

# TEIL I Kurzbericht

## „H<sub>2</sub>-Forschungskaverne – Phase I: Entwicklung einer H<sub>2</sub>-Speicherforschungsplattform (SPF) für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt“

Dies ist ein gemeinsamer Kurzbericht über die Teilvorhaben der Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Entwicklung der Speicherforschungsplattform (SPF) und Integration in die Infrastruktur am Standort Bad Lauchstädt



*DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg  
Halsbrücker Str. 34, D-09599 Freiberg*

Teilvorhaben 2: Wasserstoffbereitstellung für die H<sub>2</sub>-Forschungskaverne mittels Elektrolyse



*Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen  
Walter-Hülse-Straße 1, D-06120 Halle*

Teilvorhaben 3: Geotechnischer Eignungsnachweis am Standort Bad Lauchstädt



*IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH  
Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig*

Teilvorhaben 4: Wasserstofftransport auf Basis einer Erdgaspipeline



*ONTRAS Gastransport GmbH  
Maximilianallee 4, D-04129 Leipzig*

Teilvorhaben 5: Entwicklung der Genehmigungsunterlagen zur H<sub>2</sub>-Forschungskaverne



*VNG Gasspeicher GmbH  
Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig*

Freiberg, den 31.01.2022

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde

Das diesem Abschlussbericht zugrundeliegende Projekt ist eines der Leuchtturmprojekte der HYPOS-Initiative - Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany. Zentrales Thema für HYPOS ist die umfassende Nutzung von Erneuerbaren Energien insbesondere aus volatilen Quellen wie Wind und Sonne zur wirtschaftlichen und versorgungssicheren Nutzung. Die Forschungs- und Entwicklungsleistungen werden auf eine markt- und einsatzgerechte Umwandlung bzw. Speicherung dieser Strommengen in den Energieträger Wasserstoff ausgerichtet. Das Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung und Vorbereitung einer Speicherforschungsplattform (SPF) für die Untergrundgasspeicherung von Wasserstoff in Salzkavernen. Das Projekt ordnete sich damit in eine Projektkette zur Errichtung eines Reallabors und dessen Forschungsbetrieb bis hin zum späteren Regelbetrieb ein (Abbildung 1). Es stellt den ersten Schritt (Phase I) zur Vorbereitung und zum Transfer von Grundlagenforschungsergebnissen in einen Demonstrator von industrieller Größe dar. Ergebnis sollte eine Plattform sein, in der alle Fragen der Bereitstellung, der Speicherung und des Transportes von Wasserstoff im industrierelevanten Maßstab als Reallabor erforscht werden können.

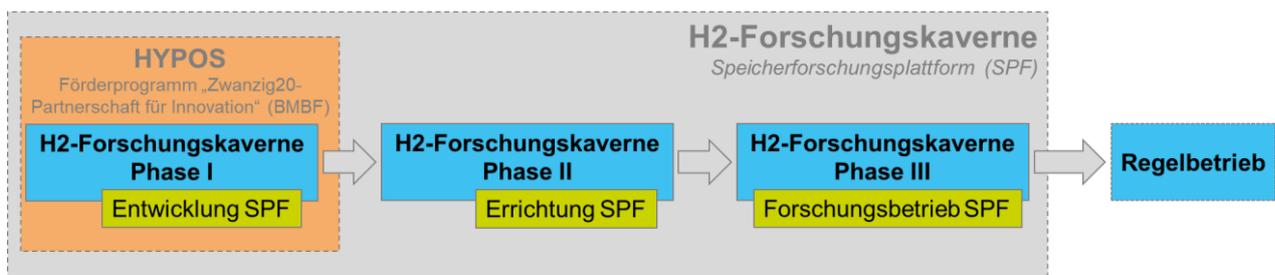


Abbildung 1: Einordnung des Projektes in die Gesamtzielstellung zur Errichtung einer Speicherforschungsplattform für Wasserstoff

Im Rahmen des Projektes wurde ein konkreter Standort innerhalb des mitteldeutschen Chemiedreiecks Leuna-Merseburg-Bitterfeld gewählt, Bad Lauchstädt, der sowohl über ausreichendes Potenzial an Erneuerbaren Energien verfügt, eine bestehende Gasinfrastruktur in der Form eines Erdgas-Untergrundspeichers und einer Transportnetzanbindung als auch über ein hohes Nutzungspotenzial innerhalb der Chemieindustrie. Zur Abgrenzung der Aufgaben innerhalb der SPF sind die Systemkomponenten des Projektes in der Abbildung 2 dargestellt. Dies beinhaltet die folgenden Bereiche:

- die Anbindung an Erzeugungsaggregate für Erneuerbaren Strom über das Netz oder optional direkt an einen Windpark,
- die Erzeugung von Wasserstoff über eine GroÙelektrolyse,
- eine Salzkaverne als Wasserstoff-Untergrundgasspeicher (GroÙspeicher) in Bad Lauchstädt – Untertageanlage (UTA),
- die Obertageanlage (OTA) des Speichers zur Ein- und Ausspeicherung des Gases mit allen peripheren Systemen und
- die bidirektionale Anbindung an das Linde-Wasserstoffnetz über eine umgestellte Erdgastransportleitung.

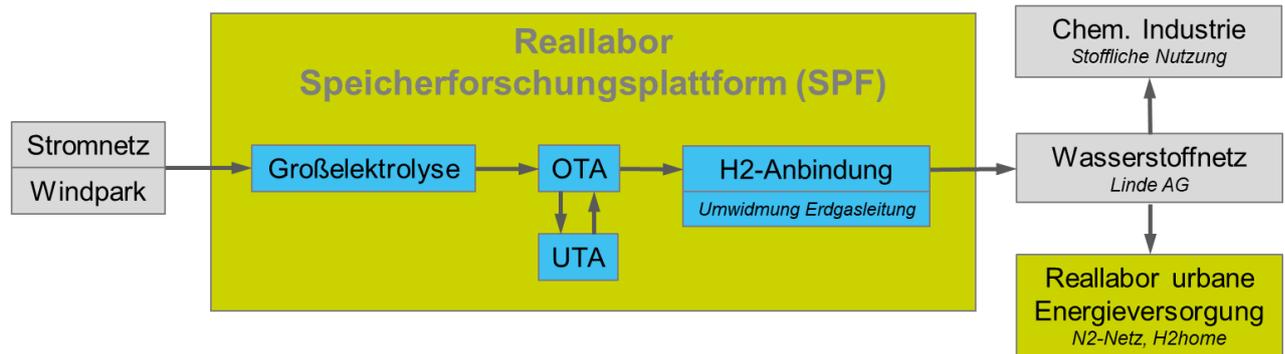


Abbildung 2: Systemkomponenten der SPF am Standort Bad Lauchstädt und Einbindung in die HYPOS-Wasserstoffversorgung

Für das Forschungsprojekt, die Phase I der Speicherforschungsplattform, wurden folgende wissenschaftliche Aufgaben und Ziele im Rahmen der Entwicklung des Anlagenkonzeptes der SPF (Entwurfsplanung) und der Genehmigung des Forschungsbetriebes fixiert. Das Kernziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung einer SPF für Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt und die Erlangung der bergrechtlichen Genehmigung für den Betrieb der SPF. Zur Erreichung des Kernziels sind verschiedene, stark aufeinander aufbauende Teilaufgaben und damit verbundene untergeordnete Ziele definiert worden:

- Entwicklung der Speicherforschungsplattform
  - Analyse der Standort- und Anbindungsoptionen für das Konzept der SPF
  - Standortwahl für die Elektrolyseanlage und deren Stromnetzanbindung und Auswahl der finalen Betriebsoption mit Berücksichtigung des Direktanschlusses eines Windparks
  - Projektdefinition: Zusammenstellung aller relevanten Projektvorgaben Betriebsparameter und Schnittstellenparameter
  - Entwicklung und Definition des finalen standortspezifisch Anlagenkonzeptes der SPF
- Entwicklung und Definition des Forschungsbetriebskonzeptes
  - Analyse und Definition des Sicherheitskonzeptes (inkl. Explosions- und Brandschutz, HAZOP - Hazard and Operability etc.)
  - Entwicklung eines Betriebsplanes für den Forschungsbetrieb der SPF nach Bergrecht
- Erstmalige Durchführung eines Genehmigungsverfahrens für eine H<sub>2</sub>-Untergrundspeicherung auf der Basis eines bergrechtlichen Betriebsplanverfahrens nach Bergrecht und BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) für die Errichtung der Systemkomponenten der SPF
- Entwicklung eines Finanzierungskonzeptes für die folgenden Phasen II und III und von Geschäftsmodellen für einen industriellen Betrieb auf der Basis einer Kostenanalyse für die Errichtung und den Betrieb der SPF

Die konkreten Arbeitsziele des Vorhabens beziehen sich jeweils auf die Systemkomponenten der SPF. Dies sind die Netzanbindung, der Elektrolyseur, die Obertage- und Untertageanlage des Speichers sowie einer Anbindung der SPF an das H<sub>2</sub>-Industrienetz des Chemiestandortes Leuna.

## 2 Ablauf des Vorhabens sowie die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

---

Das Vorhaben wurde in sehr enger, konstruktiver Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern bearbeitet. Die Koordinierung und wissenschaftliche Begleitung insbesondere zur Entwicklung von Speicher- und Transportkonzept übernahm DBI. Die konkrete Bearbeitung der Fragestellungen zum Speicher und der damit verbundenen Koordinierung des Genehmigungsverfahrens mit der zuständigen Bergbehörde wurde durch VGS bestritten, mit Unterstützung des IfG für den Eignungsnachweis der ausgewählten Kaverne. Die Anbindung und Koordinierung des Genehmigungsverfahrens der Pipelineanbindung erfolgte durch ONTRAS. Die Fragestellungen zur Elektrolyseanlage wurde durch IWMS bearbeitet. In die Bearbeitung waren darüber hinaus als assoziierte Partner die späteren Projektpartner des Reallabors Uniper Energy Storage GmbH (Elektrolyseur), Terrawatt Planungsgesellschaft mbH (Windparkanbindung) sowie mit der Linde AG und der Dow Olefinverbund GmbH spätere Nutzer des Wasserstoffs eingebunden. Als Genehmigungsbehörden fungierte das Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) für das Betriebsplanverfahren zum Untergrundgasspeicher sowie das Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt (LVwA) für die Genehmigungserfahren zum Elektrolyseur und zur Umstellung der Erdgasleitung auf den Transport von Wasserstoff.

Über die konkrete Zusammenarbeit innerhalb des Vorhabens hinaus und als eines der Teilprojekte gab es eine intensive Kooperation mit der HYPOS-Initiative (Hydrogen Power and Storage East Germany) zur Dissemination der Ergebnisse sowie zum Erfahrungsaustausch. Besonders hervorzuheben war die enge Kooperation mit dem Vorhaben H<sub>2</sub>-UGS - Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen Untergrundgasspeichern zur geologischen Speicherung von Wasserstoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen. Dieses parallellaufende Forschungsvorhaben übernahm die erforderliche Grundlagenforschung für die Auslegung insbesondere der Speicheranlagen. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Gefährdungsanalysen und der HAZOP-Studien eine enge Zusammenarbeit mit dem Forschungsvorhaben INES – Integrative Erhöhung des Sicherheitsniveaus in der Wertschöpfungskette für Wasserstoff.

Im Rahmen des Vorhabens wurde zunächst eine Standortanalyse vorgenommen und die zu Beginn des Vorhabens festgelegten Optionen detailliert, um sie auf ein finales Konzept einzugrenzen. Dazu wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, die wesentlichen Daten zusammengetragen und wirtschaftlich verglichen. Mit dem ermittelten konkreten Konzept und Standort für Elektrolyseur, Speicher und Pipelineanbindung wurden die Auslegungsgrundlagen für die Systemkomponenten ermittelt und zusammengestellt. Dazu wurden umfangreiche Datenanalysen insbesondere aus den zur Verfügung stehenden Daten vorgenommen.

Parallel dazu wurde bereits frühzeitig gemeinsam mit den zuständigen Behörden LAGB und LVwA eine gemeinsame Strategie für die unterschiedlichen Genehmigungsverfahren entwickelt. Leitverfahren war die bergrechtliche Genehmigung des Untergrundgasspeichers, an das sich die Verfahren für die Umstellung der Erdgasleitung und den Elektrolyseur anschlossen. Im Rahmen des Vorhabens wurden die Genehmigungsverfahren zum Speicher vollständig bearbeitet. Im Zusammenhang mit der Umstellung der Erdgasleitung auf den Transport von Wasserstoff wurde eine Vorprüfung auf Umweltverträglichkeit durchgeführt. Das Genehmigungsverfahren zum Elektrolyseur wurde konzeptionell vorbereitet. Da zum Zeitpunkt der Antragstellung der

ausführende Partner für die Elektrolyse noch nicht eingebunden werden konnte, wurde das Genehmigungsverfahren noch nicht eingeleitet und auf die Phase II verschoben.

Nach der Festlegung der Details zum Genehmigungsverfahren wurden die entsprechenden Unterlagen gestaffelt vorbereitet. Dazu gehören insbesondere der Hauptbetriebsplan (HBP) sowie vier Sonderbetriebspläne (SBP) für die Errichtung und den Betrieb der einzelnen Anlagenteile des Wasserstoffkavernenspeichers. Für diese Betriebspläne wurden die erforderlichen Entwicklungsarbeiten zur Untersetzung des Konzeptes durchgeführt. Gleiches wurde für die Pipelineanbindung vorgenommen. Die entsprechenden Unterlagen wurden eingereicht und durch die Behörden bearbeitet. Das Genehmigungsverfahren zum Untergrundgasspeicher konnte bis zur Erstellung dieses Abschlussberichtes noch nicht vollständig abgeschlossen werden. Die entwickelten Betriebspläne wurden im erforderlichen Umfang bereits im Vorfeld der jeweiligen Zulassungsbeantragung mit der Behörde fachlich diskutiert und entsprechend überarbeitet, bevor die Pläne sowie erforderliche Ergänzungen abschließend zur Zulassung eingereicht wurden. Die Anhörungsverfahren zu den Betriebsplänen liefen zum Redaktionsschluss des Abschlussberichtes bzw. stehen teilweise noch aus. Zweifel am Vorliegen der Zulassungsvoraussetzung hinsichtlich der zur Zulassung eingereichten Betriebspläne bestehen aus Sicht der beteiligten Konsortialpartner allerdings nicht, zumal dies in den bereits vorliegenden Zulassungsentwürfen zum HBP sowie zum SBP „H<sub>2</sub>-Feldleitung“ für diese Betriebspläne bereits festgestellt wurde.

Die Vorprüfung auf Umweltverträglichkeit der Pipeline wurde vollständig vorbereitet und während des Projekts abgeschlossen. Im Ergebnis war für die Umstellung der Leitung keine Umweltverträglichkeitsprüfung notwendig. Aufgrund einer gesetzlichen Änderung ist das Genehmigungsverfahren für die Umstellung der Erdgaspipeline auf Wasserstoff in ein Anzeigeverfahren umgewandelt worden. Dazu werden die vorbereiteten Unterlagen genutzt.

Neben der Vorbereitung und Erstellung der Genehmigungsunterlagen und den damit verbundenen Unterlagen zum Speicherdesign wurde das Betriebskonzept der Elektrolyseanlage erarbeitet. Das Betriebskonzept basiert auf dem Erzeugungsprofil lokaler Windkraftanlagen mit dessen Hilfe das potenzielle Produktionsprofil für Wasserstoff abgeleitet wurde. Diese Daten waren ebenfalls Grundlage für die Auslegungsdaten sowohl der Elektrolyseanlage, der Obertageanlage des Speichers als auch den Messanlagen am Speicher und am Übergabepunkt der Pipelineanbindung zum Chemiepark Leuna. Mit Hilfe des finalen Anlagendesigns und des Betriebskonzeptes ist ein Entwurf für die Versuchspläne für den späteren Forschungsbetrieb erarbeitet worden.

Eine wichtige Zielstellung des Vorhabens war die wirtschaftliche Analyse und die Entwicklung eines möglichen Geschäftsmodells der Hauptanlagen. Die Abschätzung der Kosten für Investition und Betrieb der Hauptanlagen bildet den Abschluss des Vorhabens. Die Kostenschätzung und die Pläne für den Forschungsbetrieb waren Grundlage für den Projektantrag zum Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt, welcher parallel zum Abschluss des Forschungsvorhabens H<sub>2</sub>-Forschungskaverne eingereicht wurde. Das Reallabor-Vorhaben konnte erfolgreich im September 2021 als Phase II der Speicherplattform gestartet werden. Damit kann die Bearbeitung des Vorhabens als sehr erfolgreich eingeschätzt werden. Alle Ziele des Vorhabens konnten erfüllt werden.

### 3 Wesentliche Ergebnisse

---

Das vorliegende Forschungsvorhaben H<sub>2</sub>-Forschungskaverne – Entwicklung einer H<sub>2</sub>-Speicherforschungsplattform für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt hat im wesentlichen folgende Ergebnisse erzielt:

- Technologiebewertung, Anforderungen und Ermittlung von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekten hinsichtlich der Betriebsoptionen der Elektrolyse

Die fortschreitende Entwicklung der Elektrolysetechnologie während der Durchführung des Vorhabens hat gezeigt, dass sowohl die Alkali-Elektrolyse als auch die PEM-Elektrolyse ähnliche Performance-Daten liefern können. Damit werden für die spätere Entscheidung auf eine der genannten Technologien die konkreten wirtschaftlichen Angebotsdaten (Investitionskosten) eines Ausschreibungsverfahrens das wesentliche Entscheidungskriterium werden. In beiden Technologien haben sich insbesondere für Großanlagen über 10 MW Niederdrucksysteme aufgrund der höheren Effizienz und des geringeren Anlagenaufwandes herauskristallisiert.

Im Ergebnis der Standortanalyse konnte gezeigt werden, dass eine Lokalisierung der Elektrolyseanlage in der Nähe des Speichers Bad Lauchstädt einige Vorteile gegenüber der Integration in den Chemiapark Leuna hat. Zu den Vorteilen gehören die räumliche Nähe zu Windparks und zu einem der großen Umspannwerke, die verfügbaren Flächen direkt am Untergrundgasspeicher und den daraus erwachsenden Optionen für eine spätere Erweiterung.

- Konzepterstellung und Dokumentation für die Anlagenteile OTA, UTA und Pipeline in Vorbereitung auf die grundsätzlichen Genehmigungen

Im Projekt wurde ein komplettes, detailliertes Anlagenlayout für die Speicheranlage und die Pipelineanbindung entwickelt, die die Spezifika einer Wasserstoffspeicherung berücksichtigt. Dazu gehören die Auslegung der Anlagen für die wesentlich von Erdgas abweichenden Gaseigenschaften, die Sicherheitsaspekte hinsichtlich des Brand- und Explosionsschutzes sowie die besonderen Anforderungen an die Gasreinheit. Die Aspekte wurden in das System integriert und stellen ein erstes vollständiges Gesamtdesign für einen Wasserstoff-Untergrundgasspeicher dar.

Zum Gesamtkonzept gehört ebenso ein detailliertes Betriebskonzept sowohl für die Elektrolyseanlage als auch den Untergrundgasspeicher und die Anschlussleitung.

- Durchführung von beispielhaften Genehmigungsverfahren für OTA, UTA und Pipeline bis zum Status „Entwurfs- und Genehmigungsplanung“ und Ausschreibungsgrundlagen (Hauptbetriebsplan, Struktur Sonderbetriebspläne)

Das Genehmigungsverfahren für den Wasserstoff-Untergrundgasspeicher am öffentlichen Gasnetz ist das erste Verfahren dieser Art in Europa. Dies stellte eine besondere Herausforderung sowohl für die Projektpartner als auch für das zuständige Bergamt dar. Im Ergebnis wurde ein beispielhaftes Verfahrenskonzept aus Hauptbetriebsplan (HBP) und mehreren Sonderbetriebsplänen (SBP) erarbeitet. Das Verfahren lehnt sich grundsätzlich an das für Erdgas an, ist im Detail jedoch auf die Bedingungen für Wasserstoff ausgerichtet. Das gestaffelte Verfahren erlaubt darüber hinaus die Erkenntnisse aus der Forschung in die Umsetzung einfließen zu lassen und gesicherte

Erkenntnisse zu verankern. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten so der HBP und die insgesamt vier SBP fertiggestellt, im erforderlichen Umfang mit der zuständigen Bergbehörde diskutiert und abschließend zur Zulassung eingereicht werden. Mit Redaktionsschluss des Abschlussberichtes liefen die Anhörungen zum HBP und zum SBP „H<sub>2</sub>-Feldleitung noch. Die zu beiden Betriebsplänen vorliegenden, mit dem LAGB fachlich diskutierten Zulassungsentwürfe lassen eine Zulassung auch der verbleibenden SBP erwarten.

Die regulatorischen Rahmenbedingungen für das Genehmigungsverfahren zur Umstellung der Pipeline auf H<sub>2</sub> haben im Laufe des Vorhabens eine positive Entwicklung genommen. So ist nicht zuletzt durch die Erkenntnisse aus dem Vorhaben, zu denen eine vollständige Bereitstellung der Genehmigungsunterlagen gehörte, die Genehmigungspflicht in eine Anzeigepflicht umgewandelt worden.

- Entwicklung einer H<sub>2</sub>-Gestehungskostenanalyse für die Wertschöpfungskette mit Fokus auf die einzelnen Elemente

Für die Wertschöpfungskettenelemente Elektrolyse, Untergrundgasspeicher und Pipelineanbindung wurden eine ausführliche Kostenanalyse durchgeführt, die für den Forschungsbetrieb der Speicherforschungsplattform einen Rahmen für die Gestehungskosten auf der Basis aktueller Betriebsbedingungen und Auslastungen erlaubt. Der direkte Betrieb des Elektrolyseurs an einem Windpark und bestehenden Größenverhältnisse für die bereits vorhandene Speicherkaverne und die auf H<sub>2</sub> umzustellende Pipelineanbindung führen zu einer lediglich ca. 50 %-igen Auslastung von Elektrolyse und Speicher sowie einer Auslastung von ca. 5 % für die Pipelineanbindung. Darüber hinaus ist die Größe der Anlagen im Vergleich zu bisherigen Erdgasspeichern lediglich als sehr klein zu bezeichnen. Damit haben CAPEX und die fixen OPEX noch einen hohen Anteil an den Gestehungskosten. Die Finanzierung solcher Pilotprojekte erfordert damit eine fundamentale staatliche Förderung, ohne die die gesamtgesellschaftliche Aufgabe der Versorgungssicherheit nicht möglich erscheint.

Dennoch konnte gezeigt werden, dass die H<sub>2</sub>-Gestehungskosten erste wirtschaftliche Geschäftsmodelle für frühe Märkte (z.B. Mobilität) erlauben. Dazu gehört auch das Abbauen von legislativen Hemmnissen für den Betrieb der Anlagen, wie z.B. die Befreiung der EEG-Umlage für die H<sub>2</sub>-Erzeugung sowie die Harmonisierung des regulatorischen Rahmens für den Betrieb von H<sub>2</sub>-Leitungen für die Versorgung von Öffentlichkeit und Industrie. Darüber hinaus können eine deutlich höhere Auslastung und eine Skalierung der Anlagen zu einer wesentlichen Kostensenkung beitragen.

Das wichtigste Ergebnis aus der Entwicklung des Gesamtkonzeptes, die Vorbereitung und Durchführung des Genehmigungsverfahrens sowie die detaillierte Gestehungskostenanalyse der H<sub>2</sub>-Wertschöpfungskette ist, dass die Erkenntnisse in die Beantragung des Reallabor-Vorhabens Energiepark Bad Lauchstädt eingeflossen sind. Damit wurden die Voraussetzungen für dessen Realisierung geschaffen. Start des Vorhabens war am 1. September 2021. Dieses Vorhaben mit einem Gesamtinvestitionsumfang von voraussichtlich etwa 200 Mio. € (in der gesamten Phase II inkl. eines Windparks) stellt einen Leuchtturm mit internationaler Ausstrahlung dar und wird die Region Mitteldeutschland nachhaltig verändern.

# TEIL II Abschlussbericht

## „H<sub>2</sub>-Forschungskaverne – Phase I: Entwicklung einer H<sub>2</sub>- Speicherforschungsplattform (SPF) für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt“

Dies ist ein gemeinsamer Abschlussbericht über die Teilvorhaben der Zuwendungsempfänger:

- Teilvorhaben 1: Entwicklung der Speicherforschungsplattform (SPF) und Integration in die Infrastruktur am Standort Bad Lauchstädt  
*DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg  
Halsbrücker Str. 34, D-09599 Freiberg*
- Teilvorhaben 2: Wasserstoffbereitstellung für die H<sub>2</sub>-Forschungskaverne mittels Elektrolyse  
*Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen  
Walter-Hülse-Straße 1, D-06120 Halle*
- Teilvorhaben 3: Geotechnischer Eignungsnachweis am Standort Bad Lauchstädt  
*IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH  
Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig*
- Teilvorhaben 4: Wasserstofftransport auf Basis einer Erdgaspipeline  
*ONTRAS Gastransport GmbH  
Maximilianallee 4, D-04129 Leipzig*
- Teilvorhaben 5: Entwicklung der Genehmigungsunterlagen zur H<sub>2</sub>-Forschungskaverne  
*VNG Gasspeicher GmbH  
Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig*

Freiberg, den 31.01.2022

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Danksagung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0750 A-E in der Zeit vom 01.05.2019 bis 31.07.2021 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Abschlussberichtes liegt bei den Autoren.



**DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg,**  
Halsbrücker Str. 34, D-09599, Freiberg

Unter Mitarbeit von:

*Dipl.-Ing. (FH) Marco Henel*  
*Dr.-Ing. Benjamin Keßler*  
*Dipl. Chem. Udo Lubenau*  
*Dipl.-Geol. Cindy Kleinickel*  
*Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause*  
*Dr.mont. Neda Hassannayebi*



**Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von**  
**Werkstoffen und Systemen**

Walter-Hülse-Straße 1, D-06120 Halle

Unter Mitarbeit von:

*M.Sc. M.Eng Marcus Tümmeler.*  
*Dr. Moritz Kühnel*



**IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH**

Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig

Unter Mitarbeit von:

*Dipl.-Geol. Tobias Fabig*  
*Dipl.-Geol. Grit Asmussen-Günther*



**ONTRAS Gastransport GmbH**

Maximilianallee 4, D-04129 Leipzig

Unter Mitarbeit von:

*Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Eric Tamaske,*  
*Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Christian Decker*



**VNG Gasspeicher GmbH**

Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig

Unter Mitarbeit von:

*Frank Sauer, LL.B.*  
*Dipl.-Ing. Stefan Kalch*  
*Dipl.-Ing. (FH) Bernd Siedler*  
*Dipl.-Ing. (FH) Robert Preißner*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Konzeptanalyse für das Gesamtsystem der Speicherforschungsplattform und für die Systemkomponenten .....</b>	<b>9</b>
2.1	Technische Anforderungen an den Betrieb der Speicherforschungsplattform.....	9
2.1.1	Definition der technischen Anforderungen an den Betrieb des Elektrolysesystems (AP 1.1.2.).....	9
2.1.2	Definition der technischen Anforderung für den H <sub>2</sub> -Untergrundgasspeicher (AP 1.1.3).....	11
2.1.3	Technische Anforderungen an den Pipelinetransport von Wasserstoff (AP 1.1.3) .....	11
2.2	Gesamtkonzept – Analyse und Definition der standortspezifischen Anforderung an die Ausrüstungen der Speicherforschungsplattform .....	11
2.2.1	Anforderung an die Ausrüstung der Elektrolyse (AP 1.2.1.).....	11
2.2.2	Anforderung an die Ausrüstung des H <sub>2</sub> -Untergrundgasspeichers (AP 1.2.2) .....	14
2.2.3	Anforderung an die Ausrüstung der H <sub>2</sub> -Pipeline-Anbindung (AP 1.2.3) .....	15
<b>3</b>	<b>Variantenvergleich von Ausrüstungen und Betriebsoptionen .....</b>	<b>19</b>
3.1	Variantenvergleich der Betriebsoptionen anhand wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte (AP 2.4).....	19
3.2	Ermittlung standortspezifische Investitions- und Betriebskosten für die Elektrolyse (AP 2.1).....	20
3.2.1	Vergleich verschiedener Elektrolysetechnologien (AP 2.1.1).....	20
3.2.2	Standortvergleich für die Versorgung der Kaverne mit grünem H <sub>2</sub> aus der Elektrolyse (AP 2.1.2).....	21
3.2.3	Ableitung von Investitions- und Betriebskosten für die Betriebsoptionen (AP 2.1.3).....	23
3.3	Ermittlung standortspezifische Investitions- und Betriebskosten für den H <sub>2</sub> -Untergrundgasspeicher (AP 2.2) .....	24
3.3.1	Grobplanung der Untertageausrüstung .....	24
3.3.2	Grobplanung Obertageausrüstung .....	25
3.3.3	Forschungsschwerpunkte für den H <sub>2</sub> - Speicher .....	26
3.4	Ermittlung standortspezifischer Investitions- und Betriebskosten für die H <sub>2</sub> - Pipeline-Anbindung .....	27
3.4.1	Entwicklung eines Forschungsprogramms für die jeweiligen Betriebsoptionen der Pipeline-Anbindung (AP 2.3.1) .....	27
3.4.2	Ableitung von Investitions- und Betriebskosten für die Betriebsoptionen (AP 2.3.2).....	28
<b>4</b>	<b>Entwicklung der Anlagen- und Versuchspläne für die Systemkomponenten und das Gesamtsystem.....</b>	<b>30</b>
4.1	Planung und Zusammenstellung der Anforderungen an Netzanbindung und Elektrolyseplattform (AP 3.1).....	30
4.1.1	Zusammenstellung der Anforderungen an die Netzanbindung für die Elektrolyse (AP 3.1.1).....	32

4.1.2	Zusammenstellung der Anforderungen an die Elektrolyseplattform (AP 3.1.2) .....	33
4.2	Entwicklung der Untertageanlage für die H <sub>2</sub> -Kaverne (AP 3.2) .....	42
4.2.1	Geomechanischer Standsicherheits- und Integritätsnachweis der H <sub>2</sub> -Kaverne (AP 3.2.2 und 3.2.3) .....	42
4.2.2	Laboruntersuchungen an lokationsspezifischen Kernmaterial (AP 3.2.1) .....	43
4.2.3	Geomechanisches Berechnungsmodell – Standsicherheits- und Integritätsnachweis (AP 3.2.2 und AP 3.2.3) .....	45
4.2.4	Konvergenzeinflüsse und Bodensenkung durch den Betrieb der H <sub>2</sub> -Kaverne (AP 3.2.1).....	51
4.3	Detaillentwicklung der Untertageausrüstung (AP 3.2.5) .....	51
4.3.1	Einbau der letzten zementierten Rohrtour (LzRT) .....	51
4.3.2	Förderinstallation und Gasförderkopf .....	54
4.4	Entwicklung der Obertageanlage für den H <sub>2</sub> -Untergrundgasspeicher (AP 3.3) .....	55
4.4.1	Detaillentwicklung der allgemeinen Obertageausrüstung .....	55
4.4.2	Anlagenkomponenten der Stromversorgung .....	56
4.4.3	Anlagenkomponenten der Gasaufbereitung .....	57
4.4.4	Anlagen der Gasdruckregelung und Gasmengenmessung (GDR(M)A), EMSR .....	58
4.4.5	Trassen für Ver- und Entsorgungsleitungen, Trassen für OT-Piping.....	59
4.4.6	Erschließung Wasser / Abwasser.....	60
4.4.7	Molchschleuse, Schiebergruppe, Stationsschrank und Ausbläser Schiebergruppe.....	60
4.4.8	Fundamentisolierungen- und Erdungssysteme.....	61
4.4.9	Objektschutz sowie Flucht- Rettungswege .....	61
4.4.10	Anlagen der Löschwasserversorgung .....	61
4.4.11	Verdichteranlage inkl. Nebenanlagen und Kühlung (Phase II.2).....	62
4.4.12	Filtergruppe ONTRAS und Filter / Abscheider .....	63
4.4.13	Kanäle für Ver- und Entsorgungstechnik, Trassen für OT-Piping .....	63
4.4.14	Fundamentisolierungen- und Erdungssysteme.....	63
4.5	Versuchspläne für die Untertage- und Obertageausrüstung .....	64
4.6	Entwicklung der H <sub>2</sub> -Pipeline-Anbindung (AP 3.4) .....	66
4.7	Entwicklung eines MSR-Konzeptes (AP 3.5) .....	66
4.7.1	Entwicklung eines MSR-Konzeptes für die Obertageausrüstung (AP 3.5.1) .....	66
4.7.2	Entwicklung eines MSR-Konzeptes für die Gasreinigung (AP 3.5.2) .....	71
<b>5</b>	<b>Anlagen- und Arbeitsschutz für die Speicherforschungsplattform .....</b>	<b>72</b>
5.1	Ergebnis der HAZOP-Studien (AP 4.1).....	72
5.2	Explosionsschutz- und Brandschutzkonzepte (AP4.5).....	72
<b>6</b>	<b>Entwicklung der Genehmigungsunterlagen für die SPF (AP 5) .....</b>	<b>75</b>
6.1	Gesamtkonzept des Genehmigungsverfahrens.....	75
6.2	Übersicht zu den Genehmigungsunterlagen der Speicherforschungsplattform (AP 5).....	76
6.2.1	Bergrechtliches Genehmigungsverfahren für den Wasserstoffkavernenspeicher .....	76
6.2.2	Vorabstimmungen (AP 5.1) .....	77
6.2.3	Entwicklung der Genehmigungsplanung und Einreichung der Betriebspläne .....	77

6.2.4	Stand des Genehmigungsverfahrens .....	78
6.2.5	Fazit .....	79
6.2.6	Genehmigungsunterlagen für relevante Anlagenbereiche nach Bundes- Immissionsschutzgesetz (BImSchG) .....	80
6.2.7	Genehmigungsunterlagen für die H <sub>2</sub> -Pipeline .....	81
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines Geschäftsmodells für den Betrieb von H<sub>2</sub>- Untergrundgasspeicher und Transportpipeline .....</b>	<b>84</b>
7.1	Übersicht zu den Kosten für die Speicherplattform (AP 6.1) .....	84
7.2	Betrachtung von möglichen Geschäftsmodellen für den wirtschaftlichen Betrieb (AP 6.2) .....	89
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>92</b>
<b>9</b>	<b>Ergänzende Inhalte .....</b>	<b>95</b>
9.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	95
9.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	95
9.3	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	96
9.4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	97
9.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse .....	97
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>100</b>
<b>12</b>	<b>Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>101</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>14</b>	<b>Anlagen .....</b>	<b>104</b>
14.1	Inhaltsverzeichnis Hauptbetriebsplan .....	104
14.2	Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Feldleitung .....	107
14.3	Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Untertage .....	109
14.4	Geplante Installation der LzRT und der FRT .....	112
14.5	Kavernenkopf .....	113
14.6	Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Anlagentechnik .....	114
14.7	Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Bautechnik .....	117
14.8	Technische/technologische Beschreibung der wesentlichen Anlagenteile .....	119
14.9	H <sub>2</sub> -Forschungskaverne HAZOP-Studie .....	124
14.10	Inhaltsverzeichnis Explosionsschutzdokument Untergrundspeicher Bad Lauchstädt .....	130
14.11	Aufstellungskonzept (H <sub>2</sub> -OTA Layout) mit Ex-Zonen .....	131

## 1 Einleitung

Für die Umsetzung der politischen Ziele der Bundesregierung – zukünftig die Treibhausgasemissionen stark zu reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen (EEG) – bedarf es der Entwicklung und Einführung neuer und effizienter Technologien zur Energie-Erzeugung, -transport und -speicherung. Es sind Voraussetzungen zu schaffen, mit denen eine Versorgungssicherheit trotz fluktuierender Energieerzeugung gewährleistet werden kann. Eckpfeiler einer versorgungssicheren Energie- und Stoffinfrastruktur mit überwiegend regenerativen Quellen ist die großvolumige, sichere und effiziente Speicherung „grünen Wasserstoffs“ in Untergrundgasspeichern. Derzeit bieten Salzkavernen die besten Voraussetzungen, damit fluktuierende Erzeugungsleistungen für unterschiedliche Verwertungspfade geglättet bzw. bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden können. Durch Wasserstoffherzeugung kann ein wesentlicher Beitrag zur Dekarbonisierung der Chemieindustrie und der Energieversorgung in Deutschland geleistet und darüber hinaus eine Speichermöglichkeit von Strom aus erneuerbaren Energien aufgezeigt werden. Das Vorhaben H<sub>2</sub>-Forschungskaverne ordnet sich in weitere Aktivitäten der HYPOS-Initiative, wie z.B. urbane Energieversorgung mit H<sub>2</sub>“ (Projekte H2-Netz und H2home) ein.

Das Verbundvorhaben verfolgt den Ansatz, Strom aus einem neu zu errichtendem Windpark mittels Netzparallelbetrieb mit Überschusseinspeisung direkt über eine Großelektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln und diesen in Salzkavernen zu speichern. Der erzeugte und gespeicherte Wasserstoff wird über eine Anbindungsleitung an das H<sub>2</sub>-Netz für die stoffliche Nutzung im Chemiapark Leuna zur Verfügung gestellt. Als weitere Anwendungssektoren steht die Direktnutzung des Wasserstoffs für Mobilität und für den urbanen Bereich zur Wärme- und Stromerzeugung.

Das Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung und Vorbereitung einer Speicherforschungsplattform (SPF) für die Untergrundgasspeicherung von Wasserstoff in Salzkavernen. Das Vorhaben ordnete sich damit in eine Projektkette zur Errichtung eines Reallabors und dessen Forschungsbetrieb bis hin zum späteren Regelbetrieb ein (Abbildung 1). Es stellt den ersten Schritt (Phase I) zur Vorbereitung und zum Transfer von Grundlagenforschungsergebnissen in einen Demonstrator von industrieller Größe dar. Ergebnis sollte eine Plattform sein, in der alle Fragen der Bereitstellung, der Speicherung und des Transportes von Wasserstoff im industrierelevanten Maßstab als Reallabor erforscht werden können.

