansion durch die folgende Gleichung definiert.

$$P_{cmp\_spot}(t = l_{spot\_max} s_{spot} + l_{spot}) = P_{cmp\_spot}(t = l_{spot\_max} s_{spot} + l_{spot} + 1) \quad (6.3)$$

$$\forall l \in L_{spot}, \forall s \in S_{spot}$$

$$P_{exp\_spot}(t = l_{spot\_max} s_{spot} + l_{spot}) = P_{exp\_spot}(t = l_{spot\_max} s_{spot} + l_{spot} + 1) \quad (6.4)$$

$$\forall l \in L_{spot}, \forall s \in S_{spot}$$

$t_{max}$  Anzahl der Zeitschritte innerhalb eines Optimierungszeitraumes

$l_{spot\_max}$  Anzahl der Zeitschritte eines Spotmarktproduktes

$s_{spot\_max} = \frac{t_{max}}{l_{spot\_max}}$  Anzahl der Spotmarktprodukte innerhalb des Optimierungszeitraums

$L_{spot} = [0, l_{spot\_max} - 1]$  Auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgende Zeitschritte

$S_{spot} = [0, s_{spot\_max} - 1]$  Spotmarktprodukte innerhalb des Optimierungszeitraums

$l_{spot}$  Auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgender Zeitschritt

$s_{spot}$  Spotmarktprodukt innerhalb des Optimierungszeitraums

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

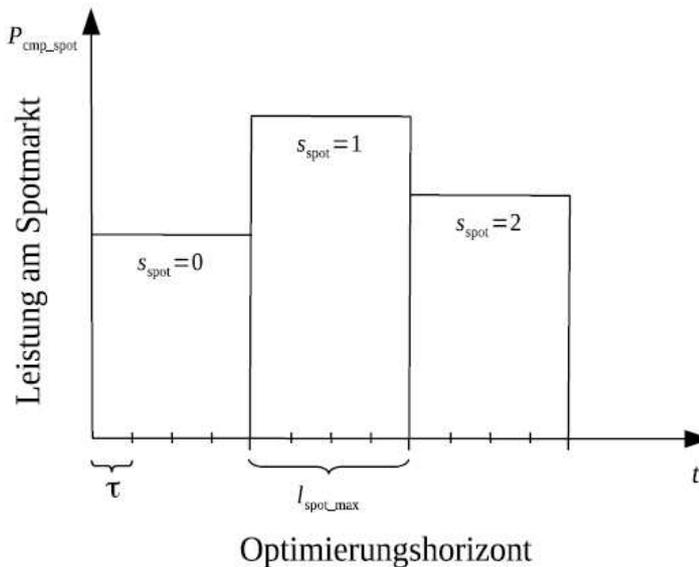


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Modellierung von Spotmarktprodukten

Dabei beschreibt die Menge  $S_{spot} = [0, s_{spot\_max} - 1]$  die einzelnen Produkte  $s_{spot}$  am Spotmarkt bis zur durch  $s_{spot\_max} = \frac{t_{max}}{l_{spot\_max}}$  beschriebenen Anzahl der Spotmarktprodukte innerhalb des Optimierungszeitraums. Der Parameter  $t_{max}$  steht für die Anzahl der Zeitschritte innerhalb eines Optimierungszeitraumes. Weiterhin beschreibt  $L_{spot} = [0, l_{spot\_max} - 1]$  die auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgenden Zeitschritte.

### 6.3 Minutenreserve

Im Folgenden werden die für die Beschreibung der Teilnahme am Minutenreservemarkt notwendigen Gleichungen erläutert, die sowohl für den Kompressionsteil als auch für den Expansionsteil gelten. Um Doppelungen zu vermeiden, beschränken sich die Ausführungen an dieser Stelle auf den Kompressionsteil. Die Gleichungen des Expansionsteils ergeben sich durch eine entsprechend veränderte Indexierung aller spezifischen Parameter bzw. Entscheidungsvariablen. So wäre beispielsweise die Gleichung  $P_{tcr\_neg\_del}(t) \leq P_{tcr\_neg\_act}(t)$  für den Expansionsteil als  $P_{tcr\_pos\_del}(t) \leq P_{tcr\_pos\_act}(t)$  zu implementieren.

#### Begrenzung der aktivierten Leistung auf die Abrufhöhe

Die erbrachte Leistung am Minutenreservemarkt  $P_{tcr\_neg\_del}(t)$  darf maximal der abgerufenen negativen Minutenreserveleistung  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  entsprechen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

$$P_{tcr\_neg\_del}(t) \leq P_{tcr\_neg\_act}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.5)$$

$P_{tcr\_neg\_del}(t)$  Leistungserbringung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

Dabei können  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  und die Leistungsvorhaltung  $P_{tcr\_neg\_cap}(t)$  auf die maximal am Minutenreservemarkt platzierbare Leistung  $P_{tcr\_neg\_max}$  begrenzt werden. Dies erlaubt es nur einen Teil der verfügbaren Kompressionsleistung als Minutenreserveleistung bereitzustellen oder die Marktteilnahme ganz auszuschließen.

$$P_{tcr\_neg\_act}(t) \leq P_{tcr\_neg\_max} \quad \forall t \in T \quad (6.6)$$

$$P_{tcr\_neg\_cap}(t) \leq P_{tcr\_neg\_max} \quad \forall t \in T$$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_max}$  Maximal am Minutenreservemarkt platzierbare Leistung

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

### Begrenzung der aktivierten auf die vorgehaltene Leistung

Die erbrachte Leistung  $P_{tcr\_neg\_del}(t)$  darf maximal der vorgehaltenen negativen Minutenreserveleistung  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  entsprechen.

$$P_{tcr\_neg\_del}(t) \leq P_{tcr\_neg\_pro}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.7)$$

$P_{tcr\_neg\_del}(t)$  Leistungserbringung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

### Einhaltung der Mindestleistung

Die am Minutenreservemarkt vorgehaltene Leistung  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  muss größer als die geforderte Mindestleistung für Minutenreserveprodukte  $P_{tcr\_pro\_min}$  oder Null sein. Dies wird über die Multiplikation der Mindestleistung mit der Binärvariablen  $B_{tcr\_neg\_min}(t)$  sichergestellt.

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

$$P_{tcr\_pro\_min} B_{tcr\_neg\_min}(t) \leq P_{tcr\_neg\_pro}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.8)$$

$P_{tcr\_pro\_min}$  Mindestleistung für Minutenreserveprodukte

$B_{tcr\_neg\_min}(t)$  Binärvariable

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

### Setzen der aktivierten Leistung auf die Abrufhöhe

Der erbrachten Leistung  $P_{tcr\_neg\_del}(t)$  muss stets das Minimum der Leistungsvorhaltung  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  und der möglichen Abrufhöhe  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  zugewiesen werden. Diese Notwendigkeit ergibt sich daraus, dass auch eine Leistungsvorhaltung unterhalb der maximalen Verdichterleistung möglich sein soll. In diesem Fall einer partiellen Leistungsvorhaltung darf die erbrachte Leistung  $P_{tcr\_neg\_del}(t)$  höchstens der Leistungsvorhaltung  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  entsprechen. Im Falle einer geringeren Abrufhöhe  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  als der Vorhaltung soll hingegen die genaue Abrufhöhe erbracht werden. Die folgende Abbildung veranschaulicht den Zusammenhang anhand von zwei exemplarischen Abrufen.

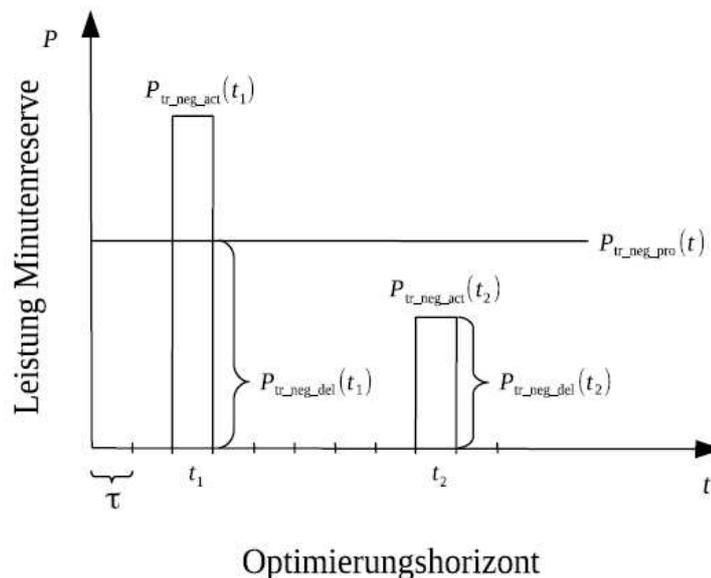


Abbildung 6.2: Modellierung der zu erbringenden Leistung am Minutenreservemarkt

Für die Formulierung der dargestellten Zuweisungsproblematik wird die sogenannte Big-M-Methode angewandt. Diese erlaubt unter anderem die mathematische Beschreibung der Ermittlung des Minimums eines Parameters und einer Variablen über lineare Ausdrücke. Die Formulierung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme einer Binärvariablen und einer vom konkreten Problem abhängigen großen Zahl  $M$ .

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Für die Anwendung der Big-M-Methode innerhalb des Modells wurden im ersten Schritt die Variablen  $M_{tcr\_neg}$  und  $B_{tcr\_neg\_set}(t)$  eingeführt. Dabei sollte  $M_{tcr\_neg}$  zur Minimierung des Rechenaufwandes so klein wie möglich aber mindestens so groß wie der Ausdruck

$$| P_{tcr\_neg\_act}(t) - P_{tcr\_neg\_pro}(t) | \quad (6.9)$$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_cap}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

gewählt werden. Da  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  maximal so groß wie  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  sein darf und im Falle eines ausbleibenden Abrufs Null ist, wird in diesem Fall

$$M_{tcr\_neg} = \max(P_{tcr\_neg\_pro}(t)) \quad (6.10)$$

$M_{tcr\_neg}$  Ausreichend große Zahl  $M$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

definiert. Weiterhin wurden Gleichungen erstellt, die die Relation der Variablen  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  und  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  innerhalb der Binärvariablen  $B_{tcr\_neg\_set}(t)$  speichern.

$$P_{tcr\_neg\_act}(t) - P_{tcr\_neg\_pro}(t) \leq M_{tcr\_neg} B_{tcr\_neg\_set}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.11)$$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$M_{tcr\_neg}$  Ausreichend große Zahl  $M$

$B_{tcr\_neg\_set}(t)$  Binärvariable

$$P_{tcr\_neg\_pro}(t) - P_{tcr\_neg\_act}(t) \leq M_{tcr\_neg} (1 - B_{tcr\_neg\_set}(t)) \quad \forall t \in T \quad (6.12)$$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$M_{tcr\_neg}$  Ausreichend große Zahl  $M$

$B_{tcr\_neg\_set}(t)$  Binärvariable

Durch diese Formulierung nimmt die Binärvariable  $B_{tcr\_neg\_set}(t)$  den Wert Eins an wenn gilt  $P_{tcr\_neg\_act}(t) \geq P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  bzw. den Wert Null wenn gilt  $P_{tcr\_neg\_act}(t) \leq P_{tcr\_neg\_pro}(t)$ .

Im letzten Schritt wurde die Zuweisung des Minimums der Variablen  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  und des Parameters  $P_{tcr\_neg\_act}(t)$  an die Variable  $P_{tcr\_neg\_del}(t)$  über zwei weitere Gleichungen beschrieben.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

$$P_{tcr\_neg\_del}(t) \geq P_{tcr\_neg\_act}(t) - M_{tcr\_neg} B_{tcr\_neg\_set}(t) \quad \forall t \in T \quad (6.13)$$

$P_{tcr\_neg\_del}(t)$  Leistungserbringung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$M_{tcr\_neg}$  Ausreichend große Zahl  $M$

$B_{tcr\_neg\_set}(t)$  Binärvariable

$$P_{tcr\_neg\_del}(t) \geq P_{tcr\_neg\_pro}(t) - M_{tcr\_neg} (1 - B_{tcr\_neg\_set}(t)) \quad \forall t \in T \quad (6.14)$$

$P_{tcr\_neg\_del}(t)$  Leistungserbringung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$M_{tcr\_neg}$  Ausreichend große Zahl  $M$

$B_{tcr\_neg\_set}(t)$  Binärvariable

Diese stellen sicher, dass der aktivierten Leistung  $P_{tcr\_neg\_work}(t)$  im jeweiligen Zeitschritt nur einer der beiden Werte zugewiesen wird. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Formulierung der Zuweisung bewusst über zwei lineare Ungleichungen vorgenommen wurde. Es wäre ebenfalls möglich diesen Zusammenhang über die folgende Gleichung zu definieren.

$$P_{tcr\_neg\_del}(t) = P_{tcr\_neg\_pro}(t) B_{tcr\_neg\_set}(t) + P_{tcr\_neg\_act}(t) (1 - B_{tcr\_neg\_set}(t)) \quad \forall t \in T \quad (6.15)$$

$P_{tcr\_neg\_del}(t)$  Leistungserbringung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$B_{tcr\_neg\_set}(t)$  Binärvariable

$P_{tcr\_neg\_act}(t)$  Leistungsabruf negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

Dies würde jedoch durch das Produkt von  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  und  $B_{tcr\_neg\_set}(t)$  zu einem quadratischen Ausdruck führen und damit den Rechenaufwand für die Lösung des Problems erhöhen.

## Einhaltung der Zeitscheiben

Wenn negative Leistung  $P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  vorgehalten wird, muss dies immer für eine Zeitscheibe von vier Stunden erfolgen. Hierfür wird (analog zur Formulierung der Spotmarktprodukte) die Leistung über die Anzahl der Zeitschritte eines Minutenreserveproduktes  $l_{tcr\_max}$  ab dem jeweiligen Produktstartzeitpunkt (beschrieben durch den Term  $l_{tcr\_max} str$ ) konstant gehalten. Dabei beschreibt die Menge  $S_{tcr} = [0, s_{tcr\_max} - 1]$  die einzelnen Produkte  $s_{tcr}$  am Markt für Minutenreserve bis zur durch  $s_{tcr\_max} = \frac{t_{max}}{l_{tcr\_max}}$

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

beschriebenen Anzahl der Produkte innerhalb des Optimierungszeitraums. Dabei steht  $t_{max}$  für die Anzahl der Zeitschritte innerhalb eines Optimierungszeitraumes. Weiterhin beschreibt  $L_{tcr} = [0, l_{tr\_max} - 1]$  die auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgenden Zeitschritte. Die folgende Gleichung beschreibt den gesamten Zusammenhang.

$$P_{tr\_neg\_pro}(t = l_{tcr\_max} s_{tr} + l_{tr}) = P_{tcr\_neg\_pro}(t = l_{tcr\_max} s_{tcr} + l_{tcr} + 1) \quad (6.16)$$

$$\forall l \in L_{tcr}$$

$$\forall s \in S_{tcr}$$

$P_{tcr\_neg\_pro}(t)$  Leistungsvorhaltung negativer Minutenreserve zum Zeitpunkt  $t$

$t_{max}$  Anzahl der Zeitschritte innerhalb eines Optimierungszeitraumes

$l_{tcr\_max}$  Anzahl der Zeitschritte eines Minutenreserveproduktes

$s_{tcr\_max} = \frac{t_{max}}{l_{tcr\_max}}$  Anzahl der Minutenreserveprodukte innerhalb des Optimierungszeitraums

$L_{tr} = [0, l_{tcr\_max} - 1]$  Auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgende Zeitschritte

$S_{tr} = [0, s_{tcr\_max} - 1]$  Minutenreserveprodukte innerhalb des Optimierungszeitraums

$l_{tcr}$  Auf den Startzeitpunkt eines Produktes folgender Zeitschritt

$s_{tcr}$  Minutenreserveprodukt innerhalb des Optimierungszeitraums

## 7 Anpassungsmöglichkeiten

Das Modell erlaubt eine Anpassung auf einen alleinigen Betrieb am Spot- oder Regelleistungsmarkt. Hierfür müssen die entsprechenden Zielfunktionsterme und Nebenbedingungen des jeweiligen Marktes aus dem Modell entfernt bzw. deaktiviert werden. Für die im Rahmen dieses Projektes vorgenommene Anpassung auf den alleinigen Betrieb am Spotmarkt, betrifft dies entsprechend alle Zielfunktionsterme und Nebenbedingungen der Minutenreserve.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## J. Modellierung des Versorgungssystems mit renpassGIS

### Open Energy Modelling Framework

Das Marktmodell renpassGIS wurde innerhalb eines offenen Frameworks für die Energiesystemmodellierung entworfen, das im Folgenden beschrieben wird. Das Open Energy Modelling Framework (oemof) [69] adressiert das Problem mangelnder Transparenz von Energiesystemmodellen durch die Bereitstellung eines freien, quelloffenen und sauber dokumentierten Frameworks für die Energiesystemmodellierung. Dieser Ansatz erlaubt einen fundierten wissenschaftlichen Diskurs über die zu Grunde liegenden Modelle und Daten und verbessert somit die Qualität und Aussagekraft der durchgeführten Analysen. Zudem lässt ein modularer Aufbau des Frameworks die Anpassung an eine Vielzahl von Anwendungszwecken zu.

Das Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES) entwickelt das Framework gemeinsam mit dem Reiner Lemoine Institut (RLI) in Berlin und der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) Magdeburg. oemof bietet dabei in einer Art Baukastensystem eine Vielzahl von Funktionalitäten, die zur Erstellung von Energiesystemmodellen in hoher zeitlicher in räumlicher Auflösung genutzt werden können. Hierzu zählt etwa die Simulation der Windenergieeinspeisung einer Region auf Basis von Wetterdaten, die Berechnung des CO<sub>2</sub> minimalen Einsatzes von Biomassekraftwerken oder die Simulation der zukünftigen Energieversorgung in Europa.

Das Framework besteht aus verschiedenen Paketen, die über geeignete Schnittstellen miteinander kommunizieren können. Ein Paket stellt wiederum eine Sammlung aus verschiedenen Modulen dar, die eine definierte Aufgabenstellung auf verschiedene Art und Weise lösen. Eine Verknüpfung ausgewählter Funktionalitäten durch die Module der einzelnen Pakete wird in oemof als Applikation (App) bezeichnet und stellt beispielsweise ein konkretes Energiesystemmodell dar. Die folgende Abbildung 65 veranschaulicht das zugrundeliegende Konzept. So wird neben anderen Applikationen beispielsweise auch „renpassGIS“ als Applikation innerhalb des Frameworks entwickelt. Allgemein ist durch den modularen Ansatz des Frameworks eine Anwendung auf sehr unterschiedliche Anwendungszwecke möglich.

Berichtreihe.	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

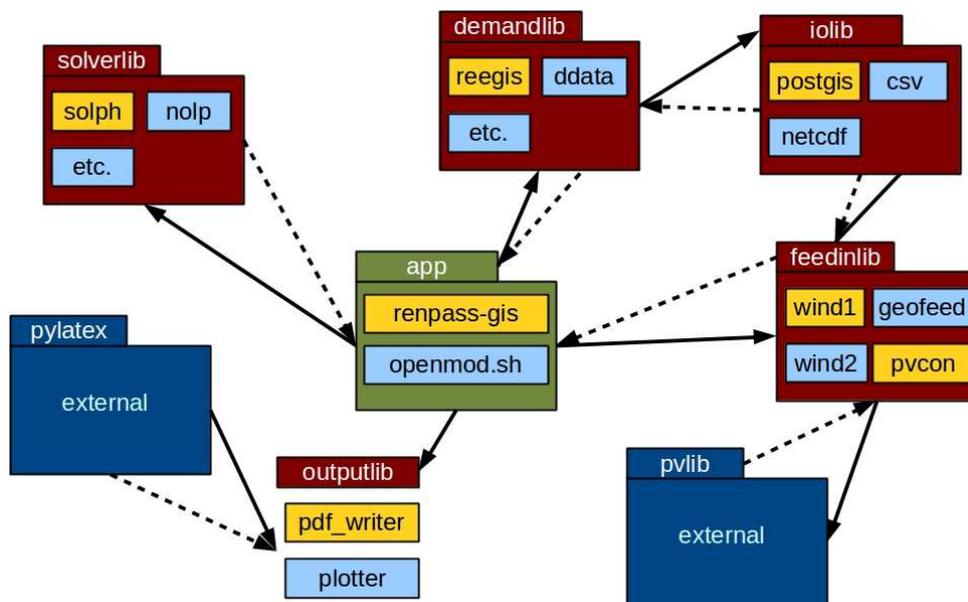


Abbildung 65: Konzept des Energiesystemmodellierungsframeworks

Die kollaborative Entwicklung und Nutzung eines Frameworks bietet verschiedene Vorteile:

- **Synergien:** Bei der gemeinsamen Entwicklung können Synergien zwischen den beteiligten Instituten genutzt werden.
- **Kontrolle:** Fehler werden aufgrund mehrerer Entwickler und Nutzer schneller identifiziert und behoben.
- **Verbesserung:** Die auf oemof basierende Applikation profitiert von Weiterentwicklungen des Frameworks.

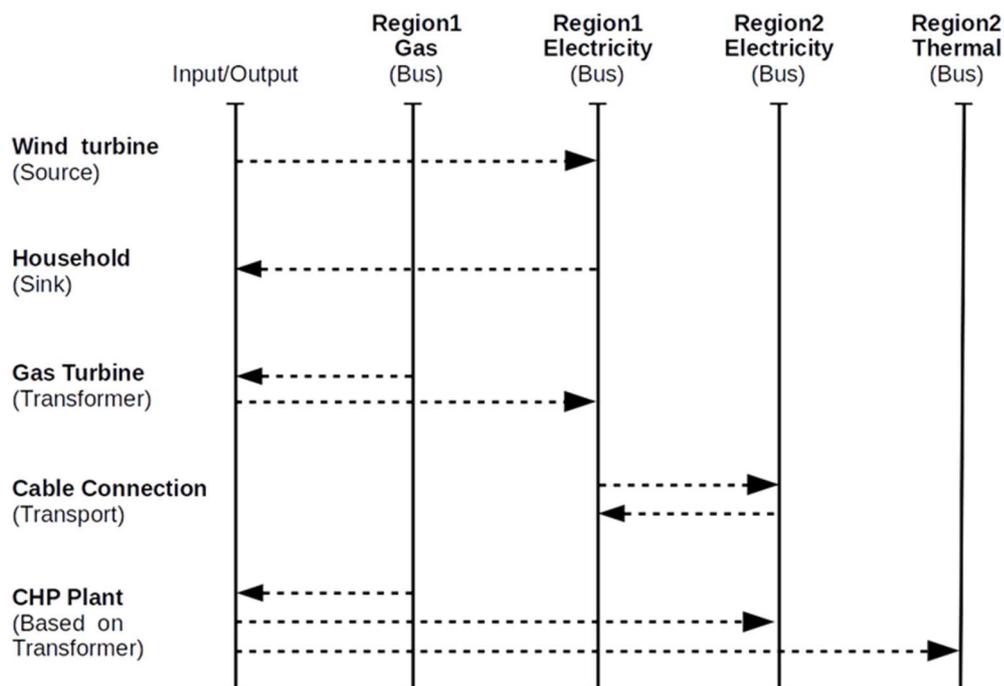
Die Modellierung von Energiesystemen mit ihrer Vielzahl an benötigten Objekten folgt innerhalb des Frameworks einer klaren, hierfür entwickelten Methodik. Dabei lassen sich beliebig komplexe Energiesysteme stets auf die gleichen Grundbausteine zurückführen. Diese bilden wiederum zusammen eine universelle Grundstruktur.

Ein Knoten (Node) stellt entweder eine Sammelschiene (Bus) oder eine Komponente (Component) dar. Ein Bus steht dabei in Verbindung mit einer oder mehreren Komponenten. Zudem ist er durch einen eindeutigen Bezeichner und Typ (z.B. Elektrizität, Gas, Wärme) charakterisiert. Komponenten können Ressourcen aus einem Bus entnehmen oder zu diesem hinzufügen. Alle Entnahmen aus einem Bus stellen dabei die Eingangsgrößen für Komponenten dar. Analog dazu stellen alle Eingangsgrößen eines Busses wiederum die Ausgangsgrößen von Komponenten dar.

Eine Komponente steht immer in Verbindung mit einem oder mehreren Bussen. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden Komponenten in verschiedene Untertypen aufgeteilt. Ein Wandler (Transformer) hat

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

einen Eingang und einen Ausgang. Eine Gasturbine entnimmt z.B. aus einer Sammelschiene des Typs Gas und speist in eine Sammelschiene des Typs Elektrizität ein. Wandler verfügen zudem über zusätzliche Informationen, die in Übertragungsfunktionen genutzt werden können. Bei einer Gasturbine kann z.B. mit Hilfe des Wirkungsgrades eine Beziehung zwischen dem Ressourcenverbrauch (Eingang) und der bereitgestellten Sekundärenergie (Ausgang) modelliert werden. Eine Senke (Sink) verfügt stets über genau einen Eingang und hat keinen Ausgang. Mit diesen Objekten können einzelne Verbraucher wie z. B. Haushalte dargestellt werden. Eine Quelle (Source) verfügen über genau einen Ausgang und haben keinen Eingang. Auf diese Weise können beispielsweise Windenergie- oder Photovoltaikanalagen modelliert werden. Objekte des Typs Transport verfügen wiederum wie Transformatoren über einen Eingang und einen Ausgang. Allerdings haben hier die dazugehörigen Sammelschienen immer denselben Typ (z.B. Elektrizität). Mit Objekten des Typs Transport können so beispielsweise Stromleitungen modelliert werden. Abbildung 66 illustriert den Aufbau eines einfachen Energiesystems auf Basis der zuvor erläuterten Grundstruktur.