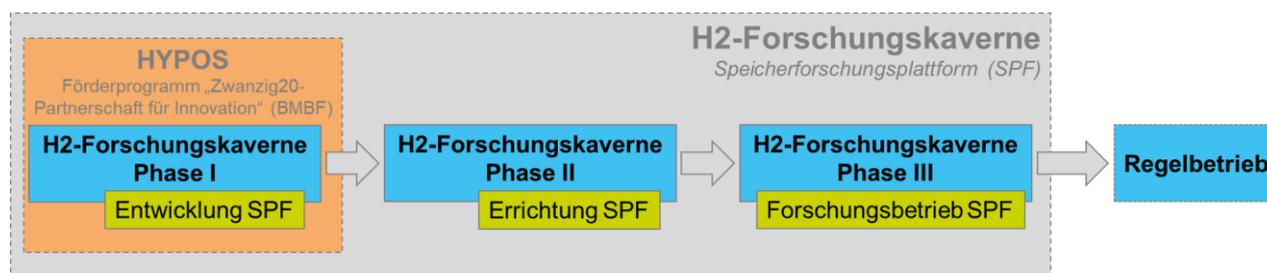


Abbildung 1: Einordnung des Projektes in die Gesamtzielstellung zur Errichtung einer Speicherforschungsplattform für Wasserstoff

Im Rahmen des Projektes wurde ein konkreter Standort innerhalb des mitteldeutschen Chemiedreiecks Leuna-Merseburg-Bitterfeld gewählt, Bad Lauchstädt, der sowohl über ausreichendes Potenzial an Erneuerbaren Energien verfügt, eine bestehende Gasinfrastruktur in der Form eines Erdgas-Untergrundspeichers und einer Transportnetzanbindung als auch über ein hohes Nutzungspotenzial innerhalb der Chemieindustrie. Zur Abgrenzung der Aufgaben innerhalb der SPF sind die Systemkomponenten des Projektes in der Abbildung 2 dargestellt. Dies beinhaltet die folgenden Bereiche:

- die Anbindung an Erzeugungsaggregate für Erneuerbaren Strom über das Netz oder optional direkt an einen Windpark,
- die Erzeugung von Wasserstoff über eine Großelektrolyse,
- eine Salzkaverne als Wasserstoff-Untergrundgasspeicher (Großspeicher) in Bad Lauchstädt – Untertageanlage (UTA),
- die Obertageanlage (OTA) des Speichers zur Ein- und Ausspeicherung des Gases mit allen peripheren Systemen und
- die bidirektionale Anbindung an das Wasserstoffnetz im Chemiapark Leuna über eine umgewidmete Erdgastransportleitung.

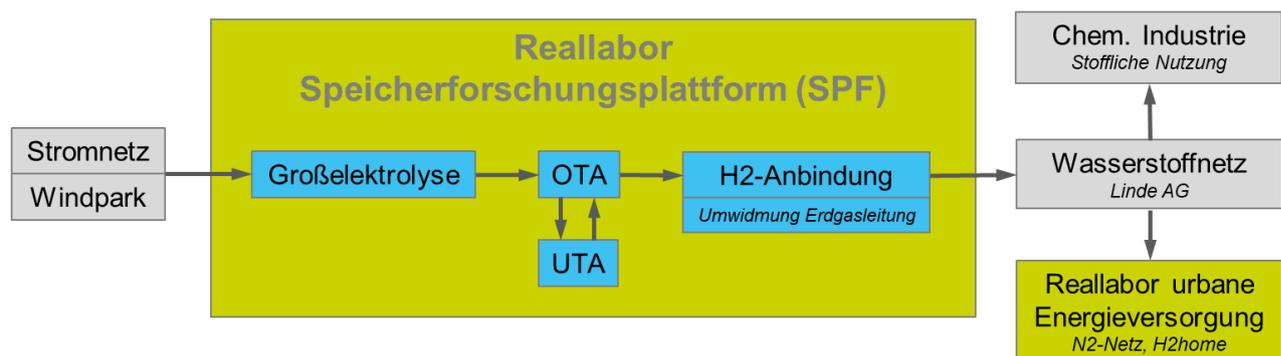


Abbildung 2: Systemkomponenten der SPF am Standort Bad Lauchstädt und Einbindung in die HYPOS-Wasserstoffversorgung

Für das Forschungsprojekt, die Phase I der Speicherforschungsplattform, wurden folgende wissenschaftliche Aufgaben und wissenschaftlich technische Ziele im Rahmen der Entwicklung des Anlagenkonzeptes der SPF (Entwurfsplanung) und der Genehmigung des Forschungsbetriebes fixiert. Das Kernziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung einer SPF für Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt und die Erlangung der bergrechtlichen Genehmigung für den Betrieb der SPF. Zur Erreichung des Kernziels sind verschiedene, stark aufeinander aufbauende Teilaufgaben und damit verbundene untergeordnete Ziele definiert worden:

- Entwicklung der Speicherforschungsplattform
  - Analyse der Standort- und Anbindungsoptionen für das Konzept der SPF
  - Standortwahl für die Elektrolyseanlage und deren Stromnetzanbindung und Auswahl der finalen Betriebsoption mit Berücksichtigung des Direktanschlusses eines Windparks
  - Projektdefinition: Zusammenstellung aller relevanten Projektvorgaben Betriebsparameter und Schnittstellenparameter

- Entwicklung und Definition des finalen standortspezifisch Anlagenkonzeptes der SPF
- Entwicklung und Definition des Forschungsbetriebskonzeptes
  - Analyse und Definition des Sicherheitskonzeptes (inkl. Explosions- und Brandschutz, HAZOP - Hazard and Operability etc.)
  - Entwicklung eines Betriebsplanes für den Forschungsbetrieb der SPF nach Bergrecht
- Erstmalige Durchführung eines Genehmigungsverfahrens für eine H<sub>2</sub>-Untergrundspeicherung auf der Basis eines bergrechtlichen Betriebsplanverfahrens nach Bergrecht und BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) für die Errichtung der Systemkomponenten der SPF
- Entwicklung eines Finanzierungskonzeptes für die folgenden Phasen II und III und von Geschäftsmodellen für einen industriellen Betrieb auf der Basis einer Kostenanalyse für die Errichtung und den Betrieb der SPF

Mit dem vorliegenden Vorhaben wurden die Voraussetzungen zur Realisierung einer großvolumigen Erzeugung und Speicherung von grünem Wasserstoff in der bereits bestehenden Kaverne am Standort Bad Lauchstädt sowie die Möglichkeit der Umwidmung der Erdgas-transportleitung zur Wasserstoff-Transportinfrastruktur des mitteldeutschen Chemiedreiecks erarbeitet.

## 2 Konzeptanalyse für das Gesamtsystem der Speicherforschungsplattform und für die Systemkomponenten

### 2.1 Technische Anforderungen an den Betrieb der Speicherforschungsplattform

#### 2.1.1 Definition der technischen Anforderungen an den Betrieb des Elektrolysesystems (AP 1.1.2.)

Als Basiswert zur Dimensionierung der Elektrolyse wurde im Konsortium eine geforderte maximale Produktionsmenge von 8.000 Nm<sup>3</sup>/h anhand der Bedarfsstruktur der geplanten Abnehmer des produzierten Wasserstoffes festgelegt. Weiterhin muss der produzierte Wasserstoff zur Einspeisung in die Pipeline nach Anforderungen von Linde als Betreiber des Anschlusspunktes einen Druck von 30 bar(g) und zur Verträglichkeit mit Pipeline und Obertageanlage eine Reinheit von mindestens 99,96 % (Qualitätsstufe 3.6) mit folgenden maximalen Verunreinigungsmengen aufweisen:

Tabelle 1: Qualitätsanforderungen Wasserstoff

Komponente	Bezugsgröße	Grenzwert
H <sub>2</sub>	Vol.-%	≥ 99,96
temperature of dew point (bei 30 bar)	°C	≤ - 40
O <sub>2</sub>	Vol.-ppm	≤ 1
N <sub>2</sub>	Vol.-ppm	≤ 400
C	Vol.-ppm	≤ 2
CO	Vol.-ppm	≤ 2
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> (not Methane hydrocarbons)	Vol.-ppm	≤ 3

Hinsichtlich des Druckes ist ein Betrieb der Elektrolyse selbst bei 30 bar zwar technisch möglich, nach Rücksprache mit Herstellern aber heute noch nicht üblich ist. Es wird noch an Serienmodellen gearbeitet, die dies leisten. Der Zieldruck muss durch eine zusätzliche Kompression erreicht werden, wobei die zellintern erreichbaren Druckstufen sich von Hersteller zu Hersteller stark unterscheiden. Die von Herstellern genannten Stromverbrauchswerte sind daher für atmosphärischen Betrieb zu verstehen.

Auf Basis der im Antrag definierten Betriebsoptionen wurden drei Szenarien zur Versorgung der Elektrolyse aufgestellt, die im weiteren Projektverlauf auf ihre erzielbaren Wasserstoffgestehungskosten hin untersucht wurden. Hierbei handelt es sich um:

1. Standort Chemiapark Leuna mit Stromversorgung aus dem Netz
2. Standort Bad Lauchstädt (Kavernennähe) mit Stromversorgung aus dem Netz
3. Standort Bad Lauchstädt (Kavernennähe) mit Stromversorgung per Direktleitung zum benachbarten Windpark

Sofern die Elektrolyse im Verbund der Kavernenanlage aufgebaut wird (Standortoptionen 2 und 3) wäre die Nutzung der niedertemperierten Abwärme der Elektrolyse (ca. 60 bis 80 °C, herstellerabhängig) für die Obertageanlage denkbar, da die Elektrolyse ohnehin über eine Kühleinheit verfügt. Inwieweit eine solche Verschaltung wirtschaftlich sinnvoll ist, muss jedoch in einem detaillierten, anlagenspezifischen Engineering überprüft werden.

Für den Fall der Versorgung über den Windpark (Standortoption 3) wurden Zielgrößen im resultierenden Verhalten der Elektrolyse festgelegt sowie Steuer- und Messvariablen, die deren Ermittlung bzw. die Quantifizierung ihrer Grenzwerte erlauben. Solche Versuche wären im Direktverbund mit fluktuierender Einspeisung nötig, um Aussagen zu Auswirkungen auf die Langlebigkeit der Anlage, ihre Abstimmbarkeit auf das Lastprofil der WKA sowie die Kosten, die sich durch besondere Betriebssituation sowohl hinsichtlich Medienverbrauch als auch zusätzlicher Degradation ergeben, treffen zu können. Dabei handelt es sich um:

Tabelle 2: Zielgrößen, Steuer- und Messvariablen der Elektrolyse

Beschreibung Zielgröße	Messvariable in Versuchsprogrammen
<b>Minimale Reaktionszeit auf Änderungen in Windlast:</b> Fähigkeit zum Folgen von Lastsprüngen und Ableitung eventueller Notwendigkeit von Strompufferspeichern	Gradient der Stromstärke- bzw. Stromdichteänderung
<b>Wirtschaftlich maximal zulässige Hot Standbyzeit:</b> Abschätzung, ab welchem Zeitraum es wirtschaftlicher ist, die Anlage bei längerer Einspeiseflaute herunterzufahren, trotz erhöhter Degradation bei Neustart aus Cold Standby	Standby-Stromverbrauch
<b>Degradation bei typischen Zuständen mit stark fluktuierender Einspeisung:</b> Bei Durchfahren von Lastwechseln (up/down) verschiedenen Umfangs, Start aus Hot Standby, Start aus Cold Standby, Halten von Hot Standby, Überlastbetrieb	Veränderung der Zellspannung (bzw. Spannung über Stack) bei gleichbleibender Stromdichte
<b>Schwankung der Produktgaszusammensetzung bei unterschiedlichen Laststufen mit vorhergehenden Lastverläufen:</b> Sich verändernder Reinigungsaufwand in Abhängigkeit vom Betriebszustand	Konzentration o.g. Stoffe im Wasserstoffstrom

Weitere relevante Größen, beispielsweise die maximale Betriebsdauer in Überlast und die danach einzuhaltende Cooldown-Dauer oder die minimale Laststufe, bevor aus Sicherheitsgründen eine Schaltung in Standby erfolgen muss, sollten vom Hersteller der Elektrolyseanlage zur Verfügung gestellt werden können.

Aus der Kombination dieser Größen mit den gemessenen Zielgrößen bzw. Effekten der Einzelsituationen ließe sich nachfolgend bei Betrachtung einer gegebenen Windlastkurve die Häufigkeit der Zustände ableiten und somit bestimmen, welche Zustände in welchem Umfang aus ökonomischer Sicht angefahren werden sollten sowie welche zusätzlichen Aggregate (Stromspeicher vor der Elektrolyse zur Glättung der Einspeisung, Gaszwischenpeicher vor Kompressor zur Schonung desselbigen und Vermeidung von Pulsationswirkungen auf die Elektrolyse) in welcher Größenordnung und Leistungsfähigkeit nötig sind, um bei Vermeidung einzelner Zustände elektrolyseseitig dennoch eine möglichst hohe Ausnutzung der anliegenden

Windenergie zu ermöglichen. Solche Versuche müssten im Vorfeld jedoch bei Anschluss an eine steuerbare Stromversorgung erfolgen. Als weitere Anforderung auf technischer Seite ergibt sich damit die zwingende Verfügbarkeit von Anschlussmöglichkeiten für entsprechende Sensorik.

### 2.1.2 Definition der technischen Anforderung für den H<sub>2</sub>-Untergrundgasspeicher (AP 1.1.3)

Für die wasserstoffspezifische Obertageanlage (H<sub>2</sub>-OTA) wurde im Konsortium eine geforderte maximale Produktionsmenge von 8.000 Nm<sup>3</sup>/h anhand der Bedarfsstruktur der geplanten Abnehmer des produzierten Wasserstoffes festgelegt. Als weitere Anforderung wurde eine max. erweiterte Durchflussleistung von 100.000 Nm<sup>3</sup>/h als Größenordnung für eine perspektivische Skalierung bestimmt, um die max. Leistung der Wasserstoffherzeugung im Chemiedreieck Mitteldeutschland ohne Koppelproduktion substituieren zu können. Die Betriebsdrücke orientieren sich dabei an dem Einspeisedruck am Übergabepunkt Leuna sowie dem max. Speicherdruck in der Kaverne.

Als weitere technische Anforderung stand im Mittelpunkt der OTA die bidirektionale Mengenmessung des Wasserstoffes.

Hinsichtlich der Gasaufbereitung (GA) des aus der Kaverne ausgespeicherten Wasserstoffes ist der Schwerpunkt in der Entfernung des Wassers zu sehen (Gastrocknung). Außerdem ist nicht auszuschließen, dass sich mikrobiologisch bedingt Schwefelverbindungen in der Sole bilden, die in den Wasserstoff übergehen. Deshalb ist eine Entschwefelung in der Gasaufbereitung enthalten. Außerdem ist ein Aktivkohlefilter für die Entfernung höherer Kohlenwasserstoffe nötig. Diese können aus dem Blankett (Abdeckmedium der Kaverne), dem Verdichter (Verdichteröl) oder der ersten Trocknungsstufe (TEG-Trocknung) kommen.

Durch den Partner VGS wurde für das Vorhaben eine bereits gesolte Kaverne des Erdgasspeichers Bad Lauchstädt ausgewählt. Die Kaverne Lt 9 ist derzeit mit Sole gefüllt und noch mit einem Solegestänge ausgerüstet. Die Kaverne wird für einen maximalen Druck am letzten zementierten Rohrschuh von 140 bar und einen minimalen Druck von 30 bar ausgelegt. Aus der resultierenden Druckdifferenz ergibt sich ein Arbeitsgasvolumen von rund 50 Mio. Nm<sup>3</sup> und ein Bedarf an Kissengas von rund 15 Mio. Nm<sup>3</sup>.

### 2.1.3 Technische Anforderungen an den Pipelinetransport von Wasserstoff (AP 1.1.3)

In Fokus der technischen Anforderungen für den Gastransport wurde zum einen eine umzuwidmende Bestandsleitung und zum anderen alternative Transportlösungen (Neubau einer Pipeline und Einsatz von Kunststoffmaterialien bei erforderlichen Betriebsdrücken und Kapazitäten) für den erzeugten Wasserstoff untersucht.

Weiterhin muss der produzierte Wasserstoff nach Anforderungen des Betreibers des Anschlusspunktes einen Druck von 30 bar(g) und eine Reinheit von mindestens 99,96 % (siehe Kapitel 2.1.1) vorweisen.

## 2.2 Gesamtkonzept – Analyse und Definition der standortspezifischen Anforderung an die Ausrüstungen der Speicherforschungsplattform

### 2.2.1 Anforderung an die Ausrüstung der Elektrolyse (AP 1.2.1.)

Ziel ist es den Medienbedarf der Elektrolyse bei den oben definierten Produktionszielen zu ermitteln und nachfolgend die Ansprüche an die Verfügbarkeit dieser Medien an den beiden Standorten zusammenzustellen.

Zu diesem Zweck ein umfangreicher Fragebogen für Hersteller von Elektrolyseanlagen angefertigt, der diverse Details der Anlagen abfragt, welche weit über frei zugängliche Daten hinausgehen (siehe auch AP 2.1.1). Aus den erhaltenen Antworten ging eine hohe Bandbreite der anzunehmenden Medienbedarfe je produzierter Einheit Wasserstoff hervor.

#### Direktverbrauchsmedien (Wasser/Deionat und Strom)

Grundsätzlich benötigt jede Wasserelektrolyse im Betrieb lediglich deionisiertes Wasser und elektrischen Strom. Ersteres wird meistens direkt am Elektrolyseur aus normalem Leitungswasser generiert. Dabei liegt ein Mindestverbrauch von 0,81 Liter Deionat je Nm<sup>3</sup> Wasserstoff durch die rein chemische Massenbilanz an.

Die Antworten zu realen Anlagen, die in den Fragebögen festgehalten wurden, wiesen einen Deionatbedarf von 0,9 bis 2 Liter je Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> auf. Bei Nutzung von Leitungswasser erhöht sich der Volumenbedarf beträchtlich, da die Aufbereitung üblicherweise per Umkehrosmose abläuft und daher als Nebenprodukt eine hochkonzentrierte Salzlösung anfällt, die den Gesamtwasserbedarf erhöht. Für Leitungswasser wurde daher ein Bedarf von 1,4 bis 4 Liter je Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> ermittelt.

Daraus ergeben sich folgende Anschlussgrößen auf Seiten des Wassers unter Maßgabe der Zielgröße von 8.000 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub>:

*Tabelle 3: Anschlussgrößen Wasser*

Medium	Minimal l/h	Maximal l/h
Deionat	7.200	16.000
Leitungswasser	11.200	32.000

Die Größen müssen je nach tatsächlicher Produktionskapazität der Anlagen, die nicht stufenlos einstellbar ist, angepasst werden.

Daraus ergibt sich auch, dass die elektrische Anschlussleistung ebenso abhängig von der herstellereigenen Produktionskapazität ist. Der Strom kann bei den zur Verfügung stehenden Standorten entweder aus dem Netz bezogen oder direkt von einem Windpark zugeleitet werden. Der geplante Windpark weist im Projekt eine geplante Nennleistung von 41,56 MW auf. Der Stromleistungsbedarf der Elektrolyse und somit die Anschlussgröße ergeben sich aus der gewünschten Produktionsmenge von 8000 Nm<sup>3</sup>/h in Kombination mit dem Wirkungsgrad der individuellen Anlage.

Als Strombedarf zur Produktion wurden in den Fragebogen mehrheitlich Werte von 4,9 kWh/Nm<sup>3</sup> bis zum auf Qualität 5.0 aufgereinigten Wasserstoff genannt. Der Energiebedarf ohne Reinigung, entsprechend der Qualität am Kathodenausgang, liegt etwas niedriger, erreicht aber nicht die geforderte Qualität 3.6 und auch nicht dauerhaft gesichert die Grenzkonzentration für Sauerstoff. Da der Reinigungspart ebenso modular eingesetzt wird, wie der Rest des Elektrolyseurs wird daher vorausgesetzt, dass sowohl ein Deoxidizer wie auch eine Trocknung zum Einsatz kommen, womit der oben genannte Energiebedarf bei fabrikneuen Anlagen angenommen werden kann.

Unter Zugrundelegung von 8.000 Nm<sup>3</sup>/h Produktion ergibt sich damit eine Anschlussleistung von 39,2 MW. Die betrachteten Anlagen werden daher in den Stufen betrachtet, die in den zur Verfügung stehenden Konfigurationen möglichst nah an diesem Wert liegen (sowohl mit Über- als auch Untererfüllung).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur der Nennstrom einer Anlage, nicht aber die elektrische Anschlussleistung als fix zu betrachten ist. Auf diesen Nennstrom ist üblicherweise die Balance of Plant und insbesondere die Leistungselektronik ausgelegt. Die Nennanschlussleistung gilt nur im Werksneuzustand, denn eine Degradation der Stacks erfolgt in jedem Fall und führt zu einer höheren benötigten Spannung, um einen gegebenen Stromfluss und somit eine gewünschte Produktionsrate aufrecht zu erhalten. Folglich steigt die Anschlussleistung mit fortschreitender Degradation. Weitere Betrachtungen hierzu werden bei der Berechnung des Jahresbetriebsplanes erläutert.

### Hilfsmedien (Stickstoff und Kühlung)

Weiterhin benötigt die Elektrolyse eine Quelle für Stickstoffgas, welches immer dann zum Einsatz kommt, wenn die Elektrolyse gestoppt wird. Dabei variieren nach Herstelleraussage die Vorgehensweisen, wann dieser benötigt wird. Sofern die Anlage komplett heruntergefahren wird (Shutdown), wird sie vollständig gespült und somit inertisiert. Manche Hersteller nehmen dies auch beim Einstellen eines (Hot) Standby vor, andere nicht. Weiterhin wurden keine Angaben zur Menge des benötigten Stickstoffs je Spülvorgang genannt, sodass hier keine Verbrauchsmenge angegeben werden kann. In jedem Fall muss aber eine Möglichkeit vorgesehen werden, sei es aus Flaschenbündeln, Tanks oder per Leitung.

Je nach Laststufe ist eine Kühlung des Elektrolyseurs notwendig. Die anfallende Kühllast variiert daher stark je nach Betriebszustand und kann nicht pauschal genannt werden. Sie verändert sich außerdem im Laufe der Zeit durch die Degradation, da die erhöhte Leistungsaufnahme sich in verstärkter Abwärme manifestiert. Die konkrete Ausführung der Kühltechnik ist sowohl hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit als auch der verwendeten Medien (Strom für eine Kompressionskälteanlage oder Wasser für eine Durchflusskühlung) vom Herstellerkonzept abhängig und muss in einem detaillierten Engineering betrachtet werden. Sie wird daher in der vorliegenden Konzeptstufe nicht näher ausgeführt, ist aber hinsichtlich des Energiebedarfes laut den Aussagen in den Fragebögen bereits im angegebenen Verbrauch inkludiert.

### Abmedien (Sauerstoff und Salzlösung)

Sofern kein Deionat direkt zur Verfügung gestellt wird, fällt Abwasser an, da eine aufkonzentrierte Salzlösung das Nebenprodukt der Umkehrosmose zur Wasseraufbereitung ist. Die Menge wurde mit 0,4 bis 2 Liter / Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> beziffert. Kosten für die Entsorgung hängen dabei entscheidend von der Beschaffenheit, also der Konzentration der Lösung, ab, hierfür wurden allerdings keine Angaben gemacht. Auch dieser Aspekt muss daher in einem Detail Engineering betrachtet werden und wird hier mangels Daten nicht näher verfolgt.

Weiterhin fällt als zweites Produktgas Sauerstoff an. Dieser weist üblicherweise eine Reinheit von 98% auf. An den zur Verfügung stehenden Standorten gibt es allerdings keine bekannte Möglichkeit diesen direkt zu verwerten, womit er voraussichtlich abgeblasen wird und keinen Einfluss auf das Geschäftsmodell hat. Aktuell laufen verschiedene Forschungsprojekte, die eine wirtschaftlich sinnvolle Verwertung des anfallenden Sauerstoffs untersuchen.

### Systemgrenzen nach Standort

Zusammengefasst lassen sich die beiden Standorte (Leuna und Bad Lauchstädt) insbesondere durch die anliegende Systemgrenze unterscheiden, die durch die Art des verwendeten Wassers charakterisiert wird. In Leuna steht leitungsgebunden direkt Deionat zur Verfügung, in Bad Lauchstädt muss dieses erst durch die im Elektrolyseur integrierte Wasseraufbereitung generiert werden. Es ergaben sich unter Einbezug der oben dargestellten benötigten Typen von Medien und den Gegebenheiten an den beiden Standorten folgende Darstellungen (Abbildung 3 und

Abbildung 4). Die mengenmäßige Verfügbarkeit der jeweils benötigten Medien ist an beiden Standorten gegeben.

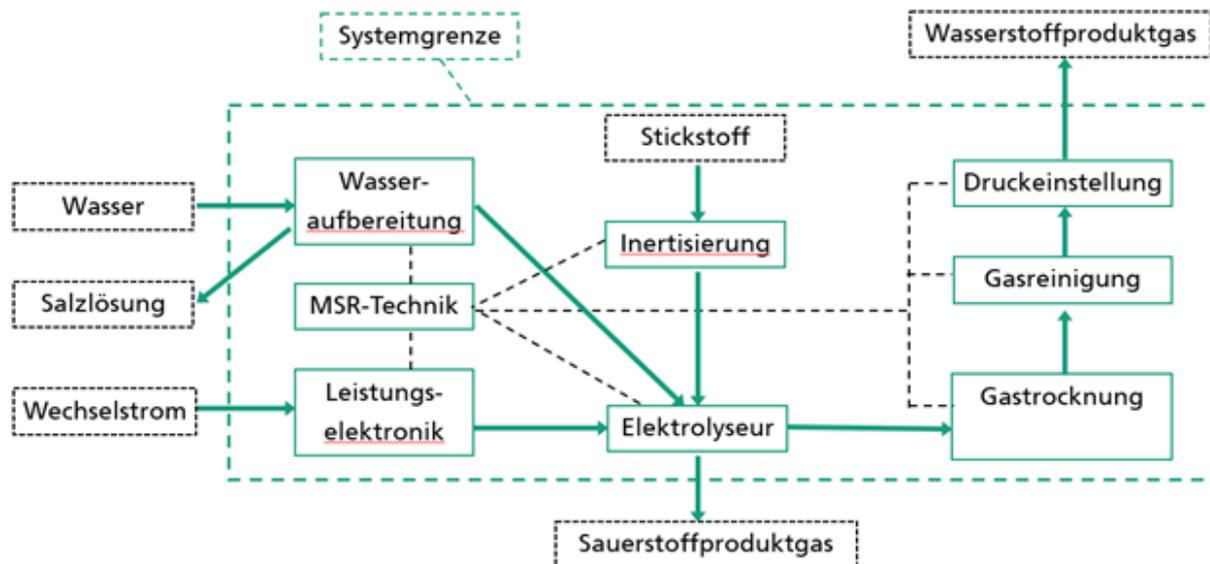


Abbildung 3: Systemgrenzendefinition Standort Bad Lauchstädt (inklusive Wasseraufbereitung)

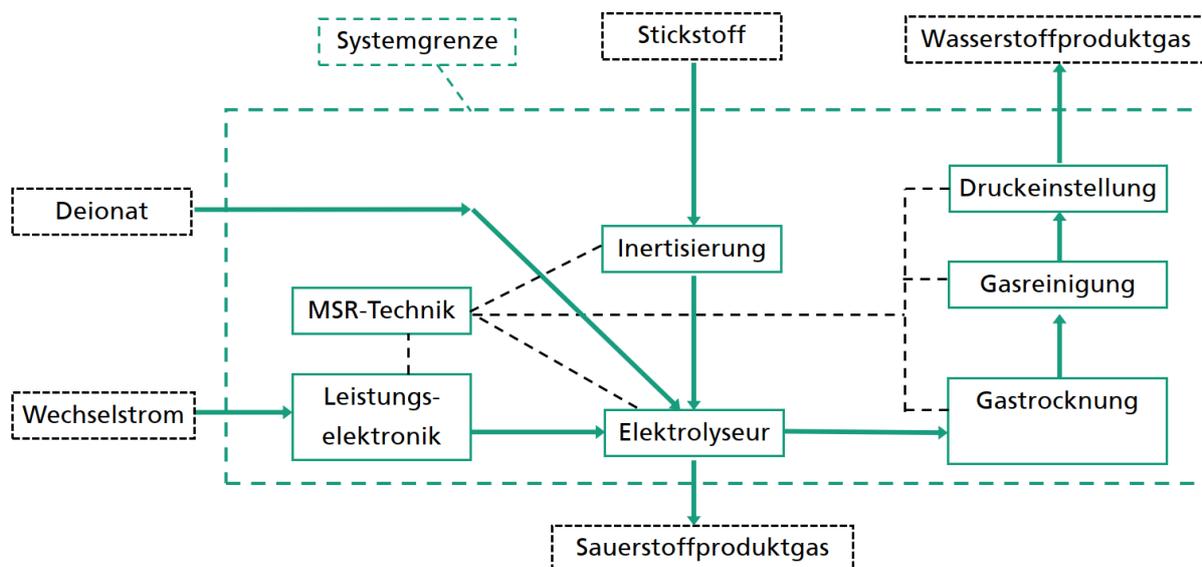


Abbildung 4: Systemgrenzendefinition Standort Leuna (exklusive Wasseraufbereitung)

### 2.2.2 Anforderung an die Ausrüstung des H<sub>2</sub>-Untergrundgasspeichers (AP 1.2.2)

Hinsichtlich der Materialauswahl, welche mit Wasserstoff in Kontakt treten, bestehen im Vergleich zu Methan erhöhte Anforderungen. Diese sind in den jeweiligen Kapiteln 4.2 und 4.3 näher erläutert.

Die Standsicherheit und die Integrität der Kaverne für die Speicherung von Wasserstoff wird mittels eines gebirgsmechanischen Nachweises anhand eines Berechnungsmodells belegt. Dieser wurde durch das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) erstellt und nach Vorlage der

Ergebnisse der Soleendvermessung wird die erreichte Geometrie anhand der Vorgaben nochmals bewertet. Nach Abschluss der Erstvermessung der Kaverne unter Wasserstoff erfolgt eine weitere gebirgs-mechanische Bewertung.

Durch den, nach der untertägigen Umrüstung der Kaverne zur Gaserstbefüllung an der eingebrachten technischen Installation durchzuführenden Funktions- und Dichtheitstest wird der Nachweis der technischen Dichtheit der Installation unter Wasserstoff erbracht.

### 2.2.3 Anforderung an die Ausrüstung der H<sub>2</sub>-Pipeline-Anbindung (AP 1.2.3)

Nach Eruierung der Möglichkeit zur alternativen Transportlösung (Neubau einer Pipeline und Einsatz von Kunststoffmaterialien bei den hier erforderlichen Betriebsdrücken und Kapazitäten) wurde auf Grundlage der begrenzten technischen Betriebsparameter (Rohrdimensionierung und max. Betriebsdrücke) die Variante der Leitungsumstellung in Betracht gezogen. In Kapitel 4.6 sind die wesentlichen technischen Aspekte, die für diese Leitungsumstellung sprechen, nochmal prägnant zusammengefasst.

Grundlage für die Umstellung einer Pipeline auf Wasserstofftransport, die zuvor für den Erdgastransport genutzt wurde, bildet immer eine kapazitive Analyse aus der hervorgehen muss, dass auch das weiterhin bestehende Erdgassystem zukünftig entsprechend kapazitiven Anforderungen und vertraglichen Regelungen weiter betrieben werden kann. Gerade für den Start einer zukünftig zur Erweiterung vorgesehen Substitution des aktuell noch überwiegend fossilen Energieträgers CH<sub>4</sub>, bieten sich im Netz der ONTRAS Netzabschnitte an den Speicherstandorten an. Aufgrund der hohen Bündelung von Transportkapazität und durch die früher notwendige Trennung von Gasen unterschiedlicher Energiegehalte und Zusammensetzungen (Stadtgas und Erdgas) bestehen Speicheranbindungen oftmals aus mehreren Rohrleitungssystemen. Dazu gehören folgende Arbeitsschritte:

#### Prüfung der grundsätzlichen Verfügbarkeit:

Durch eine Simulation der Auswirkungen auf das bestehende Erdgassystems konnte festgestellt werden, dass die durch eine physische Trennung des betreffenden Leitungszuges unter Zuhilfenahme von Netzsteuerungsmaßnahmen (Armaturenstellungen in Netzknoten) keine Einschränkungen im Erdgassystem entstehen.

#### Technischen Analyse der Pipeline und ihrer Einbauteile:

Grundlage dafür bildet das sogenannte Rohrbuch, in welchem sämtliche vorhandenen Dokumente aus der Errichterzeit (zwischen 1975 und 1976) zusammengefasst sind (Abbildung 5, Abbildung 6). Diese Dokumentation beinhaltet:

- Eingesetztes Rohrleitungsmaterial
- Herstellungsart der Rohrsegmente
- Herstellungsart von Krümmern, Bögen, weiteren Formteilen
- Eingesetzte Schweißtechniken
- Abnahme-/Prüfzeugnisse
- etc.

VEG 046 04-01-01, 04-02-01, 04-03-01, 04-04-01, 04-05-01, 04-06-01, 04-07-01, 04-08-01, 04-09-01, 04-10-01, 04-11-01, 04-12-01  
 701 100/001, 000/001, 001/001, 10-20

**Prüfprotokoll**

Tragkabelsysteme mit Luft im Formableitungen

---

Objekt: IEGL Leuna - Bad Lauchstädt (Strom)  
 Investitions: VEB Verbundnetz Gas  
 Gesamtmaßnahmensort: VEB PKM Leipzig  
 Hauptauftragsnummer: VEB Rohrleitungsbau Karl-Marx  
 Ausführer des Betriebs: VEB Rohrleitungsbau Karl-Marx  
 Anfertiger o. von: NP 234 bis NP 42 +  
 Kennlinie: 500 Länge des Tragkabels 4,28

Maßstab: 1:100  
 Datum: 17.3.76

1 Absperrschieber NW 150, ND 64 Nr. 4

Betriebsdruck: 5,5 bar  
 Prüfdruck: 10,5 bar  
 Ausdehnung des Stängels von 9.3.76 14<sup>h</sup> bis 11.3.76  
 Bohrungszustand von 11.3.76 12<sup>h</sup> bis 16.3.76  
 Maßstab von 16.3.76 9<sup>h</sup> bis 17.3.76

Zulässiger Druckabfall: 196 bar  
 Ermittelter Druckabfall: 0 bar

Festgestellte Unfallschäden: keine

Bemerkungen: keine

VEG-Verbindungs-Gesellschaft  
 VEG-046-007-0301-ILKXW108  
 FÜR DIE VERBUNDNETZ GAS  
 046 04-01-01 bis 04-04-01  
 046 04-05-01 bis 04-06-01  
 046 04-07-01 bis 04-08-01  
 046 04-09-01 bis 04-10-01  
 046 04-11-01 bis 04-12-01

Orts: Bad Lauchstädt Datum: 17.3.76

Unterschriften:

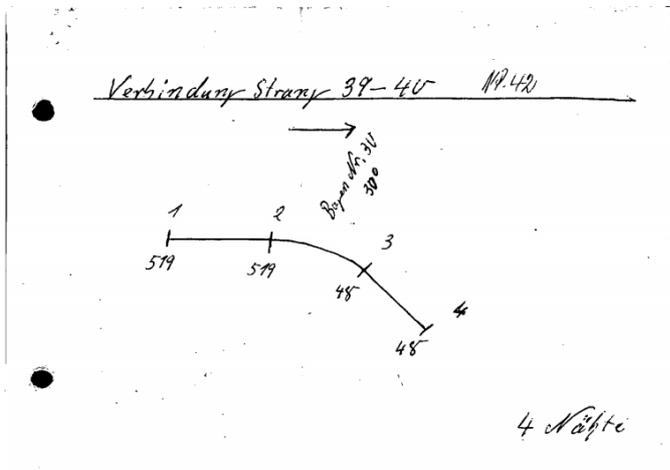


Abbildung 5: Auszug Errichterdocumentation – Beispiel Prüfprotokoll

Abbildung 6: Auszug Errichterdocumentation – Beispiel Strangschemata

Weiterhin wurden die Daten aus den aktuellen Informationssystemen, z. B. detaillierte Trassenverläufe, Höhenschnitte, Grundstücksrechte, Eigentumsverhältnisse von Netzstandorten und Dokumentationen späterer Maßnahmen zusammengetragen und hinsichtlich notwendiger Maßnahmen und Hemmnisse im Umstellprozess untersucht (Abbildung 7 und Abbildung 8).



Auf Basis der umfangreichen Dokumentenlage wurden die notwendigen Analysen in Vorbereitung der Umstellung durchgeführt. Dabei wurde das Rohrleitungsmaterial mit vorliegenden Studien (H<sub>2</sub>-Kompendium) und aktuell gültigen, einschlägigen Regelwerken (EIGA, ASME) abgeglichen. Mit den materialspezifischen Kennwerten und unter Einbeziehung von Erfahrungswerten und, sofern vorhanden, bekannter Vorschädigungen, wurde der betreffende Pipelineabschnitt auf Wasserstoffverträglichkeit untersucht.

Nach Abschluss der Analyse auf Basis der Bestandsdokumente kann festgehalten werden, dass der Leitungszug, besonders mit Hinblick auf das eingesetzte Material, grundsätzlich für den Transport von Wasserstoff geeignet ist.

Darauf aufbauend wurde ein Maßnahmenpaket zusammengestellt, was alle zum aktuellen Zeitpunkt planbaren Maßnahmen zur Umstellung beinhaltet. Die erforderlichen Maßnahmen setzen sich wie folgt zusammen:

- Festlegung Schnittstellen und Ableitung Betriebsparameter
- Aufstellung Maßnahmen zur Trennung Wasserstoff- /Erdgassystem (Separierung)
- Austausch kritischer Einbauteile
- Abstimmung Gasqualität an Schnittstellen
- Konzepterstellung zur netztechnischen Trennung
- Ableitung notwendiger Zusatzmaßnahmen
- Diagnose zur Eignung für den Transport von Wasserstoff
  - Ertüchtigung der Molchschleusen zur Reinigung und Bestanduntersuchung hinsichtlich des Leitungszustandes
  - Molchung zur Feststellung des IST-Zustandes und Ableitung ggf. notwendige Folgemaßnahmen
  - Erweiterungsmaßnahmen hinsichtlich der Leitungsüberwachung (Monitoringsystem)

Zum Zeitpunkt der Arbeiten im Projekt wurde von einer Neugenehmigung nach Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) ausgegangen. Dies hat zur Folge, dass andere Verordnungen und technische Regeln (Rohrfernleitungsverordnung (RohrFLtgV), Technische Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL)) als im Erdgasbetrieb gemäß Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) zur Anwendung kommen. Daraus hätten sich andere Anforderungen an die Sicherheits- und Monitoringsysteme ergeben.

Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich aus dem Pkt. 11.4 der TRFL, indem ein „Verfahren zum Feststellen austretender Stoffe“ (Leckageerkennung- und Ortungssystem (LEO)) gefordert, was im entsprechenden Anhang VIII genauer beschrieben ist. Im Rahmen des Projektes wurden Gespräche mit Herstellern von LEO-Systemen geführt und technische Möglichkeiten der Umsetzung im ONTRAS-Leitsystem untersucht.

Mit der Novellierung des EnWG im August 2021 ist dieser Verfahrensweg nicht mehr anzuwenden und ein Weiterbetrieb einer umgestellten Erdgasleitung auf den Tarnsport von Wasserstoff auch unter Anwendung des EnWG möglich. Diese Erkenntnisse lagen zum Zeitpunkt der Projektdurchführung noch nicht vor.