**Abbildung 66 Modellierung eines einfachen Energiesystems innerhalb des Frameworks**

Komponenten und Busse lassen sich zu einem Energiesystem verbinden. Die Verbindung der Knoten erfolgt über Kanten (Edges), welche die Eingänge und Ausgänge der Knoten darstellen. Die Ein- und Ausgänge der Komponenten stellen dabei die (gerichteten) Kanten des Graphs dar. Die Busse selbst entsprechen den Knoten des Graphs. Entsprechende Ein- bzw. Ausgangsgrößen von Bussen bzw. Komponenten stellen den Fluss (Flow) einer Kante dar. Ein so erstelltes Modell lässt sich mathematisch als bipartiter Graph interpretieren, da Sammelschienen ausschließlich mit Komponenten verbunden sind

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

und umgekehrt. Neben der Möglichkeit der Verwendung von Basiskomponenten besteht die Möglichkeit auf deren Basis speziellere Komponenten zu erstellen und diese innerhalb der Modellierung zu verwenden.

Das Framework ist in Python programmiert und stellt unter Zuhilfenahme diverser Module für wissenschaftliche Anwendungen (Mathematische Optimierung, Netzwerkanalyse, Datenanalyse) im Zusammenhang mit einer PostgreSQL/PostGIS Datenbank eine Vielzahl an mächtigen Funktionalitäten bereit. Es handelt sich dabei um eine Zusammenstellung von Python-Modulen, die in Form von Paketen gruppiert werden. Durch das Ziel, das Framework möglichst zugänglich zu gestalten, ist jedes Modul ausführlich dokumentiert. Dies stellt zudem die Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Analysen sicher.

## Verwendung von Fundamentalmodellen

Zur Entscheidungsunterstützung von Energieversorgern, -verbrauchern und -händlern wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl an Modellen und Ansätzen, unter anderem zur Modellierung bzw. Prognose von Preisen an diversen Strommärkten, entwickelt. Ein detaillierter Überblick über den derzeitigen Stand der Wissenschaft im Bereich der Energiesystemmodellierung sowie zukünftige Trends und Herausforderungen wird hierbei in [70] gegeben.

Laut [71] bilden im Bereich der Modellierung der für die Einbindung von erneuerbaren Energien besonders wichtigen Spotmarktpreisen die Fundamentalmodelle eine bedeutende Kategorie. Überdies bestehen weitere Modellkategorien zur Modellierung von Strompreisen, die sich in spieltheoretische Ansätze [72] [73], technische Analyse- und Expertensysteme, ökonometrische-stochastische Modelle [74] [75] sowie künstliche-Intelligenz-Modelle [76] untergliedern lassen. Zudem existiert eine Vielzahl an hybriden Modellen, die verschiedene Modelle aus den obengenannten Kategorien miteinander kombiniert, um so zu qualitativ höherwertigen Ergebnissen zu gelangen. Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf eine umfassende Studie [71] verwiesen, die verschiedene Modelltypen kategorisiert und analysiert.

In Fundamentalmodellen werden die physischen und ökonomischen Zusammenhänge in der Stromerzeugung und im Handel mit Strom abgebildet, um daraus resultierende Marktpreise zu ermitteln. Dafür werden die wesentlichen Zusammenhänge zwischen fundamentalen Einflussgrößen wie beispielsweise Wetter- und Lastdaten innerhalb eines Modells formuliert und anschließend die Eingangsparameter des Modells unabhängig voneinander erhoben, bestimmt bzw. prognostiziert. Die Verwendung von Fundamentalmodellen basiert auf der Annahme der klassischen ökonomischen Theorie, nach welcher sich Preise in Märkten mit intensivem Wettbewerb als Ergebnis des Gleichgewichts von Angebot und Nachfrage einstellen [77]. Im Day-Ahead-Markt entspricht dieser Preis im theoretischen Idealfall eines perfekten Wettbewerbs den Grenzkosten des letzten Kraftwerks, das gebraucht wird, um die

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

entsprechende Stromnachfrage zu decken [78] [79]. Dieser Preis wird im Modell abgebildet und als entsprechender Marktpreis bzw. dessen Näherung interpretiert.

Allgemein unterscheiden sich Fundamentalmodelle hinsichtlich des gewählten Ansatzes und Prognosehorizontes bzw. -ziels [80]. Neben Ansätzen aus dem Bereich der Zeitreihenanalyse und Ökonometrie, wie beispielsweise in [81] bzw. [82] zur Preisfindung von Derivaten wurden in der Vergangenheit bereits Methoden zur Modellierung von Spotmarktpreisen in verschiedenen Marktregionen angewandt. So wurden etwa in [83] [84] sowie [85] Spotmarktpreise für den britischen bzw. skandinavischen Markt modelliert. Weiterhin wurden in [86] [87] [88] sowie [78] Optimierungsmethoden unter Berücksichtigung intertemporaler Restriktionen zur Modellierung von Spotmarktpreisen für den deutschen bzw. kalifornischen Markt verwendet.

Die Stärke von Fundamentalmodellen zur Modellierung von Strompreisen liegt in der Fähigkeit auftretende Nichtlinearitäten in der Angebotskurve des Kraftwerksparks (Merit-Order) abzubilden sowie in der Fähigkeit zeitabhängige Größen, wie etwa Brennstoff- und CO<sub>2</sub>-Preise oder die Einspeisung erneuerbarer Energien, konsistent zu berücksichtigen [80]. Zudem sind Fundamentalmodelle flexibel im Hinblick auf die Integration bzw. die Veränderung von Fundamentaltreibern wie beispielsweise verschiedener Windeinspeisezeitreihen oder einer veränderten Kostenstruktur. So können geeignete Szenariorechnungen Einblicke in zukünftige Entwicklungen des Energiesystems und -marktes gewähren.

Die Modellierung von Preiseinflüssen neben oben genannten Grenzkosten des jeweils letzten Kraftwerks gestaltet sich innerhalb von Fundamentalmodellen als schwierig. So können Einflussgrößen wie etwa (vermeidene) Startkosten für Kraftwerke, verschiedene Marktsituationen oder das Bieterverhalten im Energiehandel beispielsweise besser durch den Einsatz von Regressionsmodellen erfasst werden [80]. Dennoch existieren Möglichkeiten die oben genannten Einflussgrößen -zumindest teilweise- innerhalb von Fundamentalmodellen zu berücksichtigen [86].

Für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Technologiebewertung unter Berücksichtigung von Entwicklungspfaden des zukünftigen Energieversorgungssystems wurde nach der Evaluation verschiedener Ansätze bewusst ein Fundamentalmodell zur Modellierung möglicher zukünftiger Marktpreise gewählt. Dies ermöglicht die monolithische und modellendogene Berechnung von Preisen unter Berücksichtigung verschiedenster Fundamentalfaktoren innerhalb einer Modelllogik und eines geschlossenen Szenariorahmens. Gleichermaßen kann der Einsatz- von Kraftwerken oder die Auslastung der vorhandenen Netzinfrastruktur stets auf die verwendeten Eingangsparameter des jeweiligen Szenarios zurückgeführt werden.

Ein solcher Ansatz lässt die konsistente Bewertung verschiedener Ergebnisse im Rahmen der Modellierung zu, was im Falle ökonometrisch-stochastischer Modelle, wie sie beispielsweise in [89] oder [90]

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

zur Anwendung kommen, nicht möglich wäre. Entsprechende Ansätze wurden zwar im Rahmen des Projektes geprüft und zeigen für kurzfristige Prognosen akzeptable Ergebnisse, stellen aber bei größeren Prognosehorizonten von mehreren Jahren ein „Blackbox-Modell“ dar, da sie keine Rückschlüsse auf den Preisbildungsprozess zulassen. Zudem ist durch die Verwendung eines Fundamentalmodells die Betrachtung von Entwicklungspfaden innerhalb des gesamten europäischen Energiesystems möglich. Folglich können durch die Verwendung dieses Ansatzes auch komplexe, länderübergreifende technische und wirtschaftliche Wechselwirkungen analysiert werden.

### **Behandlung von Unsicherheiten**

Wie bereits in [86] und [80] erläutert, stellt die adäquate Abbildung des Preisbildungsprozesses in Elektrizitätsmarktmodellen die entscheidende methodische Herausforderung dar. Für die Berechnung der sich unter den Bedingungen eines funktionierenden Wettbewerbs einstellenden Marktergebnisse innerhalb eines optimierenden Fundamentalmodells müssen somit alle wesentlichen für die Preisbildung verantwortlichen technischen, strukturellen und ökonomischen Einflüsse erfasst werden. Eine sachgerechte Modellierung des Kraftwerkseinsatzes sowie Abbildung der Angebotserstellung seitens der Kraftwerksbetreiber ist daher unabdingbar.

Zudem bestehen Herausforderungen im Bereich der Parametrierung, die einerseits auf eine in Teilbereichen mangelhafte Datenverfügbarkeit und andererseits -im Falle prognostizierter Daten- auf eine Unsicherheitsbehaftung der verwendeten Größen zurückzuführen ist. Daher werden die wichtigsten Herausforderungen im Anhang zusammengefasst. Für eine ausführliche Diskussion wird an dieser Stelle zudem auf [86] und [91] verwiesen.

Die Berücksichtigung von intertemporalen Restriktionen wie Anfahrvorgängen, Mindeststillstands- und Mindestbetriebszeiten sowie der kraftwerksspezifischen Leistungsänderungsgeschwindigkeiten und Mindestleistungsbedingungen hat Auswirkungen auf die Modellierung des Preisbildungsprozesses. Zudem beeinflusst die Abbildung von Pumpspeicherkraftwerken den Prozess ebenfalls in hohem Maße. In Fundamentalmodellen auf Basis der Methode der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung können solche dynamischen Restriktionen mit Hilfe von Binärvariablen berücksichtigt werden. Diese haben allerdings erheblichen Einfluss auf den Rechenaufwand des Modells [21] und sollten somit nur bei einem entsprechenden Bedarf an Genauigkeit verwendet werden.

Der Teillastbetrieb von Kraftwerken, also eine Leistungsabsenkung der Kraftwerke unter die Nennleistung, ist in der Regel mit Wirkungsgradeinbußen verbunden. Sollen diese Wirkungsgradänderungen durch Teillastbetrieb berücksichtigt werden, kann in linearen Optimierungsmodellen der Zusammen-

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

hang von spezifischem Brennstoffverbrauch und Änderung der elektrischen Leistung zwischen Minimal- und Maximalleistung vorgenommen werden. Entsprechende Ansätze wurden beispielsweise in [92] aufgezeigt.

Die Abbildung der spezifischen Betriebsweise von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen stellt eine weitere Herausforderung im Rahmen der Modellierung dar. So unterscheiden sich etwa Gegendruckturbinen- und Entnahmekondensationsanlagen hinsichtlich ihrer Betriebsfelder und können im Rahmen der Modellierung getrennt abgebildet werden. Zudem gestaltet sich die systemische Einbindung von KWK-Anlagen zum Teil sehr unterschiedlich, was großen Einfluss auf die vorhandene Flexibilität und das Verhalten am Elektrizitätsmarkt haben kann. So macht es beispielsweise einen großen Unterschied, ob eine Anlage eng an ein Fernwärmenetz gekoppelt ist, dessen Wärmelast stets gedeckt werden muss, oder dezentral an einem Wärmespeicher betrieben wird. Durch die zum Teil sehr individuellen Fälle des Anlagenbetriebs gestaltet sich deren adäquate Berücksichtigung als schwierig.

Der Markt für Regelleistung stellt die Versorgungssicherheit bei unvorhersehbaren Lastschwankungen oder unerwarteten Ausfällen von Kraftwerken sicher. Kraftwerke, die parallel zum Spotmarkt am Markt für Regelleistung agieren, können nicht mehr ihre gesamte Leistung am Markt platzieren, da diese für eventuelle Abrufe bereitgehalten werden muss. Soll dieser Umstand im Rahmen der Modellierung berücksichtigt werden, bieten sich verschiedene Möglichkeiten. So kann wie in [86] beispielsweise die Leistungsvorhaltung modellendogen optimiert werden und auf sich im Betrieb befindliche (drehende) Kraftwerke und stehende Kraftwerke aufgeteilt werden. Eine weitere einfache Möglichkeit stellt die Berücksichtigung im Rahmen der durchschnittlichen Nichtverfügbarkeiten von Kraftwerken dar.

Die blockscharfe Abbildung des Kraftwerksparks ist, allein in Deutschland, durch den daraus resultierenden Rechenaufwand nahezu unmöglich [86]. Hier stellt die Bildung von Kraftwerksklassen in Abhängigkeit von der mathematischen Problemgröße bzw. des vertretbaren Rechenaufwandes eine Möglichkeit dar, dieser Herausforderung zu begegnen. Im Falle einer starken brennstoff- und/oder technologiebezogenen Aggregation von Kraftwerksblöcken, lassen sich laut [86] jedoch die einzelnen kostenseitigen Abstufungen in der Kraftwerkseinsatzreihenfolge, die sich auf den Preisbildungsprozess auswirken, unter Umständen nicht adäquat erfassen.

Die Abbildung kühlwasserbedingter Einflüsse auf die realisierbare Leistung einzelner Kraftwerke und den jeweiligen Wirkungsgrad stellt im Rahmen linearer Optimierungsansätze eine methodische Herausforderung dar, der nur begrenzt begegnet werden kann. So sind die thermodynamischen Zusammenhänge zwischen den technischen Betriebsbedingungen und der Kühlwassertemperatur des Flusses am Kraftwerksstandort bzw. Möglichkeiten der Entnahme standortabhängig und sehr individuell.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Eine adäquate Berücksichtigung würde eine entsprechend gute Datenlage voraussetzen und wäre äußerst arbeitsintensiv. Zudem stellt sich in diesem Fall die Frage, ob der erzielte Effekt den benötigten Aufwand rechtfertigt.

Der unternehmensindividuelle Kraftwerkseinsatz ist im Rahmen eines Fundamentalmodells nur bedingt abzubilden. So können beispielsweise durch jeweilige Lastdeckungsbedingungen von Energieversorgungsunternehmen mehrere Kraftwerke in Teillast arbeiten, während die gleiche Leistung im Modell durch ein auf Nennleistung arbeitendes Kraftwerk erbracht würde. In diesem Fall würden demnach mehrere Kraftwerke mit höheren variablen Erzeugungskosten am Markt agieren und so eine Abweichung zum tatsächlichen Kraftwerkseinsatz bzw. sich ergebenden Grenzpreis induzieren.

Die Angebotserstellung von Unternehmen kann durch deren individuelle Ausgestaltung ebenfalls nicht adäquat abgebildet und nur abstrahiert wiedergegeben werden. So ist die Einpreisung und Verteilung von Anfahrkosten durch Elektrizitätshändler auf das am Markt gehandelte Kraftwerksportfolio durch eine entsprechende Nichtverfügbarkeit von Daten nicht zu gewährleisten. Gleichmaßen sind Koppelprozesse, wie sie beispielsweise in wärmegeführten KWK-Anlagen auftreten, nur schwierig zu bewerten, da der produzierte Strom als Nebenprodukt der Wärmeerzeugung zu geringen variablen Erzeugungskosten ins Elektrizitätsnetz eingespeist wird. Wie bereits weiter oben erläutert, ist eine entsprechende Abbildung durch die teils individuelle Einbindung der Anlagen nicht angemessen abzubilden.

Andere verhaltensbezogenen Bedingungen, die ebenfalls Einfluss auf die Preisbildung an Großhandelsmärkten haben, können nicht oder nur eingeschränkt in optimierenden Fundamentalmodellen erfasst werden. Diese umfassen etwaige Risikoprämien zur Absicherung gegen Schwankungen von Brennstoffpreisen, die Erwartungsbildung von Unternehmen im Hinblick auf bestimmte Preisentwicklungen aufgrund begrenzter Marktinformationen und beschränkter Rationalität, sowie die Bewertung von Opportunitätskosten durch Möglichkeiten der Elektrizitätsvermarktung auf alternativen Märkten neben dem Spotmarkt.

Die Erfassung von Knappheitspreisen innerhalb von linearen Optimierungsmodellen ist unter anderem durch die Annahme einer preisunelastischen Nachfrage problematisch. In Marktsituationen mit sehr hoher Nachfrage und stark begrenztem physischen Angebot kann unter Umständen kein Marktgleichgewicht erreicht werden, was zur Ausbildung sogenannter Knappheitspreise führt. Bedingt durch den Preisbildungsmechanismus am Großhandelsmarkt bildet sich in diesen Situationen der Elektrizitätspreis nicht auf der Basis der Grenzkosten des letzten zur Lastdeckung eingesetzten Kraftwerks, sondern durch die Zahlungsbereitschaft der Nachfrage aus [86]. Zudem könnte sich die Nachfrage durch große

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Stromverbraucher zukünftig zunehmend an der Entwicklung des Börsenstrompreises ausrichten. Bei den Umständen kann in Fundamentalmodellen nur mit geeigneten Annahmen begegnet werden, die den realen Fall aber aufgrund der zugrundeliegenden Modellcharakteristik nicht adäquat abbilden.

In gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodellen können die dualen Variablen (Schattenpreise) der Lastdeckungsgleichung aufgrund der inhärenten Nicht-Stetigkeit der Binärvariablen nicht mehr als Grenzkosten des Energiesystems interpretiert werden. Dieser Umstand wurde in bestehenden Analysen oftmals vernachlässigt, ist jedoch für eine saubere Interpretation der berechneten Preise unabdingbar. Für eine ausführliche Diskussion zur Interpretation von Preisen innerhalb von Optimierungsproblemen auf Basis mathematischer Analysen sei an dieser Stelle auf [93] und [94] verwiesen.

Neben den aufgezeigten Herausforderungen im Bereich der Modellierung bestehen im Bereich der Modellparametrierung Schwierigkeiten hinsichtlich der Berücksichtigung aller für die Preisbildung am Elektrizitätsmarkt notwendigen Informationen. Ursächlich hierfür sind öffentliche Informationsdefizite aufgrund bestehender Betriebsgeheimnisse, die Nicht-Veröffentlichung spezifischer systemtechnischer Betriebszustände, die jeweilige Veröffentlichungspraxis der verwendbaren Informationsquellen und im Rahmen der Modellierung zukünftiger Preise vor allem die Nichtverfügbarkeit von zukünftigen Marktinformationen. Entsprechenden Unsicherheiten in Bezug auf die zugänglichen Informationen kann beispielsweise mit Sensitivitätsanalysen oder anderen geeigneten Verfahren begegnet werden.

Brennstoffpreise, Brennstofftransportkosten und sonstige variable Betriebskosten können je nach Anwendungszweck des Modells aus entsprechenden Statistiken oder Hochrechnungen bzw. Prognosen entnommen werden. Während für historische Rechnungen auf eine gute Datenbasis zurückgegriffen werden kann, werden Preise für zukünftige Szenarien üblicherweise durch die Sichtung und den Vergleich entsprechender Studien ermittelt. Dabei ergibt sich das oben genannte Problem der Unsicherheitsbehaftung durch die jeweils getroffenen Annahmen zur Entwicklung der zukünftigen Märkte, da diese wiederum stark abhängig von politischen Entscheidungsprozessen sind. Die Frage, ob beispielsweise im Jahr 2025 fossile Energieträger aufgrund verstärkter Klimaschutzanstrengungen zukünftig mit hohen Steuern belegt werden, ist derzeit nicht zu beantworten. Weiterhin ist eine adäquate Quantifizierung der standortabhängigen Brennstofftransportkosten, wie sie beispielsweise für Steinkohlen, Erdgas und Heizöl anfallen, aufgrund der oben genannten Informationsdefizite nicht möglich. Entsprechende Annahmen müssen daher entweder selbst getroffen oder aus bestehender Literatur ermittelt werden. Gleichmaßen verhält es sich mit sonstigen variablen Betriebskosten, die beispielsweise für Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Personal für den Betrieb der jeweiligen Kraftwerksblöcke anfallen.

Die Wirkungsgrade für Kraftwerke hängen von der jeweiligen Auslegung, dem Jahr der Inbetriebnahme bzw. des Retrofits und dem Turbinentyp ab. Zudem variieren diese innerhalb des dynamischen Betriebs und sind abhängig von individuellen externen Größen wie etwa Kühlwasserbedingungen oder

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Außentemperaturen. Eine umfassende Datenbank für den deutschen Kraftwerkspark mit Kraftwerken oberhalb einer elektrischen Netto-Nennleistung von 10 MW wird von der Bundesnetzagentur [95] bereitgestellt, enthält aber keine Wirkungsgrade. Weiterhin veröffentlicht das Umweltbundesamt -ebenfalls ohne Wirkungsgrade - eine Liste der deutschen Kraftwerke, die neben der elektrischen Nennleistung auch die thermische Leistung enthält [96]. Durch die teilweise lückenhafte und teilweise redundante Struktur beider Listen, gab es in jüngster Vergangenheit verschiedene Initiativen mit dem Ziel beide Listen miteinander zu verbinden und zudem durch Anwendung geeigneter Methoden den Wirkungsgrad einzelner Kraftwerke zu bestimmen [97]. Zum derzeitigen Zeitpunkt wurden die entsprechenden Ergebnisse jedoch noch nicht veröffentlicht.

Bei den Verfügbarkeiten von Kraftwerken wird zwischen geplanten und ungeplanten Verfügbarkeiten unterschieden. Während ungeplante Verfügbarkeiten, die beispielsweise durch unerwartete Kraftwerksausfälle oder andere technische Defekte auftreten können, grundsätzlich nicht prognostizierbar sind, werden geplante Nichtverfügbarkeiten von Kraftwerken, die beispielsweise bei planmäßigen Wartungen auftreten, seit einigen Jahren auf der Transparenzplattform der EEX zur Verfügung gestellt. Zudem existieren verschiedene überschlägige Literaturannahmen und Analysen auf Basis empirischer Daten [98]. Das Auftreten von ungeplanten Nichtverfügbarkeiten kann jedoch im Rahmen der Modellierung zukünftiger Preise nicht hinreichend berücksichtigt werden. Kraftwerksin- und Außerbetriebnahmen können hingegen den oben genannten Kraftwerkslisten entnommen werden.

Historische und aktuelle installierte Kraftwerkskapazitäten werden in verschiedenen Statistiken in verschiedener Auflösung bzw. Aggregationsform veröffentlicht. Allerdings unterscheiden sich die Quellen grundsätzlich bezüglich der Güte und Aktualität und weichen in Teilen voneinander ab. So unterscheiden sich beispielsweise selbst die öffentlich zugänglichen Datensätze des Verbunds der deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) zu installierten Kraftwerkskapazitäten für die Vergangenheit untereinander. Selbst eine entsprechende Aufbereitung bzw. Anpassung der Datensätze in entsprechenden Initiativen [97] konnte dieses Problem nicht vollständig lösen. Ein konsistenter und umfassend auf Validität geprüfter Datensatz für die historischen und geplanten installierten Kapazitäten innerhalb des europäischen Verbundsystems ist somit derzeit nicht verfügbar. Als länderübergreifender, konsistenter Datensatz existiert lediglich der Szenariorahmen des Ten-Year Network Development Plans der ENTSO-E, der in Szenariorechnungen verschiedene Möglichkeiten der Integration von bis zu 60 % erneuerbaren Energien in das europäische Verbundsystem, unter Berücksichtigung der Kosteneffizienz und Versorgungssicherheit, aufzeigt [97]. Dieser ist jedoch nur als Vorschlag seitens des Verbunds der Übertragungsnetzbetreiber zu sehen und mit eigenen Annahmen behaftet. Aufgrund des mangelnden Angebotes an konsistenten und zugänglichen Datensätzen existieren im Bereich der Modellierung von Energieversorgungssystemen auch vermehrt Bestrebungen eine gemeinsame, transparente Datenbasis zu schaffen [99].

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Die Modellierung der Einspeisung regenerativer Energien stellt eine Herausforderung auf verschiedenen Ebenen dar. Da die Handelsentscheidung an der EEX auf Grundlage von Wind- bzw. Solarenergieprognosen getroffen wird, können diese Daten für die gemeinsame Marktregion Deutschland-Österreich-Luxemburg für historische Rechnungen von der EEX-Transparenzplattform bezogen werden. Die Verwendung entsprechend konsistenter Daten für die weiteren Länder des europäischen Verbundsystems gestaltet sich hingegen als problematisch, da hier ebenfalls auf Prognosedaten zurückgegriffen werden müsste. Weitaus schwieriger gestaltet sich die Modellierung der Einspeisung von Wind- und Solarenergie in zukünftigen Szenarien, da neben der dargebotsabhängigen volatilen Verfügbarkeit kinetischer bzw. thermischer Energie, gleichermaßen der Ausbau des erneuerbaren Kraftwerksparks berücksichtigt werden muss. In jüngster Zeit wurden hier, zumindest auf nationaler Ebene, entsprechende frei verfügbare Datensätze veröffentlicht und wissenschaftlich diskutiert [41] [42]. Die historische Einspeisung der Lauf- und Speicherwasserkraftwerke wird von verschiedenen Dienstleistern, meist berechnet auf der Basis hydrologischer Zustände, angeboten [86]. Die Problematik gestaltet sich durch den volatilen Charakter des Wetters jedoch ähnlich wie bei den zuvor erläuterten Wind- und Solardaten. Zudem erhöht die nutzbare Flexibilität von Speicherkraftwerken im Hinblick auf gegebene Preissignale die Komplexität einer adäquaten Modellierung. Dennoch gibt es -zumindest für Modelle auf Basis historischer Daten- vermehrt Anstrengungen diese Komplexität im Rahmen der Modellierung zu berücksichtigen.