### 3 Variantenvergleich von Ausrüstungen und Betriebsoptionen

---

#### 3.1 Variantenvergleich der Betriebsoptionen anhand wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte (AP 2.4)

##### Stromeinspeisung und Elektrolyse

Hinsichtlich des Aspektes der Wasserversorgung ist bei Vergleich der beiden Varianten zu erkennen, dass die Option Leuna (Direktversorgung mit Deionat) stets etwas höhere Kosten verursacht als die Option Bad Lauchstädt (Einspeisung von Leitungswasser), was den hohen Kosten des Deionat-Leistungspreises geschuldet ist. Dem steht bei Aufbereitung des Wassers in Bad Lauchstädt die Kosten des Abtransportes des Restwassers gegenüber. Ein Anschluss an die Deionat-Leitung von Linde muss den Kosten der Aufbereitung in Bad Lauchstädt gegenübergestellt werden, um eventuelle Vorteile zu erkennen.

Zudem müssen auch die Kosten, die bei Transport des H<sub>2</sub> durch die Pipeline zum Speicher hin zusätzlich anfallen würden (verglichen mit dem Aufbau der Elektrolyse in Bad Lauchstädt) bedacht werden. Dies ist aktuell allerdings kein Bestandteil der Untersuchungen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sie die Gestehungskosten von Wasserstoff am Eingang der Obertageanlage nochmals nach oben korrigiert werden muss. Es verbleibt somit aus Sicht der Elektrolyse zur Wahl der Vorzugsvariante nur noch der Vergleich zwischen den beiden Stromversorgungsvarianten für den Standort Bad Lauchstädt.

Zusammenfassend ist für die komplexeren Zusammenhänge und Möglichkeiten der Stromversorgung festzustellen, dass deren Kosten weiterhin den größten Kostenfaktor stellen und die Gestehungskosten der Windpark-Option für alle Anlagendatensätze stets unter jenen liegen, die bei Netzkopplung mit den relativ sicher zu erreichenden EEG-Reduzierungen auf 15 % (falls doch eine Anerkennung als Produktion technischer Gase erfolgt) möglich sind. Lediglich bei Ansatz des absoluten Minimalsatzes der EEG-Umlage wie oben erläutert, können die Gestehungskosten der Windpark-Option noch unterboten werden, hier aber nur um wenige Cent je kg Wasserstoff.

Für eine auf der sicheren Seite liegende Kalkulation hinsichtlich möglicher Geschäftsmodelle ist daher rein wirtschaftlich betrachtet zum Zeitpunkt der Bearbeitung die Option „Bad Lauchstädt mit Direktanbindung an einen Windpark“ zu bevorzugen, ohne hier explizit eine spezielle Anlage festzuhalten. Auf technologischer Seite kommt noch hinzu, dass die Kopplung der Multi-MW-Elektrolyse an eine fluktuierende Stromeinspeisung den Herausforderungen der kommenden Jahre entspricht. Eine annähernd gleichmäßige Betreibung der Elektrolyse bei alleiniger Netzkopplung wäre zwar für die Anlage an sich hinsichtlich der auftretenden Degradation günstiger, die neu zu erlangenden Erkenntnisse zur Optimierung der Fahrweise wären allerdings stark eingeschränkt.

Daher hat sich das IMWS, wie auch die anderen Mitglieder des Konsortiums in Anbetracht ihrer jeweils zu untersuchenden Aspekte, für die Windpark-Option als Vorzugsvariante ausgesprochen. Diese wurde entsprechend gewählt und im weiteren Projektverlauf detailliert betrachtet.

### Transportpipeline

Auf Basis der Untersuchungen, zu Investitions- und Betriebskosten für die Betriebsoptionen, hat sich zum Zeitpunkt der Bearbeitung ein hinreichend genaues Bild hinsichtlich des technischen und finanziellen Umfangs ergeben, um die Pipelineumstellung anderen Technologien zum Transport von Wasserstoff gegenüberzustellen. Als Alternativen zum Transport von Wasserstoff zwischen dem UGS Bad Lauchstädt und dem Chemiestandort Leuna wurden zum einen der Bedarfsgerechte Neubau einer H<sub>2</sub>-Transportpipeline und zum anderen der Transport mittels Trailer untersucht.

## 3.2 Ermittlung standortspezifische Investitions- und Betriebskosten für die Elektrolyse (AP 2.1)

### 3.2.1 Vergleich verschiedener Elektrolysetechnologien (AP 2.1.1)

Auf der Basis aktueller Fachliteratur wurde ein Dossier zum Vergleich der heutzutage in industriellem Maßstab verfügbaren Elektrolysetechnologien angefertigt. Dieses beinhaltet sowohl zu erwartende CAPEX und OPEX in Form von Orientierungswerten. Letztere sind durch die Stromkosten jedoch höchst variabel und sind signifikant vom Energieverbrauch des Elektrolyseurs abhängig. Der Fokus des Dossiers liegt daher auf der Herleitung der Wirkungsgrade der verschiedenen Elektrolysetechnologien und den Möglichkeiten, diese durch eine Anpassung des Betriebszustandes zu beeinflussen. Entsprechende Kennlinien des Wirkungsgrades in Abhängigkeit des vorliegenden Auslastungszustandes wurden daraus abgeleitet. Dadurch wird das Spannungsfeld zwischen rein technologischer Effizienz und höchstmöglicher Wirtschaftlichkeit aufgespannt.

Das Dossier wurde allen Partnern zur Verfügung gestellt. Die Erkenntnisse des Dossiers flossen in Form der Identifikation relevanter Variablen auch in den bereits erwähnten Fragebogen für die Anbieter von kommerziell verfügbaren Elektrolyseuren ein.

Seitens der Hersteller wurden trotz expliziter Abfrage, von Unterschieden zwischen den möglichen Konfigurationen der Elektrolyseanlagen in Anbetracht der unterschiedlichen Versorgungssituationen an den Standorten, keine Differenzen hinsichtlich Investitionskosten oder Energiebedarf genannt. Begründet wurde dies mit einem standardisierten, modularen Aufbau der Anlagen. Auch bei Direktnutzung von Deionat entstehen daher bei diesen Größen keine direkten Vorteile.

Im Gesamtergebnis ist festzustellen, dass für die anvisierte Projektnutzung (Wasserstoffbereitstellung für Kavernenbefüllung mit potentiell deutlich bis sehr stark fluktuierender Produktionsmenge) die Anwendung einer Niedertemperatur-Elektrolyseanlage prinzipiell geeignet ist. Die üblichen Technologievarianten unterscheiden sich in ihrer Eignung und ihrem Medienbedarf nicht stark, dennoch weisen PEM-Anlagen eine etwas größere Flexibilität auf, was die möglichen Lastgradienten als auch die möglichen Lastbereiche angeht. In der Größenordnung der Zeitschritte, die seitens der Stromversorgung als Eingangswerte zur Berechnung eines Produktionsverlaufes über das Jahr zur Verfügung stehen (ein Mittelwert je 15 min), fallen die Unterschiede der Lastgradienten aber nicht ins Gewicht. Die möglichen Lastbereiche werden aber bei Nutzung einer direkten Windenergieeinspeisung einen Einfluss auf den Grad der möglichen Ausnutzbarkeit des anliegenden Stromprofils haben.

Für die weitere Bearbeitung standen nun detaillierte Daten für konkrete am Markt verfügbare Anlagen aus den Fragebögen sowie gröbere Daten für Prinzipanlagen aus der Literaturauswertung diverser Studien sowie aus groben Orientierungsangeboten von Herstellern zur Verfügung.

### 3.2.2 Standortvergleich für die Versorgung der Kaverne mit grünem H<sub>2</sub> aus der Elektrolyse (AP 2.1.2)

Analog zu AP 2.1.1 wurde ein Fragebogen für die Betreiber der potentiellen Elektrolysestandorte angefertigt, um die resultierenden Kosten für die benötigten Medien zu kalkulieren. Es wurden folgende Werte genannt:

Tabelle 4: Kosten für benötigte Medien der potentiellen Elektrolysestandorte

	<b>Leuna</b>		<b>Bad Lauchstädt (Windpark)</b>	
	<b>Arbeitspreis</b>	<b>Leistungspreis</b>	<b>Arbeitspreis</b>	<b>Leistungspreis</b>
<b>Strom</b>	0,046 EUR/kWh	(inkludiert)	0,05 EUR/kWh	
<b>Wasser</b>	-	-	1,25 EUR/m <sup>3</sup>	576 EUR/(a*m <sup>3</sup> /h)
<b>Deionat</b>	0,84 EUR/m <sup>3</sup>	11703,68 EUR/(a*m <sup>3</sup> /h)	-	-

Für den Standort Bad Lauchstädt wurde insbesondere die Option des Direktanschlusses untersucht. Der angegebene Arbeitspreis entstammt hier einer Kalkulation des assoziierten Partners Terrawatt. Effektiv unterscheidet sie sich auf finanzieller Seite von der Option mit Netzanschluss lediglich durch die niedrigeren zu leistenden Abgaben und Umlagen. Der Arbeitspreis hingegen bei Netzanschluss ist bedingt durch die Regelungen für Industriestrom annähernd mit denen identisch, die am Standort Leuna zu erwarten wären (0,045 EUR/kWh). Sie war dadurch zum Zeitpunkt der Bearbeitung stets ungünstiger als der Direktanschluss und wird hier nicht weiter im Detail dargestellt.

Für den Strom kommen zusätzlich zu den angegebenen Kosten noch diverse Abgaben und Umlagen. Diese wurden nach der aktuellen Rechtslage in Deutschland analysiert. Zur Erläuterung wurde ein weiteres Dossier („Analyse regulatorischer Strompreisbestandteile in Deutschland nach Anschlusssituation“) angefertigt. Im weiteren Verlauf wird auf eine Aktualisierung hinsichtlich der EEG-Umlage eingegangen, die zum Zeitpunkt der Erstellung des Dokuments noch nicht vorlag. Zusammenfassend fallen folgende Arten von Stromnebenkosten an:

Tabelle 5: Zusammenstellung Stromnebenkosten

<b>Art / Typ</b>	<b>Bemerkung / Variante</b>	<b>Aufschlag in EUR/kWh</b>
EEG-Umlage	Standard, für vollen Verbrauch	0,06756
	Minimal, nur für > 1 GWh	0,001
	Reduziert (15%), nur für > 1 GWh	0,010134
Strom-NEV-Umlage	Für erste GWh	0,00358
	Nur für > 1 GWh	0,00025
Konzessionsabgabe	Für vollen Verbrauch	0,0011
KWKG-Umlage	Für vollen Verbrauch	0,00226
Offshore-Haftungsumlage	Für vollen Verbrauch	0,00416
Abschaltbare-Lasten-Umlage	Für vollen Verbrauch	0,00007
Stromsteuer	Nur auf Verbrauch der Peripherie	0,001537

Die Stromsteuer entfällt laut EnWG vollumfänglich für den Kernprozess der Elektrolyse, also die eigentliche Wasserspaltung und auch die dabei auftretenden Verluste. Sie fällt jedoch für den Verbrauch der peripheren Aggregate (Heizung, Pumpen, Wasseraufbereitung, Kühlung etc.) vollumfänglich an. Diese Aggregate wurden anhand Werten, die aus Studien entnommen wurden, auf 5% des Gesamtverbrauches der Elektrolyseanlage geschätzt. Die Steuer wurde nur für die sich damit ergebenden Strommengen eingerechnet. Der angegebene Wert ist bereits der in erster Stufe reduzierte Steuerbetrag, da die Voraussetzungen für weitere Reduktionsstufen nicht im Vorhinein geprüft werden können.

Für die Optionen mit Netzkopplung fallen alle oben genannten Umlagen an. Die Minimal-Version der EEG-Umlage kann dann angenommen werden, wenn eine privilegierte Netzanschlussstelle genutzt werden kann, dies ist jedoch fraglich. Für eine Kostenannahme auf der sicheren Seite liegend ist hingegen die Version mit Reduktion auf den Satz von 15%, sofern der Elektrolyseur der Branche „Herstellung von Industriegasen“ zuzuordnen ist. Dies könnte eventuell argumentiert werden, aufgrund der besonderen Anschlusssituation (letztenliche Einspeisung in nicht nur örtliches Gasnetz) muss im Zweifel allerdings von einer Definition als Gasversorger ausgegangen werden, womit keine Begrenzung der EEG-Umlage nach dem §64 möglich ist. Sie fällt dann für den vollen Verbrauch vollumfänglich an. Für nähere Details dazu, die dem Stand des EEG 2020 entsprechen, wird an dieser Stelle auf das Dossier verwiesen. Die weiteren Betrachtungen haben alle drei Möglichkeiten finanziell einbezogen.

Für die Direktleitung zum Windpark entfallen bei Personeneinheit von Betreiber von Windpark und Elektrolyseur die EEG-Umlage und die Konzessionsabgabe. Dieser Fall wurde bei den weiteren Betrachtungen angenommen.

Abweichend davon wurde, wie oben bereits erwähnt, Mitte 2021 eine Novelle des EEG veröffentlicht, mit folgenden Neuerungen. Zunächst einmal sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden. §64a erlaubt eine Reduktion der EEG-Umlage auch für Unternehmen, die von §64 nicht erfasst werden, sofern sie über ein elektrochemisches Verfahren Wasserstoff herstellen, das den größten Beitrag zur gesamten Wertschöpfung des Unternehmens leistet. Die Stromherkunft und der Verwendungszweck des H<sub>2</sub> sind dabei irrelevant, wobei das BAFA explizit von der Klassifikation des Statistischen Landesamtes abweichen kann. Hiervon werden also alle im Projekt möglichen Anschlusssituationen erfasst. §69b hingegen erlaubt ein vollständiges Entfallen der EEG-Umlage, sofern der Wasserstoff als Grüner Wasserstoff deklariert werden kann. Es muss sich für eine von beiden Varianten entschieden werden. Es folgen Details zu beiden Varianten.

Für §64a gilt weiterhin die Anforderung, dass ein stromkostenintensives Unternehmen vorliegt, wobei nach Abs. 8 (der noch nicht final von der EU-Kommission genehmigt ist) Unternehmen jeder Rechtsträger ist, der Einrichtungen zur elektrochemischen H<sub>2</sub>-Herstellung betreibt. Daher sind auch Joint Ventures und ähnliches sowie selbstständige und nicht selbstständige Unternehmensteile erfasst. Im Gegensatz zu §64, der umfangreiche Nachweise zu den tatsächlich angefallenen Stromkosten fordert, ist für eine Reduktion nach §64a nur die Stromrechnung des letzten abgeschlossenen Geschäftsjahres nötig. Die Forderung des zertifizierten Energie- und Umweltmanagementsystems verbleibt bei beiden. Außerdem muss nachgewiesen werden, dass die H<sub>2</sub>-Herstellung den größten Teil der Bruttowertschöpfung ausmacht. Dann kann die EEG-Umlage auf 15% begrenzt werden.

Soll sie noch stärker reduziert werden, muss die Stromkostenintensität mindestens 20% betragen (sollte bei Elektrolysebetrieb der Fall sein). Dann kann das sogenannte Super-Cap genutzt

werden, welches die EEG-Umlage auf bis zu 0,5% der Bruttowertschöpfung (mindestens jedoch 0,1 ct/kWh) begrenzt, wofür jedoch im Gegensatz zur 15%-Regelung den Nachweis aus den letzten drei Jahren erfordert.

Die Nachweise der Stromkosten können für neugegründete Unternehmen allerdings auch per Prognosedaten erfolgen, womit die Umlagenbegrenzung dann auf Widerruf erfolgt. Details zur zeitlichen Aufteilung für verschiedene Fälle enthält §64a Abs. 4. Für beide Begrenzungslevel gilt außerdem, dass der Selbstbehalt auf die erste verbrauchte GWh, welcher in §64 noch vorgeschrieben ist, hier entfällt.

In Summe kann allerdings für die im Projekt einschlägige Anlage davon ausgegangen werden, dass das Super-Cap greifen wird. Dies ist als Projektion zu verstehen, da diese Informationen erst nach Bearbeitung aller Arbeitsinhalte, kurz vor Projektende, zur Verfügung standen.

Für den §69b (der zum aktuellen Zeitpunkt ebenfalls noch von der EU-Kommission geprüft wird) hingegen geht es um den vollständigen Entfall der Umlage, solange es sich um Grünen Wasserstoff handelt. Er greift nur für Anlagen mit Inbetriebnahme vor dem 1.1.2030 und erfordert die Einhaltung einer zusätzlichen Verordnung, die durch §93 in die Wege geleitet wird. Diese wurde am 30.06.2021 beschlossen (EEV). Sie enthält folgende Anforderungen an den Strombezug und die Fahrweise des Elektrolyseurs:

- Zu befreiender Strombezug zu 100% aus EE-Anlagen, was dann gegeben ist, wenn 80% der Anlagen, von denen gekauft wird, in Deutschland betrieben werden (die verbleibenden 20% können in anderen EU-Staaten lokalisiert sein) – dafür sind gekoppelte Herkunftsnachweise zu erbringen.
- Genutzter Strom darf NICHT nach dem EEG gefördert sein, um eine Doppelförderung zu vermeiden.
- Der Elektrolyseur soll systemdienlich betrieben werden, was hier durch eine Begrenzung der Volllaststunden auf 5000 pro Jahr versucht wird zu erreichen. Perspektivisch kann dieser Wert eventuell auf 6000 h/a erhöht werden. Darüber hinaus gehende Betriebsstunden erhalten KEINE Befreiung.

Es besteht ein jährliches Wahlrecht, welche der beiden Optionen zur Privilegierung man in Anspruch nehmen möchte, sie schließen sich allerdings gegenseitig aus (Alternativverhältnis).

Die ökonomischen Betrachtungen der weiteren Betrachtungen beinhalten in ihren Berechnungen diese Umstände wie oben erwähnt nicht, da sie zum Zeitpunkt der Berechnung noch nicht bestanden.

### 3.2.3 Ableitung von Investitions- und Betriebskosten für die Betriebsoptionen (AP 2.1.3)

#### Anlagenanschlussgröße und Investitionskosten:

Aus den Literatur- sowie Fragebogendaten wurde eine Kostenmatrix zu den oben vorgestellten Anschlussoptionen erstellt. Diese geht für Anlagen, deren Kennwerte aus der Literatur entnommen wurden, von exakt 8.000 Nm<sup>3</sup>/h Produktion bei Nennlast aus. Für Anlagen, die real am Markt erhältlich sind, bestehen wie oben erwähnt Einschränkungen hinsichtlich der möglichen Größenordnungen. Diese sind nur in diskreten Schritten verfügbar, womit eine Reduktion der Produktion auf bis zu 7.140 Nm<sup>3</sup>/h bei Nennlast einhergeht.

Die Investitionskosten der Anlagen werden in der Literatur in der Dimension „EUR/kW“ angegeben. Dies ist zwar leicht irreführend, da daraus nicht zwingend auch auf die

Produktionskapazität rückzuschließen ist (es fehlt der Einbezug der Effizienz), aber ein anderer Vergleichswert steht aktuell nicht breitbandig zur Verfügung. In der Berechnung der CAPEX wurde deswegen darauf zurückgegriffen.

Die Lebensdauer der Anlagen wurde hier einheitlich auf 20 Jahre festgelegt, womit auch die Abschreibungszeit der Erstinvestition feststeht (im Rahmen der späteren Betrachtung zu Geschäftsmodellen wurden auch davon abweichende Annahmen untersucht). Für diese erste Abschätzung wurde eine vereinfachte lineare Abschreibung genutzt, die in die Wasserstoffgestehungskosten eingeht.

#### Strommengen, Produktionsmengen und resultierende Medienkosten:

Da zu diesem Zeitpunkt die 15-Minuten-Intervall-Ertragskennlinie des Windparks noch nicht zur Verfügung stand, wurde vereinfacht mit einem seitens des assoziierten Partners Terrawatt geschätzten Gesamtertrag des Stroms für die Anschlussoption Windpark gerechnet (141.444 MWh/a). Mit den Nennlasten der genutzten Anlagendaten ergab sich somit eine Volllaststundenzahl pro Jahr von 3.540 bis 4.040. Mangels eines Lastverlaufes wurden Betriebsstunden auch vollständig als Volllaststunden angesehen, was zum Ansetzen des Wirkungsgrades für eine Laststufe von 100% für die gesamte Rechnung führt. Da es sich hier lediglich um eine Abwägung der einzelnen Optionen zur Ermittlung einer Vorzugsoption handelt, die weiter detailliert betrachtet wird, wird dies als hinreichend angesehen.

Für die netzgekoppelten Anlagen wurde eine Verfügbarkeit von 90% angesetzt, was zu einer Volllaststundenzahl von rund 7.900 pro Jahr führt. Für diese Anlagen wurden die Stromkosten in mehreren Varianten ermittelt, die den verschiedenen möglichen Situationen bezüglich der EEG-Umlage entsprechen.

Hinsichtlich der OPEX wurden die entsprechend der für ein Jahr zur Verfügung stehenden Strommengen, ebenfalls benötigten Wassermengen ermittelt und darauffolgend mit den ermittelten Medienkosten kombiniert.

Das Ergebnis waren unter den beschriebenen Rahmenbedingungen Kostenschätzungen im Sinne von resultierenden Gestehungskosten für das Produkt Wasserstoff für jede der Anschlussvarianten mit jeweils jedem betrachteten Anlagendatensatz verfügbar. Diese waren die Grundlage für die angeschlossene Identifikation der Vorzugsvariante.

### 3.3 Ermittlung standortspezifische Investitions- und Betriebskosten für den H<sub>2</sub>-Untergrundgasspeicher (AP 2.2)

#### 3.3.1 Grobplanung der Untertageausrüstung

Die zukünftige Wasserstoffkaverne K Lt 09 befindet sich derzeit unter Sole mit eingebautem Solstrang und Solinstallation. Zur Herrichtung der Kaverne für den Gasbetrieb müssen eine Reihe von Arbeitsschritten erfolgen:

- Rückbau der Solinfrastruktur (Blanketbehälter, Solinstallation (Verrohrung/Leitungen), Mess- und Regeleinrichtungen aus dem Solbetrieb)
- Ausbau der Solegestänge
- Endvermessung der Kaverne unter Sole

- Einbau Letzte zementierte Rohrtour (LzRT)
- Durchführung Dichtheitstest (DHT) der LzRT
- Durchführung Casinginspektion der LzRT und
- Einbau untertägiger Komplettierung:
  - Permanentpacker zzgl. Tailpipe mit Landeebenen für Setzeinrichtungen (Absperr-, Mess-, Kontrollinstrumente etc.),
  - Einbau Gasförderrohrtour (GFRT),
  - Montage Kavernenkopf und Durchführung Funktionstest der Förderinstallation
- Aufbau Soleentleerungskopf und Einbau der Soleentleerungsrohrtour
- Durchführung Funktionstest der Gesamtinstallation
- Aufbau und Betrieb der SEA
- Ausbau der Soleentleerungsrohrtour mittels Hydraulic Workover Unit (HWO; (Snubbing-Unit))
- Finale Installation und Test UTSAV, Komplettierung Kavernenkopf und Antriebe
- Erstvermessung der Kaverne unter Wasserstoff

Die Umrüstung der Kaverne folgt hinsichtlich der Dimensionierung einer Standard-Komplettierung geplant, was bedeutet eine 13 3/8“ Letzte zementierte Rohrtour (LzRT) und ein 9 5/8“ Förderstrang. Alle Bauteile der Bohrung sind für einen Druck bis maximal 140 bar ausgelegt und für eine Wasserstoffumgebung geeignet. Die Beschreibung des geeigneten Werkstoffs erfolgt in Kapitel 4.3.

### 3.3.2 Grobplanung Obertageausrüstung

Die Wasserstoffspeicherung soll über eine neu zu errichtende H<sub>2</sub>-Feldleitung (H<sub>2</sub>-FL) an eine neue, wasserstoffspezifische Obertageanlage (H<sub>2</sub>-OTA) angebunden werden, deren Errichtung südlich angrenzend und außerhalb der bestehenden Obertageanlage des Erdgasspeichers UGS Bad Lauchstädt (Erdgas-OTA) geplant ist.

Die Errichtung und Inbetriebnahme des H<sub>2</sub>-UGS Bad Lauchstädt ist Gegenstand der Phase II, dem Reallaborvorhabens „Energiepark Bad Lauchstädt“ und wird in zwei aufeinanderfolgenden Projektphasen (Phase II.1 und Phase II.2) erfolgen (2-Phasen-Konzept). In Phase II.1 werden die Forschungsbaugruppen der OTA (Gasreinigung, bidirektionale Gasmengenmessung) errichtet, in Betrieb genommen und im Rahmen eines Forschungsbetriebes erprobt. In Phase II.2 erfolgt dann die Errichtung und Umrüstung der restlichen Anlagenteile der Speicheranlage (Verdichter, GDRA, Feldleitung, Kaverne), die Inbetriebnahme der Gesamtanlage und deren Erprobung im Rahmen einer weiteren Forschungsbetriebsphase (inkl. Gaserstbefüllung - GEB).

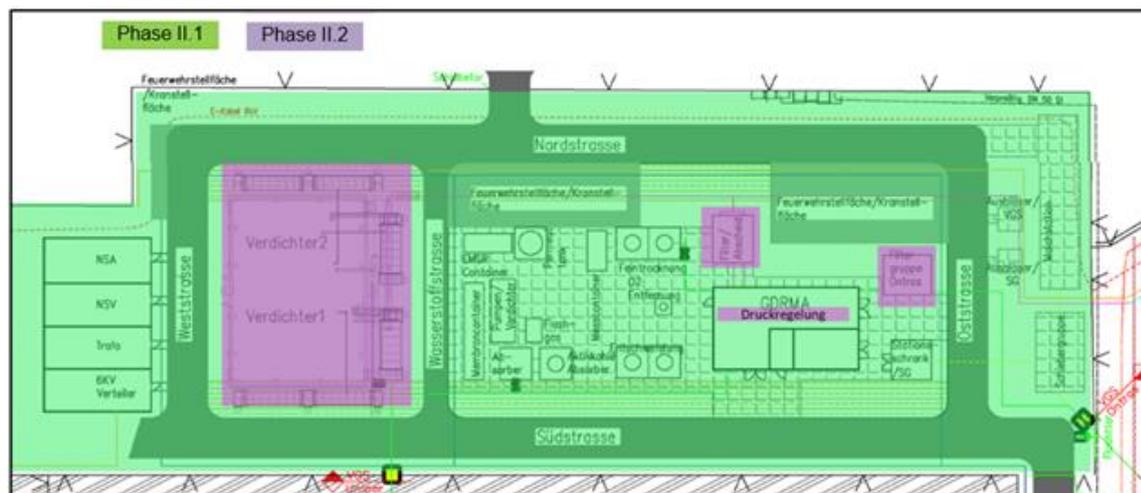


Abbildung 9: H<sub>2</sub>-OTA Layout mit Kennzeichnung der Phase II.1 und II.2

Zur Ermittlung der standortspezifischen Investitions- und Betriebskosten wurden u. a. Abschätzungen aus vorangegangenen Studien herangezogen, die sich mit einer ähnlichen Planung einer OTA befassen haben. Darüber hinaus wurden für spezifische Komponenten Herstelleranfragen durchgeführt und assoziierende Projektpartner interviewt. Die Ergebnisse sind in das Kapitel 7 eingeflossen.

### 3.3.3 Forschungsschwerpunkte für den H<sub>2</sub>- Speicher

Für eine versorgungssichere Energie- und Stoffinfrastruktur mit überwiegend regenerativen Quellen ist die großvolumige, sichere und effiziente Speicherung Grünen Wasserstoffs in Untergrundgasspeichern zwingend erforderlich. Mit der Errichtung einer Wasserstoff-Kaverne in Bad Lauchstädt als saisonalem Großspeicher entsteht für fluktuierende erneuerbare Energien weltweit erstmalig die Möglichkeit Versorgungsengpässe zu überbrücken und damit die vollständige Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Ohne einen Speicher in der geplanten Größenordnung ist die Versorgungssicherheit nicht darzustellen. Die saisonale Speicherfähigkeit stellt einen wesentlichen Aspekt der Systemdienlichkeit dar.

Ziel ist es eine Kaverne mit den zugehörigen obertägigen Anlagen für ein Arbeitsgasvolumen von ca. 50 Mio. m<sup>3</sup> Wasserstoff auszurüsten bzw. zu errichten. Die Energiespeicherkapazität der Kaverne beträgt damit etwa das 4fache aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke. Dazu ist die Obertageanlage so weit zu entwickeln, dass sie die maximal von der Elektrolyse bereitgestellte Wasserstoffmenge (Peak-Kapazität 10.000 Nm<sup>3</sup>/h) in dem angebotenen Leistungsprofil einspeisen kann. Die Obertageanlage der Kaverne wird in der ersten Ausbaustufe im Rahmen des Projektes auf eine Peak-Ausspeiseleistung von ebenfalls 10.000 Nm<sup>3</sup>/h entwickelt. Perspektivisch soll für den späteren Ausbau des Standortes zunächst eine Kaverne mit zusätzlich 65 Mio. Nm<sup>3</sup> Arbeitsgasvolumen einer Gesamteinspeiseleistung von ca. 45.000 Nm<sup>3</sup>/h und einer Gesamtausspeiseleistung von bis zu 100.000 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff haben.

Anders als im regulären Erdgasspeicherbetrieb kommen bei der Speicherung von Wasserstoff im Betrieb mit volatilen Quellen zusätzliche Aufgaben auf die Obertageanlage eines Untergrundgasspeichers zu. Diese Aufgaben lassen sich wie folgt charakterisieren:

- fiskalische Abrechnung und die bilanzielle Abgrenzung von grünem und grauem Wasserstoff,

- Steuerung von ein- und ausgespeicherten Gasmengen parallel zum Elektrolysebetrieb,
- bei gleichzeitiger Gewährleistung der Versorgungssicherheit durch die Mengensteuerung von gespeichertem Wasserstoff zur Sicherstellung der Gesamtliefermengen auch bei schwankendem Betrieb des Windpark-Elektrolyse-Systems.

Diese Aufgaben erfordern in der öffentlichen Gasversorgung eine bidirektionale eichfähige Gasmengenmessung für die Obertageanlage mit mindestens zwei redundanten unterschiedlichen Messverfahren. Derzeit existiert nur ein zugelassenes Messsystem auf der Basis einer Coriolis-Mengenzählung. Für kostengünstige Messverfahren fehlen entsprechende Erfahrungen. Ergänzendes Ziel für die Obertageanlage ist die Weiterentwicklung einer bidirektionalen Gasmengenmessung und Steuerung für die o.g. Aufgaben, entsprechend den Anforderungen der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) im Folgeprojekt Energiepark Bad Lauchstädt (Phase II).

Ein wesentlicher Aspekt der Wasserstoffbereitstellung ist die hohe Reinheit des abgegebenen Wasserstoffs von 99,96 % über den gesamten Leistungsbereich der Ausspeisekapazität. Diese hohen Anforderungen aus der Chemieindustrie gelten perspektivisch auch für die Versorgung von Brennstoffzellen in der urbanen Energieversorgung und der Mobilität. Mithilfe einer für Wasserstoff zu entwickelnder kombinierter, umweltschonender Gasreinigung aus TEG-Trocknung mit Membranregeneration für eine Vortrocknung, einer katalytischen Sauerstoffentfernung und einer Molsieb-Feinreinigung für H<sub>2</sub>S und Kohlenwasserstoffe sind die Anforderungen bezüglich Reinheit des H<sub>2</sub> der Chemieindustrie erfüllbar.

Anders als in der klassischen Route über die Dampfreformierung von Erdgas treten zusätzliche Spurenstoffe wie Sauerstoff und Schwefelwasserstoff auf. Andere Spurenstoffe sind in höheren Konzentrationen (Feuchte) vorhanden. Dabei stellen die Einhaltung der Grenzwerte von kritischen Spurenstoffen (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O, Kohlenwasserstoffe) mit kostengünstigen, skalierbaren Verfahren eine besondere Herausforderung dar.

Zielstellung des Vorhabens Energiepark Bad Lauchstädt (Phase II) ist dann die Erforschung und Entwicklung der kombinierten kontinuierlichen Gasreinigung, welche die wechselnden Abnahmedurchsätze bis zunächst 10.000 Nm<sup>3</sup>/h und später skalierbar bis 100.000 Nm<sup>3</sup>/h sicherstellt.

Anders als Erdgasspeicher oder Wasserstoffspeicher der chemischen Industrie müssen Speicher für grünen Wasserstoff der schwankenden Produktion und den davon abweichenden Lastprofilen folgen. Dies hat eine um mehrere Größenordnungen höhere Umschaltfrequenz von Ein- und Ausspeisebetrieb zur Folge, mit einer entsprechend höheren Belastung aller Speicherkomponenten. Für einen technisch-ökonomischen optimalen Betrieb auf der Basis von Prognosen für Wasserstoffproduktion und -verbrauch sind Prozessmodelle erforderlich, die auch den verschleißarmen Betrieb der kritischen Komponenten (Verdichter, Kaverne Gasreinigung) berücksichtigt. Die CAPEX und OPEX für die SPF sind in Kapitel 7 zusammengefasst.

### 3.4 Ermittlung standortspezifischer Investitions- und Betriebskosten für die H<sub>2</sub>-Pipeline-Anbindung

#### 3.4.1 Entwicklung eines Forschungsprogramms für die jeweiligen Betriebsoptionen der Pipeline-Anbindung (AP 2.3.1)

Hauptziel und Herausforderung für den Wasserstofftransport ist die erfolgreiche Umstellung einer bestehenden Erdgasleitung für den Wasserstofftransport ohne Abstriche an der Transport-

kapazität der Leitung. Die Reinheit des transportierten Gases muss an den Übergabepunkten den Anforderungen der Chemieindustrie genügen. Die Wasserstofftransportleitung dient sowohl zum Einspeisen in den Gasspeicher als auch zum Ausspeisen und muss daher bidirektional betrieben werden können. Dieser Betrieb ist für alle Druckregelstationen, Messeinrichtungen und die Komponenten der bestehenden Leitung des Chemiepark Leuna sicherzustellen. Damit bestehen hinsichtlich der Gasmengenmessung und Gasqualitätsüberwachung prinzipiell die gleichen Entwicklungsaufgaben wie auch für die Obertageanlage des Speichers.

Die Umstellung der Erdgastransportleitung zwischen Bad Lauchstädt und Leuna auf Wasserstoff stellt den Betreiber vor zusätzliche Herausforderungen, die insbesondere durch die Umstellung von Erdgas auf hochreinen Wasserstoff resultieren. Zum einen müssen die technischen Komponenten wie z. B. Armaturen, Schweißnähte, Messanlagen, Regelanlagen, etc. auf ihre Wasserstoffverträglichkeit überprüft werden und zum anderen muss, im Folgeprojekt EPBL aufgrund des Betriebes außerhalb des EnWG, die Genehmigung der Leitung mit den geänderten Rahmenbedingungen erlangt, sowie die dann neu geltenden Regelungen für Betrieb und Instandhaltung umgesetzt werden.

Im Rahmen des Reallaborvorhabens ist das Umstellkonzept methodisch zu detaillieren und durch beispielhafte abgesicherte Arbeitsanweisungen für das Inbetriebnahmeverfahren zu untersetzen. Das Inbetriebnahmeverfahren ist dabei zu evaluieren und zu verallgemeinern.

Zusätzliche Entwicklungsaufgaben kommen der Sicherstellung der Gasqualität auch im Transport des Gases zu. Bedingt durch den historischen Betrieb der Pipeline über mehrere Dekaden sind die Oberflächen der Leitung durch Erdgaskomponenten kontaminiert. Für eine unbestimmte Zeit nach der Umstellung werden die Verunreinigungen vom durchgeleiteten Wasserstoff aufgenommen und können eine Überschreitung der Grenzwerte verursachen. Es ist Ziel des Vorhabens Reinigungskonzepte für die Inbetriebnahme der Pipeline zu entwickeln und zu erproben, die wesentlich zur Minimierung der Verunreinigungen beitragen. Es wird nicht erwartet, dass diese Maßnahmen die hohen Reinheitsanforderungen vollständig erfüllen. Für die Feinreinigung dieser Komponenten ist ein Feinreinigungssystem zu entwickeln welches temporär an der Übergabestation zum H<sub>2</sub>-Chemienetz installiert wird und als Polzeifilter fungiert. Im Rahmen des Forschungsbetriebes ist zu ermitteln über welchen Zeitraum bei gegebenen Randbedingungen kritische Verunreinigungen auftreten können. Die Reinigungs- und Überwachungsmaßnahmen sind zu evaluieren und Handlungsempfehlungen für die Umstellung zu entwickeln.

Der Betrieb von Hochdruck-Wasserstofftransportleitungen erfordert im Gegensatz zum Erdgas-transport nach aktuellen Regularien ein LEO-System. Besonderheiten gegenüber bestehenden Wasserstofftransportsystemen ergeben sich aus dem sehr dynamischen bidirektionalen Betrieb. Das bestehende LEO-System ist auf den bidirektionalen Betrieb weiterzuentwickeln, in das bestehende Gas-Managementsystem zu implementieren und im Forschungsbetrieb zu evaluieren.

#### 3.4.2 Ableitung von Investitions- und Betriebskosten für die Betriebsoptionen (AP 2.3.2)

Auf Basis der Ergebnisse aus AP 1.2.3 wurden die notwendigen Maßnahmen mit Technologien zur Umsetzung untersetzt und auf Basis von Pauschalkostenansätzen bewertet. Hierfür wurde eine Entwurfsplanung durchgeführt, um die Kosten zum Zeitpunkt der Durchführung möglichst nachvollziehbar zu ermitteln und eine Grundlage zu schaffen, um bei einer Projektdurchführung auf dieser Arbeit aufzusetzen.

Die wesentlichen Bestandteile dabei waren:

- Ertüchtigung Molchschleusen für Nullmolchung
- Trennung Erdgassystem/zukünftiges H<sub>2</sub>-System
- Errichtung Gasdruckregel- und Messanlage (GDRMA) zur Übergabe an Anschlusskunden
- Neubau Anschlussleitung ONTRAS Netz – Mitteldeutsches H<sub>2</sub>-Netz der Linde AG
- Installation LEO-System
- Betriebs- und Wartungskosten

Ertüchtigung Molchschleuse für Nullmolchung:

Die bestehenden Molchschleusen entsprechen nicht den Anforderungen der Molchdienstleister. Die neue Molchtechnologie, die bei ONTRAS zum Einsatz kommen soll (Rissdetektionsmolch) erfordert den Um- und Neubau der Molchschleusen.

Trennung Erdgassystem/zukünftiges H<sub>2</sub>-System:

An den Standorten der Molchschleusen in Bad Lauchstädt und im Netzknoten Leuna ist die Pipeline der ONTRAS in das Erdgasnetz eingebunden. Zudem befindet sich im Trassenverlauf der Netzknoten in Milzau. An diesen Punkten sind Arbeiten zur Trennung und Neuverbindung des bestehenden Erdgassystems und zukünftigen H<sub>2</sub>-Systems notwendig. Sie beinhalten unter anderem Tiefbau- und Rohrbaumaßnahmen.

Errichtung Gasdruckregel- und Messanlage zur Übergabe an Anschlusskunden:

Zur Erfassung der transportierten Mengen und zur Verbindung von Transportsystemen mit unterschiedlichen Betriebsdrücken ist die Errichtung einer GDRMA notwendig.

Neubau Anschlussleitung ONTRAS-Netz – Mitteldeutschen H<sub>2</sub>-Netz der Linde AG:

Der Endpunkt der umgestellten Leitung in Leuna liegt ca. 1 km vom Verknüpfungspunkt des bestehenden H<sub>2</sub>-Netzes der Linde AG entfernt. Diese beiden Systeme werden mittels einer neu zu errichtender H<sub>2</sub>-Leitung miteinander verbunden.

Installation LEO-System:

Die Installation LEO-Systems ergibt sich aus der Anwendung der TRFL beim Betrieb von H<sub>2</sub>-Transportleitungen.

Betriebs- und Wartungskosten:

Hier wurden pauschale Ansätze auf Basis von Erfahrungswerten aus dem Erdgasbetrieb gewählt und mit einem Aufschlag für die besonderen Anforderungen für den H<sub>2</sub>-Transport und aus der TRFL (z. B. wiederkehrende Prüfung) versehen. Zusätzlich wurden Kosten berücksichtigt, die sich aus dem Forschungsbetrieb ergeben und Tätigkeiten wie zusätzliches Gasspüren, Prüfung der Armaturen auf innere Dichtheit, zusätzliche Kontrollen betriebswichtiger Punkte, zusätzliche Kontrollen in oberirdischen Anlagenteilen (z. B. GDRM-Anlage), etc. beinhalten.

## 4 Entwicklung der Anlagen- und Versuchspläne für die Systemkomponenten und das Gesamtsystem

---

### 4.1 Planung und Zusammenstellung der Anforderungen an Netzanbindung und Elektrolyseplattform (AP 3.1)

Das Gesamtziel ist ein Betriebsplan für die Elektrolyse unter Beachtung der Kopplungen an die Teile der Speicherforschungsplattform upstream (Windkraftanlagen) sowie downstream (Kompressor der OTA). Das bedeutet, es werden unter Ansatz der Versorgungssituation der Vorzugsvariante alle zur Verfügung stehenden detaillierten Datensätze genutzt, um eine digitale Abbildung der Elektrolyse zu erstellen. In sämtlichen Peripherie-Variationen, die noch weiter erläutert werden, wird dieses Abbild schließlich mit dem zur Verfügung gestellten Windlastprofil in einer Simulation beaufschlagt, die sämtliche bekannten technischen Kennwerte der Elektrolyse berücksichtigt. Es findet somit je Zeitschritt von 15 Minuten eine Auswertung des Ist-Zustandes der Elektrolyse statt, die auch die vorhergehenden Zeitschritte und deren Status (Betriebszustand, Speicherfüllung, genutzter Überlastbetrieb etc.) mit einbezieht (im Falle der Nutzung der prädiktiven Regelung zudem die zur Verfügung stehende Windenergiemenge und der daraus in nachfolgenden Zeitschritten zu erwartende Betriebszustand der Elektrolyse). Es werden damit die Jahresverläufe der Wasserstoffproduktion ermittelt (Wasserstofffluss je Zeitschritt sowie Veränderung des Zeitflusses vom vorherigen zum aktuellen Zeitschritt), die zur Auslegung des Kompressors notwendig sind. Weiterhin erlaubt die Simulation auch die Ermittlung der Wasserstoffgestehungskosten, hierauf wird aber im Kontext der Geschäftsmodelle näher eingegangen.

Hinsichtlich der einzelnen Bestandteile dieser Arbeiten soll zunächst näher erläutert werden, auf welcher Basis die Ergebnisse erzeugt wurden. Wie schon bei vorangegangenen Inhalten dargestellt, wurden Anlagendatensätze aus der Literatur, aus Richtangeboten und aus den Antworten auf den angefertigten Fragebogen erzeugt. Nur Letztere sind allerdings detailliert genug, um damit eine Betriebssimulation bei fluktuierender Einspeisung über 1 Jahr im 15-Minuten-Takt durchführen zu können. Die anderen Sätze würden keine realistische Abbildung des Verhaltens der Elektrolyse erlauben, da zumeist nur die Rahmenkenndaten mit alleiniger Gültigkeit zum Beginn der Lebenszeit der Anlage genannt wurden. Angaben über Grenzzustände, Alterungsverhalten, interne Verschaltung und weitere simulationsseitig benötigte Daten waren hingegen nur in den Fragebogenergebnissen enthalten.

Der Industriebereich der Elektrolyse ist momentan ein stark wachsender Sektor, weshalb die Anbieter der Systeme sehr auf ihren Datenschutz bedacht sind. Dieser durchaus nachvollziehbare Umstand führte allerdings dazu, dass nur zwei Hersteller der als am besten geeignet identifizierten Technologie bereit waren, den Fragebogen letztendlich vollumfänglich auszufüllen. Diese können aus Geheimhaltungsgründen an dieser Stelle nicht explizit genannt werden.

Die beiden Anlagentypen, die in den Fragebogenantworten dargestellt wurden, unterscheiden sich insbesondere durch ihr Verhalten bei Grenzzuständen und die Art und Weise der internen Verschaltung. Diese Faktoren wirken sich auf die Flexibilität der Anlagen insbesondere bei niedrigen Lastzuständen aus. Bei der Nutzung einer direkten Stromeinspeisung aus fluktuierenden Quellen (wie hier aus einem Windpark) hat dies besonders starke Einflüsse auf das Endergebnis bzw. die möglichen Betriebspläne im Jahresverlauf, da diese niedrigen

Lastzustände häufig und in unterschiedlich langen Zeitabschnitten vorkommen. In den weiter unten dargestellten Ergebnissen wird dies deutlich.

Einer der beiden Anlagentypen kann aktuell nur in einer elektrischen Anschlussgröße von rund 18,3 MW beim Hersteller bezogen werden. Diese Größe besteht aus einer großen Anzahl einzelner Stacks, die in 6 Gruppen geteilt werden können. Jede dieser Gruppen kann als individuell steuerbar betrachtet werden. Zur Einhaltung der in den Projektgrundlagen erläuterten Produktionsziele ist bei dieser Anlage, ab hier „Anlage B“ genannt, nur eine Version möglich, die aus dem parallelen Betrieb von zwei solchen Anlagen besteht (Nennleistung 36,6 MW). Zur Verringerung der Kosten besteht die Gesamtanlage dann aber nicht aus zwei unabhängigen Einzelanlagen, sondern aus der entsprechenden Anzahl Stack-Blocks, die mit einer gemeinsamen, größer dimensionierten Balance of Plant (BoP) betrieben werden. Bezüglich der Flexibilität handelt es sich demnach um insgesamt 12 steuerbare Gruppen.

Die andere Anlage, fortan „Anlage A“ genannt, kann in Schritten von 5 MW in ihrer Nennleistung variiert werden. Jeder dieser Blöcke verfügt dabei über eine eigene Balance of Plant; sie sind folglich unabhängig voneinander, jeder Block kann aber nur als Ganzes gesteuert werden und entspricht somit einer steuerbaren Gruppe. Zur Anpassung auf das Produktionsziel können bei dieser Anlage daher zwei Versionen genutzt werden – eine mit Nennleistung 35 MW (bestehend aus 7 Blöcken bzw. Gruppen – Anlage A35) und eine mit 40 MW Nennleistung (bestehend aus 8 Blöcken bzw. Gruppen – Anlage A40).

Zusammen wurden daher drei verschiedene Anlagenversionen detailliert in der gewählten Anschlussoption untersucht (A35, A40 und B).

Trotz der unterschiedlichen Arten der Verschaltung wurde es als Maxime der Betriebsgestaltung gewählt, die Anlage bzw. jede Gruppe möglichst selten dem Stress eines vollständigen Ein- und Ausschaltens auszusetzen, da nach aktueller Studienlage insbesondere in diesen Situationen verstärkte Degradationserscheinungen auftreten.

Um die nachfolgenden Ausführungen verständlich zu gestalten, muss zudem auf einige Eigenarten der untersuchten Anlagen eingegangen werden:

#### Mindestanlagenlast

Jede Elektrolyseanlage verfügt über eine Mindestlaststufe (in Prozent der Nennleistung), unter welcher sie zwangsweise in einen Standby-Zustand fährt, also trotz anliegender Spannung keine Wasserstoffproduktion mehr stattfindet. Das liegt einerseits am Eigenverbrauch des Elektrolyseurs als Ganzes als auch an sicherheitstechnischen Vorgaben zur Vermeidung der Entstehung einer explosionsgefährlichen Atmosphäre in den Produktgasströmen.

Diese Begrenzungen sind für die beiden untersuchten Anlagentypen prozentual betrachtet unterschiedlich hoch, was für alle drei Variationen zu unterschiedlichen untersten Absolutwerten der anliegenden Windenergieleistung führt, bis zu der sie noch zu betreiben sind. Die Begrenzungen gelten dabei für die Anlagen als Ganzes. Für die einzelnen Stackgruppen gelten andere, höhere Grenzen, die ebenfalls nicht unterschritten werden dürfen. Sobald ein Zustand entsteht, in dem alle Stacks unter ihrer internen Grenze belastet werden würden, wird daher eine partielle Abschaltung durchgeführt, was die Gesamtlast auf die übrigen Stacks verteilt. Dies hat Einfluss auf den Verlauf der Laststufe-Wirkungsgradkennlinie der Gesamtanlage im unteren Lastbereich. Eine höhere Anzahl unabhängig steuerbarer Gruppen bzw. kleinere Gruppennennleistungen führen daher zu Anlagen, die flexibler in kleinen Stromleistungsbereichen betrieben werden können.

Sobald jedoch der Grenzwert der Gesamtanlage unterschritten wird, kann entweder ein Hot Standby (es verbleibt der Eigenverbrauch, die Anlage kann jedoch sehr schnell wieder hochgefahren werden) oder ein Cold Standby (vollständiges Herunterfahren (Off-Zustand) und spülen; kein Stromverbrauch im ausgeschalteten Zustand, aber hoher Stress für die Zellen beim wieder einschalten) ausgeführt werden. Um diese Zustände ökonomisch wie technisch möglichst minimalinvasiv gestalten zu können, wurde im Rahmen der Betriebssimulation eine optional einsetzbare prädiktive Regelung entwickelt.

### Überlastoption

Für Anlagentyp A besteht die Möglichkeit, eine Überlastfunktion zu installieren. Diese ist in Ihrem Einsatzumfang begrenzt – sie kann nur über kurze Zeitintervalle genutzt werden und danach muss ein längerer Cooldown erfolgen, bevor die Funktion erneut eingesetzt wird. Sie erlaubt die kurzzeitige Nutzung von Elektroleistung, die über der Nennleistung der Anlage liegt. Durch die dafür nötige Beschaffenheit der Peripherie des Elektrolyseurs zieht sie allerdings erhebliche Steigerungen der Investitionskosten nach sich. Es ist daher zu untersuchen, ob der Vorteil der stärkeren Windlastdargebotsausnutzung die höheren Kosten aufwiegt. Übersichtshalber werden hier die wesentlichen Daten der drei untersuchten Anlagenkonfigurationen dargestellt:

Tabelle 6: Anlagenkonfigurationen

Anlage	A35	A40	B
Nennleistung [MW]	35	40	36,46
Überlastgrenze optional [%]	20	20	0
Wirkungsgrad Neuzustand (BoL) bei Nennlast [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	4,92	4,92	4,92
Mindestlast Anlage [%]	10,00	10,00	1,67
Mindestlast Stack [%]	20,00	20,00	20,00
Interne Verschaltung (Einzelgruppen unabhängig)	7 Stackgruppen, je 5 MW	8 Stackgruppen, je 5 MW	12 Stackgruppen, je 3,04 MW
Standbyverbrauch Anlage	0,35 MW	0,40 MW	0,002 MW

#### 4.1.1 Zusammenstellung der Anforderungen an die Netzanbindung für die Elektrolyse (AP 3.1.1)

Durch die Wahl einer Direktanbindung an den Windpark entfällt der Aspekt der Netzanbindung, der eigentlich grundsätzlich untersucht werden sollte. Es muss folglich lediglich die Direktverbindung zwischen Windpark und Elektrolyse verlegt werden. Diese muss auf die maximal durch die Elektrolyse nutzbare Leistung ausgelegt sein, was von der betrachteten Variante abhängig ist. Bei Varianten, die einen Stromspeicher integriert haben, muss der Speicher entweder direkt neben dem Windpark installiert werden oder die auf ihn entfallende Leistung muss zusätzlich zu jener, die durch die Elektrolyse direkt verbraucht wird, übertragen werden können. Durch die Einbindung der Speicheroption ergaben sich allerdings zahlreiche neue Aspekte, die in Wechselwirkung mit allen anderen Variablen im nachfolgenden AP betrachtet wurden. Sie sollen daher an dieser Stelle nicht isoliert erläutert werden.

#### 4.1.2 Zusammenstellung der Anforderungen an die Elektrolyseplattform (AP 3.1.2)

An dieser Stelle wird zunächst erläutert, welche Berechnungsvarianten betrachtet wurden. Alle basieren zunächst jeweils auf einer der drei Anlagenkonfigurationen A35, A40 oder B. Jede dieser Anlagen kann nun auf verschiedene Art in ihrem Verhalten modifiziert werden, indem zusätzliche periphere Bestandteile integriert werden. Diese sind:

##### Überlastoption (nur für A35 und A40 möglich)

- Erhöhung der Investitionskosten um 25%, da deutlich höhere Anforderungen an die Anlagenteile der BOP und der Leistungselektronik
- Erlaubt temporäre Steigerung der Nennlast um höchstens 25% für 15 Minuten (entsprechend einem Zeitintervall des Windlastganges) zur Ausnutzung von Windenergiemengen, die über der Nennlast der Elektrolyse liegen
- Nach Nutzung muss ein „Cooldown“ erfolgen, der die Auslastung der Elektrolyse für mindestens eine Stunde am Stück auf 100% begrenzt
- Erhöhte Degradation durch höhere Stromdichte
- Geringere Effizienz durch höhere Stromdichte

##### Stromzischenspeicher

- Zwingend nötig zur Deckung des Stromverbrauches im Standby, welcher nicht durch die zur Verfügung stehende Windenergie gedeckt wird
- Betrachtet in drei Größen: Kapazität von 5 MWh oder 10 MWh oder in Form einer Notstromversorgung (bei letzterer jedoch keine Zwischenspeicherung von Windenergie möglich)
- Erlaubt je nach Kapazität die Zwischenspeicherung von nicht genutzter, überschüssiger Windenergie, um entweder Standby-Phasen zu überbrücken oder bei kurzzeitigem Windenergieeinbruch ein Standby und/oder starke Lastschwankungen zu vermeiden
- Verfügt über eine Mindestfüllmenge, die benötigt wird, um die längsten auftretenden Standby-Phasen überbrücken zu können (es kann nur die darüber liegende Füllmenge genutzt werden, um Lastschwankungen auszugleichen)
- Wurde angesetzt mit üblichen Investitionskosten für herkömmliche Batteriespeicher dieser Größenordnung

##### Prädiktive Regelung

- Ohne Nutzung: Elektrolyse fährt auch bei Unterschreitung der Mindestlast nie vollständig herunter, sondern geht lediglich in den (noch immer leicht stromverbrauchsbehafteten) Standbybetrieb, um Degradation bei Neustart zu vermeiden (ein Neustart kann sonst theoretisch schon beim jeweils nächsten Zeitschritt notwendig sein, was ohne Prädiktion nicht zu überprüfen ist, womit der Vorteil des Stromsparens im heruntergefahrenen Zustand durch die erhöhte Degradation bei häufigem aus- und einschalten negiert werden würde)
- Aktivierung überprüft ein variabel festlegbares, zukünftiges Zeitfenster auf die zu erwartende Windenergiemenge in jedem Zeitschritt dieses Fensters (hier also die bekannten nächsten Zeitschritte des Windlastganges, reale Regelungen würden die

Windgeschwindigkeitsvorhersage und daraus abgeleitete Leistung des Windparks nutzen)

- Sofern in diesem Zeitfenster während zu vieler Zeitschritte der Standbybetrieb in längeren, zusammenhängenden Phasen notwendig wäre (Grenzwerte für Dauer und Anzahl der Phasen sind frei einstellbar), versetzt die Regelung die Elektrolyse stattdessen in den Off-Zustand bzw. Shutdown
- Der Off-Zustand wird so lange gehalten, wie das festgelegte Zeitfenster lang ist; nach Ende dieses Zeitfensters wird bei jedem Zeitschritt geprüft, ob Kriterien für das Wiedereinschalten (Halten einer Mindestlast über eine Mindestzeitdauer während danach folgender Zeitschritte) erfüllt sind – sind diese Kriterien nicht erfüllt, verbleibt die Anlage im Off-Zustand

Aus der Kombination dieser Variablen (Anlagentyp, Speichergröße, Überlast ja/nein, prädiktive Regelung ja/nein) wurden somit 30 Varianten gebildet, die in der Simulation betrachtet wurden. Allen wurde zudem ein Degradationsverlauf überlagert, der ausgehend von den Effizienzen im End-of-Life Zustand (nach Aussage der Anlagenhersteller) je Stunde auf die aktuell bestehende Effizienz aufgeschlagen und entlang des Zeitverlaufes additiv berücksichtigt wurde. Mit welchem Faktor diese Beaufschlagung je Zeitschritt stattfindet, ist vom Betriebszustand des jeweiligen Zeitschrittes abhängig (Regelbetrieb, Überlast, Standby, Off, Wechsel von Off in Betrieb).

Die Ergebnisse der Simulation, welche für dieses AP benötigt werden, hängen direkt mit den möglichen Geschäftsmodellen zusammen, da die Anforderungen an die Elektrolyseplattform sich direkt aus der Betrachtung der wirtschaftlichsten Kombinationen aus oben erläuterten Variablen ergeben. Es werden daher nachfolgend die Simulationsergebnisse in mehrere Kategorien geteilt dargestellt.

Zum besseren Verständnis der Grafiken soll noch kurz auf die Benennung der Varianten eingegangen werden. Diese ergeben sich stets aus folgendem Schema:

#### **Anlagentyp\_Überlastfähigkeit\_Nutzung Prädiktion\_Speicherkapazität**

Dabei sind möglich:

Anlagentyp:	<b>A35 oder A40 oder B</b>
Überlastfähigkeit:	<b>Ü</b> (Überlast-Option genutzt) <i>oder</i> <b>O</b> (Ohne Nutzung der Option)
Nutzung Prädiktion (Shutdown):	<b>NS</b> (No Shutdown, also keine Nutzung) <i>oder</i> <b>6S</b> (6 Stunden Shutdown, was sich hier auf das gewählte zu prüfende Zeitfenster bezieht – iterativ haben sich 6 Stunden als gut geeignete Option ergeben, die weder zu häufig noch zu selten den Off-Zustand einleitet)
Speicherkapazität:	<b>5</b> (5 MWh) <i>oder</i> <b>10</b> (10 MWh) <i>oder</i> <b>0</b> (keine Speicherkapazität, stattdessen Notstromaggregat)

Besonders hinsichtlich der Einstellungen der prädiktiven Regelung und der gewählten Speicherkapazität können perspektivisch noch detailliertere Untersuchungen mit höheren Auflösungen der Abstufungen ein genaueres Optimum ergeben. Da der Berechnungsaufwand jedoch je Variante sehr groß ist, konnten solche Konkretisierungen im hier vorliegenden Projekt nicht abgedeckt werden und müssen in kommenden Projekten vorgenommen werden.

Kategorie 1: Verteilung des Stromverbrauches vs. H<sub>2</sub>-Produktion

Es wird betrachtet, welcher Verwendung jede Kilowattstunde, die der Windpark laut prognostiziertem Lastgang im Jahr produzieren kann, zugeführt wird (grafische Darstellung in Abbildung 10). Der Strom kann dabei wie folgt verwendet werden:

- Produktiv, er wird also im Elektrolyseur zu Wasserstoffproduktgas umgesetzt. Dabei ist es unerheblich, ob er direkt verwendet wird oder zunächst im Stromspeicher zwischengelagert wurde (positiver Einfluss auf die Gestehungskosten)
- Zur Versorgung der Elektrolyse während des Standby-Zustandes, er wird also in der Elektrolyse verbraucht, hat aber kein direktes Produkt zur Folge (negativer Einfluss auf die Gestehungskosten)
- Abregelung, was stets dann notwendig ist, wenn eine potentiell zur Verfügung stehende Leistung nicht direkt oder durch Speisung in den Stromspeicher abgenommen werden kann (Direkte Wirkung neutral, da einer Abregelung keine direkten Kosten gegenübergestellt werden. Indirekt, aber negative Wirkung, da weniger Produkt pro Zeiteinheit und somit ungünstigere Verteilung der CAPEX)

Die Darstellung wird dabei als Summe über das volle betrachtete, erste Betriebsjahr formuliert und der ebenso im ganzen Jahr summiert produzierten Wasserstoffmenge in Tonnen gegenübergestellt. Die nachfolgenden Jahre würden sich davon leicht unterscheiden, da die fortschreitende Degradation die Verhältnisse nach und nach immer weiter verschiebt.

Ergänzend sind noch die orange dargestellten Blöcke (Abbildung 10) zu erwähnen, die den Varianten mit Notstromaggregat entsprechen. Diejenigen Strommengen, die durch das Aggregat zur Verfügung gestellt werden müssen, werden auf die Gesamtmenge an Strom aufgeschlagen, da sie aus anderer Quelle aufgebracht werden müssen. Eine Betriebsverlaufoptimierung, wie der Einsatz eines Speichers sie erlaubt, ist dadurch aber nicht möglich.

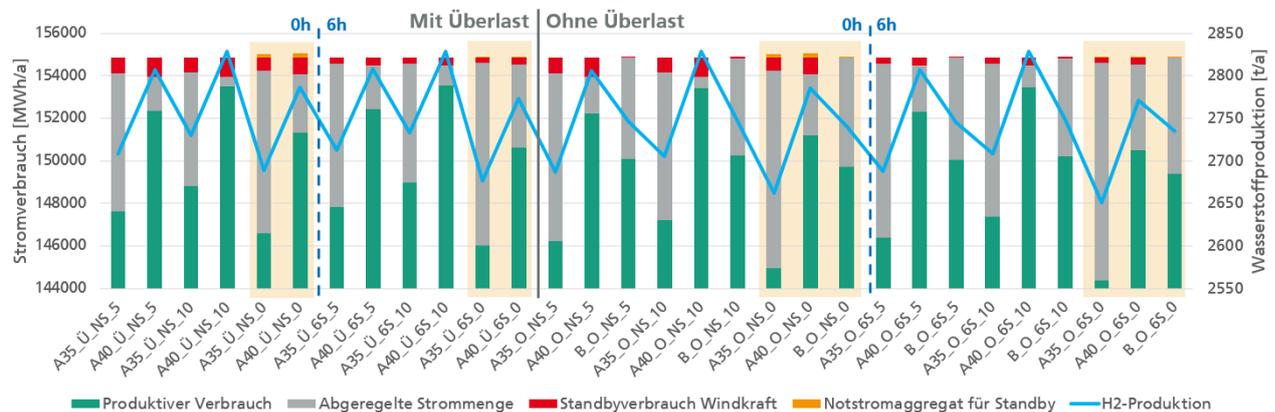


Abbildung 10: Verteilung des Stromverbrauches vs. H<sub>2</sub>-Produktion

Wie deutlich wird, steigt der Standby-Verbrauch mit der Anlagennennleistung und sinkt mit der prozentualen Mindestlast, da sich dadurch das absolute untere Leistungsniveau definiert und daraus die Zeiten resultieren, während derer dieses Niveau unterschritten wird. Kleinere Anlagen verhalten sich hier also effizienter.

Erhöht man die Speicherkapazität, kann der Standby-Verbrauch weiter verringert werden, da mehr Strom zunächst gepuffert und später zur Vermeidung von Standby eingesetzt werden kann. Den gleichen Effekt bringt auch die prädiktive Regelung mit sich, da durch sie längere Standby-

Phasen hinsichtlich des Stromverbrauches übersprungen werden; die Verbesserung beträgt hier rund 60%.

Das Windparkdargebot als Ganzes kann hingegen mit steigender Nennleistung besser ausgenutzt werden, da auch Windlastspitzen öfter und mit größerem Betrag nutzbar sind. Auch hier hat eine steigende Speicherkapazität einen positiven Einfluss. Dies zeigt sich auch in der Jahresproduktionsmenge, die sich vereinfacht trotz unterschiedlicher Charakteristika von Anlagentypen und Kombinationen dennoch proportional zur Nennleistung der Elektrolyse verhält.

### Kategorie 2: Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Betriebszustände

Es wird betrachtet, wie oft welcher Betriebszustand im Jahr auftritt, also wie viele 15-min-Zeitschritte damit gekennzeichnet sind. Dabei wurde, wie in Abbildung 11 ersichtlich, unterschieden in:

- Regelbetrieb, d.h. Auslastung der Elektrolyse zwischen Mindestlast und 100% (inklusive der Zeiten, während denen eine partielle Abschaltung per Gruppenstandby stattfindet)
- Volllastbetrieb, d.h. Auslastung = 100%
- Überlastbetrieb, d.h. Nutzung der Überlastoption, sofern implementiert, und somit Auslastung über 100% bis maximal 125%
- Standby, d.h. Zeiten mit Stromverbrauch des Hot Standby
- Shutdown, d.h. Zeiten im Off-Zustand ohne Stromverbrauch (Cold Standby)

Ergänzt wird jede Variante um einen Zähler für die Summe der Schaltvorgänge, die aus dem Standby oder dem Shutdown zurück in den Regelbetrieb stattfinden. Sofern die prädiktive Regelung nicht genutzt wird (Kennzeichen 0h in der Grafik), verbleibt dieser Zähler für den Shutdown automatisch auf null.

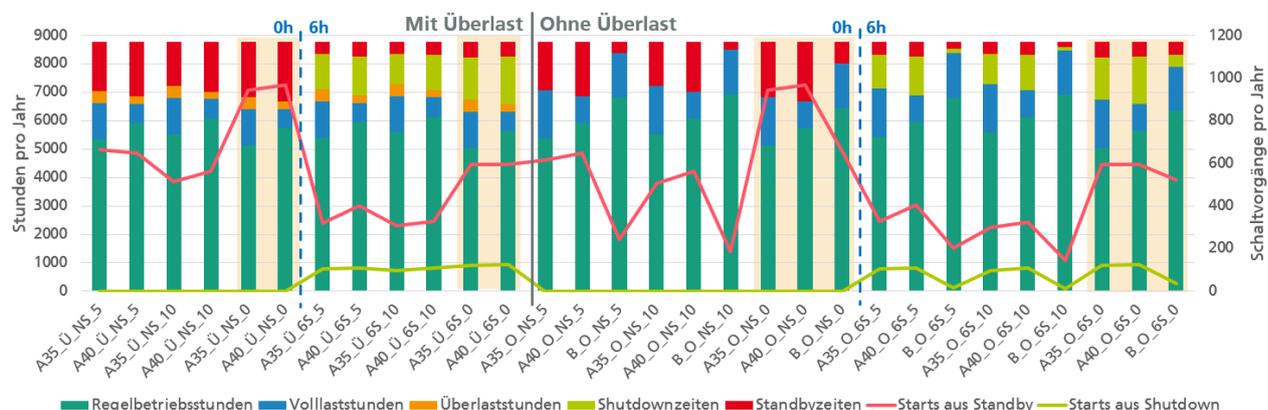


Abbildung 11: Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Betriebszustände

Es zeigt sich, dass zwar die Standby-Zeiten mit den Verhältnissen der Standby-Verbräuche proportional laufen, wie es auch zu erwarten ist. Allerdings liegen die Gesamtbetriebsstunden, betrachtet man nur die Anlagen des Typs A, für kleinere Anlagen höher als die der größeren Anlagen, obwohl Kategorie 1 zeigte, dass mit kleineren Anlagen deutlich mehr Windenergie abgeregelt werden muss. Dies wird auch durch geordnete Jahreslastgänge deutlich, die aus Übersichtsgründen an dieser Stelle aber nicht dargestellt werden. Sie werden exemplarisch am Ende dieses Kapitels gezeigt, um einige Zusammenhänge zu erläutern.

Die enorm hohen Betriebsstunden für Anlagen des Typs B ergeben sich aus deren hoher Flexibilität hinsichtlich der möglichen Laststufen. Das gilt auch für die Varianten, bei denen die prädiktive Regelung genutzt wird. Diese kann bei Typ B nur selten greifen, da längere potentielle Standby-Phasen nur ab und zu eintreten.

Grundsätzlich verringert die prädiktive Regelung die Anzahl der Betriebsstunden in geringem Maße, erlaubt aber eine günstigere Verteilung der Last auf die übrigen Betriebsstunden und verringert die Schaltvorgänge signifikant. Dieser Effekt steigert sich im Zusammenspiel mit einer Speicherkapazität, deren Steigerung grundsätzlich positive Folgen hat.

Als Zwischenfazit lässt sich damit festhalten, dass rein technologisch betrachtet kleinere, flexiblere Anlagen einen gleichmäßigeren Betrieb erlauben, aber auch eine geringere Gesamtproduktion mit sich bringen. Zudem erfahren sie eine stärkere Überlastdegradation, sofern diese Option eingesetzt wird, da sie öfter in diesem Bereich arbeiten als Anlagen mit höherer Nennlast.

### Kategorie 3: Spezifische Wasserstoffgestehungskosten vs. Produktionsmenge

Hier werden nun die Wasserstoffgestehungskosten je Kilogramm für die 30 Varianten betrachtet, wobei unterschieden wird, ob der Effekt der CAPEX mit einbezogen wird oder nicht (siehe Abbildung 12).

Wird dies nicht getan (helle Balken), zeigt sich, dass die OPEX nahezu unabhängig von der Anlagengröße und der Speichergöße sind, obwohl diese wie erläutert die Betriebscharakteristik verändern (vergleiche A35 und A40) und deutlichen Einfluss auf die Gesamtproduktionsmenge haben. Auch die Nutzung der prädiktiven Regelung hat hier keinen deutlichen Einfluss, da die eingesparten Strommengen durch übersprungene Standby-Phasen im Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch sehr klein sind.

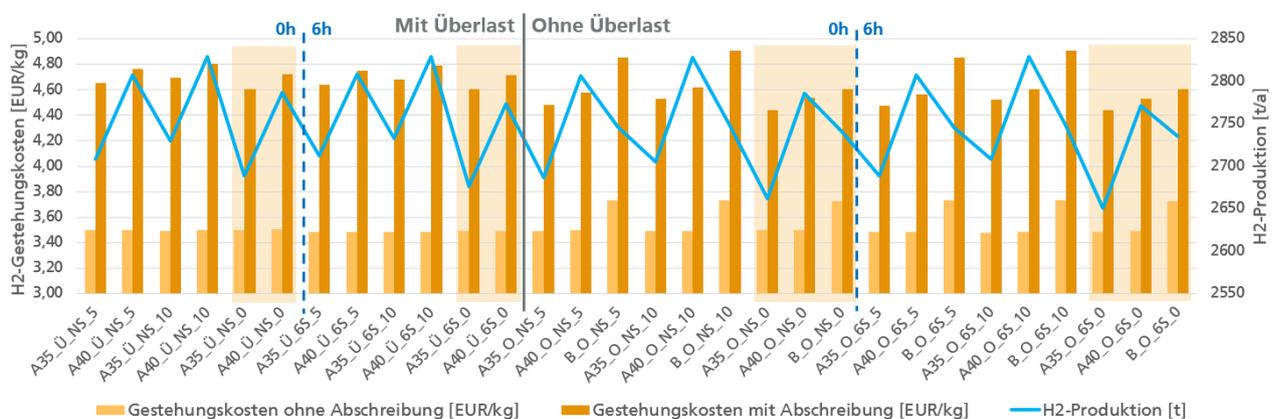


Abbildung 12: Spezifische Wasserstoffgestehungskosten vs. Produktionsmenge

Werden hingegen die CAPEX von Elektrolyse und Speicher mit einbezogen (dunkle Balken), werden deutliche Unterschiede sichtbar. Betrachtet man auch hier zunächst die Anlagen Typ A isoliert, können die kleineren Anlagen ihren Vorteil von geringen Investitionskosten ausspielen, der trotz gleicher Abschreibungszeit bei geringerer Produktmenge erhalten bleibt.

Das macht sich auch bei der Überlastoption bemerkbar – die stets etwas höhere Produktmenge wird mit einem höheren Wasserstoffpreis erkaufte.

Das gleiche gilt für den Effekt des Speichers – bei den aktuellen Preisen für Speicherkapazität kann nur ein rein technischer Vorteil errungen werden, die spezifischen H<sub>2</sub>-Kosten steigen jedoch bei Speichereinsatz. Das rein kostenseitige Optimum ist daher bei der Variante A35\_O\_6S\_0 zu

finden, es liegt allerdings nur 4 Cent unter den Kosten, die die gleiche Konfiguration bei Inkludierung eines 5 MWh-Speichers erzeugt. Der technische Vorteil dieser zweitplatzierten Option ist allerdings sehr deutlich, wenn die Kategorien 1 und 2 betrachtet werden. Detail folgen im Verlauf. Eine Verdopplung der Speicherkapazität bringt hingegen einen verhältnismäßig kleinen zusätzlichen Vorteil mit sich – je nach Konfiguration kann also eine optimale Speichergröße ermittelt werden. Weiterhin ist zu bedenken, dass im Rahmen der hier gezeigten Berechnungen weder die Investitionskosten noch die Betriebskosten des Notstromaggregates eingepreist sind, da im Konsortium noch keine bevorzugte Technologie formuliert wurde. Sie wurde lediglich hinsichtlich der benötigten Strommengen bilanziert. Das bedeutet, dass der geringe Preisvorteil der günstigsten Option durch diese hier nicht eingerechneten Kosten durchaus negiert werden könnte. Die prädiktive Regelung vermindert die spezifischen Kosten stets um wenige Cent.

Anlage B zeigt stets die höchsten Kosten aller Variantengruppen. Dies ist hier allerdings lediglich dadurch bedingt, dass ein fester Abschreibungszeitraum betrachtet wurde. Wie bisher dargestellt wurde, bringt Anlage B weit höhere Betriebsstunden pro Jahr mit sich, da auch bei sehr geringen Lasten produziert werden kann. Die Mengen sind dann sehr gering, stehen aber dennoch einer normalen Produktionsdegradation gegenüber. Da Stacks ab einer gewissen kumulierten Degradation als defekt gelten und ausgetauscht werden, tritt dieser Punkt für Anlage B nach einer kürzeren Gesamtzeit (unter 10a) als bei allen Varianten von Anlage A (stets über 10 Jahre) auf. Das bringt es mit sich, dass die Stacks von Anlage B bei einer festen Gesamtlebenszeit von 20 Jahren zweimal ausgetauscht werden müssen. Die enorm hohen Kosten des Stacktausches (grob kann hier von der Hälfte des Neupreises des gesamten Elektrolyseurs ausgegangen werden) ziehen eine deutliche Steigerung der spezifischen H<sub>2</sub>-Kosten nach sich. In weiteren Arbeiten wurde daher eine Sensibilitätsanalyse zu diesem Aspekt durchgeführt.

**Im Mittel** kann bei den insgesamt technoökonomisch günstigsten, bis hierhin betrachteten Konfigurationen und einer festen Nutzungsdauer von 20 Jahren von einem **Wasserstoffpreis von rund 4,50 EUR/kg** ausgegangen werden.

Dabei ergibt sich das **rein wirtschaftliche Optimum mit 4,44 EUR/kg H<sub>2</sub>** für die Variante A35\_O\_6S\_0:

- Grundanlage Typ A35 (geringere Nennleistung sowie weniger flexible, dafür aber geringere leistungsspezifische Investitionskosten)
- Verzicht auf einen Stromzwischenspeicher (stattdessen Einsatz eines Notstromaggregates zur Überbrückung des Standby-Bedarfes während kurzer Windflauten)
- Nutzung der prädiktiven Regelung zur Vermeidung hoher Standby-Stromverbrauchsmengen (hier mit einem Entscheidungszeithorizont von 6h)
- Verzicht auf Überlastoption der Grundanlage

Wie in den Ergebniskategorien 1 und 2 gezeigt, ergeben sich für diese Variante allerdings auch einige technische Nachteile:

- Hohe Anzahl von Anfahrsituationen
- Geringe jährliche Gesamtproduktionsmenge und Betriebsstundenzahl

- Häufige Abregelung von Windenergie bzw. suboptimale Ausnutzung des Windenergiepotentials

Um diese Nachteile teilweise auszugleichen, kann auf Varianten mit leicht höheren spezifischen Kosten zurückgegriffen werden. Wie oben erwähnt soll hier als Beispiel die Variante A35\_O\_6S\_5 dienen, die gegenüber dem Kostenoptimum lediglich um einen Speicher von 5 MWh ergänzt wurde. Für dieses **technoökonomisch orientierte Kostenoptimum von 4,48 EUR/kg H<sub>2</sub>** ergeben sich folgende Vorteile:

- Reduktion der Anfahrvorgänge aus dem Standby von 596 auf 329 sowie aus dem Off-Zustand von 119 auf 103 für das volle erste Betriebsjahr
- Erhöhung der Jahresproduktion von 2.650 t H<sub>2</sub> auf 2.688 t H<sub>2</sub>
- Erhöhung der Betriebsstunden von 6.749,5 h/a auf 7.134,5 h/a
- Verringerung der abgeregelten Windenergie von 10,22 GWh/a auf 8,18 GWh/a

Es sei außerdem nochmals darauf hingewiesen, dass die Kosten der Variante A35\_O\_6S\_0 aktuell noch nicht die Investitions- und Betriebskosten des Notstromaggregates enthalten, da noch keine Technologie dafür festgelegt wurde. Der Preisunterschied könnte dadurch noch verringert werden. Entsprechend der gewählten Variante ergeben sich schließlich auch die Bestandteile der Elektrolyseplattform, die zu deren Realisierung notwendig sind.