Die möglichst konsistente Gegenüberstellung von Elektrizitätserzeugung und -nachfrage erfordert eine adäquate Abbildung der Last. Öffentlich zugängliche Lastdaten unterscheiden sich durch ihre zeitliche und örtliche Auflösung. Allgemein kann zwischen unterschiedlichen Lasttypen wie der Regelzonenlast, der vertikalen Netzlast oder dem Verbrauch unterschieden werden. Daten zur Elektrizitätsnachfrage im synchronisierten ENTSO-E (vormals UCTE) Netz werden seit 2006 in stündlicher Auflösung veröffentlicht. Die Last des ENTSO-E-Datensatzes wird in Form der aggregierten Regelzonenlast durch die vier ÜNB durch den Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft übertragen [100] und wird somit durch die Lastgüte der Regelzonenlast der ÜNB definiert. Die Regelzonenlast ist wiederum definiert als „[...] Leistung aller an das Versorgungsnetz (Übertragungsnetz und Verteilnetz) angeschlossenen Kunden als auch die in den Versorgungsnetzen entstehenden Verluste. Nicht enthalten sind der elektrische Eigenbedarf konventioneller Kraftwerke sowie die Pumpleistung der Pumpspeicherkraftwerke. [...]“ [101] und wird durch die Übertragungsnetzbetreiber rechnerisch mithilfe einer Leistungsbilanz ermittelt. Dabei ist die Vorgehensweise bei der Berechnung durch die ÜNB individuell [102]. Die vertikale Netzlast ist hingegen als „[...] vorzeichenrichtige Summe aller Übergaben aus dem Übertragungsnetz über direkt angeschlossene Transformatoren und Leitungen zu Verteilungsnetzen und Endverbrauchern“ [101] definiert und wird messtechnisch ermittelt. Demnach sind bei hoher Stromeinspeisung innerhalb von Verteilnetzen auch negative Lasten möglich, so dass die vertikale Netzlast dadurch stark beeinflusst wird. Daher ist die alleinige Modellierung zukünftiger Lastentwicklungen auf Basis der

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

vertikalen Netzlast, ohne Berücksichtigung der Verteilnetze, derzeit nicht zielführend [100]. Eine exakte Bestimmung des tatsächlichen Endverbrauchs an Elektrizität für die Verwendung im Rahmen der Modellierung ist folglich nicht möglich, so dass diese Größe immer mit Unsicherheiten behaftet ist. Für weiterführende Analysen hinsichtlich der Güte von Lastdaten bzw. verschiedenen Ansätzen zur Erstellung geeigneter Lastdaten sei an dieser Stelle auf [103] bzw. [102] verwiesen.

Die Modellierung von Außenhandelsalden beeinflusst die Marktpreisbildung maßgeblich, da etwaige Energieflüsse aus bzw. in Nachbarregionen in der Regel abweichende Grenzkosten aufweisen. Für die Modellierung von Marktpreisen sind nicht die tatsächlichen (physikalischen) Energiemengen, die über die Bilanzgrenzen ausgetauscht werden, relevant, sondern die finalen Fahrpläne für den Außenhandel [86]. Die Übertragungsnetzbetreiber der ENTSO-E sind zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit angehalten ihre Grenzübertragungskapazitäten zu anderen Netzregionen zu ermitteln und zu veröffentlichen. Dabei sind die Net Transfer Capacities (NTCs) definiert als die maximale gemeldete Austauschleistung zwischen zwei Netzregionen unter Berücksichtigung des gemeinsamen Netzwerk-Codes und etwaiger zukünftiger Unsicherheiten [104]. Die NTCs der europäischen Länder wurden von der ENTSO-E für das Jahr 2010 in Form einer NTC-Matrix veröffentlicht, die unter anderem in [105] verwendet und diskutiert wurde. Eine aktualisierte Version liegt derzeit noch nicht vor, so dass aktuelle Austauschkapazitäten, durch den veralteten Datensatz, im Rahmen der Modellierung nicht hinreichend abgebildet werden können. Für zukünftige Austauschkapazitäten existieren lediglich Werte aus der Szenariodefinition von ENTSO-E-Rechnungen für das Jahr 2030. Auf diese kann im Rahmen der Modellierung zurückgegriffen werden.

Die Vorhaltung von Reserveleistung innerhalb der deutschen Marktregion wird seitens der Übertragungsnetzbetreiber auf einer gemeinsamen Internetplattform veröffentlicht [38]. Aus dieser Leistung, die sich wiederum in Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung aufteilt, kann jedoch nicht ohne geeignete Annahmen auf deren Verteilung auf einzelne Kraftwerksblöcke oder Energieträger geschlossen werden. Das Treffen geeigneter Annahmen über die zukünftige Vorhaltung von Regelleistung, gestaltet sich als weitaus schwieriger. Während derzeit noch ein Großteil der Regelleistung durch thermische Kraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke erbracht wird, könnte sich der Markt durch ebenfalls geeignete Technologien wie beispielsweise Windkraftanlagen oder intelligente Verbraucher grundlegend ändern. Zudem müsste der zunehmende Ausbau des europäischen Verbundnetzes berücksichtigt werden, da etwaige Ausgleichseffekte durch die geographische Verteilung (erneuerbarer) Kraftwerke ebenfalls Einfluss auf die Dimensionierung der Reserveleistung haben könnte. Eine exakte Abbildung des Regelleistungsmarktes ist daher im Rahmen der Modellierung nicht möglich.

Mit der Einführung des europäischen Handelsrahmens für Emissionsrechte (EU ETS) und deren Handel an der Leipziger Strombörse wurde ein Marktpreis für eine Tonne Kohlenstoffdioxid geschaffen. Da die thermische Umwandlung fossiler Primärenergieträger innerhalb von Kraftwerksprozessen stets mit

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

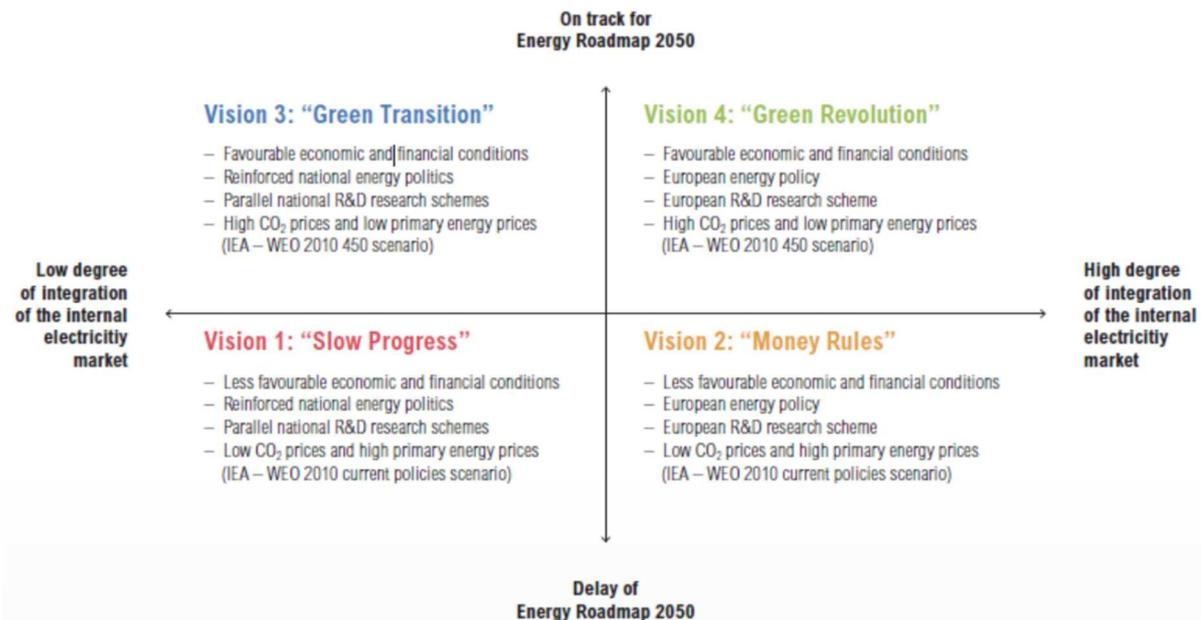
Emissionen einhergeht, müssen für den Betrieb der Kraftwerke entsprechende Emissionszertifikate vorgehalten werden. Während für historische Rechnungen auf die Handelspreise für European Emission Allowances (EUA) der EEX zurückgegriffen werden kann, können für zukünftige Entwicklungen der Zertifikatspreise nur geeignete Annahmen getroffen bzw. Prognosen verwendet werden. Letztere sind jedoch stets mit großen Unsicherheiten behaftet, da sie, vor allem durch politische Prozesse, multifaktoriell beeinflusst werden. So konnte beispielsweise der Preisverfall für Zertifikate von fast 30€/tCO<sub>2</sub> im Jahr 2008 auf weniger als 5€/tCO<sub>2</sub> im Jahr 2013 und die damit verbundene „Renaissance“ emissionsintensiver thermischer Kraftwerke selbst ex-post nicht hinreichend erklärt werden [106]. Demnach können zukünftige Zertifikatspreise im Rahmen der Modellierung nicht hinreichend genau abgebildet werden.

### ***Auswahl und Einordnung des Szenariorahmens***

Zusätzlich zu den Herausforderungen im Bereich der Modellierung und Parametrierung im Hinblick auf die Marktpreismodellierung besteht für die Abbildung des zukünftigen, länderübergreifenden Kraftwerkseinsatzes die Herausforderung der Verwendung eines konsistenten Szenariorahmens. Für die Fortschreibung bzw. zukünftige Entwicklung des Kraftwerksparks einzelner Länder müssten dafür umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt werden, um die - ihrerseits wiederum teilweise politisch unbeständigen- nationalen Ausbaupläne zu erfassen und abzubilden. Zudem bestehen starke Wechselwirkungen zwischen der strukturellen Entwicklung der installierten Kapazitäten einzelner Länder und den Austauschkapazitäten zwischen den einzelnen nationalen Energiesystemen. Demnach kann die Entwicklung möglicher nationaler Ausbauszenarien nur unter Einbezug der Entwicklung der zukünftigen Netzinfrastruktur erfolgen. Im Folgenden wird daher zunächst die Auswahl eines geeigneten Szenariorahmens begründet. Anschließend werden die wesentlichen Annahmen beschrieben und diskutiert.

Die integrierte, techno-ökonomische Bewertung einzelner Technologien in zukünftigen Energieversorgungssystemen setzt die Bildung geeigneter, realistischer Annahmen für deren Entwicklung voraus. Während Fragestellungen, wie beispielsweise die kostenoptimale Integration von Speichertechnologien für 100 % erneuerbaren Energiesysteme im Jahr 2050, „auf der grünen Wiese“ untersucht werden können, stellt sich innerhalb dieses Projektes vielmehr die Frage, welche möglichen konsistenten Entwicklungen einzelne europäische Energieversorgungssysteme in naher und ferner Zukunft nehmen und welchen Einfluss dies auf die Marktpreisbildung in Deutschland hat. Daher wurden im Rahmen der Szenarienbildung weitestgehend der länderübergreifende 10-Jahres-Netzentwicklungsplan des ENTSO-E aus dem Jahr 2014 sowie die daraus abgeleiteten Szenarien der einheitlichen Versorgungssicherheitsprognose (Scenario Outlook (SO) & Adequacy Forecast (AF)) verwendet [31].