Zuletzt soll hier anhand zweier geordneter Jahreslastgänge auf einige Besonderheiten eingegangen werden, die sich bei der Kombination der verschiedenen Optionen ergibt. Dafür wird in Abbildung 13 zunächst die minimalistischste der vorhandenen Kombinationen betrachtet, Variante A35\_O\_NS\_0 (kleinste Grundanlage, keine Überlastoption, keine prädiktive Regelung des Off-Zustandes, kein Speicher):

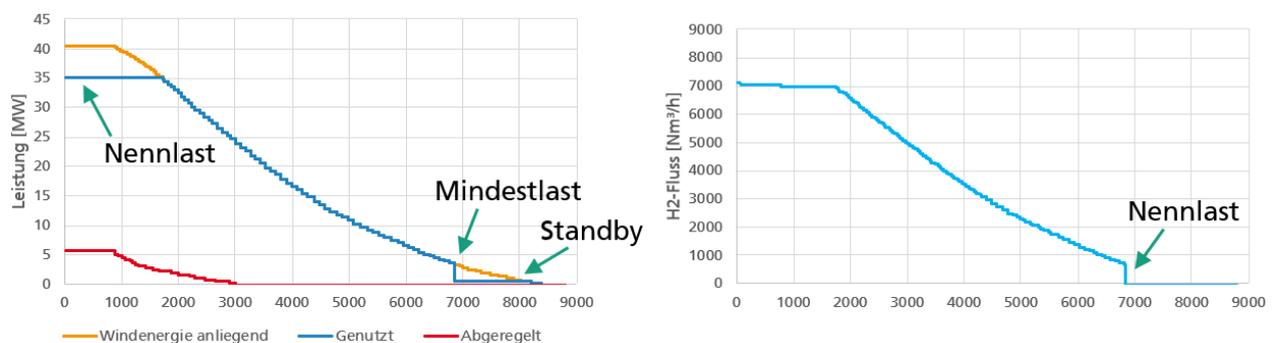


Abbildung 13: Geordnete Jahresgänge von elektrischer Leistung (links, unterschieden in anliegend, genutzt und abgeregelt) sowie resultierendem H<sub>2</sub>-Produktgasfluss für Simulationsvariante A35\_O\_NS\_0

Im linken Teil sind die geordneten Jahresgänge der zur Verfügung stehenden Windenergie (orange), der genutzten Windenergie (blau) sowie der zwangsweisen abzuregelnden Windenergie (rot) jeweils in MW dargestellt.

Das linksseitige Plateau der Leistung ergibt sich aus der Nennlast des Elektrolyseurs; alle darüber liegenden Leistungen des Windparks müssen vollständig abgeregelt werden. Der plötzliche Abbruch des blauen Verlaufes ergibt sich aus der Mindestlast der Anlage (bei A35 entspricht dies 3,5 MW), unter welcher der Elektrolyseur in den Standby schalten muss. Der Verbrauch in diesem Zustand ist dadurch dargestellt, dass die blaue Linie nie den Wert Null erreicht, auch wenn die erzeugte Windenergie unter dem Standby-Bedarf liegt. Hier greift dann das Notstromaggregat ein.

Der rechte Teil der stellt den Wasserstofffluss in jedem Zeitintervall dar. Der nicht glatt verlaufende linke Teil der Funktion ist dadurch bedingt, dass auch bei Annahme einer konstanten Nennlast die Effizienz des Elektrolyseurs durch Degradationsvorgänge allmählich zurück geht und somit die Produktionsrate sinkt. Die rechtsseitige Stufe im Verlauf ist wiederum durch die Mindestlast der Anlage bedingt, die ihrerseits von der Nennlast abhängt. Anlagen höherer Nennlast würden diese Stufe bereits bei niedrigeren Stundenzahlen aufweisen. Im Gegensatz zum Stromverbrauch geht die Produktionsrate im Standby allerdings tatsächlich auf null.

Im Kontrast dazu soll nun in Abbildung 14 die maximal ausgestattete der betrachteten Kombinationen mit der gleichen Grundanlage A35 dargestellt werden, Variante A35\_Ü\_6h\_10 (kleinste Grundanlage, Nutzung der Überlastoption, Nutzung der prädiktiven Regelung des Off-Zustandes, 10MWh Speicher):

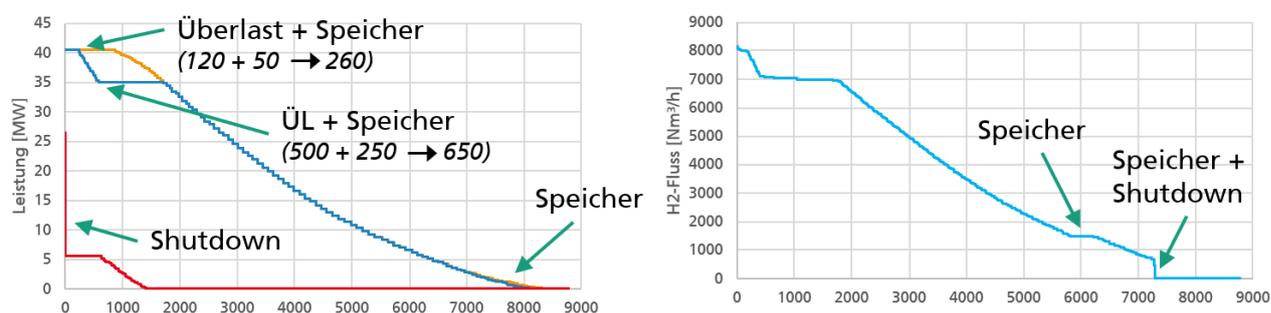


Abbildung 14: Geordnete Jahrgänge von elektrischer Leistung (links, unterschieden in anliegend, genutzt und abgeregelt) sowie resultierendem H<sub>2</sub>-Produktgasfluss für Simulationvariante A35\_Ü\_6h\_10

Die Leistungsdarstellung weist im linken Bereich eine Treppung auf. Diese ist primär durch die Überlastoption bestimmt, da diese eine direkte Nutzung von Windlastspitzen erlaubt. Allerdings hat auch der Speicher hier einen Effekt, da auch in Zeiten, in denen die Elektrolyse nicht in Überlast betrieben werden kann, die darüber hinausgehende Windleistung im Speicher gepuffert und somit nicht abgeregelt werden muss. Sie kann somit später genutzt werden. Die Zahlen sind dabei wie folgt zu verstehen:

Die erste Ziffer stellt die Stundenzahl dar, bei welcher der gekennzeichnete Knick in der Verlaufskurve auftritt, sofern nur die Überlastoption genutzt wird, aber kein Speicher installiert ist (dementsprechend ein Vergleichswert zur Variante A35\_Ü\_6h\_0). Die zweite Ziffer gibt die Lage des Knickpunktes für die Variante an, bei der zwar der gleiche Speicher wie hier grafisch dargestellt genutzt wird, jedoch keine Überlastoption (was der Variante A35\_O\_6h\_10 entspricht). Die Ziffer nach dem Pfeil gibt die Stundenzahl der kombinierten Wirkung an, die hier auch grafisch zu sehen ist.

Damit zeigt sich für die Ausnutzung der maximalen, über die Elektrolysenennlast hinausgehende Windenergie, dass sie am stärksten nutzbar ist, wenn sowohl Speicher als auch Überlast verwendet werden. Die Wirkung übersteigt bei Kombination dabei die isolierten Wirkungen beider getrennter Optionen (siehe oberer Knick der Nutzungskurve).

Für den unteren Knick, welcher den Übergang auf den Betrieb in Nennlast kennzeichnet, findet ebenso eine kombinationsabhängige Verschiebung statt. Die Abtreppung resultiert aus Zeiten, in denen die Windlast zwar einen Überlastbetrieb seitens der Elektrolyse erfordert, die Windlast zugleich aber nicht der Nennlast des Windparks entspricht, sondern darunterliegt. Die Lage dieses Punktes ist zwar ebenso am günstigsten, wenn beide Optionen zugleich verwendet

werden (Stundenzahl 650), jedoch bewirkt hier eine Kombination nicht mehr als die isolierten Wirkungen der Einzeloptionen.

Der rechte Bereich der Nutzungskurve zeigt hier nicht den plötzlichen Abbruch, wie er bei der zuvor dargestellten, minimalistischen Kombination zu sehen war, da hier auch Windenergie-mengen, die bei geringer Momentanleistung zur Verfügung stehen, genutzt werden können, indem sie zunächst im Speicher gepuffert und später produktiv verwendet werden. Anliegende Windenergie und genutzte Menge sind hier dennoch nicht vollständig deckungsgleich, da weiterhin geringe Mengen abgeregelt werden müssen, auch im Schwachleistungsbereich.

Der hohe linksseitige Peak der Abregelungskurve („Shutdown“) ergibt sich aus kurzzeitigen starken Windböen, die während Phasen auftreten, die innerhalb einer Off-Zustands-Periode auftreten. Sie werden seitens des Elektrolyseurs übersprungen, da es nicht lohnenswert ist, für solche kurzzeitigen Peaks die Anlage wieder hochzufahren. Der Schwachlastbereich der Abregelungskurve fällt jedoch weit geringer aus als bei der Minimalversion.

Ähnliches ergibt sich für den Produktionsmengenverlauf. Der mit „Speicher“ gekennzeichnete Kurventeil stellt Bereiche dar, in denen dank der im Speicher zwischengelagerten Strommengen eine Produktion auf 20% der Nennleistung, was der Minimallast jedes Einzelstacks entspricht, weiter betrieben werden kann. Dies tritt ein, wenn in Zeiten hoher Windlasten kurze Zeitabschnitte eintreten, die aus Sicherheitsgründen einen Lastabwurf seitens des Windparks erfordern (Überschreitung einer Grenzwindgeschwindigkeit). Damit würde ein plötzliches Schalten in den Standby erforderlich werden, da die zur Verfügung stehende Leistung schlagartig auf null absinkt, nur um direkt danach wieder in die reguläre Belieferung durch den Windpark zu wechseln. Um diese starken Gradienten zu vermeiden, werden die Phasen des Lastabwurfes mit Strom überbrückt, der im Speicher vorhanden ist. Die Fläche unter der Produktionskurve wird somit direkt gegenüber der Minimalversion erweitert.

Gleiches gilt für das rechte Ende der Produktionskurve. Hier wird ebenfalls eine Flächen-erweiterung durch den Speicher erlaubt, hier allerdings durch eine Überbrückung von Schwach-windzeiten. Kurze Flauten, die eine so geringe Windenergie zur Verfügung stellen, dass ein Schalten in Standby notwendig wäre, werden stattdessen mit zwischengespeichertem Strom auf Mindestlastniveau durchfahren. Der Bereich ist mit „Speicher + Shutdown“ bezeichnet, da diese Nutzung umso häufiger möglich ist, wenn größere Mengen an Strom zwischengespeichert werden, die im Rahmen von Off-Zuständen nicht direkt genutzt werden können. Weitere Beispiele dieser Art würden an dieser Stelle den Rahmen des Berichtes sprengen. Die Kurvenverläufe sämtlicher 30 Varianten wurden den Partnern allerdings zur Auslegung der OTA zur Verfügung gestellt.

Mit den Erläuterungen zu den bisherigen Arbeiten sind ebenso die Inhalte von AP5 seitens des IMWS abgedeckt. Hier war für AP 5.2.1 das Ziel, den Forschungsbetriebsplan zu konkretisieren und damit das DBI zu unterstützen, was in Form der Analyse der 30 Varianten erfolgt ist. Hier sei darauf hingewiesen, dass die Inkludierung der Varianten, die statt einem Speicher ein Notstromaggregat enthalten, auf Wunsch der Partner erstellt und bearbeitet wurden. Die dazu im Vornherein nötigen Abstimmungen können unter AP 5.3.3 zusammengefasst werden, dass eine iterative Anpassung der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse und Unterlagen per partnerüber-greifender Abstimmung zum Ziel hatte. Außerdem sind diesem AP die Erstellung der geordneten Jahresgänge zuzuschreiben, die ebenfalls auf Wunsch der Partner angefertigt wurden. Zusammen mit den in AP1, 2 und 3 erläuterten Analysen zu Anschluss-, Anlagen- und Medienkennwerten wurden sie an die Partner übergeben und somit die Erstellung der Genehmigungsunterlagen unterstützt.

## 4.2 Entwicklung der Untertageanlage für die H<sub>2</sub>-Kaverne (AP 3.2)

### 4.2.1 Geomechanischer Standsicherheits- und Integritätsnachweis der H<sub>2</sub>-Kaverne (AP 3.2.2 und 3.2.3)

Als Voraussetzung für die Nutzung einer Salzkaverne als Wasserstoffkaverne ist es u.a. erforderlich einen gebirgsmechanischen Eignungsnachweis der Dichtheit und Integrität der Salzgesteine zu erbringen. Zur Nutzung ist die Kaverne Lt 09 des UGS Bad Lauchstädt der VNG Gasspeicher GmbH (VGS) vorgesehen, welche soltechnisch fertiggestellt ist und zur H<sub>2</sub>-SpeicherKaverne ausgerüstet werden soll. Für den Eignungsnachweis wurde mit Hilfe eines Berechnungsmodells und der aktuellen Geometrie der Kaverne Lt 09 entsprechend der Ultraschall-Vermessungen der Betrieb der Wasserstoffspeicherung simuliert. Lokations-spezifische Randbedingungen, aus den Laborversuchen abgeleitete Materialparameter und das speichertypische Druckregime wurden in das Modell implementiert. Anhand des Modells wurde der Nachweis hinsichtlich der Stabilität und Integrität im Betriebszeitraum der Kaverne erbracht.

Wesentlich für die Anlage, den Betrieb und die Speicherung von Wasserstoff in der Kaverne Lt 09 ist die Beachtung folgender gebirgsmechanischer Sicherheitsaspekte. Zum einen muss für den langfristigen Speicherbetrieb die Standsicherheit der H<sub>2</sub>-Kaverne am Standort gewährleistet werden, d. h.:

- die Tragfähigkeit der die Kavernen überspannenden Steinsalzschwebe unter Beachtung der wirkenden Deckgebirgslast;
- die Stabilität der Pfeiler zwischen benachbart gelegenen Kavernen unter Beachtung der herrschenden Gebirgsdruckbelastung;
- die Standfestigkeit der Kavernenkontur unter der Wirkung der speicher-druckbedingten Beanspruchungen, insbesondere die Vermeidung fortschreitender Konturbruchprozesse.

Zum anderen muss die Dichtheit der Kaverne (Integrität der die Kaverne umgebenden Salinarbarriere) gegeben sein, d. h.:

- die geologische Dichtheit der die Kaverne in ausreichender Mächtigkeit umschließenden Steinsalzzone in Abhängigkeit von der Gasdruckbelastung des Salzgesteins und dem wirkenden Gebirgsdruck;
- die technische Dichtheit des Verbundes Rohrtour-Zement-Steinsalz in der Kavernenbohrung unter Wirkung der Gebirgsspannung im Kavernendach sowie der konvergenzbedingten vertikalen Dehnungsbeanspruchungen.

Außerdem sind unzulässige Beanspruchungen der Tagesoberfläche durch Senkungen zu vermeiden. Bei der Berechnung der Volumenkonvergenzrate des Kavernenhohlraums und den daraus resultierenden Senkungen wurde das konkrete Speicherbetriebsregime der Kaverne (minimal und maximal zulässige Innendrucke, zulässige Ein- und Ausspeicherraten sowie die Standzeiten im Bereich geringer Innendrucke) berücksichtigt.

#### 4.2.2 Laboruntersuchungen an lokationsspezifischen Kernmaterial (AP 3.2.1)

Im Rahmen der Erstellung der Kavernenbohrungen Bad Lauchstädt Ug Lt 09<sup>1</sup> wurden Bohrkerne für gesteinsmechanische Untersuchungen in jeweils drei repräsentativen Teufenbereichen im Gebiet der anzulegenden Kavernen gewonnen:

1. T1: 825 – 852 m, letzte zementierte Rohrtour (Casing shoe)
2. T2: 900 – 982 m, Kavernenhimmel, oberer Kavernenabschnitt
3. T3: 1076 – 1100 m, unterer Kavernenabschnitt

An den Kernproben wurden Triaxiale Druckversuche (TC), Triaxiale Kriechversuche (TCC), Triaxiale Relaxationsversuche (TCR) und Triaxiale Permeationsversuche (TCP) durchgeführt<sup>2</sup>. Die Ergebnisse der triaxialen Druckversuche belegen das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Steinsalz des Teutschenthaler Sattels bei in situ relevanten Temperaturen.

Das Langzeitverformungsverhalten von Steinsalz aus den Bohrungen Lt 09 wurde mit Kriech- und Relaxationsversuchen untersucht. Das Kriechverhalten ist im Vergleich zu den Erfahrungswerten (Kriechgesetz BGR-a) als verformungsfreudig einzuschätzen. Für die vollständige Beschreibung des gesteinsmechanischen Verhaltens des in den Bohrungen im Kavernenhorizont anstehenden Steinsalzes wurden weitere Untersuchungen, wie Permeationsversuche und Schwelllastversuche bei Gebirgstemperatur, durchgeführt. Die im Labor gemessene initiale Permeabilität  $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$  bestätigt die Dichtheit des Steinsalzes in dem für die Gasspeicherung vorgesehenen Teufenhorizont. Im IfG sind die Ergebnisse<sup>2</sup> der Laboruntersuchungen sowie die Ableitung der erforderlichen Parameter als Eingangsgrößen für die numerischen Modellierungen auf Grundlage der Versuchsergebnisse und der Erfahrungen des Verhaltens von Steinsalz der Lokation Teutschenthaler Sattel ausführlich beschrieben. Im Rahmen des Forschungsprojektes H<sub>2</sub>-Forschungskaverne wurden Triaxiale Druckversuche (TC) am Staßfurt-Steinsalz der Bohrung Lt 09 durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen das bereits 2011 gewonnene Festigkeitsverhalten des Steinsalzes. Von elementarer Bedeutung für die Wasserstoffspeicherung ist die Dichtheit des Materials gegenüber dem Speichergas. Demzufolge wurden Permeabilitätsuntersuchungen am Steinsalz mit Wasserstoff durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Permeabilitäten von Staßfurtsteinsalz gegenüber Wasserstoff im Vergleich zum Testmedium Stickstoff bei unterschiedlichen Differenzdrücken ( $\sigma_{\text{MIN}} - p_{\text{FI}}$ ) im ähnlichen Erwartungsbereich liegen (Abbildung 15). Im Druckbereich, der sich an der Kavernenkontur nach Anfahren des minimalen Speicherdruckes einstellt, streut die Permeabilität um die oben genannte initiale Permeabilität von  $k \leq 10^{-20} \text{ m}^2$  und bestätigt somit die Dichtheit des Salzes gegenüber Wasserstoff. Untersuchungen an Bohrlochzement sowie Steinsalz wurden ebenfalls im Basisprojekt H2-UGS „Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen-Untergrundspeichern zur geologischen Speicherung von Wasserstoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen“ durch die TU Bergakademie Freiberg (TU BAF) durchgeführt<sup>3</sup>. Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass eine initiale Dichtheit des Baustoffes Zement und des Speichergesteins gegenüber Wasserstoff gegeben ist und dass die gemessenen Permeabilitäten im Erwartungsbereich liegen.

---

<sup>1</sup> UGS (2010): Geologischer Abschlussbericht zur Bohrung Bad Lauchstädt Ug Lt 9/2009 02.03.2010. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

<sup>2</sup> IfG (2011b): Gesteinsmechanische Untersuchungen an Steinsalz der Bohrungen Lt 09 und Lt 10 für die Anlage von Kavernenspeichern im Bereich des Teutschenthaler Sattels. 02.08.2011 (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

<sup>3</sup> KIRCH, M.; AMRO, C.; FREESE, C. (2020): Evaluierung der Bohrintegrität von Wasserstoffspeicherkavernen – Evaluation of the well integrity of hydrogen storage caverns. EEK – Erdöl Erdgas Kohle 136 Jg. Ausgabe 5 / 2020

Die Kontaktfläche zwischen Zement und Salz, welche bei der Casing-Installation (LzRT) bezüglich der Kavernenintegrität eine entscheidende Rolle spielt, wurde durch das IfG bereits im Jahr 2014 untersucht<sup>4</sup>. Es konnte gezeigt werden, dass die Permeabilitäten bei Wasserstoff im Vergleich zu Untersuchungen mit Stickstoff – unter Beachtung gleicher Druckrandbedingungen – nahezu identisch sind.

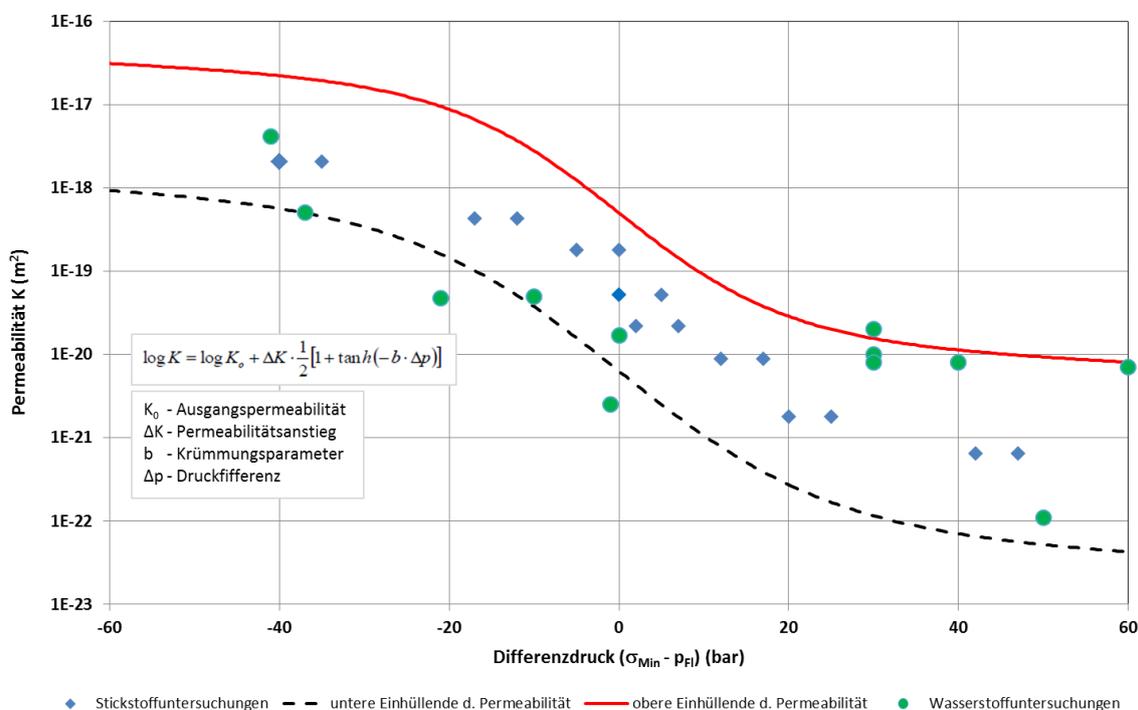


Abbildung 15: Vergleich der Permeabilität von Steinsalz bei Untersuchungen mit Stickstoff und Wasserstoff im Zuge unterschiedlicher Belastungen (Differenzdrücke). Der funktionale Zusammenhang zwischen Permeabilität und Druckdifferenz lässt sich in geschlossener Form durch eine Tangens-Hyperbolicus-Funktion beschreiben. Im Diagramm ist dafür die untere und die obere Einhüllende der Permeabilität abgebildet.

Aus den im Labor gewonnenen Ergebnissen wurden materialspezifische Parameter abgeleitet, welche die Verformungseigenschaften des Gesteins beschreiben, abgeleitet. Die Parameter wurden, in die für die gebirgsmechanische Modellierung verwendeten Stoffansätze implementiert:

- Deckgebirge und Basalanhydrit: MOHR-COULOMB
- Zechstein Salinar: IfG – GÜNTHER/SALZER

Das bei den Berechnungen für die spezifischen Eigenschaften der Salzgesteine verwendete Stoffmodell IfG-GS (Günther/Salzer-Modell) wurde am IfG entwickelt, um realitätsnah das vollständige Kriechverhalten mit allen 3 Kriechphasen und das geschwindigkeitsabhängige Festigkeits- und Dilatanzverhalten zu beschreiben. Das Stoffmodell ist in den Rechencode FLAC<sup>3D</sup> implementiert, verifiziert und an statisch ablaufenden Entfestigungsvorgängen im

<sup>4</sup> IfG (2014): Gebirgsmechanische Untersuchung und Bewertung der Perkolation von Wasserstoff - Laborbericht - 13.01.2014. (unveröffentlicht für UGS Mittenwalde GmbH)

Kali- und Steinsalzbergbau validiert<sup>5</sup>. Das für die gebirgsmechanische Modellierung verwendete Rechenprogramm FLAC<sup>3D</sup>, Version 7 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) von<sup>6</sup> wurde speziell für gebirgsmechanische Aufgabenstellungen entwickelt. Es bestehen seit 1997 praktische Anwendungserfahrungen bei der Modellierung diverser gebirgsmechanischer Problemstellungen, wobei die Software durch Implementierung spezieller Stoffansätze kontinuierlich weiterentwickelt und den praktischen Anforderungen angepasst wurde.

Im IfG-GS-Modell wird das Spannungs-Verformungsverhalten der Salzgesteine hauptsächlich über das Kriechverhalten beschrieben. Das bedeutet, dass die Viskosität des Kriechansatzes abhängig von einer inneren Zustandsvariable ist, die den Ver- und Entfestigungsprozess steuert, von der aber auch das stationäre Kriechen abhängt. Die Modellierung des eigentlichen Zugbruches nimmt jedoch eine Sonderstellung ein, da dieser in Form eines Sprödbruches als zeitunabhängiger Prozess beschrieben wird. Detaillierte Zusammenhänge und die Auflistung der gesteinsmechanischen Parameter sind dem Gutachten in der „H<sub>2</sub>-Forschungskaverne – Geotechnischer Eignungsnachweis zur H<sub>2</sub>-Forschungskaverne“ aufgeführt, das Teil des HBP (Hauptbetriebsplan) ist, welcher durch die VGS bei der zuständigen Bergbehörde (LAGB) für die Kaverne Lt 09 eingereicht hat.

#### 4.2.3 Geomechanisches Berechnungsmodell – Standsicherheits- und Integritätsnachweis (AP 3.2.2 und AP 3.2.3)

##### Modellaufbau

Die gebirgsmechanische Zulässigkeit der Wasserstoffspeicherung in der Kaverne Lt 09 wurde mit Hilfe eines Berechnungsmodells erbracht. Als Ausgangspunkt für den Modellaufbau dienten die Rohdaten der reinterpretierten SOCON-Hohlraumvermessung vom 20.09.2019<sup>7</sup> <sup>8</sup>. Basierend auf diesen Angaben wurde mit Hilfe des CAD-Programms Rhino3D (Robert McNeel & Associates) ein detailliertes 3D-Modell der Forschungskaverne Lt 09 erstellt (Abbildung 16). Dementsprechend ist die reale, zu erwartende (nach Soleendvermessung) Kavernengeometrie verwendet worden, wobei die Form für die Berechnungen in zulässiger Weise vereinfacht wurde.

---

<sup>5</sup> GÜNTHER, R.-M. (2009): Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz, Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-4

<sup>6</sup> ITASCA (2019): User's Guide for FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 7.0, ITASCA Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota USA.

<sup>7</sup> SOCON (2016): Bericht über die Ergebnisse der echometrischen Hohlraumvermessung in der Kaverne Lauchstädt K Lt 9. 8. Messung (Vollvermessung). 05.02.2016. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

<sup>8</sup> UGS (2020): Statusbericht Kaverne Lt 09. Solung vom 19.02.2016 bis 17.04.2020. 24.11.2020. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

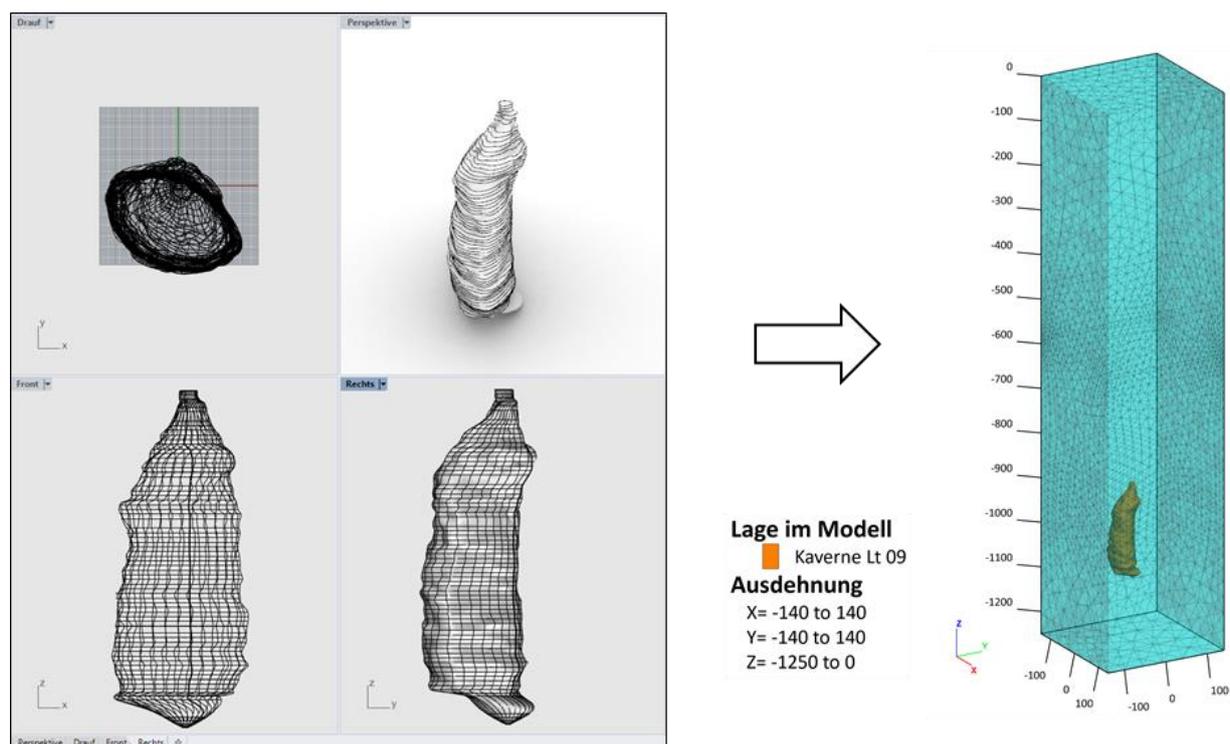


Abbildung 16: CAD-Modell der Kaverne Lt 09 (links) und gesamtes FLAC<sup>3D</sup>-Modell (rechts). Das Modell besitzt in x- und y-Richtung eine horizontale Kantenlänge von 280 m. Dies entspricht den Bohrlochabständen zwischen benachbarten Kavernen im UGS Bad Lauchstädt.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Kaverne fertig gesolt. Eine Endvermessung unter Sole steht für die Kaverne Lt 09 noch aus. Das im FLAC<sup>3D</sup> erstellte Ausgangsvolumen beträgt  $V = 527.016 \text{ m}^3$ . Das Kavernenvolumen ergibt sich dabei aus einer theoretischen Annahme, die aus der Generierung des Berechnungsmodells folgt. Basis hierfür waren die durch den Betreiber übergebenen Hohlraumdaten (Hohlraumvermessung und Solsimulation). Die Modelloberkante stellt gleichzeitig die Tagesoberfläche dar, so dass alle geografischen Angaben in vertikaler Richtung Teufenangaben entsprechen. Die Geologie wurde in Anlehnung an die in-situ Situation im Modell berücksichtigt. Die horizontale Kantenlänge des Modells beträgt 280 m. Die seitlichen Grenzflächen bilden dabei Symmetrieebenen, sodass die Situation im Kavernenfeld und damit auch die bestehenden Nachbarkavernen mit Überzugswirkung berücksichtigt werden. Die Modellbasis liegt in einer Teufe von 1250 m, die Kavernensole bei 1104,6 m und die Firste bei 890,7 m. Der Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour (RS LzRT) wurde im Modell in 850 m Teufe angenommen.

Die Annahme des wirkenden lithostatischen Teufendruckes im Modell erfolgte entsprechend der in situ vorhandenen Dichten der Gebirgsschichten. Im Salzgestein herrscht dabei ein isotroper Spannungszustand mit allseitig gleichem Druck, der dem lithostatischen Überlagerungsdruck entspricht. Dementsprechend wurde der Seitendruckbeiwert (Verhältnis von Horizontalspannung zu Vertikalspannung) im Salinar mit  $\lambda = 1$  zugrunde gelegt. Im Deckgebirge sowie im Basalanhydrit wurde hingegen ein Seitendruckbeiwert von  $\lambda = 0,7$  angenommen<sup>9</sup>. An den

<sup>9</sup> IFB (1987): Untersuchungen zum Bruch- und Verformungsverhalten des Deckgebirges. Institut für Bergbausicherheit, Leipzig (nicht veröffentlicht)

seitlichen Modellrändern sowie an der Modellbasis wurden Randbedingungen vorgegeben, die eine Normalverschiebung der jeweiligen Modellränder verhindern. Der obere Modellrand ist in vertikaler und horizontaler Richtung frei verschiebbar und entspricht in seiner Lage der Tagesoberfläche.

Um das Modell an das in-situ Verhalten der Kaverne Lt 09 anzupassen, erfolgte im Vorlauf der eigentlichen Berechnungen eine Validierung des Modells mit Hilfe von vorhandenen Konvergenzwerten und Senkungsergebnissen. Die Konvergenzwerte werden für die Kaverne Lt 09 nach ersten analytischen Abschätzungen zwischen  $\varepsilon_V = 1,4$  und  $2,8$  ‰/a liegen<sup>10 11</sup>. Die Ergebnisse der Obertagesenkungen stammen aus den zweijährig durchgeführten Nivellementmessungen am UGS Bad Lauchstädt. Das Rechenmodell wurde bezüglich seines Verhaltens an das Obertageverhalten angepasst.

Der Simulationsablauf sowie die Druck- und Temperatureingangskurven für die mechanischen bzw. thermo-mechanisch gekoppelten Berechnungen sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Druckvorgaben für den Speicherbetrieb von  $p_{MAX} = 140$  und  $p_{MIN} = 30$  bar resultieren aus gebirgsmechanischen und technisch umsetzbaren Werten für den UGS Bad Lauchstädt. Neben einer rein mechanischen Berechnung fand der Temperatureinfluss des Wasserstoffs auf das Gebirge in Form eines thermo-mechanischen Berechnungsdurchlaufs Berücksichtigung. So konnten auch zuverlässige Aussagen bezüglich der langfristigen Standsicherheit und Integrität der Kaverne Lt 09 unter Beachtung des Temperatureinflusses gemacht werden.

	Datum	Dauer [Jahre]
Grundspannungszustand, Solbeginn	01.12.2009	10.3
Solende, danach 7 Jahre Standzeit unter Soledruck	01.04.2020	7.0
Gaserstbefüllung bei p = 130 bar	01.04.2027	2.0
Speicherregime beginnt (saisonal mit 1 Gasumschlag/Jahr)	01.04.2029	
Ende der thermo-mechanisch-gekoppelten Berechnung	21.05.2038	5.0
Ende des Speicherbetriebs	01.04.2059	30.0

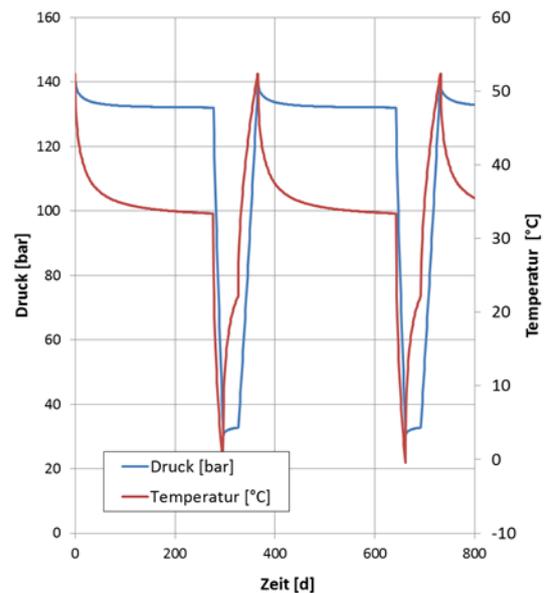


Abbildung 17: Zeitlicher Ablauf der gebirgsmechanischen Berechnung und simuliertes Druck- und Temperaturregime im jährlichen Speicherbetrieb mit Wassererstoff (Maximaler Betriebsspeicherdruck  $p_{MAX} = 140$  bar, Minimaler Betriebsspeicherdruck  $p_{MIN} = 30$  bar).

<sup>10</sup> IfG (2011a): Gebirgsmechanische Modellierung zum Nachweis der Standsicherheit im Speicherbetrieb und der Zulässigkeit maximaler und minimaler Speicherdrücke für neu anzulegende Kavernen des UGS Bad Lauchstädt. 07.09.2011. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

<sup>11</sup> IfG (2019): Senkungsprognose für das Kavernenfeld des UGS Bad Lauchstädt. 28.02.2019 (Entwurfssfassung bei VNG Gasspeicher GmbH unveröffentlicht)

## Ergebnisse

Für die Auswertung dienen die Spannungszustände im Modell in Form der minimalen und maximalen Hauptspannungen ( $\sigma_{\text{MIN}}$ ,  $\sigma_{\text{MAX}}$ ) sowie der Effektiv- bzw. von-Mises-Vergleichsspannung ( $\sigma_{\text{Eff}}$ ). Folgende Kriterien kommen dabei zur Anwendung:

### Maximaldruckbewertung

- Minimalspannungskriterium (geologische Dichtheit)
- Technisches Dichtheitskriterium (technische Dichtheit)

### Minimaldruckbewertung

- Dilatanzkriterium (Standicherheit)
- Minimalspannungskriterium bei minimalen Betriebsspeicherdruck

Die Verteilung der minimalen Hauptspannung dient als Grundlage für die Bewertung des Zustandes bei maximalem Speicherdruck. Es kann festgestellt werden, dass die Kaverne immer von einer ausreichend bemessenen Zone umgeben ist, in der die minimale Druckeinspannung  $\sigma_{\text{MIN}}$  um 10 % größer ist als der maximale Speicherdruck  $p_{\text{MAX}}$  (Abbildung 18 links). Erkennbar ist, dass die Zone, in der das Bewertungskriterium verletzt ist, nur den unmittelbaren Saumbereich der Kavernenkontur betrifft. Durch das Modell werden ausreichend große Bereiche im Hangenden und im Pfeiler ausgewiesen, in denen die geologische Dichtheit entsprechend dem Minimalspannungskriterium gewahrt bleibt. Es kann somit ausgeschlossen werden, dass es beim Anfahren des maximalen Betriebsspeicherdruckes zu einem Übergang des Wasserstoffs, der in der Lt 09 gespeichert wird, zu den Nachbarkavernen sowie in das Deckgebirge kommt.

Die Einhaltung der Anforderung an die technische Dichtheit ist ebenso der Abbildung 18 (rechts) zu entnehmen. Es ist im Bereich des Rohrschuhs eine ausreichende horizontale Druckeinspannung durch das Gebirge auf die technische Installation erforderlich. Im Hangenden über der Firste einer Kaverne bildet sich aufgrund der Anlage des Hohlraumes ein sekundäres Spannungsfeld aus. Bezogen auf die Horizontalspannungen bedeutet dies, dass sich aufgrund der Lastverteilung 20 bis 40 m oberhalb der Firste eine Spannungsglocke ausbildet. Diese begünstigt zusätzlich den dichten Einschluss der Casing-Installation in das Gebirge. Weil die Kaverne Lt 09 doch sehr schmal und dementsprechend auch sehr hoch (Verhältnis Flächenquerschnitte zu Kavernenhöhe) entwickelt wurde, ist im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour (RS = 850 m) die "Spannungsglocke" der auf den Casing wirkenden Radialspannung kaum ausgeprägt – vielmehr ist sie bereits 10 bis 15 m oberhalb der Firste ausgebildet. Im Teufenbereich des Rohrschuhs folgt die Radialspannung eher dem ungestörten lithostatischen Teufendruck. Die Modellergebnisse zeigen jedoch, dass die Radialspannungen bzw. Horizontalspannungen in 850 m Teufe ebenso ausreichend groß genug sind, um den dichten Verschluss des Verbundes Rohrtour-Zement-Salzgestein im Bereich des Rohrschuhs beim Anfahren des maximalen Speicherdruckes zu gewährleisten. Dementsprechend ist auch das Kriterium der technischen Dichtheit für den Wasserstoffbetrieb erfüllt.