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 67: Politische und ökonomische Entwicklungspfade innerhalb der ENTSO-E Szenarien (ENTSO-E, 2014)**

Der 10-Jahres-Netzentwicklungsplan (Ten-year network development plan, TYNDP) des ENTSO-E zeigt in zweijährigen Abständen, unter Berücksichtigung geplanter Investitionsvorhaben im Energiesektor, auf, welcher Weg zur Integration von bis zu 60 % erneuerbaren Energien im Jahr 2030 zu akzeptablen Kosten unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit seitens der europäischen Übertragungsnetzbetreiber vorgeschlagen wird [31]. Ein Plan besteht jeweils aus mehreren Dokumenten und wird über zwei Jahre in Abstimmung mit verschiedenen Institutionen und den relevanten Akteuren entwickelt. Zudem kann die Öffentlichkeit vor der Finalisierung der jeweiligen Version, innerhalb eines definierten Zeitfensters ca. zwei Monaten, ihre Vorschläge in den Plan mit einbringen. Der gesamte Datensatz besteht aus dem Gesamtbericht einschließlich der Kommentare des Review-Prozesses, einzelnen regionalen Investmentplänen, Szenarien der Versorgungssicherheitsprognose (SO & AF) für das Jahr 2014 und 2025 sowie aufgezeigten möglichen Entwicklungspfaden (Visionen) des europäischen Energiesystems bis in das Jahr 2030. Das Jahr 2030 stellt hierbei ein Brückenjahr zwischen den vereinbarten EU-Zielen im Energiebereich für die Jahre 2020 und 2050 dar, das in Abhängigkeit politischer, ökonomischer und technischer Entwicklungen verschiedene Ausprägungen annehmen kann. Abbildung 67 stellt politische und ökonomische Entwicklungspfade innerhalb der ENTSO-E Szenarien dar.

Es wird deutlich, dass im dritten Szenario von guten Investitionsbedingungen im Energiesektor und verstärkten nationalen Anstrengungen zur Dekarbonisierung ausgegangen wird, um die EU-Ziele für das Jahr 2050 planmäßig zu erreichen. Auf technischer Seite wird eine steigende Elektrizitätsnachfrage, eine Vernetzung des Strom- und Verkehrssektors durch E-Mobilität, eine moderate Ausprägung von

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Demand-Side-Management und Smart-Grids sowie keine Durchsetzung der CCS-Technologie (CO<sub>2</sub>-Abscheidung- und Speicherung) angenommen.

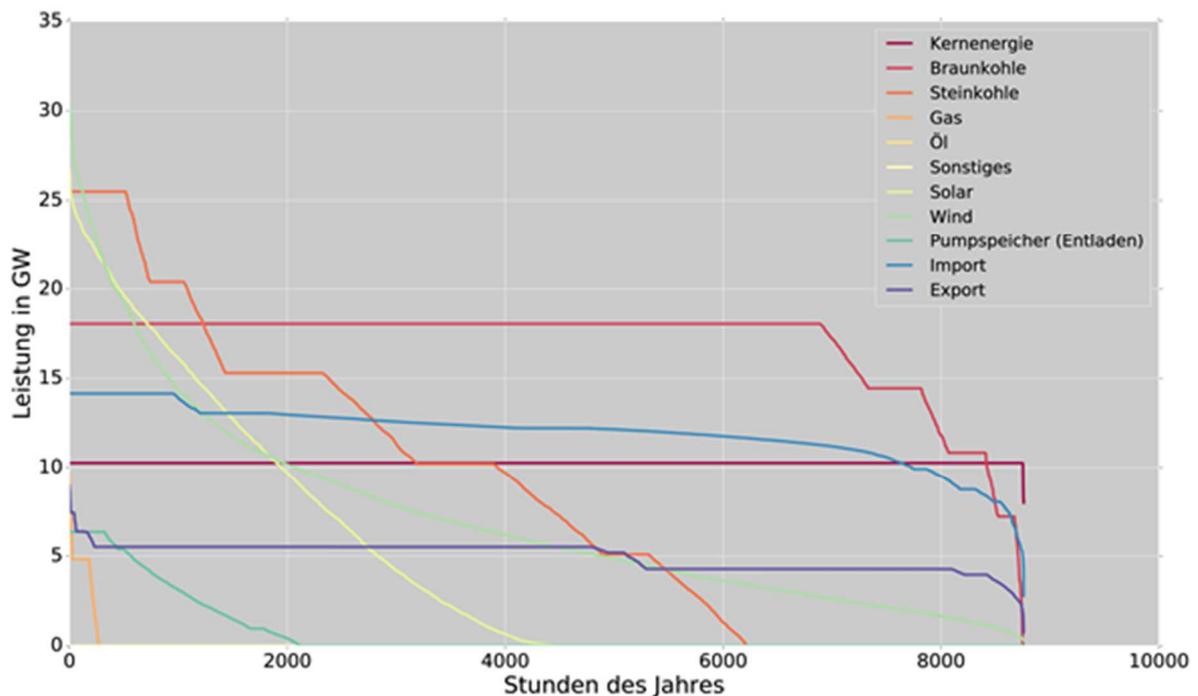
Die Verwendung der TYNDP-Szenarien geht mit Vor- und Nachteilen einher. Die Vorteile liegen in einer transparenten, länderübergreifenden, dokumentierten Modellparametrierung unter Einbezug ausführlicher Analysen hinsichtlich der politischen, ökonomischen und technischen Entwicklungen in naher (2025) und ferner (2035) Zukunft. Zudem werden die derzeitigen EU-Ziele für die Konversion des Energiesektors im Rahmen der Modellierung berücksichtigt. Weiterhin kann durch das Vorliegen von historischen Daten für das Jahr 2014 eine Modellvalidierung gegen historische Spotmarktpreise und Einsatzzeiten erfolgen. Als Nachteil kann die Behaftung der Szenarien durch getroffene Annahmen genannt werden. Diese stellen jedoch ein grundsätzliches Problem bei der Szenariodefinition dar. Zudem orientiert sich die Technologieentwicklung innerhalb der Szenarien an derzeitigen Strukturen. So wird ein Großteil der Kraftwerksleistung innerhalb der Energieszenarien auch zukünftig noch von fossilen Kraftwerken gestellt und Flexibilität durch Speicherwasser- und Pumpspeicherkraftwerke erbracht. Andere Speichertechnologien wie etwa Druckluftspeicherkraftwerke, Redox-Flow-Batterien oder dezentrale, intelligent verwaltete Batteriespeichertechnologien werden hingegen nicht berücksichtigt.

#### ***Abgleich von Modell- und Realdaten***

Eine nähere Analyse des Kraftwerkseinsatzes hinsichtlich der realisierten Leistungsbereiche einzelner Technologien wurde auf Basis von hierfür erstellten geordneten Jahresdauerlinien durchgeführt. Diese geben die absteigend geordnete realisierte Leistung einzelner Technologien wieder und erlauben somit eine Aussage über die Dauer der Auslastung einer bestimmten Technologie in einem bestimmten Leistungsbereich. Abbildung 68: Geordnete Jahresdauerlinien einzelner Technologien in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU für das Modelljahr 2014 zeigt die geordneten Jahresdauerlinien für das Modelljahr 2014.

Es zeigt sich, dass die in Bezug auf die Grenzkosten günstigen Technologien einer dauerhaft hohen Auslastung unterliegen. So zeigt sich etwa bei der Kernenergie, dass stets ein Grundlastanteil von ca. 8 GW mobilisiert wird und die Leistung zu keinem Zeitpunkt des Jahres unter diesen Wert fällt. Zudem ist die realisierte Leistung nahezu konstant, d. h. die entsprechenden Kraftwerke fahren bis auf wenige Stunden des Jahres permanent auf Nennleistung. Analog wird die verfügbare Leistung der Braunkohlekraftwerke in über ca. 7.000 Stunden des Jahres, bis auf wenige Stunden in Teillast zu Zeiten geringer Stromnachfrage bzw. hoher erneuerbarer Einspeisung, abgerufen.

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



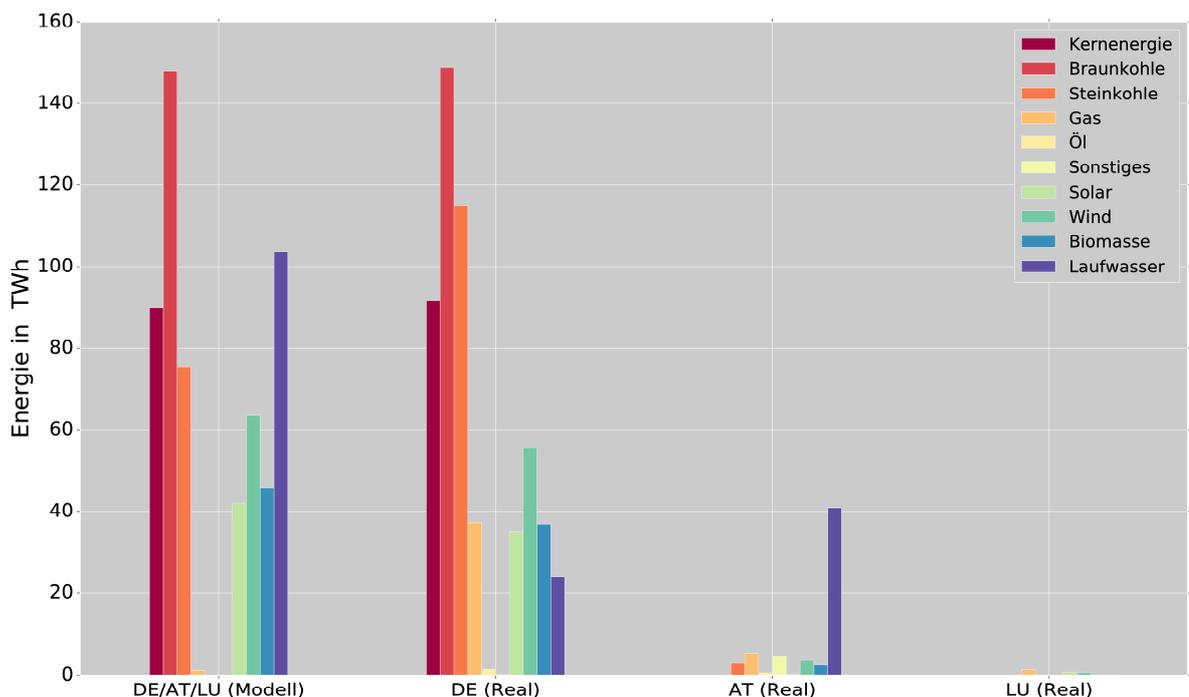
**Abbildung 68: Geordnete Jahresdauerlinien einzelner Technologien in der gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU für das Modelljahr 2014**

Bei näherer Betrachtung von Steinkohle- und Gaskraftwerken ergibt sich hingegen ein anderes Bild. So weist die durch Steinkohle realisierte Leistung ein deutliches Treppenprofil auf, das die unterschiedliche Mobilisierung der zuvor beschriebenen Leistungsblöcke pro Energieträger wiedergibt. Die deutliche Ausprägung dieser Stufung legt die Vermutung nahe, dass die Steinkohle im Modell häufig den Marktpreis setzt. Im Vergleich mit den selten eingesetzten Leistungsblöcken entsprechender Gaskraftwerke wird deutlich, dass die Steinkohle im Modell die Rolle von Gaskraftwerken als Spitzenlasttechnologie übernimmt. Diese Aussage deckt sich mit der, trotz sinkender Ressourcenpreise, abnehmenden Auslastung von Gaskraftwerken in den vergangenen Jahren, welche vor allem auf die zunehmende Durchdringung des Marktes durch erneuerbare Energien zurückzuführen ist. Überdies zeigt sich, dass Kraftwerke mit höheren Grenzkosten als Gaskraftwerke im Rahmen der Modellierung nicht zum Einsatz kommen. Dieser Umstand ist auf die vereinfachte, lediglich grenzkostenbasierte Modellierung zurückzuführen. So werden beispielsweise Must-Run-Restriktionen für wärmegeführte KWK-Anlagen oder realisierbare Gradienten einzelner Kraftwerke nicht näher beachtet. Dies stellt somit eine Ungenauigkeit im Rahmen der Modellierung dar, die zwar im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse mitbetrachtet wird, aber dennoch bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

Weiterhin zeigt sich bei näherer Betrachtung der erneuerbaren Energien, dass die Auslastung, beispielsweise für die realisierte Windkraft- oder Photovoltaikleistung, erwartungsgemäß in kleinen Abstufungen ausprägt. Zudem wird deutlich, dass Pumpspeicherkraftwerke einen höheren Beitrag zur Deckung der Netzlast als Gaskraftwerke leisten. Überdies ist zu erkennen, dass die aggregierten Import- und Exportkapazitäten einer hohen Auslastung unterliegen und in Summe mehr Strom importiert als exportiert wird. Dieser Umstand wird in weiteren Analysen näher betrachtet.

Abschließend wurde zur Einordnung der produzierten Ergebnisse die jährliche Energieproduktion einzelner Technologien mit statistischen Daten des ENTSO-E verglichen. Hierbei sei auf Probleme hinsichtlich verfügbarer und vor allem vergleichbarer Daten verwiesen, da oftmals selbst Datensätze aus der gleichen Datenquelle durch die Art der statistischen Erhebung deutliche Unterschiede aufweisen. So hat beispielsweise ein Vergleich von Daten zur Stromerzeugung durch verschiedene Energieträger in Deutschland des Verbundes der europäischen Übertragungsnetzbetreiber mit veröffentlichten Daten des deutschen Ministeriums für Wirtschaft und Energie [107] erhebliche Abweichungen aufgezeigt. Demnach ist die Vergleichbarkeit von Modell- und Realdaten nur begrenzt aussagekräftig. Dennoch ist ein Vergleich im Rahmen einer ausführlichen Modellvalidierung unabdingbar. Abbildung 69 zeigt die durch das Modell berechnete und die tatsächliche Stromerzeugung für das Jahr 2014. Dabei werden der modellierten gemeinsamen Marktregion DE/AT/LU die einzelnen Länder gegenübergestellt und somit zusätzlich ein Überblick über die jeweiligen Verhältnisse der einzelnen Länder geschaffen.