Die Bewertung der Stabilität der Tragsysteme (Hangendschwebe, Pfeiler und Kontur) um die Kaverne Lt 09 erfolgte auf der Basis der unter Berücksichtigung der Langzeitfestigkeit des Salinargesteins prognostizierten plastischen Volumenverformung  $\varepsilon_{\text{Vol}}$ , welche bei Überschreiten der Dilatanzgrenze akkumuliert wird. Ob die Dilatanzgrenze überschritten wird, hängt von den herrschenden Effektivspannungen ab.

Mit dem bei der Modellierung zugrunde gelegten IfG-Günther/Salzer-Ansatz, wird die Auflockerung des Gebirges direkt berechnet und kann somit als Grundlage für eine Analyse der Einhaltung des Dilatanzkriteriums dienen. Für die dilatanzfreien Teile der Salinarbarriere mit  $\varepsilon_{Vol} = 0$  kann jegliche Mikrorissbildung ausgeschlossen werden. Diese Gebirgsbereiche bleiben undurchlässig und sind dauerstandsicher.

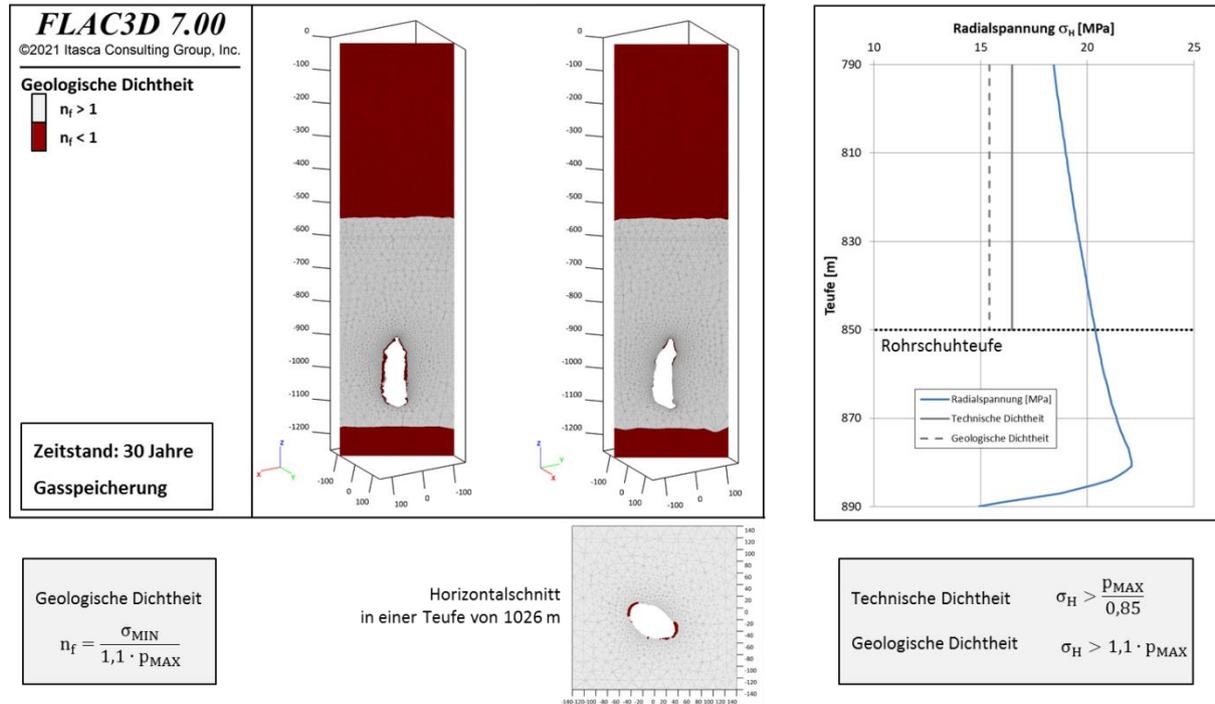


Abbildung 18: Gebirgsmechanische Bewertungskriterien beim Anfahren des maximalen Betriebsspeicherdruckes von  $p_{MAX} = 140$  bar. Links zeigt den Nachweis der geologischen Dichtigkeit. Eine Verletzung des Kriteriums ist nur in einer konturnahen Saumzone (roten Bereiche) zu erwarten. Die technische Dichtigkeit (rechtes Bild) der Casing-Installation ist aufgrund einer ausreichend wirkenden radialen Druckeinspannung erfüllt.

Das Hangende, Liegende, sowie der gesamte Pfeilerbereich um die Kaverne Lt 09 erfährt während des Gasspeicherbetriebs keine Schädigung. Die Stabilität des Systems Kaverne kann demnach gewährleistet werden. Bereiche, in denen das Kriterium verletzt wird ( $\varepsilon_{Vol} > 0$ ), sind nur auf den konturnahen Bereich beschränkt und sind abhängig von der Ausbildung der Kontur (Überhängende unregelmäßige Bereiche sind mehr betroffen als glatte Konturbereiche). Unterschiede können in der Betrachtung mit und ohne Berücksichtigung des thermo-mechanischen Einflusses von Wasserstoff gemacht werden. Wird die Temperatur im Modell vernachlässigt, wird beim Anfahren des minimalen Betriebsspeicherdruckes von  $p_{MIN} = 30$  bar im Modell nur punktuell Schädigung an der Kavernenkantur ausgewiesen. Für die Übertragung auf die in situ Situation ist es jedoch notwendig den Temperatureinfluss zu berücksichtigen. Man sieht, dass aufgrund der zusätzlich induzierten Thermospannungen der gesamte Konturbereich in einer Saumzone von wenigen Metern dilatant beeinflusst wird (Abbildung 19, rechts). Die Maximalwerte für  $\varepsilon_{Vol}$  liegen nach 5 Jahren Gasspeicherbetrieb zwischen 0,5 und 1 %. In diesen Bereichen des Anstehenden um die Kavernen sind Mikrorisse entstanden. Das Gas kann hier begrenzt in die Mikrostruktur des Salzes eindringen. Eine Akkumulation weitere Schädigung ist nicht zu befürchten, da davon auszugehen ist, dass es im Verlauf des Gasspeicherbetriebes zu Entfestigungsvorgängen der betreffenden Bereiche kommen kann. Dabei kommt es zu Abschaltungs- und konturbereinigenden Prozessen. Die Kavernenkantur strebt einer gebirgsmechanisch stabilen Idealform entgegen. Die Hohlraumkonvergenz (Kriechen des Salzes)

wirkt dabei dem Prozess der Konturbereinigung entgegen, so dass Veränderungen an der Kontur mit Hilfe von Ultraschallvermessungen nur lokal (Abbruch überhängende Bereiche oder Sumpfspiegelanstieg) erkennbar sein werden. Letztendlich kann aus den Ergebnissen der Berechnungen geschlussfolgert werden, dass im langfristigen Wasserstoffbetrieb ( $\pm 30$  Jahre) die Stabilität der Firste und das Pfeiler gewährleistet bleibt. Die Bereiche, die durch dilatante Verformung beeinflusst sind, liegen innerhalb einer Zone, die 10 % der Pfeilerbreite nicht überschreiten.

Ein ähnliches Bild zeigt die Auswertung der geologischen Dichtigkeit beim Anfahren des minimalen Speicherdruckes (Abbildung 19, links). Aufgrund der Absenkung der minimalen Hauptspannung unterhalb des Kaverneninnendruckes entstehen sogenannte effektive Zugspannungen ( $\sigma_{MIN} > p_{MIN}$ ). Bei schnellem Absenken des Kaverneninnendruckes vom maximalen Speicherdruck auf das Niveau des minimalen Druckes können die Spannungen durch eine schnelle Abkühlung der Kavernenkantur stark abgesenkt und damit verbundene Thermospannungen induziert werden. Porendrücke werden wirksam und es kann lokal Gas in die Porenräume eintreten und dort verweilen. In Abbildung 19 (links) sind die Konturbereiche in einem Horizontalschnitt durch den Kavernenhohlraum, in denen effektive Zugspannung nach der Druckabsenkung auftreten, rot gekennzeichnet. Sie sind konturnah begrenzt und ähneln in ihrer Ausbreitung den Bereichen, in denen auch die dilatanten Verformungen auftreten bzw. wird hier die Dilatanz durch das Auftreten der effektiven Zugspannungen verursacht.

Im Laufe der Betriebsjahre wird die betreffende Zone aufgrund der konvergenzbedingten Hohlraumverringering nicht größer und bleibt in ihrer geringen Ausdehnung unverändert. Schlussfolgernd bleibt die Stabilität und Integrität der Kaverne beim Anfahren des minimalen Betriebsspeicherdruckes mit Wasserstoff über mehrere Jahrzehnte gewahrt.

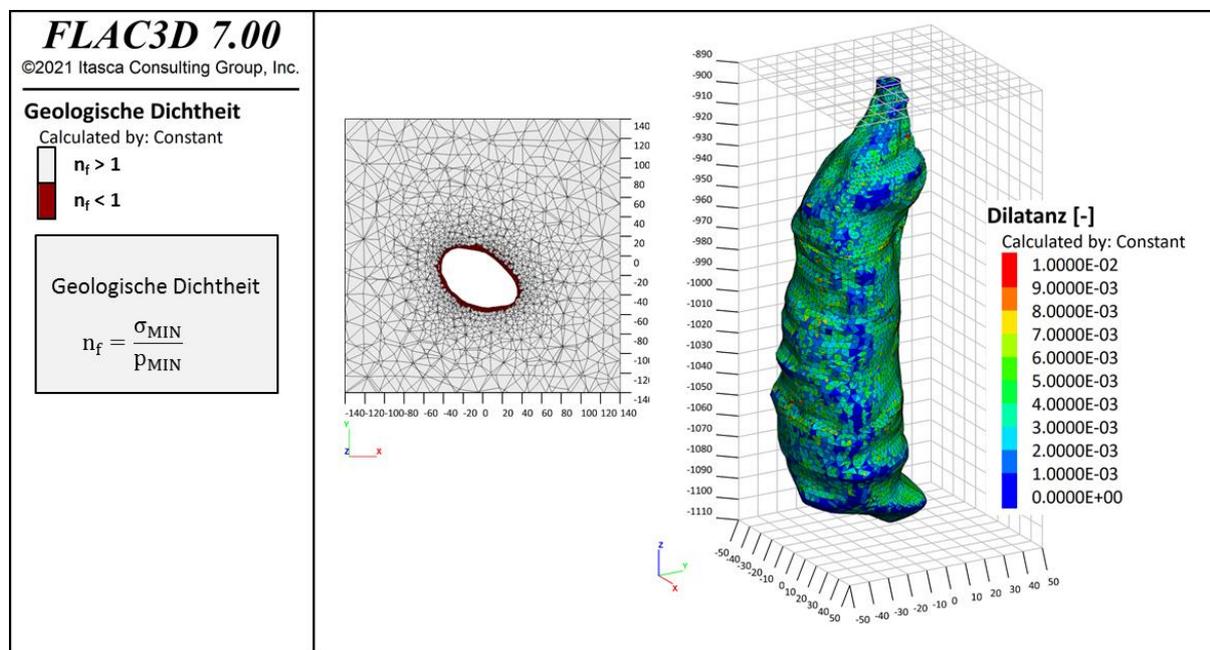


Abbildung 19: Gebirgsmechanische Bewertungskriterien beim Anfahren des minimalen Betriebsspeicherdruckes von  $p_{MIN} = 30$  bar. Links zeigt den Nachweis der geologischen Dichtigkeit (Absenkungen der Hauptspannungen unter Kavernendruck). Eine Verletzung des Kriteriums ist nur in einer konturnahen Saumzone (roten Bereiche) zu erwarten. Die dilatant beeinflussten Bereiche (rechtes Bild) konzentrieren sich ebenfalls nur auf den unmittelbaren Konturbereich der Kaverne.

#### 4.2.4 Konvergenzeinflüsse und Bodensenkung durch den Betrieb der H<sub>2</sub>-Kaverne (AP 3.2.1)

Aufgrund der Kriecheigenschaften des Salzgesteins wird sich das Volumen der Kaverne über die Zeit verringern. Je geringer der Druck in der jeweiligen Kaverne gegenüber dem Gebirgsdruck ist, desto größer ist die Konvergenz. Anfänglich wird eine Konvergenzrate von  $\dot{\epsilon}_V = 1,5 \text{ ‰/a}$  für den saisonalen Betrieb zwischen  $p_{\text{MAX}}$  und  $p_{\text{MIN}}$  von ausgewiesen. In der fortlaufenden Betriebsphase nimmt dieser Wert dann ab. Gemittelt über eine Lebensdauer von 30 Jahren wird eine Konvergenzrate von  $\dot{\epsilon}_V = 1,05 \text{ ‰/a}$  prognostiziert.

Da im gebirgsmechanischen Berechnungsmodell die Modelloberkante gleich der Tagesoberfläche entspricht, können Senkungen, die im Zuge der Hohlraumkonvergenz induziert werden, direkt aus dem Modellergebnissen abgegriffen werden. Die umgesetzte Modellgeometrie berücksichtigt dabei die Überzugswirkung von 4 Nachbarkavernen im Feld. Die tatsächliche Situation stellt sich so dar, dass die Kaverne Lt 09 drei Nachbarkavernen in unmittelbarer Umgebung und zwei Nachbarkavernen, die etwas weiter entfernt sind, besitzt. Die in-situ auftretenden Überzugswirkungen können somit in ihren Beträgen durch das Modell abgedeckt werden.

50 Jahre nach Ansolung der Kaverne Lt 09 werden Obertage, direkt über der Kaverne durch das Modell ca. 22 cm Senkung ausgewiesen. Das ergibt eine Senkungsrate von 4,4 mm/a. Hier wurden im Zuge einer dem Bericht vorgelagerten Bewertung der Höhenüberwachung zwischen 21 und 25 cm Senkung für die Betriebsphase bis 2065 ausgewiesen<sup>11</sup>. Das entspricht einer Rate von 4,2 – 5,0 mm/a.

Aus den Berechnungsergebnissen kann festgestellt werden, dass sich die ausgewiesenen Senkungen, die durch den Wasserstoffbetrieb der Kaverne Lt 09 induziert werden, in das Gesamtsenkungsgeschehen des UGS Bad Lauchstädt einpassen. Bergschadenkundliche Beanspruchungen, die eine Gefährdung an der Tagesoberfläche darstellen, werden durch den Betrieb der Kaverne Lt 09 nicht verursacht.

### 4.3 Detailentwicklung der Untertageausrüstung (AP 3.2.5)

#### 4.3.1 Einbau der letzten zementierten Rohrtour (LzRT)

##### Allgemeines

Da der untere Teil der LzRT beim späteren Betrieb der Kaverne mit dem in der Kaverne gespeicherten Wasserstoff in Kontakt tritt, bestehen hier besondere Anforderungen an die Werkstoffauswahl. Dies betrifft ausschließlich den Bereich unterhalb des Setzbereiches des Packers. Ein geeigneter Werkstoff sowie die geeignete Verbindungstechnologie wird parallel im HYPOS-Forschungsprojekt „H<sub>2</sub>-UGS“ untersucht.

Gemäß DIN EN ISO 16530-1 werden geeignete Schutzmaßnahmen für die Bohrlochverrohrung gegen Korrosionseinflüsse von außen getroffen. Entsprechend wird für den Casingschutz der Bohrlochverrohrung Lt9 eine eigene KKS-Anlage vorgesehen, dessen Errichtung im SBP „H<sub>2</sub>-Feldleitung“ beschrieben wird.

##### Material im Bereich unterhalb des Packers der LzRT

Im Projekt „H<sub>2</sub>-UGS“ konnte ein Werkstoff der Güte X56M gemäß API 5L PSL2 für die Anwendung im direkten Kontakt mit Wasserstoff identifiziert werden. Die ermittelten mechanischen Kennwerte des verwendeten Materials entsprechen einem J55 gemäß API 5CT. Der Werkstoff

sowie die erzeugten Schweißnähte werden von der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) und dem Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (IWM) bezüglich einer möglichen Wasserstoffversprödung in Druckwasserstoff und unter Sauerstoffbedingungen untersucht. Die finalen Ergebnisse werden nach Ende des Projekts „H<sub>2</sub>-UGS“ (voraussichtlich 04/2022) vorliegen.

Die endgültige Ermittlung eines Werkstoffes erfolgt durch den mit der Ausführungsplanung beauftragten Ingenieurdienstleiter, entsprechend den funktionalen Anforderungen, die sich aus den künftigen Betriebsparametern ergeben. Die geplante Installation der LzRT ist in Anlage 14.4 dargestellt.

#### Zementation der LzRT

Ebenso wie bei der Erdgasspeicherung ist auch bei der Wasserstoffspeicherung durch die Zementation der LzRT Folgendes zu gewährleisten:

- die feste und dichte Verankerung der Casing durch gute Haftung des Zementsteins sowohl am Rohrmaterial als auch mit dem Gebirge bis Übertage,
- der Schutz der Casing vor Schichtdrücken,
- der Schutz der Casing vor Korrosion sowie
- die Abdichtung des Ringraumes zwischen Technischer Rohrtour und LzRT nach Übertage.

Gegenwärtig laufen im Rahmen des HYPOS-Forschungsprojektes „H<sub>2</sub>-UGS“ experimentelle Untersuchungen an Zementen für einen Einsatz unter Wasserstoff. Dabei geht es neben den rein chemischen Untersuchungen auch um Untersuchungen des Verbundes Gebirge-Zement-Rohr. Die bisherigen Ergebnisse (Permeabilität  $< 10^{-23} \text{ m}^2$ ) zeigen die technische Dichtheit der gefertigten reinen Salz- bzw. Zementsteinproben gegenüber Wasserstoff. Die Tests zur Überprüfung der Durchlässigkeit des Materialverbundes Casing-Zement-Gebirge werden voraussichtlich in Q4/2021 abgeschlossen.

Aufgrund der Tatsache, dass bereits Untergrundgasspeicher für Wasserstoff existieren und über mehrere Jahre sicher betrieben werden, sowie mit Bezug auf die aktuellen Untersuchungsergebnisse des Forschungsprojektes „H<sub>2</sub>-UGS“, ist davon auszugehen, dass die derzeit verfügbaren Zemente keine Restriktionen bzgl. des Speichermediums Wasserstoff darstellen. Die Festlegung der zu verwendenden Zementrezeptur ist Teil der Ausführungsplanung.

#### Vorbereitungen des Einbaus der LzRT

Vor dem Einbau der LzRT wird eine echometrischen Endvermessung der Kaverne unter Sole einschließlich einer Halsvermessung durchgeführt.

In Vorbereitung des Einbaus der LzRT werden u.a. folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Unterschneiden des unverrohrten Bereichs und
- Multifinger Caliper Messung (MFC).

Nach der Durchführung der geophysikalischen Messungen erfolgt die Präzisierung des zu unterschneidenden Bereiches unterhalb des Rohrschuhs der 16“ technischen Rohrtour. Weiterhin werden die Setzteufe für den Rohrschuh der 13 3/8“ LzRT sowie des Widerlagers für die Durchführung der Zementation der LzRT bestätigt.

Um die Zementation der LzRT durchzuführen ist es erforderlich, dass unterhalb des künftigen Rohrschuhs ein Widerlager für die Zementbrücke eingebracht wird. Hierfür gibt es verschiedene technologische Möglichkeiten, wie z.B. die Nutzung eines mechanischen Widerlagers wie beispielsweise der Eigenentwicklung der UGS GmbH unter der Bezeichnung „Spider Plug“, welche im Rahmen der Ausführungsplanung geprüft und festgesetzt werden. Dieses Widerlager bildet dann eine tragfähige Grundlage für die später einzubringenden Zementschlämme, welche nach Aushärtung die hydraulische Barriere zwischen der Kaverne und der LzRT bildet.

Die Auswahl der hierfür geeigneten Zementrezeptur sowie -technologie ist ebenfalls Gegenstand der noch zu erstellenden Ausführungsplanung.

#### Einbau der LzRT

Der Einbau der LzRT erfolgt nach Maßgabe des Arbeitsprogramms (Teil der Ausführungsplanung)

#### Nach Einbau der LzRT

Nach Einbau der LzRT werden zur Überprüfung der Rohr- und Zementbedingungen sowie des verbleibenden unverrohrten Kavernenhalses folgende Messungen durchgeführt:

- Zementmessung mit Zementbindung (CBL-VDL)
- USIT-Messung zur Bewertung von Korrosion und Zementierung sowie
- Dichtheitstest am Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour

#### Dichtheitstest der letzten zementierten Rohrtour

Entsprechend den bergrechtlichen Forderungen (Allgemeine Bundesbergverordnung, BVOT der Länder) und der Technischen Regel Bohrungsintegrität der BVEG ist vor Inbetriebnahme einer Speicherkaverne der Nachweis der technischen Gasdichtheit im Rohrschuhbereich der letzten zementierten Rohrtour (LzRT) und der jeweiligen Rohrtouren (Produktionsrohrtour, Förderrohrtour) zu erbringen.

Bei der untertägigen Erdgasspeicherung ist der Nachweis der technischen Gasdichtheit im Bereich des Rohrschuhs der LzRT unter Anwendung eines Dichtheitstests (DHT) mit Stickstoff Stand der Technik. Prüfkriterien, Prüfzeiten sowie die Auswertungs- und Berechnungsverfahren sind aufgrund der langjährigen Testpraxis anerkannt. Die Dichtheit bezüglich des maximal anzufahrenden Druckes am Rohrschuh der LzRT der Kaverne wird zu Beginn der Komplettierungsarbeiten mit einem Test auf den zementierten Rohrschuh der LzRT belegt. Die Vorgabe für den anzufahrenden Testdruck ergibt sich aus der Stellungnahme des IfG im Ergebnis der Soleendvermessung. Als Testmedium für den Dichtheitstest vor Komplettierung der Kaverne wird aus Sicherheitsgründen Stickstoff als inertes Testgas vorgesehen. Die Dichtheit unter Wasserstoff wird für die Kaverne Lt 9 mittels eines kombinierten Funktions- und Dichtheitstest, zum zementierten Rohrschuh der LzRT, mittels Wasserstoff nach Abschluss der Komplettierungsarbeiten festgestellt.

Aufbauend auf den gebirgsmechanischen und den experimentellen Untersuchungen zum Verbund Casing-Zement-Gebirge im Projekt „H<sub>2</sub>-UGS“ werden Dichtheitskriterien abgeleitet und die für die Wasserstoffspeicherung relevante Prüfcharakteristik (z.B. Dauer, Ablauf, Testgas, Testequipment) sowie die zugehörige Auswertemethodik inkl. der Vorgabe von Berechnungsverfahren und Fehlerbetrachtungen entwickelt. Die finale Ausarbeitung des Dichtheitstests erfolgt nach Vorliegen der vorgenannten Arbeitsergebnisse aus der Begleitforschung und ist Teil der Ausführungsplanung.

#### 4.3.2 Förderinstallation und Gasförderkopf

##### Förderrohrtour

Durch den direkten Kontakt der Förderrohrtour mit dem Speichermedium Wasserstoff bestehen hierbei besondere Anforderungen an die Werkstoffauswahl. Die Förderrohrtour muss aus einem H<sub>2</sub>-resistenten Stahl sein (vgl. Kapitel 4.3.1)

Nach der Gaserstbefüllung (GEB) und dem Ausbau des Entleerungsstrangs werden folgende Basismessungen durchgeführt:

- Multi-finger (mechanisch) auf Korrosion
- Elektromagnetische Messung auf Korrosion (optional)

##### Gasförderkopf

Der Gasförderkopf (GFK) wird analog zu den Kavernenspeicherbohrungen für Erdgas konzipiert und ausgeführt, d.h. im Wesentlichen, dass der Gasförderkopf für die geplanten Ein- und Ausspeichermengen vom Wasserstoff und die zu erwartenden maximalen Betriebsdruckbedingungen ausgelegt wird. Der Gasförderkopf wird in Y-Geometrie aufgebaut. Die darin installierten Rohrtouren werden fest verankert und gegenseitig abgedichtet. Zur Bedienung und Sicherheit befinden sich am Gasförderkopf mehrere Absperrarmaturen, Sicherheits-, Kontroll- und Regeleinrichtungen.

In Hauptstromrichtung werden am Gasförderkopf zwei Absperrarmaturen (Master und Wing Valve) mit sicherheitsgerichteter Steuereinrichtung installiert, welche elektrohydraulisch angetrieben sind und im Fall unzulässiger Betriebsbedingungen bzw. im Notfall automatisch, sicherheitsgerichtet schließen. Die Bedienung dieser Armaturen kann sowohl vor Ort als auch über die Messwarte durch Betätigung der NOT-AUS-Taster erfolgen. Nach Schließen der Armaturen durch NOT-AUS können diese nur vor Ort wieder geöffnet werden.

Zwecks Autarkie und Funktionalität sind zwei weitere handbetriebene Absperrarmaturen (Top und ein zweites, inneres Wing Valve) in Hauptstromrichtung am Gasförderkopf installiert. Dadurch lassen sich eventuell erforderliche Instandhaltungsmaßnahmen realisieren, wie etwa das Befahren mit Messsonden oder das Einbringen von Stopfen in die Bohrung bzw. Reparaturarbeiten an Kopfteilen. Zur Überwachung der Kaverne werden am Kavernenkopf der Steigraumdruck, der Druck im Ringraum zwischen Förderrohrtour und Produktionsrohrtour (LzRT) sowie die Temperatur auf der Rohrbrücke kontinuierlich gemessen und zur Messwarte fernübertragen.

Es ist geplant, den Gasförderkopf (GFK) für den Einbau eines Casing 13 3/8" sowie einer Förderrohrtour 9 5/8" nach API 6A zu dimensionieren. Der GFK wird derzeit aus Materialien für die Serviceklasse „AA/BB/CC“ hergestellt. Die Innenteile der Kugelhähne sind in Duplex ausgeführt. Anforderungen zur Einhaltung ggf. weiterer Eigenschaften (z.B. DIN EN ISO 15156 / NACE MR175) werden geprüft. Es werden vom Hersteller Gashochdruckprüfungen an den Kugelhähnen nach API Level PSL3G durchgeführt. Der GFK bekommt vom Hersteller ein In-House FAT (Factory Assembly Test) und wird mit einem Formiergas gem. DIN 15848 auf Wasserstoffeignung getestet. Der GFK ist für die Gasinjektion und –produktion nach dem „Double Barrier Principle“ ausgelegt. Die API 6A Kugelhähne sind alle rein metallisch dichtend und mit den Funktionen DIB-2 ausgestattet (Double Piston Effekt am oberen Sitzring und somit 2 Barrieren in einer Armatur). Elastomere werden bei den medium berührten Abdichtungen auf H<sub>2</sub>-

Beständigkeit ausgelegt, welche vom Hersteller nachgewiesen wird. Die Antriebsinstrumentierung ist auf Wasserstoffumgebung angepasst. Alle Komponenten des GFK sind gemäß API für den Druckwert von 3.000 PSI hergestellt und ausgelegt. Anlage 14.5 zeigt ein Schema der geplanten Abschlussinstallation. Die endgültige Festlegung auf einen Hersteller und einen Werkstoff erfolgt im Rahmen der Ausführungsplanung.

#### Packer

Der Permanentpacker mit hydraulischem Setzmechanismus wird in der LzRT ca. 5 - 10 m über dem Rohrschuh des Casing gesetzt. Der Packer hat eine obere Verlängerung, um einen Tubing mit Ratch-Latch Verbindung aufzunehmen. Vor der Installation des Packers wird der Casing bis zum Setzbereich mit einem Packer-Dummy-Lauf befahren. Das Packer-Tailpipe enthält zwei Landing Nipple (LN), 2 Flow Coupling sowie einen Pump Out Sub.

Die Landungsnippel sind für die Aufnahme eines Untertagesicherheitsventils (UTSAV) vom Type Storm Choke sowie zur Aufnahme von z.B. ziehbaren Absperrerelementen (Bridge Plug) sowie Mess- und Kontrollinstrumenten geeignet.

Die Packer-Tailpipe-Assembly ist nach dem Stand der Technik hergestellt und nach APISPEC 11D1 für einen Druck von 3.000 PSI (ca. 207 bar) dimensioniert. Im Gegensatz zum herkömmlichen Betrieb mit Erdgas muss der Packer - und hierbei insbesondere die Elastomere - für den Betrieb in einer Wasserstoffumgebung geeignet sein. Die endgültige Festlegung auf das Equipment erfolgt im Rahmen der Ausführungsplanung.

#### Untertagesicherheitsabsperrventil (UTSAV)

Das zu verwendende UTSAV wird als mit Slick-Line ziehbares Klappenventil ausgeführt. Die Einbautiefe des LN-Profiles zum Setzen des UTSAV beträgt ca. 50 m unter Geländeoberkante innerhalb der Förderinstallation. Die gesamte Einheit wird gemäß API 14 A hergestellt und ist vor Einbau werksseitig auf Dichtheit geprüft. Der Dichtungsbereich der LN für das UTSAV wird durch Einsetzen einer Schutzhülse, während der Durchführung des Gaserstbefüllung (GEB) geschützt. Das Protection Sleeve wird nach Ausbau des Soleentleerungsstrangs (SES) vor dem Setzen des UTSAV wieder ausgebaut. Zum Schutz der Steuerleitung für das UTSAV werden geeignete Schutzvorrichtungen oder Klemmen verwendet, um Beschädigungen während der Umrüstung zur GEB zu verhindern. Die übertägige Steuereinheit des UTSAV ist für den sicheren Betrieb in einer potenziell explosiven Zone geeignet. Die endgültige Festlegung auf das Equipment erfolgt im Rahmen der Ausführungsplanung.

### 4.4 Entwicklung der Obertageanlage für den H<sub>2</sub>-Untergrundgasspeicher (AP 3.3)

#### 4.4.1 Detailentwicklung der allgemeinen Obertageausrüstung

Grundlage zur Definition der H<sub>2</sub>-OTA ist die folgende schematische Abbildung 20 der zwei Phasen der Realisierung. Hierbei wird die Übernahme/Übergabe des einzuspeichernden Wasserstoffes mit anschließender Messung und Verdichtung sowie Gasreinigung regelungstechnisch abgebildet. Kernelemente in diesem Prozess sind eine Messstrecke zur volumetrischen und gasanalytischen Erfassung, ein Verdichter zur Kompression des Gases auf den erforderlichen Speicherenddruck, Feldleitung als Verbindung der H<sub>2</sub>-OTA und der Speicherkaverne und Filter- bzw. Gasreinigungsanlagen zur Abscheidung von Verunreinigungen aus dem Speicherprozess, Gastrocknung zur Entfernung von Wasser aus dem Gas. Die Anlage zeigt die Komponenten gegliedert auf die zwei Phasen der Realisierung.

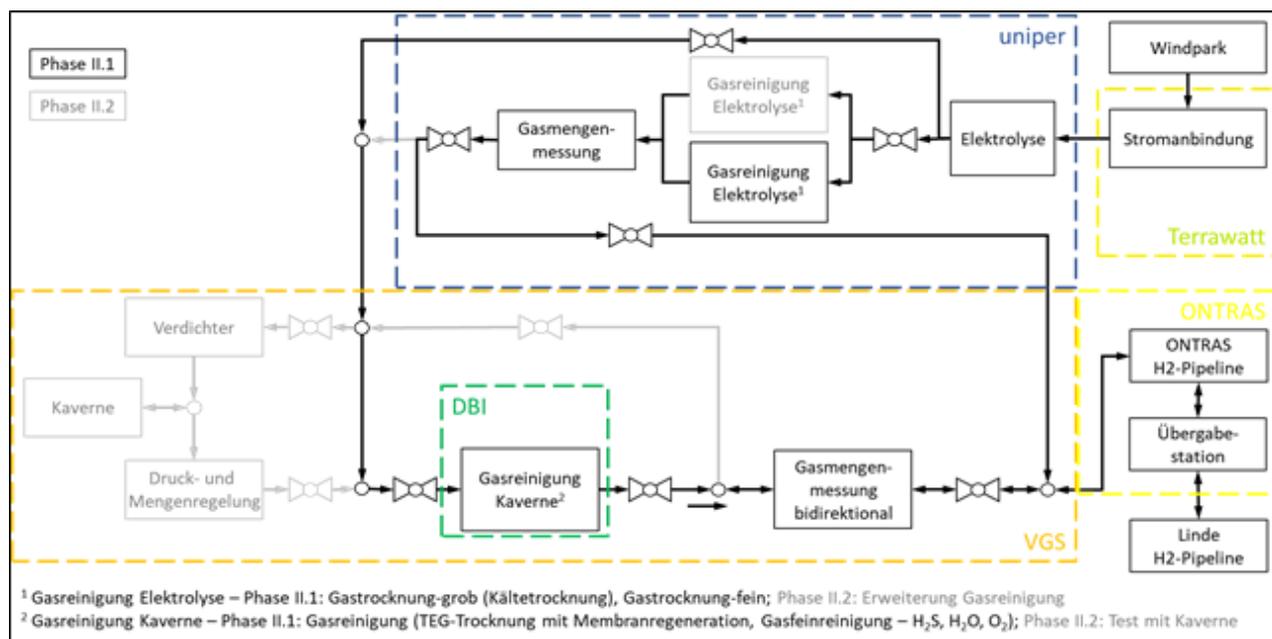


Abbildung 20: Blockschaltbild für das Gesamtvorhaben Energiepark Bad Lauchstädt inkl. Schnittstellen

Die Systemabgrenzung der H<sub>2</sub>-OTA zur Elektrolyse (UNIPER) bzw. Pipeline (ONTRAS) liegt vor der dargestellten Absperrarmatur (KH = Kugelhahn) bei der Übernahme-/Übergabestelle.

In der Anlage 14.8 sind die Komponenten der H<sub>2</sub>-OTA dargestellt und technisch beschrieben, soweit Informationen zum jetzigen Zeitpunkt vorliegen. Die Anlage wird mit einem Betriebsdruck von ca. 30 bar betrieben und ist auf einen Druck von maximal 40 bar ausgelegt. Die Komponenten sind auf die zwei Phasen der Realisierung gemäß der Gesamtprojektbeschreibung gegliedert. Im Weiteren wird auf einzelne Anlagenteile gesondert eingegangen.

#### 4.4.2 Anlagenkomponenten der Stromversorgung

Für die Versorgung der H<sub>2</sub>-OTA und der H<sub>2</sub>-Kaverne mit elektrischer Energie wird eine Umhausung mit Fundament für folgende Anlagenkomponenten errichtet:

- 6 kV-Verteilung
- 6/0,4 kV-Trafo
- Notstromaggregat (NSA) mit Mittel- und Niederspannungsverteiler (NSV)

Sie befinden sich an der Westseite der Weststraße, von der aus die Zuwegungen (teilversiegelte Flächen, z.B. Pflaster) errichtet werden. Im Zuge der Detailplanung wird der Aufbau des Fundamentes / Umhausung (z.B. Schichtaufbau) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen (technische Dimensionierung) konkretisiert.

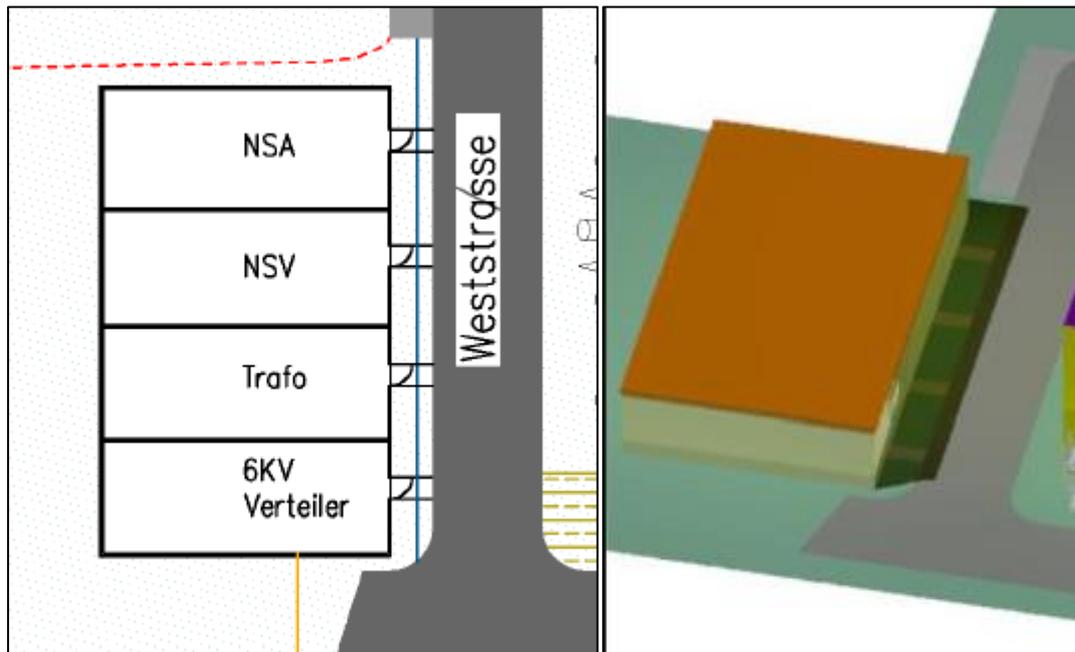


Abbildung 21: Fläche und Anlagenteile der Stromversorgung / 3D-Darstellung

#### 4.4.3 Anlagenkomponenten der Gasaufbereitung

Die Komponenten der Gasaufbereitung (GA) befinden sich östlich der Wasserstoffstraße (siehe Abbildung 22). Sie besteht aus Triethylenglykol-Trocknung (TEG), Aktivkohleadsorber, Entschwefelung, O<sub>2</sub>-Entfernung und der Feintrocknung. Die TEG-Regeneration wiederum besteht aus dem Adsorber, der Membranregeneration / Membran, einem Verdichter und einem Permeattank. Außerdem befindet sich ein Container mit Messtechnik sowie ein EMSR-Container auf der betreffenden Teilfläche des Grundstückes. Insgesamt befinden sich vier Container in Planung (ein 40-Fuss und drei 20-Fuss-Container).

Auf Grund des Forschungscharakters des Projektes und insbesondere der Gasaufbereitung bestehen Unsicherheiten bezüglich der Größe und Abmessungen des Adsorbers, der Membrananlage und der sechs Adsorber (siehe SBP H<sub>2</sub>-OTA-Anlagentechnik). Dennoch sind grundlegende Aussagen zu den Abmessungen, der Vorgehensweise und den resultierenden Anforderungen möglich. Im Einzelnen werden folgende Aktivitäten geplant:

- Errichtung von Fundamenten und Auflagern für Container, Kolonne (Absorber), Adsorber, Rohrbrücke und Rohrleitungen mit zugehörigem Tiefbau. Diese Fundamente bedürfen keiner Genehmigung nach dem Landes-Baurecht.
- Anbindung an Kabeltrassen (EMSR-System).
- Errichtung eines Erdungssystems im Zusammenhang mit dem Tiefbau.
- Herstellung einer Rohrleitungsanbindung zwischen der zu errichtenden Elektrolyse (UNIPER) und der GDR(M)A der H<sub>2</sub>-OTA.
- Herstellung eines oder Anbindung an ein Druckluftsystem(s).
- Herstellung eines Abganges an der zu installierenden Stromversorgung und Verlegung von NS-Kabel.

Es ist folgender grundsätzlicher Ablauf vorgesehen:

- Einmessen des Baufeldes
- Abtrag des Mutterbodens bzw. Abschieben und Aufnahme der Schotterfläche.
- Abfahren des Mutterbodens / Zwischenlagerung des Schotters für den Wiedereinbau.
- Erdaushub im Bereich der relevanten Fundamente und Kabeltrassen, teilweise mit vorheriger Handsuchschachtung im Bereich von Leitungs- und Kabelverläufen.
- Einbringen des Erdungssystems.
- Schalung der Fundamente / Einbringen der Armierung / Beton.
- Beschichtung der Fundamente hinsichtlich der Anforderungen des KKS.
- Einmessung der neuen Fundamente / Kabeltrassen.
- Rückverfüllung, Planum, Schotterung der Oberflächen.

Die Lage der Fundamente ergibt sich aus dem zu erstellendem Fundamentplan. Die Verlegung der Rohrleitungen erfolgt im Bereich der Gasaufbereitung oberirdisch. Die Flächen aller Container werden als versiegelte Flächen definiert. Im Zuge der Detailplanung wird der Aufbau von Fundamenten (z.B. Schichtaufbau) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen (technische Konstruktion des Absorbers, Statik) konkretisiert.

Für die Anlagenkomponenten werden mehrseitige Zuwegungen (teilversiegelte Flächen, z.B. Pflaster) ausgehend von den Nord-, Süd- und Wasserstoffstraße errichtet.

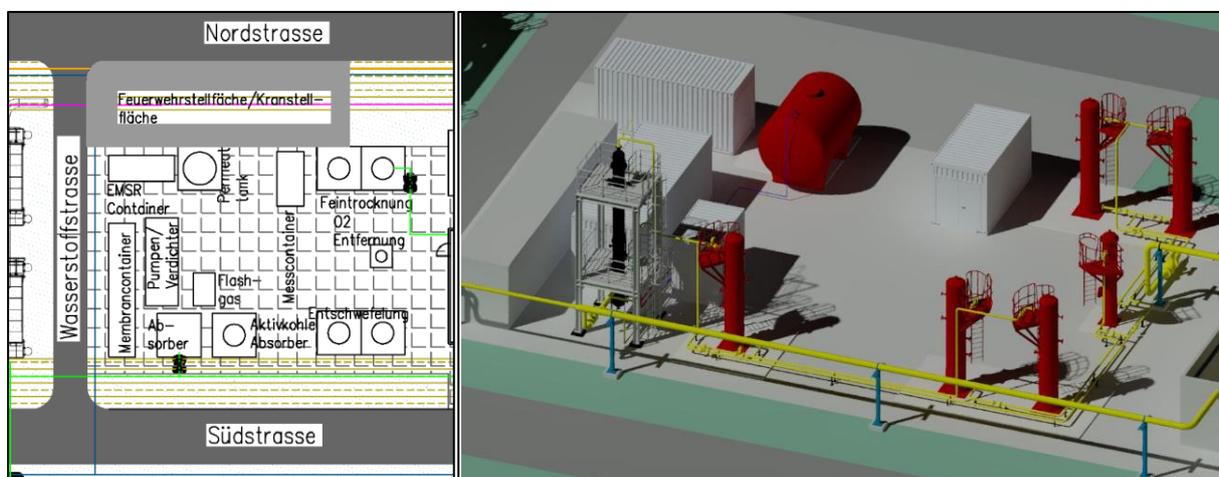


Abbildung 22: Fläche und Anlagen der Gasaufbereitung / 3D-Darstellung

Für die Container bzw. Einhausungen der technologischen Komponenten ist eine Genehmigung nach der Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt erforderlich. Diese Genehmigung wird parallel zum Sonderbetriebsplanverfahren rechtzeitig vor Baubeginn eingeholt und dem LAGB zu Kenntnis vorgelegt.

#### 4.4.4 Anlagen der Gasdruckregelung und Gasmengenmessung (GDR(M)A), EMSR

Die Anlagen der Gasmengenmessung und Gasdruckregelung befindet sich in einer Umhausung im süd-östlichen Bereich des Geländes. Diese enthält sämtliche elektronische Mess-, Steuer- und Regelungstechnik der gesamten H<sub>2</sub>-OTA inkl. der bidirektionalen Gasmengenmessung und

Druckregelung (redundant). Darüber hinaus ist ein Aggregat zur Druck- und Steuerlufterzeugung vorgesehen. Für die Umhausung wird ein Fundament errichtet, dessen Gesamtfläche versiegelt und von mehrseitigen teilversiegelten Zuwegungen (z.B. Pflaster) an die Ost- und Südstraße angebunden ist. Im Zuge der Detailplanung wird der Aufbau des Fundamentes (z.B. Schichtaufbau) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen (Dimensionierung der Mess- und Druckregelstrecke) konkretisiert. Die Errichtung der Technik zur Druckregelung erfolgt in Phase II.2 innerhalb der Umhausung (siehe SBP Anlagentechnik). Für die Errichtung der Umhausung wird das DVGW Arbeitsblatt G 491 berücksichtigt.

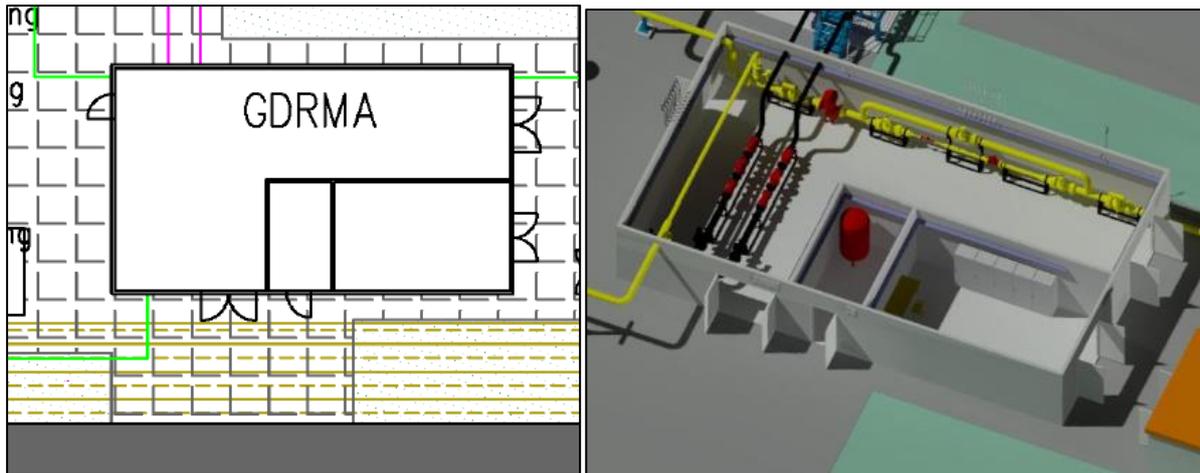


Abbildung 23: Fläche und Anlage der GDR(M)A, Drucklufterzeugung und EMSR / 3D-Darstellung

#### 4.4.5 Trassen für Ver- und Entsorgungsleitungen, Trassen für OT-Piping

Auf der Fläche der H<sub>2</sub>-OTA werden verschiedenen Trassen für Wasser-, Strom-, Wärme-, Steuerungs- und Kommunikations- und Druckluftversorgung sowie Abwasserentsorgung (Einleitung von Regenwasser von Umhausungen, Straßen und Zuwegungen) errichtet.

In Phase II.1 werden hierbei die erforderlichen Kabelkanäle und Lehrrohre (innerhalb der Trassen) zur Verbindung der Haupt- und Nebenkompenten errichtet, die hauptsächlich von West nach Ost parallel der Straßen verlaufen (Abbildung 24). Diese Haupttrassen werden mit einer kalkulierten Breite von 4,5 m vorgesehen.

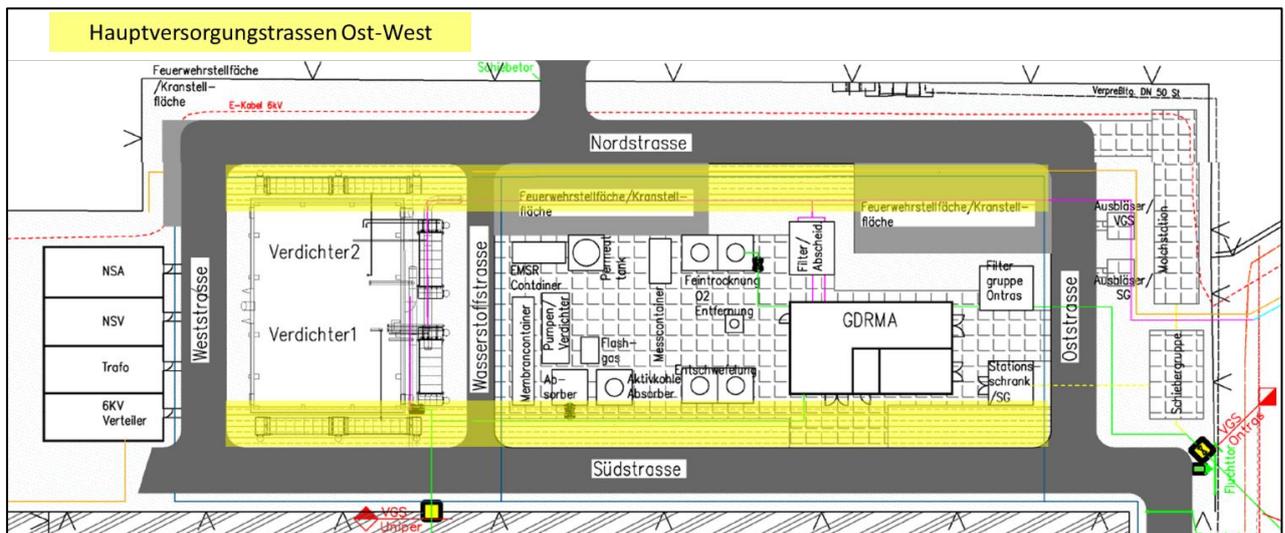


Abbildung 24: Hauptversorgungstrassen West-Ost

Dazu ist die Errichtung von H<sub>2</sub>-OT-Pipelines zur Verbindung der gasbetreffenden Kernkomponenten sowie die Direkteinspeisung aus der Elektrolyse in die ONTRAS-Leitung vorgesehen. Die erforderliche 6 kV-Stromversorgung wird vom südlich gelegenen Umspannwerk entlang der westlichen Grundstücksgrenze zur Elektrolyse (Umspannwerk) und weiter an der südlichen Grundstücksgrenze der H<sub>2</sub>-OTA zur 6 kV-Verteilung herangeführt. Von dort aus erfolgt die Erschließung zum Trafo. Für die 6 kV-Leitung Richtung Feldleitung und Verdichter werden bautechnische Maßnahmen in Phase II.1 getroffen. 6 kV-Leitungen und Druckrohre (z.B. OT-Piping) werden in Einzeltrassen verlegt. Als Option wird eine Wärmeversorgungstrasse zur Elektrolyseanlage von UNIPER in der Planung mit vorgesehen, da die dort entstehende Abwärme für die Gasaufbereitung genutzt werden soll. Die Anbindung der Wärmeversorgung zwischen Elektrolyse und H<sub>2</sub>-OTA erfolgt über den kürzesten Weg oder über den Eingang der H<sub>2</sub>-OTA im Osten.

#### 4.4.6 Erschließung Wasser / Abwasser

Nach derzeitigem Stand wird ausschließlich Brauchwasser (z.B. Kühlung Verdichter Phase II.2, Heizung, Oberflächenreinigung) mit diskontinuierlicher Mengenabnahme auf der H<sub>2</sub>-OTA benötigt. Für die Elektrolyseanlage wird eigens eine Wasserleitung zur Versorgung der Elektrolyse mit Wasser geplant. In diesem Zuge wird ein Abzweig / Unterverteilung für die H<sub>2</sub>-OTA vorgesehen.

Als Abwasser fällt derzeit nur Niederschlagwasser von versiegelten Flächen an. Mit Niederschlagwasser ist, bei einer jährlichen Niederschlagsmenge von 498 mm/m<sup>2</sup> (Region Bad Lauchstädt) und einer versiegelten Fläche von ca. 2.100 m<sup>2</sup> (Phase II.1 und II.2), mit einem jährlichen Volumen von 1.045 m<sup>3</sup> zu rechnen. Das gesamte anfallende Regenwasser (incl. Umhausungen) wird in dem südlich der H<sub>2</sub>-OTA liegenden Löschwasserreservoir eingeleitet.

Weiteres Abwasser fällt nicht an, da während des Betriebs nur temporär Mitarbeiter auf der Anlage arbeiten werden. Diese können die sanitären Einrichtungen der CH<sub>4</sub>-OTA nutzen. Für den Zeitraum der Bauarbeiten sind auf der Baustelle mobile Sanitärcontainer vorgesehen, die keinen Wasser- / Abwasseranschluss benötigen.

#### 4.4.7 Molchschleuse, Schiebergruppe, Stationsschrank und Ausbläser Schiebergruppe

Im nordöstlichen Bereich der H<sub>2</sub>-OTA wird durch den Netzbetreiber ONTRAS die Molchschleuse errichtet. Zur Molchstation gehört eine Eingangsarmatur DN 500 unter Geländeoberkante mit entsprechender Umfahrung (Treibleitung für Molch). Dahinter wird das Molchrohr aus der Erde geführt und mit einer Molcheinführung und Schließdeckel versehen. Weiterer Bestandteil ist die Schiebergruppe mit separatem Ausbläser und Treibgasleitung. Für den Betrieb der Molchung wird ein Stationsschrank zur Fernbedienbarkeit der Schiebergruppenarmaturen benötigt. Bis auf den Stationsschrank werden alle Komponenten nach aktuellem Stand als Freiluftanlage errichtet. Hierzu ist die Errichtung der Fundamente als dauerhaft bebaute und versiegelte Flächen vorzusehen. Für die Komponenten werden mehrseitige Zuwegungen (dauerhaft bebaute teilversiegelte Flächen, z.B. Pflaster) ausgehend von der Straße errichtet. Im Zuge der Detailplanung wird der Aufbau des Fundamentes (z.B. Schichtaufbau) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen (Dimensionierung, Statik) konkretisiert.

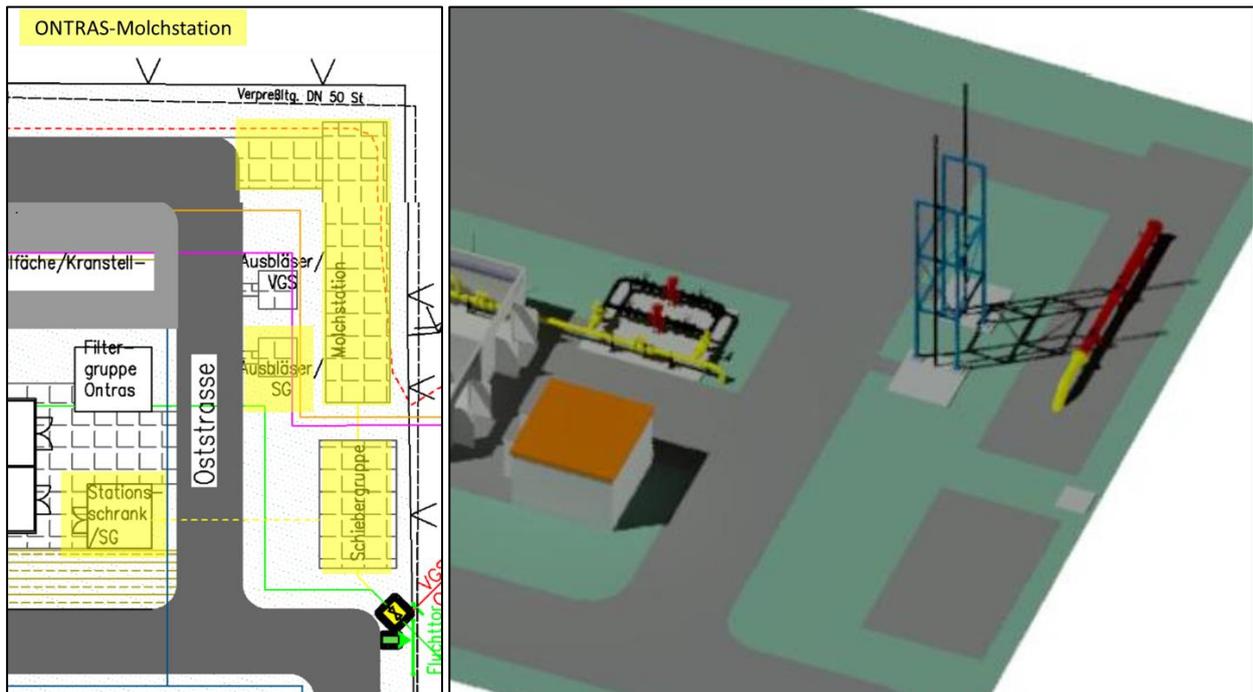


Abbildung 25: Molchschleuse und Nebenanlagen / 3D Darstellung

Die vorgesehenen Flächen werden auf der H<sub>2</sub>-OTA reserviert. Die Errichtung und Genehmigung der Anlagen betrifft die ONTRAS. Derzeit läuft hierzu ein Vorprüfungsverfahren beim Landesverwaltungsamt in Halle „Umstellung der Ferngasleitungen (FGL) FGL 46.04 inkl. Molchstation Bad Lauchstädt“. Während der Bauphase werden die Bauflächen mittels Baumzäunung getrennt.

#### 4.4.8 Fundamentisolierungen- und Erdungssysteme

Bei der Errichtung der Fundamente (z.B. GDR(M)A) werden entsprechende Isolierungen (z.B. Folien mit ausreichender Stärke) gegenüber dem zu errichteten kathodische Korrosionsschutz der Rohrleitungen vorgesehen. Dazu werden Erdungssysteme für Blitzschutz konzeptionell berücksichtigt.

#### 4.4.9 Objektschutz sowie Flucht- Rettungswege

Die gesamte H<sub>2</sub>-OTA wird mittels Stabmattenzaun mit Über- und Unterkriechschutz eingezäunt und die Zufahrt kann aus südlicher Richtung (Zufahrt über die Straße K2150) erfolgen. Die Zufahrtsstraße wird dazu mit Personentüren- bzw. -toren ausgerüstet. Diese werden mit einem elektronischen System zur Zutrittsberechtigung von Personen über Zutrittsausweise versehen. Diese Personentüren - bzw. -tore fungieren gleichzeitig als Fluchttore vom Gelände der H<sub>2</sub>-OTA. Darüber hinaus befinden sind zwei weitere in die Umzäunung eingebaute Fluchttore im Osten und Westen des Geländes. Ggf. wird in Abstimmungen zum Objektschutzkonzept nach der Errichtung zusätzlich ein vertraglich zu bindender Wachsenschutz für regelmäßige Kontrollgänge zur Überwachung des Standortes eingesetzt.

#### 4.4.10 Anlagen der Löschwasserversorgung

Im Süden an der Zufahrtsstraße K2150 wird die Errichtung eines Löschwasserreservoir vorgesehen und in der Detailplanung abgestimmt. An der Entnahmestelle wird eine Aufstell- und Bewegungsfläche einschließlich Zufahrt errichtet. Die Errichtung einer Löschwasserleitung vom Reservoir entlang der Zufahrtsstraße bis zur H<sub>2</sub>-OTA wird ebenfalls abgestimmt. Auf der H<sub>2</sub>-OTA

wird ein Löschwasserring entlang der Straßen errichtet, die unmittelbar die Feuerwehraufstellflächen erreichen. Das Löschwasserreservoir wird hauptsächlich über das anfallende Niederschlagswasser auf der H<sub>2</sub>-OTA gespeist. Dazu wird ein Regenwasserleitungssystem von der H<sub>2</sub>-OTA bis zum Löschwasserreservoir verlegt. Für den Überlauf des Löschwasserreservoirs wird geprüft, ob z.B. durch Starkregen kurzfristig (Tages- bzw. Wochenmenge) überschüssiges eingeleitetes Wasser einer Versickerung zugeführt werden kann. Die Auslegung des Löschwasserreservoirs wird im SBP H<sub>2</sub>-OTA Anlagentechnik näher beschrieben.

#### 4.4.11 Verdichteranlage inkl. Nebenanlagen und Kühlung (Phase II.2)

Für die Verdichteranlage werden die baulichen, technischen und funktionalen Anforderungen aus dem DVGW-Arbeitsblatt G 497 und DIN EN 12583 berücksichtigt. Insgesamt sind zwei baugleiche Kolben-Verdichteranlagen mit einem Elektroantrieb vorgesehen. Es ist davon auszugehen, dass die beiden Verdichteranlagen zeitlich getrennt voneinander errichtet werden. Für den Kolben-Verdichter inkl. seiner Nebeneinrichtungen und zugehöriger EMSR-Technik wird im Zuge der Errichtung der H<sub>2</sub>-OTA eine Umhausung bzw. eine Verdichterrhalle vorgesehen.

Die Verdichtereinheiten werden in Anlehnung an die geltenden Gesetze und Vorschriften ausgelegt und ausgeführt. Unter Beachtung der gültigen Vorschriften, insbesondere ATEX-Richtlinie, soll als Sekundärsperrium der Stickstoff verwendet werden. Die Verdichter werden mit einem Pumpverhütungsschutz und -regelsystem ausgerüstet. Jedem Verdichter wird austrittseitig ein Luft- bzw. Wassergekühltes Zwischen- und Nachkühler vorgesehen. Die Gaskühlung wird so ausgelegt, dass die Auslegungstemperatur des nachgeschalteten Pipelinesystems und die zulässigen Temperaturen der Verdichtereinheiten nicht überschritten werden.

Die Umhausung soll innerhalb der östlichen Ringumfahrung errichtet werden. Hierfür ist die Errichtung eines eigenen Fundamentes für jede Maschine vorgesehen. Unmittelbar in westliche Richtung innerhalb der Ringumfahrung angrenzend erfolgt die Errichtung der Nebenanlagen. Dies beinhaltet den Verdichteranschluss (6 kV) sowie den Verdichterkühler. Der Verdichterkühler wird mit einem separaten Fundament ausgestattet und in offener Bauweise ausgeführt. Für den Verdichter inkl. Nebenanlagen werden mehrseitige Zuwegungen (dauerhaft bebaute teilversiegelte Flächen, z.B. Pflaster) ausgehend von der Straße errichtet. Die Fundamente aller Umhausungen / Komponenten werden als dauerhaft bebaute und versiegelte Flächen definiert. Im Zuge der Detailplanung wird zunächst eine Verdichterauswahlstudie durchgeführt, worauf aufbauend der Aufbau von Fundamenten und Umhausung (z.B. Schichtaufbau, Wand- und Dachkonstruktion, Statik) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen konkretisiert wird.

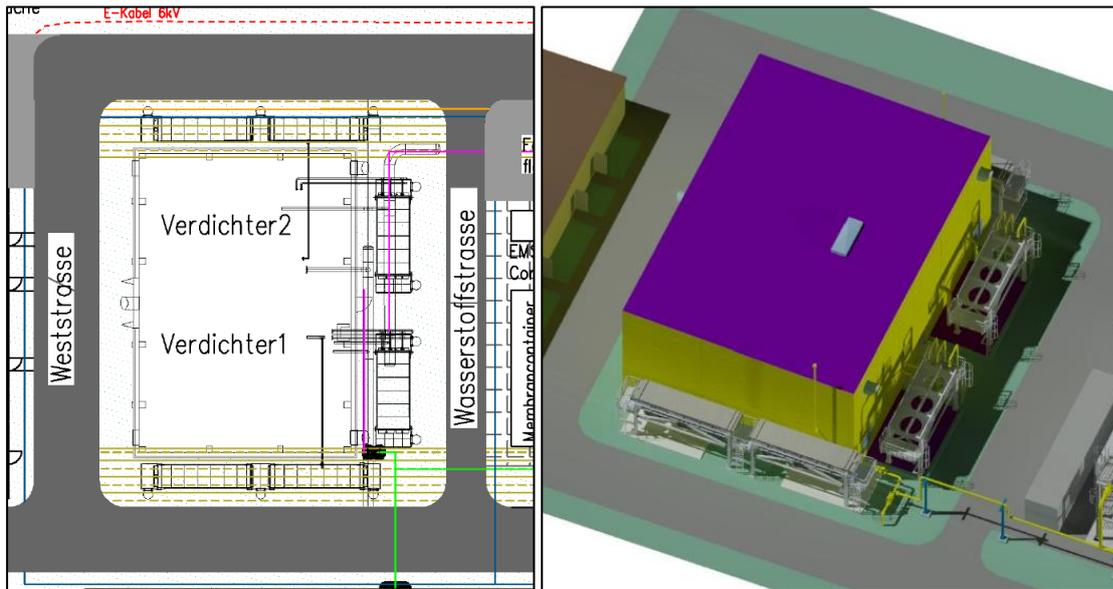


Abbildung 26: Anlagen des Verdichters / 3D-Darstellung

#### 4.4.12 Filtergruppe ONTRAS und Filter / Abscheider

Im östlichen Ring der H<sub>2</sub>-OTA befinden sich die Filtergruppe ONTRAS (AktivkohleeingangsfILTER der Transportpipeline) sowie die Filter- und Abscheidergruppe für den Ausspeicherprozess aus der Kaverne. Diese werden nach aktuellem Stand als Freiluftanlagen konstruiert. Hierzu wird jedoch jeweils ein eigenes Fundament mit Zuwegung vorgesehen. Im Zuge der Detailplanung wird der Aufbau des Fundamentes (z.B. Schichtaufbau) in Abhängigkeit der technischen Anforderungen konkretisiert.

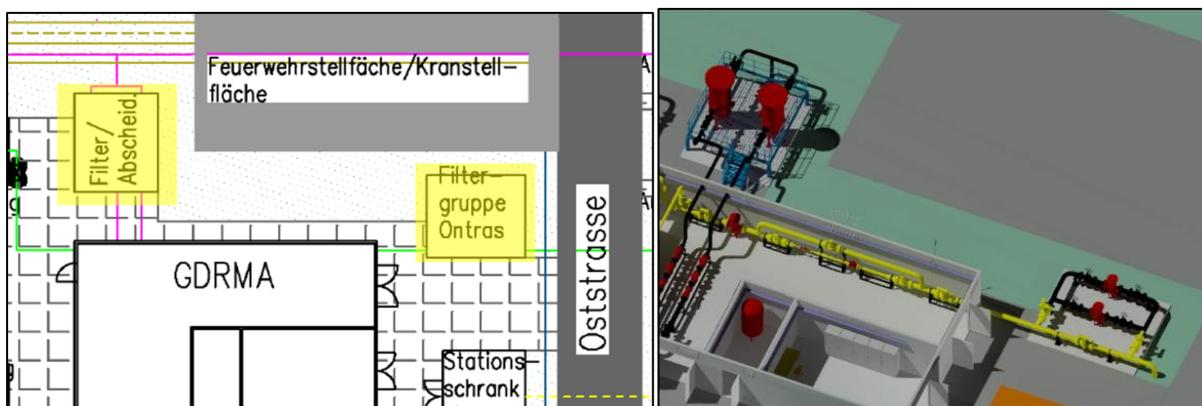


Abbildung 27: Filter / Abscheider der H<sub>2</sub>-OTA (nach Ausspeicherung Kaverne) sowie der Transportleitung 3D-Darstellung

#### 4.4.13 Kanäle für Ver- und Entsorgungstechnik, Trassen für OT-Piping

Als Erweiterung erfolgt in der Phase II.2 der Anschluss an Verdichter, Gasdruckregelanlage und Feldleitung. Konkret erfolgt der Stromanschluss von der 6 kV-Verteilung aus an den Verdichter und parallel zur Feldleitung entlang (siehe SBP H<sub>2</sub>-Feldleitung).

#### 4.4.14 Fundamentisolationen- und Erdungssysteme

Bei der Errichtung der Fundamente (z.B. Verdichter) werden entsprechende Isolationen (z.B. Folien mit ausreichender Stärke) gegenüber dem zu errichteten kathodische Korrosionsschutz

der Rohrleitungen vorgesehen. Dazu werden Erdungssysteme für Blitzschutz konzeptionell berücksichtigt.

#### 4.5 Versuchspläne für die Untertage- und Obertageausrüstung

Für den Versuchsbetrieb der Speicheranlagen ist entsprechend der Projektstrukturierung in Phase II.1 und II.2 eine Aufteilung der Versuchspläne in den Betrieb der Obertageanlage mit Schwerpunkt Gasreinigung und Gasmengenmessung (Phase II.1) und der Untertageanlage mit den Schwerpunkten Ein- und Ausspeicherung sowie dem Monitoring des Speicherbetriebes (Phase II.2) vorgesehen. Die Versuchspläne sind in die Antragstellung zum Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt eingegangen. Die Versuchspläne sind mit der Realisierung des Reallaborvorhabens weiter zu detaillieren und insbesondere mit den Anforderungen aus den Randbedingungen von Windpark und Abnehmern abzustimmen. Insofern muss sich der Betrieb in der ersten Phase den Vorgaben von Windpark und Elektrolyse als primäre Wasserstoffproduzenten unterordnen sowie eng mit dem Versuchsbetrieb der H<sub>2</sub>-Pipeline abstimmen.

##### Phase II.1: Gasreinigung und Gasmengenmessung der OTA

Mit der Inbetriebnahme der H<sub>2</sub>-Pipeline werden zwei Arbeitsschwerpunkte verfolgt. Im bidirektionalen Betrieb bei der Befüllung der Pipeline sind die Verunreinigungen aus dem ehemaligen Erdgasbetrieb und deren zeitliche Veränderung festzustellen. Diese Tests können bereits frühzeitig im Vorhaben vorgenommen werden, da sie wertvolle Informationen für die Auslegung der Gasreinigung liefern. Im Rahmen dieses Erstbetriebes wird die Gasmengenmessung im bidirektionalen Betrieb (Ein- und Ausspeisebetrieb) simuliert. Dazu sind die Messgenauigkeiten für alle wesentlichen Betriebszustände aus den Vorgaben der MID (Measurement-Instrumentation Directive) zu ermitteln. Das sind je Richtung Minimal-, Kleinlast-, Nenn- und Überlast im Wechsel- und Dauerbetrieb zu erproben. Ergänzend ist die Leckagemessung für die Pipeline zu erproben. Die Dauererprobung erfolgt mit dem laufenden Lieferbetrieb gemeinsam mit der Elektrolyse in Richtung Leuna. Auch hier werden Wechsel- und Dauerbetrieb entsprechend den Betriebsvorgaben der Elektrolyse erprobt.

Nachfolgend zur Inbetriebnahme der Elektrolyse wird der Forschungsbetrieb der Gasreinigung aufgenommen. Die Gasreinigung wird versetzt zu den übrigen Anlagen in den Forschungsbetrieb eingebunden. Dazu gehören die Baugruppen Triethylenglykol-Trocknung (TEG), Aktivkohleadsorber (für Kohlenwasserstoffe und Substanzen), Entschwefelung (H<sub>2</sub>S), O<sub>2</sub>-Entfernung und der Feintrocknung. Für die Zwecke der Testung werden Teilströme des Elektrolysewasserstoffs gezielt mit Spurenstoffen beaufschlagt. Das kombinierte Gasreinigungsverfahren wird mit dem so verunreinigten Gas in den relevanten Leistungsstufen und Betriebsdrücken getestet. Schwerpunkt bilden die Trocknung und die Entfernung von Schwefelverbindungen. Darüber hinaus stehen höhere Kohlenwasserstoffe im Fokus, die aus Desorptionsprozessen aus ehemaligen Erdgas-Anlagenstrukturen stammen können. Auch in diesem Fall wird ein Untersuchungsprogramm aus Dauer und Wechselbetrieb zusammengestellt. Für die TEG-Trocknung mit integrierter Membranreinigung des TEG schließen sich den Test auch eine Optimierung des Anlagenbetriebs an. Der Testbetrieb wird auch in der Phase II.2 mit realem Gas aus der Kaverne sowie dem Gas zur Befüllung der Kaverne fortgeführt. Es ist vorgesehen den Forschungsbetrieb am Demonstrator im Jahr 2024 aufzunehmen und mindestens über zwei Jahre fortzuführen.

Phase II.2: Ein- und Ausspeicherung sowie Monitoring des Speicherbetriebes

Erst mit der Phase II.2 werden Verdichter, Gasregelung sowie die Kaverne mit ihrer Anbindung (Feldleitung) an die OTA errichtet. Demzufolge werden wesentlichen FuE-Arbeiten zum Speicher erst in dieser Phase vorgenommen. Der Forschungsbetrieb wird in zwei Abschnitte aufgeteilt. Die Gaserstbefüllung (GEB) stellt zunächst noch keinen Speicherbetrieb im eigentlichen Sinne dar, da sie bei nahezu gleichbleibendem Druck erfolgt. Im Rahmen der GEB erfolgen die ersten Monitoring-Untersuchungen. Die GEB wird sich voraussichtlich über 1 bis 2 Jahre erstrecken. Zu den FuE-Arbeiten gehören:

- Die Vermessung des Ausgangszustandes der Kaverne am Ende der GEB
- Dichtheitstests für die Komplettierung der Rohrtour und des Wellheads unter H<sub>2</sub>
- Überwachung der ausgespeisten Sole (Salzgehalt, Verunreinigungen)
- Untersuchung des Entwässerungsstrangs nach der GEB auf Wasserstoffversprödung
- Monitoring des Verdichters während der GEB, inkl. Leistungs- und Performancetest (Effizienz in verschiedenen Laststufen)

Während des Speicherbetriebes mind. 1 – 2 Jahre:

- Erprobung des Dichtheits-Monitorings über die Ringräume der Rohrtour, inkl. einer Überwachung der Ringraumflüssigkeit
- Untersuchung der LzRT auf Schädigung durch Wasserstoff und Korrosionsüberwachung während des Betriebs durch zyklische Befahrung der Bohrung während des Betriebs
  - Multifingertool (mechanisch) auf Korrosion
  - Elektromagnetische Messung auf Korrosion und Rissbildung
- Überwachung der Gaszusammensetzung in zyklischen Abständen je nach Fahrweise, zur Untersuchung der Aufnahme von Feuchte und Spurenstoffen aus der Kaverne, in Abhängigkeit von Füllstand und Gasaufenthaltszeit
- Gezielte Simulation des Speicherbetriebes sowohl als saisonaler Test (lange Speicherzyklen ca. 0,5 – 1 Jahr) als auch kurzfristige Speicherzyklen auf unterschiedlichen Füllstufen (Min, Max, Mitte; im Wechsel ca. 1 Woche bis 1 Monat) bei unterschiedlichen Druckgradienten
- Validierung des Speichermodells zur Kavernenintegrität, Gasvermischung und Bohrungsintegrität
- Fortführung des Tests von Gasreinigung, Gasregelung und Gasmengenmessung parallel zum Speicherbetrieb

Nach Abschluss des Forschungsbetriebes werden sowohl die OTA als auch die UTA einer ausführlichen Analyse hinsichtlich von Materialveränderungen unterzogen. Der erste Abschnitt des Forschungsbetriebes (Phase II.1) wird ggf. in den Gültigkeitszeitraum des aktuell zur Zulassung eingereichten HBP fallen. Für die Durchführung des zweiten Betriebsabschnitts (Phase II.2) wird zu gegebener Zeit eine Verlängerung bzw. Neuzulassung des HBP erfolgen. Soweit die Durchführung einzelner Forschungsmaßnahmen dies erfordern, werden zusätzlich entsprechende Sonderbetriebspläne erstellt und zur Zulassung eingereicht.

## 4.6 Entwicklung der H<sub>2</sub>-Pipeline-Anbindung (AP 3.4)

Die Mengenmessung soll die H<sub>2</sub>-Menge sowohl bei der Ein- als auch bei der Ausspeisung erfassen und muss daher bidirektional aufgebaut sein. Hierzu kann ein Gaszähler mit bidirektionalen Messeigenschaften (z. B. Ultraschallgaszähler) oder ein Aufbau der Messstrecken als Z-Schaltung eingesetzt werden.

Zum Monitoring der geforderten Gasqualität ist darüber hinaus die Gasbeschaffenheit sowie der Druck und die Temperatur zu messen. Sowohl auf der Obertageanlage als auch im Netzknoten Leuna sind die Messkonzepte aufeinander abzustimmen. Im Rahmen eines Forschungsbetriebs des umgestellten Leitungsabschnittes werden zudem Untersuchungen durchgeführt, ob Begleitstoffe aus Ablagerungen in der Rohrleitung zur Verunreinigung des transportierten Wasserstoffs führen können. Um die benötigte Reinheit am Übergabepunkt in Leuna zu gewährleisten, wird, neben den üblichen Staub- und Flüssigkeitsabscheidern, ein Aktivkohlefilter vorgeschaltet, um Begleitstoffe zu entfernen.

Die Anlagen werden mit einem maximalen Betriebsdruck (MOP) von 30 bar betrieben und Materialseitig auf einen Druck von max. 70 – 100 (Präzisierung im Engineering) bar ausgelegt.

## 4.7 Entwicklung eines MSR-Konzeptes (AP 3.5)

### 4.7.1 Entwicklung eines MSR-Konzeptes für die Obertageausrüstung (AP 3.5.1)

#### Automatisierungs- und Prozessleitsystem (PLS)

Das PLS besteht aus einem leistungsstarken Automationssystem, welches sich aus Steuerungs- und Visualisierungstechnik zusammensetzt. Es ermöglicht dem Anlagenbetreiber jederzeit den Zustand der Anlage zu erkennen und diese steuern zu können, ohne dabei sicherheitstechnische Parameter zu verletzen. Durch das Prozessleitsystem werden alle Regelungen vollautomatisch überwacht und gesteuert, anhand der vorab definierten Grenzwerte. Die abzufahrenden Leistungsparameter kommen vom Anlagenfahrer vor Ort.