**Abbildung 69: Modellierte Stromerzeugung für die gemeinsame Marktregion DE/AT/LU und reale Stromerzeugung der einzelnen Länder im Jahr 2014 (ENTSO-E, 2016)**

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

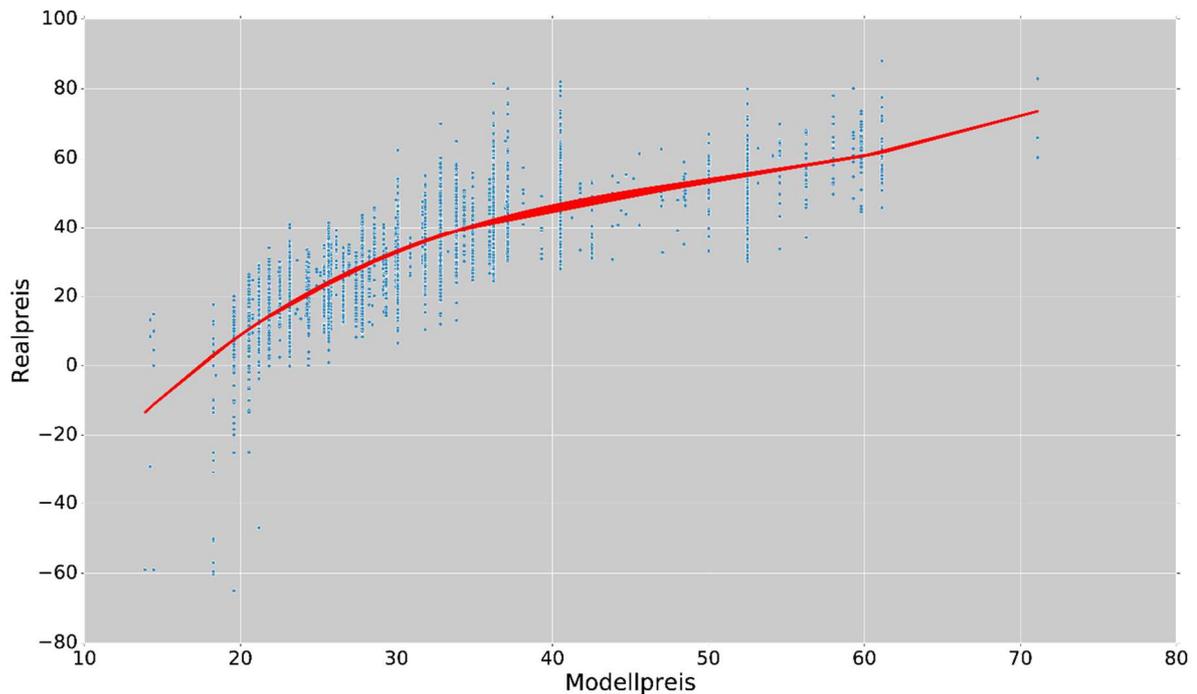
Es wird deutlich, dass der Einsatz der thermischen Kraftwerke größtenteils realitätsnah abgebildet wird. So wird beispielsweise die Stromerzeugung durch Kernenergie, Braunkohle, Biomasse, Wind und Solarenergie relativ genau getroffen. Die Erzeugung aus Lauf- und Speicherwasserkraftwerken wird hingegen im Modell überschätzt. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgehen, deren einzelner Einfluss jedoch nicht genau quantifiziert werden kann. Zum einen ergibt ein Vergleich der tatsächlichen historischen Produktionswerte von 2012 bis 2014 untereinander, allein für Deutschland, eine Abweichung von bis zu 17 % [107]. Zum anderen wird die Leistung aus Lauf- und Speicherwasserkraftwerken als konstant angenommen und somit nicht der individuelle, jährlich schwankende Abfluss einzelner Flüsse berücksichtigt. Überdies stellt die durch entsprechende Literaturwerte [98] ebenfalls als konstant angenommene Verfügbarkeit eine starke Vereinfachung dar. Da entsprechende Literaturwerte ihrerseits durch entsprechende Studien bzw. Erhebungen ermittelt wurden, wird an dieser Stelle jedoch an den Annahmen festgehalten, anstatt die für 2014 passende durchschnittliche Kraftwerksverfügbarkeit, beispielsweise auf Basis der veröffentlichten realen Stromproduktion, zu ermitteln.

Zudem zeigt sich die bereits erläuterte Ungenauigkeit im Einsatz von Gaskraftwerken und Kraftwerken höherer Grenzkosten. So kommen Gaskraftwerke und teurere fossile Kraftwerke im Rahmen der Modellierung nur begrenzt bzw. überhaupt nicht zum Einsatz. Dieser Umstand wird zudem von der Überschätzung der Produktion aus Lauf- und Speicherkraftwerken im Modell unterstützt. Die Modellierung eines überschätzten Leistungsbandes aus Wasserkraft induziert eine Senkung der zu deckenden Residuallast und folglich eine „Verflachung“ der Merit-Order in der jeweiligen Stunde. Demnach kommt möglicherweise ein ölbefeuertes Spitzenlastkraftwerk nicht mehr zum Einsatz, da die Nachfrage bereits durch Wasserkraftwerke gedeckt wurde.

Insgesamt konnte somit die Abbildung der wesentlichen technischen und ökonomischen Zusammenhänge und des daraus resultierenden Kraftwerkseinsatzes trotz einiger, teilweise unvermeidbarer Ungenauigkeiten im Bereich der Modellierung und Datenerhebung, nachgewiesen werden.

Zur Validierung der Preisbildung wurde im ersten Schritt die Korrelation der Modell- und Realpreise überprüft, die einen Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) von 0.768 aufweist. Abbildung 70 zeigt die Streuung der Realpreise über den modellierten Preisen und ein Regressionspolynom dritter Ordnung.

<u>Berichtreihe.</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			



**Abbildung 70: Streudiagramm der Real- und Modellpreise für das Jahr 2014 mit Regressionspolynom dritter Ordnung**

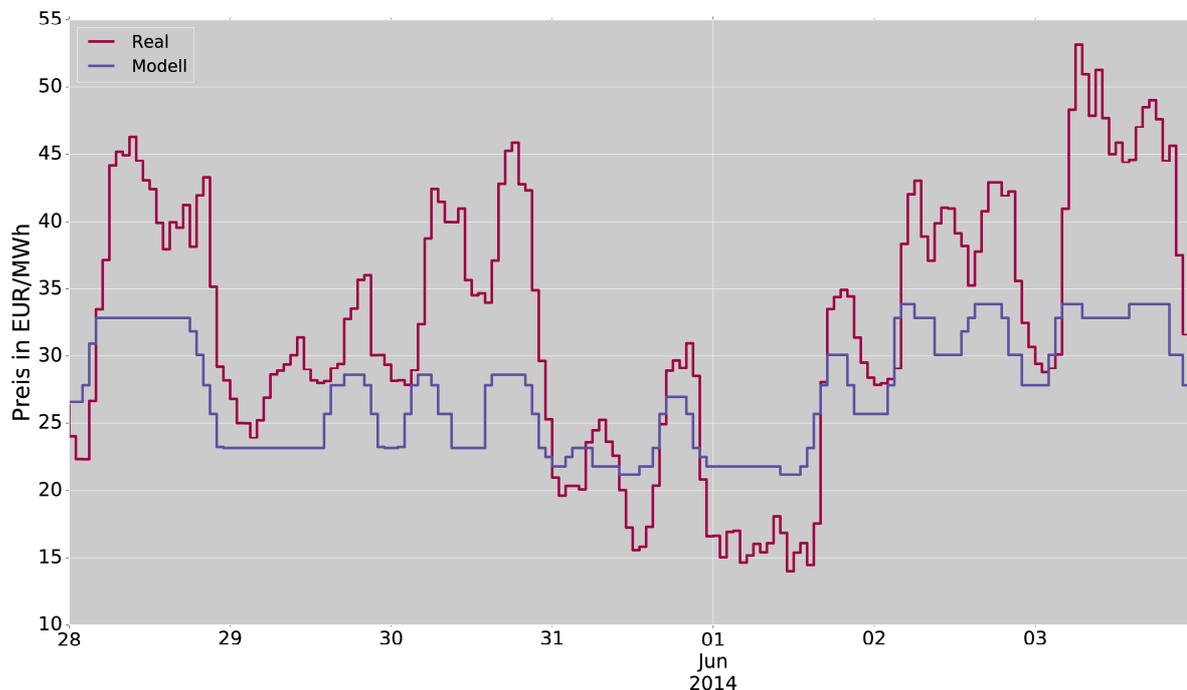
Es ist zu erkennen, dass sich innerhalb des Fundamentalmodells keine negativen Preise, welche in der Realität beispielsweise in den Mittagsstunden in Zeiten hoher solarer Einstrahlung auftreten, ausbilden. Für die Deckung einer negativen Residuallast, die immer dann auftritt, wenn die Einspeisung erneuerbarer Energien die Stromnachfrage übersteigt, wird im Rahmen der Modellierung eine Variable definiert, welche die überschüssige Energie zu einem Preis von Null aufnimmt, sofern diese nicht in entsprechende Austauschkapazitäten in Nachbarregionen übertragen werden kann. Grundsätzlich bestünde hier die Möglichkeit einer negativen Einpreisung, um negative Strompreise abzubilden. Die Höhe der Einpreisung wäre jedoch mit entsprechenden Annahmen behaftet, da, wie bereits im Abschnitt „Herausforderungen“ beschrieben, in Abhängigkeit der jeweiligen Marktsituation zeitweise unterschiedlich hohe negative Deckungsbeiträge verschiedener Kraftwerke akzeptiert werden. Entsprechende Annahmen für zukünftige Marktsituationen zu treffen bedarf zudem tieferer Analysen. Zudem bilden sich, wie der Abbildung entnommen werden kann, negative Strompreise, zumindest im Jahr 2014, relativ selten aus. Demnach wurde auf die Berücksichtigung negativer Preise verzichtet.

Bei näherer Betrachtung der positiven Preise stellt sich heraus, dass diese im unteren Preissegment der Modellpreise (bis etwa 30 €/MWh) den Realpreis tendenziell übertreffen, während im darüber liegenden Segment eine relativ gute Näherung erzielt wird. Zudem ist ersichtlich, dass der Großteil der beobachteten Preise sich im Segment zwischen ca. 20 €/MWh und 40 €/MWh ausbildet. Preisspitzen

<u>Berichtreihe</u>	<u>Nr.</u>	<u>Autoren</u>	<u>Datum</u>
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u>			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

sind zwar häufiger als negative Preise zu beobachten, prägen sich jedoch mit zunehmendem Preis immer seltener aus.

Die bereits im Streudiagramm beobachtete Ausbildung von Preisen in den verschiedenen Segmenten wurde zudem im zeitlichen Verlauf betrachtet. Hierbei bestätigten sich die bereits zuvor diskutierten Implikationen im Rahmen der Modellbildung. Abbildung 71 zeigt den Verlauf der realen und modellierten Preise einer beispielhaften Woche im Juni 2014.

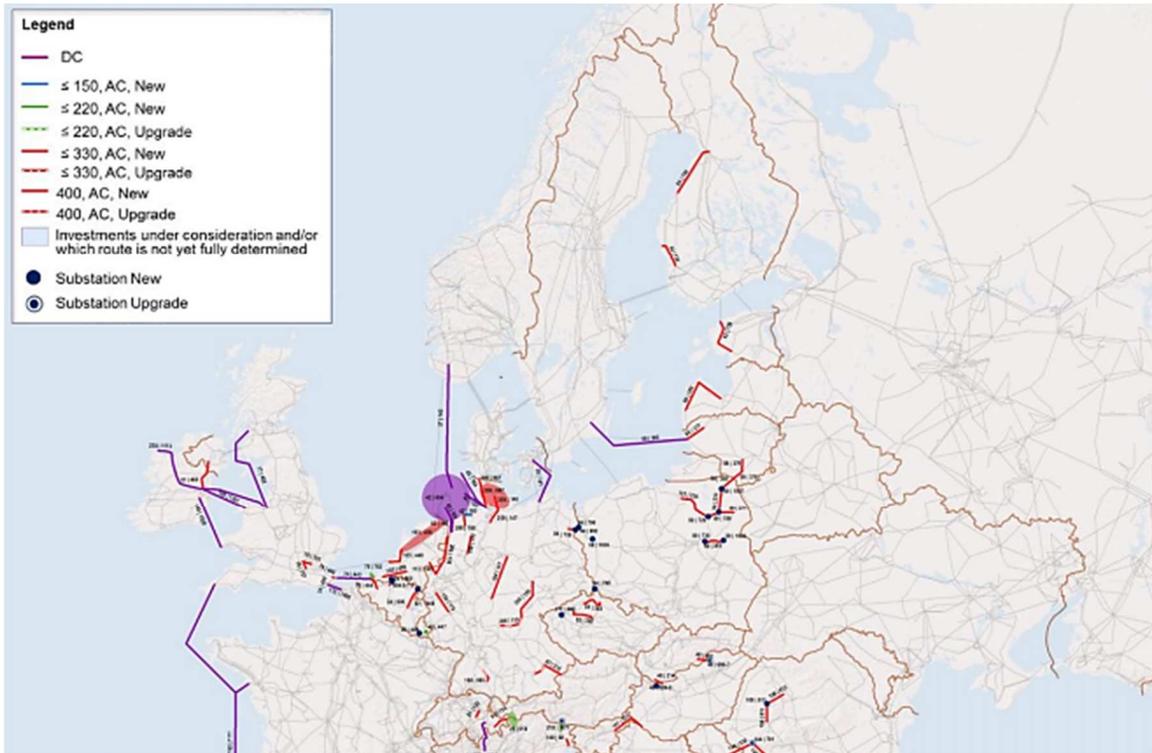


**Abbildung 71: Real- und Modellpreise im März 2014**

Der Verlauf zeigt die Unterschätzung der Realpreise im Falle hoher und deren Überschätzung im Falle einer niedrigen Residuallast. Zudem prägen sich deutliche „Tableaus“, also über Stunden konstante Preise, um die lokalen Maxima und Minima aus. Diese sind in ihrer Höhe und Dauer durch die - zur Verringerung des Rechenaufwandes - im Rahmen der Fundamentalmodellierung verhältnismäßig groß gewählte Abstufung der Leistungsblöcke pro Energieträger zurückzuführen. So kann sich beispielsweise ein Tableau über eine Dauer von 5 Stunden ausbilden, wenn die Residuallast innerhalb dieser Zeitspanne den Leistungsbereich (beispielsweise 10 GW) nicht verlässt, obwohl sich in der Realität durch die reale, blockscharfe Kraftwerksauflösung eine feine Abstufung entwickeln würde. Dennoch zeigt sich, dass auftretende Schwankungen durch das Modell abgebildet werden und die Preise im Mittel sehr gut korrelieren.

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

## Ergänzende Abbildungen



**Abbildung 72: Ausschnitt der berücksichtigten mittelfristigen (<2019) Bauvorhaben innerhalb des europäischen Stromnetzes (ENTSO-E, 2016 mit eigenen Änderungen)**

Berichtreihe	Nr.	Autoren	Datum
Forschungsergebnisse	5	Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	26.01.2018
Titel			
Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

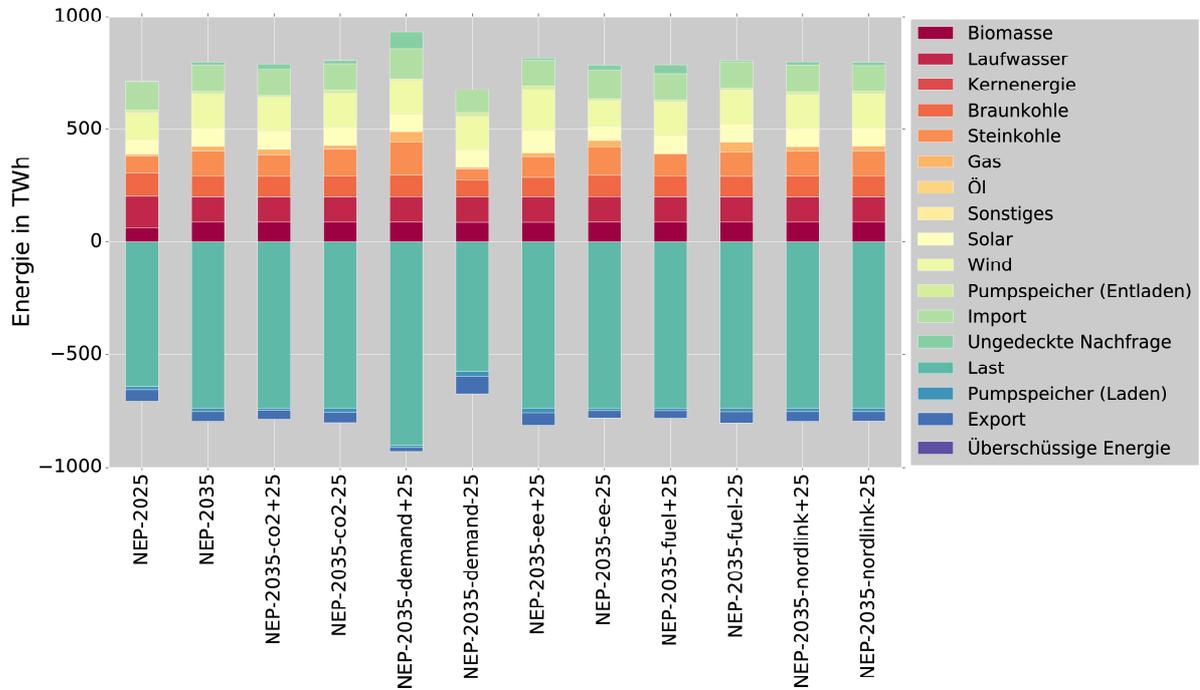


Abbildung 73: Kraftwerkseinsatz unter Veränderung der Rahmenbedingungen des Energieversorgungssystems

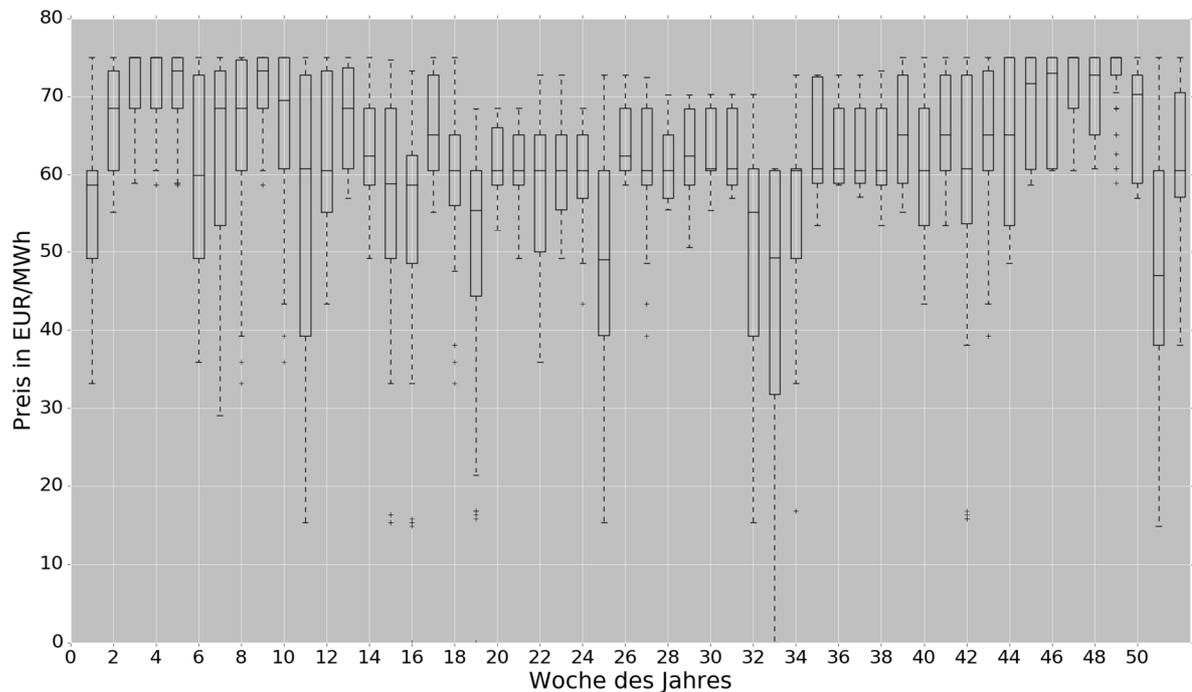


Abbildung 74: Analyse der wöchentlichen Preise im Szenario „NEP-2035-ee+25“

<u>Berichtreihe</u> Forschungsergebnisse	<u>Nr.</u> 5	<u>Autoren</u> Boysen.; Grotlüschen.; Großer.; Kaldemeyer; Tuschy	<u>Datum</u> 26.01.2018
<u>Titel</u> Druckluftspeicherkraftwerk Schleswig-Holstein			

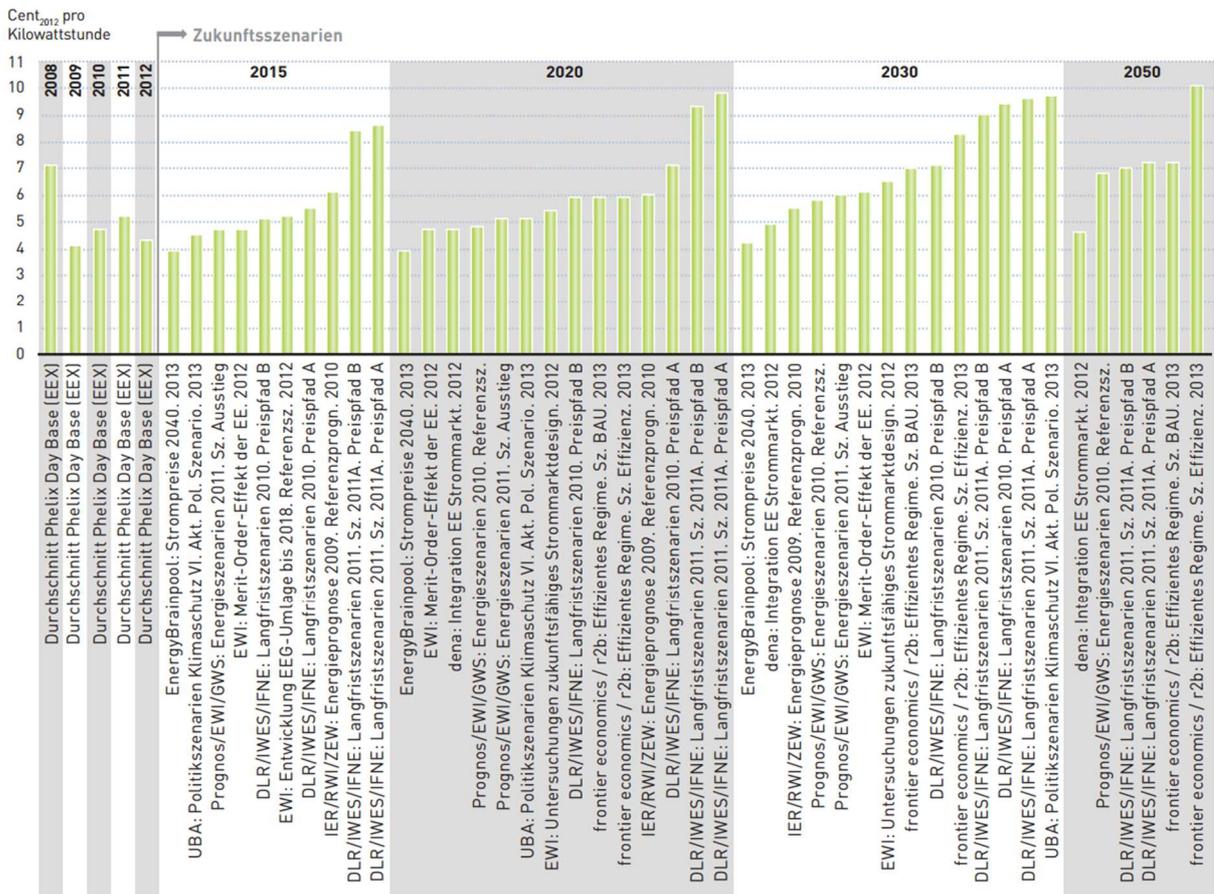


Abbildung 75: Entwicklung des Strompreises im Stromgroßhandelsmarkt in verschiedenen Studien



**Zentrum für nachhaltige Energiesysteme Hochschule / Europa-Universität Flensburg**

Kanzleistraße 91-93

24943 Flensburg

Internet: [www.znes-flensburg.de](http://www.znes-flensburg.de)

In Kooperation mit GEO mbH, Langenhorn

Gefördert durch die EKSH Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH

Flensburg, April 2017

Forschungsergebnisse 5

ISSN: 2195-4925