Das PLS wird serverseitig mit einem redundanten Runtime-Serverpaar und einem Archivserver ausgerüstet. Das Runtime-Serverpaar fungiert hierbei als Herzstück des Prozessleitsystems, da hier alle relevanten Prozessdaten auflaufen, verarbeitet und Steuerungssignale an die SPS ausgegeben werden. Weiterhin erfolgen hier die lokale Visualisierung, Bedienung und die Systemdiagnose. Dieses System hat ein hohes Maß an Ausfallsicherheit sicher zu stellen und ist daher redundant ausgelegt. Als Hardware werden leistungsstarke Server mit redundanten Einspeisungen und Festplatten verbaut. Auf einem der Runtime-Server wird das Engineering-System implementiert sein, welches dem Systemintegrator ermöglicht die Anlage zu programmieren (Engineering) bzw. nach der Inbetriebnahme gegebenenfalls Anpassungen durchzuführen. Der Archivserver dient zur Langzeitarchivierung der relevanten Prozessdaten und ist mit einer entsprechenden RAID-Einstellung konfiguriert (RAID 5 und größer). Die Bedienung und Steuerung des PLS erfolgt hierbei über zwei separate Bedienarbeitsplätze (redundant) in der Leitwarte. Diese sind ausgerüstet mit einem leistungsstarken Industrie-PC's und drei Monitoren.

Die einzelnen Komponenten des Prozessleitsystem und des Automatisierungssystems werden durch ein leistungsstarkes und ausfallsicheres Bussystem vernetzt. Der grundsätzliche Aufbau dieses Systems erfolgt in einer Ringstruktur, welche übergeordnet auf zwei redundante

Netzwerkswitche aufläuft. Zusätzlich zu den Standard-Steuerungen kommen je nach Funktionsanforderungen Fail-Safe-Komponenten zum Einsatz, welche je nach Hersteller voll integrierbar in das Steuerungssystem sind oder mit Hilfe einer separaten Sicherheits-Steuerung (Fail-Safe-SPS) in das Automatisierungssystem eingebunden werden. Ziel ist es bei eventuellen Störungen mit Hilfe dieser Fail-Safe Steuerungen die Anlage in einen vorab definierten sicheren Zustand zu bringen. Hierbei ist als Schutzeinrichtung die gesamte Strecke vom Signalgeber bis zum Aktor zu berücksichtigen. Aus dem festzulegenden Sicherheitslevel ergeben sich die sicherheitsgerichteten Konstruktionsprinzipien, die eingehalten werden müssen, damit das Risiko einer Fehlfunktion minimiert werden kann. Dabei wird geprüft, ob Schutzeinrichtungen mit SIL-zertifizierten Geräten und einer SIL-zertifizierten Steuerung inklusive sicherheitsgerichteter Schütze und Relais zum Einsatz kommen. Die Signale der zur Anwendung kommenden Gefahrenmeldeanlagen wie Gaswarnanlage und Brandwarnanlage werden potentialfrei auf Übergabeklemmleiste zur Verfügung gestellt und wirken über das Fail-Safe-System auf die Anlagen.

Das PLS übernimmt die Steuerung der späteren Anlage in regulären Betrieb. Hierbei wird generell zwischen:

- Einspeicherungsbetrieb,
- Ausspeicherungsbetrieb und
- Wartungsbetrieb (Handbetrieb) unterschieden.

Im Bedien- und Beobachtungssystem wird folgendes mittels Prozessgrafiken oder anderen Darstellungsformen visualisiert:

- Gesamtanlage & ihre Teilanlagen anhand der R&I-Schemata (Rohrschema)
- Fahrwegsschaltungen, Armaturenstellungen
- Anlagenparameter, Anlagenzustände
- Fehlermeldungen
- Störungen
- Alarmübersicht
- Spannungsversorgung inklusive USV oder NEA
- Systemzustand
- Protokolle
- Fahrwege
- Anlagenzustand

Sie ermöglichen es dem Anlagenfahrer jederzeit die Anlage überwachen und steuern zu können. Mit Hilfe von entsprechenden Alarmzeilen wird er auf kritische Zustände der Anlage aufmerksam gemacht und kann auf diese entsprechend reagieren.

Mit Hilfe eines abgesetzten Bedienarbeitsplatzes soll von der Leitwarte des benachbarten Erdgasspeichers UGS Bad Lauchstädt die H<sub>2</sub>-OTA überwacht und gesteuert werden. Hierfür wird eine LWL-Anbindung der H<sub>2</sub>-OTA an das bestehende LWL-Leitungsnetz des UGS Bad Lauchstädt geschaffen. Die Anbindung erfolgt redundant, um eine möglichst hohe Ausfallsicherheit zu garantieren.

### Energieversorgung

Die Energieversorgung erfolgt durch eine 6 kV-Einspeisung vom Umspannwerk. Hierzu wird eine 6 kV-Leitung über eine separate Trasse im Süd-Westen der H<sub>2</sub>-OTA an die 6 kV-Verteilung der H<sub>2</sub>-OTA herangeführt. Die Mittelspannungsschaltanlage versorgt folgende Abnehmer

- Transformator 6 / 0,4 kV (Eigenbedarf OTA),
- Verdichter,
- Feldleitung,
- Reserve 1 und
- Reserve 2.

Der Transformator und die Niederspannungsschaltanlage für die Niederspannungsversorgung der H<sub>2</sub>-OTA befindet sich in einer Umhausungen. Der Eigenbedarfstransformator stellt die Energie für die Versorgung der 0,4 kV-Ebene an der Niederspannungsschaltanlage auf der OTA bereit. Weiterhin wird ein Transformator 6 / 0,4 kV für die Versorgung der Verbraucher des Kavernenplatzes vorgesehen.

Vom Eigenbedarfstransformator wird eine Niederspannungshauptverteilung (NSHV) mit 400 V/50Hz ±1% gespeist. Die NSHV befindet sich in der Trafoumhausung. Die NSHV wird über drei Phasen, Neutralleiter und Erdungsschienen verfügen. Das Netzsystem ist als TN-S oder TN-CS ausgelegt. Durch die NSHV werden u.a. folgende Gebäude / Anlagen gespeist:

- Technologische Anlagen, Antriebe, Pumpen, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Automationstechnik,
- Gebäude- und Haustechnik,
- Beleuchtungsanlagen,
- Verdichterumhausung (außer Verdichterantrieb),
- Messraum / EMSR-Raum / Steuerluftanlage in GDR(M)A,
- Gasaufbereitungsanlage und
- Beleuchtungsanlage.

Jedes Gebäude / Anlage verfügt über eine eigene Unterverteilung. Die von den Unterverteilungen abgehenden Stromkreise sind durch Leitungsschutzschalter abzusichern.

Es ist eine Netzersatzanlage (Dieselaggregat mit Tank) für die Versorgung der OTA auf der Mittelspannungsebene (6 kV) vorgesehen. Die Leistung der Netzersatzanlage wird so ausgelegt, dass die gesamte OTA mit Ausnahme der Verdichter voraussichtlich für 72 h betrieben werden kann. Im Falle eines Stromausfalls wird hierfür eine leistungsgerechte USV-Anlage vorgesehen. Das USV-System soll Schwankungen, Ausfälle und Kurzunterbrechungen des Versorgungsnetzes von den Gleichstromverbrauchern (Messeinrichtungen) fernhalten. Die USV besteht aus einer Batterie und einem Transverter für die Spannungsebene 240 V. Diese USV (inklusive Batterie) wird im Leistungsschrank untergebracht.

### Erdungs- und Blitzschutzmaßnahmen

Die H<sub>2</sub>-OTA wird in die Blitzschutzklasse II nach DIN EN 62305-2 eingestuft. Die Einstufung in die Blitzschutzklasse II erfolgte auf Grundlage einer Risikoanalyse gemäß DIN EN 62305. Sämtliche Gebäude und Freianlagen werden mit äußerem Blitzschutz ausgerüstet. Zum Schutz der installierten Technik der OTA werden sämtliche Gebäude und Anlagen mit einem inneren Blitzschutz ausgerüstet.

Das Verdichtergebäude und das EMSR-Gebäude werden mit einem Ringerder ausgestattet. Weiterhin wird für die Freianlagen (Molchschleuse, Trocknung, Membrananlage) je ein Tiefenerder vorgesehen. Die Tiefenerder und die Ringerder werden miteinander verbunden. Bei der Errichtung der Fundamente (z.B. GDR(M)A) werden entsprechende Isolierungen (Folien mit ausreichender Stärke) gegenüber dem zu errichteten kathodische Korrosionsschutz der Rohrleitungen vorgesehen. Dazu werden Erdungssysteme für Blitzschutz konzeptionell berücksichtigt.

Potenzialausgleich wird ausgeführt und die Gebäude werden mit Fundamenterder ausgestattet. Alle leitenden Anlagenbestandteile und Komponenten werden in den Potenzialausgleich integriert. Zum Schutz gegen elektrostatische Aufladungen werden Metallteile, gemäß den Normvorgaben, in den Potenzialausgleich eingebunden.

### Messtechniken

Der Instrumentierungsumfang im Rahmen des vorliegenden SBP umfasst Messtechnik mit örtlicher Anzeige und Messtechnik mit Fernübertragung. Als Messgeräte mit Fernübertragung kommen konventionelle Messgeräte mit Einheitssignal 4-20 mA und HART-Protokoll zum Einsatz. Beim Einsatz im explosionsgefährdeten Bereich kommt Sensorik vorrangig in der Zündschutzart Ex i oder Ex e zur Anwendung. Nachfolgend ist eine Übersicht über die wesentlichen Messpunkte zusammengestellt:

- Druck (Eingangsdruck, Ausgangsdruck),
- Differenzdruck (Filter),
- Temperatur (Medientemperaturen, Kühler, Verdichter, Umgebungstemperatur),
- Feuchte (im Medium Wasserstoff, Gasaufbereitung),
- Durchfluss (Corioliszähler, Ultraschallzähler),
- Füllstand (Filter, Abscheider),
- Stellungsanzeigen (Ventile, Kugelhähne, SBVs) und
- Gasqualitätsmessung (PGC Gasaufbereitung).

### Gefahrenmeldeanlagen

Die Brandmeldeanlage wird gemäß den gültigen Normen und Richtlinien (z.B. DIN 14675, DIN VDE 0833 und VdS 2095) geplant. Auf dem Gelände werden alle Gebäude mit einer Brandmeldeanlage ausgerüstet, das sind zum Beispiel

- Verdichterumhausung,
- Gastrocknungsraumhausung,
- EMSR-Raum in GDR(M)A,
- Gasanalyse-Raum in GDR(M)A,

Es wird eine Brandmeldezentrale auf dem Gelände installiert, welche über Ringleitungen alle Anlagenteile überwacht. Für die Anordnung der Brandmelder wird eine Zweimeldeabhängigkeit berücksichtigt, um dadurch Falschalarme zu vermeiden bzw. zu reduzieren.

In Ex-Bereichen werden ausschließlich Ex-Betriebsmittel je nach Ex-Zonen-Plan eingesetzt, welche über eigensichere Stromkreise mit Ex-Barrieren eingebunden werden.

Die Verdichteranlage und der Gasanalyseraum werden mit einer Gaswarnanlage ausgerüstet, welche auf Grundlage des Brandschutznachweises, der DVGW-Arbeitsblätter und der gültigen DIN EN ausgelegt wird. Je nach Ex-Zonen-Einstufung wird eine Be- und Entlüftungsanlage vorgesehen bzw. dimensioniert.

Die Explosionsgrenzen für Wasserstoff liegen zwischen 4 Vol.-% UEG (untere Explosionsgrenze) und 77 Vol.-% OEG (obere Explosionsgrenze). Mit dem Einsatz der Gaswarnanlage soll aktiv verhindert werden, dass ein gefahrvoller Zustand überhaupt erst entstehen kann. Sie schaltet beim Erreichen von 20 % der UEG die Lüftung ein und beim Erreichen von 40 % der UEG den gesamten Anlagenteil ab (AmVE).

Übergeordnet über das Mess-, Steuer-, Regel- und Überwachungssystem wird ein Not-Aus-System für Sicherheitsabschaltungen installiert, das in einer Sicherheitschaltungen anerkannten fehlersicheren Technik ausgeführt ist. Im Bereich der OTA werden mehrere Not-Aus-Taster installiert, mit deren Betätigung die OTA sofort abgeschaltet und zugefahren werden kann. Die Not-Aus-Taster werden auf der übergeordneten fehlersicheren SPS aufgeschaltet und verarbeitet. Weiterhin kann das Not-Aus anlagenseitig automatisch ausgelöst werden, wenn definierte Sicherheitsparameter verletzt werden. Der sichere Zustand der OTA wird anhand der Sicherheitsbetrachtung und Risikoanalyse (HAZOP) definiert, welche im Vorfeld der Detailplanung durchgeführt werden muss. Je nach Einstufung des Gefahrenpotenzials wird ein AmV oder AmVE ausgelöst.

Gemäß § 49 der technischen Verfügung Nr. 23/2007 des LAGB sowie gemäß DVGW Arbeitsblatt G 463 sind für Rohrleitungen zum Befördern von Gasen ein Korrosionsschutz vorgeschrieben. Dieser besteht aus einer Rohrumhüllung (passiver Korrosionsschutz) und bei erdverlegten Rohrleitungen aus einem kathodischen Korrosionsschutz (aktiver Schutz). Dazu werden die entsprechenden Richtlinien und Normen eingehalten. Überflur liegende Rohrleitungsteile werden mit einem geeigneten Anstrich gegen Korrosion versehen. Bei Rohrleitungen, die das Erdreich verlassen, ist der Boden-Luft-Übergang mit einem für diesen Anwendungsfall geeigneten Umhüllung- / Beschichtungssystem zu versehen. Für die Obertageanlage der Wasserstoffanlage wird ein LKS-System vorgesehen. Die Kavernenanbindungsleitung wird mit einem separaten KKS-System und die H<sub>2</sub>-Kaverneninstallation mit einem Casingschutz versehen, welche im SBP H<sub>2</sub>-Feldleitung beschrieben sind.

Das Konzept zur Überwachung der OT- und UTA wird in die Leitwarte des bestehende Erdgasspeichers eingebunden.

#### Hilfssysteme und Betriebsmittel

Auf dem Gelände der H<sub>2</sub>-OTA werden Sammelleitungen vorgesehen, die zu einem zentralen Ausblässystem im östlichen Bereich führen. Hierbei werden alle Entspannungsleitungen relevanter Kernkomponenten zusammenführt und über diesen zentralen Ausbläser entspannt. Derzeit wird von einer Dimensionierung des Ausblägers von DN200 (Mündungsöffnung) und

einer Höhe von mind. 15,2 m (Ansatz nach DVGW-Regelwerk G 442: 1,5 fache der Mündungsöffnung über höchstes Gebäude – 12 m Verdichter) ausgegangen.

Typische kohlenwasserstoffhaltige Kondensate eines UGS fallen im H<sub>2</sub>-Betrieb nicht an. Es kann Wasser z.B. in der Feldleitung (Phase II.1) anfallen. Aus dem Abscheider würde dies in einen Kondensattank gepumpt und anschließend entsorgt. Bei ausreichender Reinheit kann es sogar dem Überschusswasser der Elektrolyse (UNIPER) zugemischt werden.

In einem Nebenraum der Umhausung GDR(M)A wird eine Drucklufferzeugung vorgesehen. Darüber hinaus werden im Rahmen der Detailplanung geprüft, an welchen Kernkomponenten Druckluft zur Anlagensteuerung benötigt wird. Demzufolge werden entsprechende Druckluftleitungen auf dem Gelände verlegt. Druckluft wird auch für einige der Messungen benötigt (GC), dazu wird eine entsprechende Aufreinigung vorgesehen.

In den erforderlichen Umhausungen (Verdichter, GDR(M)A) wird eine Frostschutzheizung zur Haltung einer Mindesttemperatur von +5 °C vorgesehen.

Neben der Bereitstellung von Druckluft aus der Drucklufferzeugungsanlage wird die Bereitstellung von Stickstoff (N<sub>2</sub>) vorgesehen. Im Rahmen der Detailplanung wird geprüft, an welchen Stellen der H<sub>2</sub>-OTA Stickstoff benötigt wird. Momentan wird der Bedarf für eine N<sub>2</sub>-Verteilung nicht gesehen, der geringe Bedarf (Messtechnik, pneumatische Schaltungen) lässt sich durch den Einsatz von Druckgasflaschen decken. Weitere gase (Argon, Helium, Prüfgase) sind für die Messtechnik relevant, werden aber als Druckgasflaschen im EMSR-Gebäude mit untergebracht.

Als relevanten flüssiges Betriebsmittel ist das TEG anzusehen. Es wird keine Lagerhaltung geben, eine Größenordnung von 20 l wird innerhalb der WHG-Wanne der TEG-Regeneration als Reserve bereitstehen.

#### 4.7.2 Entwicklung eines MSR-Konzeptes für die Gasreinigung (AP 3.5.2)

Der Prozess der Gasaufbereitung ist hinsichtlich der Kosten häufig OPEX-dominiert. Es sind Temperierungs- und Verdichtungsprozesse notwendig. Gerade die klassische Adsorptionstrocknung (Molsieb-trocknung) erfordert für die Regeneration einen erheblichen Energieaufwand. Mit der TEG/Membran – Gastrocknung kann dieser reduziert werden, gleichzeitig eröffnen sich aus Speichergesichtspunkten neue Möglichkeiten der Trocknungsteuerung.

Bisher bei TEG-Trocknungen übliche Bereitschaftsmodi werden nicht nötig sein. Ursache war die diskontinuierliche Ausspeisung von Gas aus den UGS, abhängig vom variierenden Bedarf. Es wurde erstmalig Messtechnik für Messung des Wassergehaltes des TEG identifiziert, die eine Steuerung der TEG-Regeneration über die Membran erlaubt. Gleichzeitig sind höhere Wassergehalte im TEG zulässig, der Fluss über die Membran steigt mit dem Wassergehalt. Damit ergeben sich andere Regelmöglichkeiten und-zeiten, die Temperierung der Membran und des TEG startet erst mit dem Gasfluss. Regelungsmäßig konnte ein Konzept erstellt werden, es besteht kein Temperierungsbedarf des TEG mehr bei Stopp der Ausspeisung. Außerdem wurde ein Konzept bezüglich des Umganges mit freigesetztem Gas (H<sub>2</sub> als Brüdengas) aus der Trocknung und der Feintrocknung. Ein kleiner Verdichter führt freigesetztes, H<sub>2</sub> (ca. 3 m<sup>3</sup>/h, bei Spülprozessen mehr) zurück in den H<sub>2</sub>-Zyklus, so dass keine Emissionen (bzw. Verluste) an H<sub>2</sub> erfolgen. Die Entschwefelung wird ebenfalls an ein Messinstrument (Mehrkomponenten-Lasergarät) gekoppelt, um diese nur bei Bedarf zuzuschalten.

## 5 Anlagen- und Arbeitsschutz für die Speicherforschungsplattform

---

### 5.1 Ergebnis der HAZOP-Studien (AP 4.1)

Die HAZOP-Studie wurde mit Hilfe des TÜV SÜD, Hr. Dr. Hartmut Neumann im Rahmen des HYPOS-INES Projektes und den Experten der Projektpartner zur OTA und Transportpipeline innerhalb von zwei Diskussionsrunden erstellt. In der Anlage 14.9 ist die HAZOP-Studie in Tabellenform für die OTA, GA und Transportpipeline zusammengefasst.

### 5.2 Explosionsschutz- und Brandschutzkonzepte (AP4.5)

Für überwachungspflichtige Anlagen bei denen eine Explosionsgefährdung besteht, wird auf Basis der Gefahrstoffverordnung § 6, Absatz 9 eine Gefährdungsbeurteilung in Form eines Explosionsschutz-Dokumentes erstellt. Bestandteile dieses Dokumentes sind (Inhaltsverzeichnis siehe Anlage 14.10):

- Ermittlung der Explosionsgefährdung für Planungsphase und Phase Betrieb sowie eine Bewertung dieser
- Darlegung eines Explosionsschutzkonzeptes (treffen angemessener Vorkehrungen zur Erzielung des Explosionsschutzes)
  - primäre Maßnahmen:
    - Maßnahmen zur Einschränkung der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre wie Belüftung, Kabeleinführungen mit gasdichten Rahmen, Entspannungseinrichtungen ins Freie, Sicherheitsarmaturen, Gaswarnanlagen, Dichtheit der Anlage (Rohrleitzungen etc.)
  - sekundäre Maßnahmen:
    - Maßnahmen zur Verhinderung der Zündung von Wasserstoff: keine Zündquellen im Bereich von Entspannungsleitungen, elektrostatisch ableitfähige Fußböden, ex-geschützte Elektroinstallationen, Isolierverbindungen, Temperaturbegrenzungen, Inertisierung von Rohrleitungen, Verwendung von ex. geschützten elektrischen Anlagen bzw. Betriebsmitteln (Explosionsgruppe IIC)
  - organisatorische Maßnahmen:
    - Ex-Kennzeichnung, Prüfung von Anlagen in Ex-Bereichen durch Sachverständige, Wiederholungsprüfungen gemäß BetrSichV, wiederkehrende Prüfung aller Betriebsmittel im Ex-Bereich durch Sachverständige
    - kontinuierliche Freimessungen bei Arbeiten in Ex-Zonen mittels mobilem Gaswarngerät
    - Verbot von Feuer, offenem Licht, Mobiltelefonen und anderen Geräten mit Batterien bei Arbeiten im Ex-Bereich; Einsatz von Geräten nach Ex-VO/ATEX
    - kontinuierliche Dichtheitsprüfungen an Anlagen

- personelle Maßnahmen:
  - Unterweisung eigener Mitarbeiter und Mitarbeiter von Fremdfirmen
  - Tragepflicht Persönlicher Schutzausrüstung (Gewährleistung Ableitfähigkeit)
- Zoneneinteilung gemäß GefStoffV Anhang I Nummer 1.7
- Festlegung von Bereichen mit Explosionsschutzmaßnahmen GefStoffV § 11 u. Anhang I Nummer 1
- Umsetzung der Vorgaben gemäß GefStoffV § 15
- Auflistung der Überprüfungen nach GefStoffV § 7 Absatz 7 und welche Prüfungen zum Explosionsschutz nach Anhang 2 Abschnitt 3 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) erforderlich sind

Wasserstoff ist aufgrund seiner Eigenschaften in die Gasgruppe IIC und die Temperaturklasse T1 eingeordnet. Die daraus resultierenden Anforderungen an Anlagen und Betriebsmittel werden, bei der Planung, Installation und Betrieb dieser, beachtet und umgesetzt. Nachstehend sind die vorhandenen Stoffe mit den zur Beurteilung der Explosionsschutzmaßnahmen erforderlichen sicherheitstechnischen Kennzahlen aufgelistet. Sonstige explosionsgefährdete Stoffe sind nicht vorhanden.

Tabelle 7: Stoffdaten eingesetzter Stoffe auf der OTA

Auszug aus Sicherheitsdatenblatt GESTIS-Stoffdatenbank (Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)	Wasserstoff
untere Explosionsgrenze (UEG)	4,0 Vol.-%
obere Explosionsgrenze (OEG)	77,0 Vol.-%
Zündtemperatur	560°C
Temperaturklasse	T 1
Explosionsgruppe	II C
relative Dichte bei 15°C (Luft = 1)	0,08409 kg/l

Im Innern der Gasrohrleitungen herrscht ein Überdruck mit 100 Vol.-% Wasserstoff, respektive keine Ex-Atmosphäre. Bei Normalbetrieb wird keine gefahrdrohende Menge Wasserstoff in die Umgebung der Anlage freigesetzt, die Anlage wird als technisch dicht eingestuft. Betriebsmäßige Gasfreisetzungen in geschlossenen Räumen über Atmungsventile sind nicht vorhanden.

Im Freien kann bei Normalbetrieb oder im Störfall Ex-Atmosphäre durch Entspannen oder Abblasen auftreten. Bei Gasfreisetzung an Austrittsstellen bildet sich je nach freigesetztem Volumenstrom sowie der Windgeschwindigkeit ein Freistrahle mit anschließender Ex-Atmosphäre bzw. eine unmittelbare Ex-Atmosphäre aus. Die folgende Tabelle zeigt eine Auflistung der Ausbläser (Phase II.1). Die grafische Darstellung der in der Tabelle 8 aufgeführten Werte (letzte Spalte) ist in der Anlage 14.11 zu diesem Dokument ersichtlich.

Die Rohrleitungen bzw. Anlagenteile sind technisch dicht bzw. auf Dauer technisch dicht ausgeführt. Sämtliche Rohrleitungen und Anlagenteile werden regelmäßig auf Dichtheit geprüft (intern und extern).

Tabelle 8: Liste der Ausbläser OTA

Anlagenbereich	Pos.:	Radius in m	Höhe in m	Nennweite DN	Druck bar	Ex-Zone
Gasaufbereitung Eingang	E3	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Gasaufbereitung Ausgang	E4	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
GDRMA Mengenmessung	E5	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Eingang / Filter (Phase II)	E6	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
	E12	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
	B1	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
	B2	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
GDRMA PGC (10x)	PGC	1,8	5,5	25/40	16	Zone 2
Feintrocknung 1	B11	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Feintrocknung 2	B12	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Feintrocknung	E 11			25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Absorber	B13	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Absorber Pumpen, Verdichter- Container	E12	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
	B14	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
	B15	14,45	35,49	25	40	Zone 2
Pumpen, Verdichter- Container	B16	14,45	35,49	25	40	Zone 2
	E 13	14,45	35,49	25	40	ZA - gefährdeter Bereich
	B17	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Pumpen, Verdichter- Container Aktivkohle- absorber Aktivkohle- absorber	E14	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Entschwefelung Behälter 1	B18	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Entschwefelung Behälter 2	B19	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2

Anlagenbereich	Pos.:	Radius in m	Höhe in m	Nennweite DN	Druck bar	Ex-Zone
Entschwefelung	E15	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
O <sub>2</sub> Entfernung	B20	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
O <sub>2</sub> Entfernung	E16	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Messcontainer	B21	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Messcontainer	B22	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Messcontainer	B23	14,45	35,49	25/40	40	Zone 2
Messcontainer	E17	14,45	35,49	25/40	40	ZA - gefährdeter Bereich
Ausbläser MS	-	112,3	201,8	200	63	ZA - gefährdeter Bereich
Ausbläser OT-Piping	-	121,2	213,1	200	150	ZA - gefährdeter Bereich

E = Entspannung, A=Atmung und B = Abblaseleitung // E = Zusammenfassung ZA = Zentraler Ausbläser  
grün - gefährdeter Bereich // rot – Zone 2

## 6 Entwicklung der Genehmigungsunterlagen für die SPF (AP 5)

### 6.1 Gesamtkonzept des Genehmigungsverfahrens

Die HYPOS-Initiative folgt einem bereits lang angelegten Konzept. Dies geht von der Grundlagenforschung zu Fragestellungen der Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen und dem Transport in ehemaligen Erdgasleitungen bis hin zum Genehmigungsverfahren. In der Phase I (H<sub>2</sub>-FK) wurde die bergrechtliche Genehmigungsplanung für die Errichtung und den Betrieb des Wasserstoffkavernenspeichers erstellt und zur Zulassung eingereicht sowie die Genehmigung zur Umrüstung und Umstellung der Pipeline auf Wasserstoff zu erlangen. Im Folgeprojekt Energiepark Bad Lauchstädt (Phase II) werden die Komponenten Elektrolyse und Windpark entwickelt und die zugehörigen Genehmigungsverfahren eingeleitet.

In der folgenden Abbildung 28 sind die Genehmigungsbereiche der Teilanlagen, aus Phase I und Phase II, dargestellt. Es sind vier unabhängige Genehmigungsverfahren, bezüglich derer Vorabstimmungen über Zuständigkeiten, Verfahrensabläufe und Schnittstellen bzw. Abhängigkeiten untereinander durchgeführt wurden und werden. Die vier Anlagen werden formal unabhängig voneinander bei der jeweils verfahrensführenden Behörde beantragt.

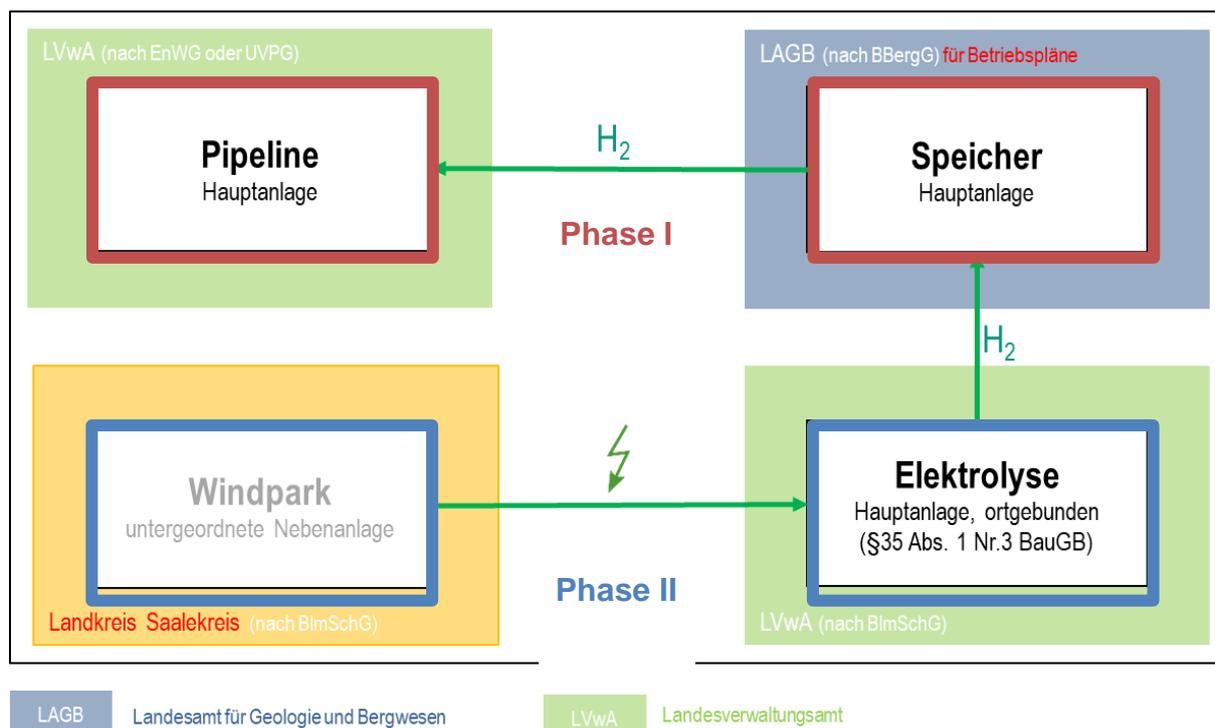


Abbildung 28: Genehmigungsbereiche der Teilanlagen, Land Sachsen-Anhalt

## 6.2 Übersicht zu den Genehmigungsunterlagen der Speicherforschungsplattform (AP 5)

### 6.2.1 Bergrechtliches Genehmigungsverfahren für den Wasserstoffkavernenspeicher

Die VNG Gasspeicher GmbH (VGS) war innerhalb des Teilvorhabens 5 für die Entwicklung der notwendigen Genehmigungsunterlagen sowie die Entwicklung bzw. Durchführung eines Genehmigungsverfahrens für die Errichtung und den Betrieb eines Wasserstoffkavernenspeichers am Betriebsstandort Bad Lauchstädt der VGS verantwortlich.

Als Basis für die Erstellung der Genehmigungsunterlagen wurde im Rahmen des Teilvorhabens 1 unter Federführung des DBI – Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI) die technologische Entwurfsplanung für die untertägige Umrüstung der bis dato solegefüllten Kaverne für den Speicherbetrieb mit reinem Wasserstoff und die Schaffung der obertägigen Infrastruktur für den Betrieb der Wasserstoffkaverne erstellt, wobei die Erstellung der Entwurfs- und Genehmigungsplanung aus Zeitgründen weitgehend parallel erfolgte. Dabei wurden auch die besonderen Sicherheitsaspekte im Zusammenhang mit der Wasserstoffspeicherung untersucht und die im Genehmigungsverfahren erforderlichen Sicherheitsdokumente (u.a. standortspezifische Auswirkungsbetrachtung zur unbeabsichtigten Freisetzung von Wasserstoff, Explosionsschutzkonzept) erstellt. Weiterer wesentlicher Bestandteil der Genehmigungsplanung ist der im Rahmen des Teilvorhabens 3 durch das IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) entwickelte geotechnische Eignungsnachweis für die Nutzung der Kaverne Lt 09 zur Speicherung von Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt.

### 6.2.2 Vorabstimmungen (AP 5.1)

Im Rahmen von Vorabstimmungen mit dem für das bergrechtliche Genehmigungsverfahren zuständigen Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) wurde geprüft und festgestellt, dass gemäß § 1 UVP-V Bergbau für das Vorhaben keine Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bzw. einer allgemeinen oder standortspezifischen Vorprüfung besteht, so dass das Aufstellen eines obligatorischen Rahmenbetriebsplanes mit der Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens zu dessen Zulassung nicht erforderlich war.

Ebenfalls konnte durch die Aufnahme zusätzlicher Angaben in den Hauptbetriebsplan auf das Aufstellen einen fakultativen Rahmenbetriebsplan verzichtet werden.

Ein zusätzliches Genehmigungsverfahren gemäß § 57d BBergG (Störfallbetriebsplan) war vorliegend nicht erforderlich. Insbesondere geht mit der Errichtung des geplanten Wasserstoffkavernenspeichers keine erhebliche Gefahrenerhöhung am Standort einher, da die zusätzlichen Mengen an Wasserstoff im Verhältnis zu den bestehenden Speichermengen am Standort sehr gering sind. Des Weiteren sind keine Schutzobjekte gemäß § 3 Abs. 5c BImSchG vorhanden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Vorabstimmung zwischen dem Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt (MLV) und dem LAGB geprüft und festgestellt, dass das Vorhaben im Einklang mit den Zielen der Raumordnung innerhalb des Vorranggebietes für Rohstoffgewinnung „Speicherfeld Teutschenthal-Bad Lauchstädt“ und des Vorranggebietes für Rohstoffgewinnung „Solfeld Holleben-Bad Lauchstädt-Teutschenthal (SK)“ steht.

Weitere Abstimmungen zur Genehmigung aller Systemkomponenten der SPF sowie des zur Versorgung der SPF mit erneuerbarer Energie vorgesehenen Windparks haben im Vorfeld der Einreichung von Antragsunterlagen mit dem Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt, dem Landkreis Saalekreis, der Stadt Bad Lauchstädt und der Gemeinde Teutschenthal stattgefunden.

### 6.2.3 Entwicklung der Genehmigungsplanung und Einreichung der Betriebspläne

Im weiteren Projektverlauf wurde sodann die bergrechtliche Genehmigungsplanung entwickelt, die entsprechenden Betriebsplanentwürfe mit dem LAGB vorabgestimmt und die fertigen Betriebspläne schließlich beim LAGB zur Zulassung eingereicht.

Dabei wurde zunächst der gemäß § 52 Abs. 1 des Bundesberggesetzes (BBergG) für das Errichten und Betreiben unterirdischer Speicheranlagen erforderliche Hauptbetriebsplan (HBP) für den „Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt“ erstellt und – nach erfolgten Vorabstimmungen zu den Betriebsplaninhalten mit dem LAGB – Ende März 2020 die Zulassung des HBP beantragt.

Anfang Juli 2020 wurde mit der Behörde eine zeitliche Vorziehung der Errichtung einzelner Forschungsbaugruppen der Obertageanlage des Wasserstoffkavernenspeichers (Gasreinigung, Gasmengenmessung) im Rahmen des Folgeprojekts „Energiepark Bad Lauchstädt“ (sog. 2-Phasen-Konzept zur Projektrealisierung) sowie diesbezügliche Zuständigkeitsfragen vorabgestimmt. In einem Folgetermin im September 2020 erklärte sich das LAGB auch für die vorgezogene Errichtung und den Betrieb dieser rein obertägigen Forschungsbaugruppen für zuständig. Dabei konnte man sich mit der Behörde auf einen Gültigkeitszeitraum des HBP von vier Jahren verständigen, sodass die geplante Errichtung und Inbetriebnahme der betreffenden Forschungsbaugruppen in den Gültigkeitszeitraum des HBP fallen. Zur Errichtung und Inbetriebnahme der übrigen Baugruppen der H<sub>2</sub>-Obertageanlage, der H<sub>2</sub>-Feldleitung und der H<sub>2</sub>-

Kaverne, die ab dem Jahr 2026 geplant ist, muss zu gegebener Zeit eine Verlängerung des Gültigkeitszeitraums des HBP bzw. dessen Neuzulassung beantragt werden.

Nachfolgend wurden notwendige Überarbeitungen des HBP in Bezug auf das 2-Phasen-Konzept sowie resultierend aus der erfolgten Beteiligung der Träger öffentlicher Belange (Ergänzungen u.a. bzgl. Gefährdungsbeurteilung (regionale Seismizität) und Eingriffsbewertung/-bilanzierung) vorgenommen und der HBP im Oktober 2020 neu eingereicht. Das Inhaltsverzeichnis des HBP ist diesem Bericht als Anlage 14.1 beigefügt.

Aufbauend auf dem HBP wurden ferner gemäß § 52 Abs. 2 BBergG insgesamt vier Sonderbetriebspläne (SBP) für die neu zu errichtenden bzw. umzurüstenden Anlagenteile (H<sub>2</sub>-Obertageanlage, H<sub>2</sub>-Feldleitung und H<sub>2</sub>-Kaverne) des Wasserstoffkavernenspeichers erstellt und – wiederum nach Vorabstimmung der jeweiligen Betriebsplaninhalte mit dem LAGB – deren unbefristete Zulassung beantragt.

Dabei wurde die Zulassung des SBP für die Errichtung und Inbetriebnahme der Wasserstoff-Feldleitung des Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt (SBP H<sub>2</sub>-Feldleitung), dessen Inhaltsverzeichnis diesem Bericht als Anlage 14.2 beigefügt ist, im Februar 2021 beantragt.

Im März 2021 folgte sodann die Beantragung der Zulassung des SBP für die Umrüstung der Kaverne Lt 09 zur Gaserstbefüllung mit Wasserstoff sowie für die Inbetriebnahme der Kaverne zum Speicherbetrieb (SBP H<sub>2</sub>-Kaverne), dessen Inhaltsverzeichnis diesem Bericht als Anlage 14.3 beigefügt ist. Im Juni 2021 wurde dem LAGB sodann ein Zwischenbericht zu dem bis dahin noch ausstehenden geotechnischen Eignungsnachweis der Kaverne Lt09 nachgereicht. Die Nachreichung des entsprechenden Gutachtens des IfG erfolgte schließlich Mitte Oktober 2021.

Der SBP für die Errichtung der H<sub>2</sub>-Obertageanlage des Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt – Teil Bautechnik (SBP H<sub>2</sub>-OTA Bautechnik) sowie der SBP für die Errichtung und Inbetriebnahme der Anlagentechnik der H<sub>2</sub>-Obertageanlage (SBP H<sub>2</sub>-OTA Anlagentechnik) wurden schließlich im April 2021 zur Zulassung beantragt; die Inhaltsverzeichnisse beider SBP sind diesem Bericht als Anlage 14.6/14.4 bzw. 14.7 beigefügt.

#### 6.2.4 Stand des Genehmigungsverfahrens

Die Anhörungsverfahren zur Zulassung des HBP sowie zur Zulassung des „SBP H<sub>2</sub>-Feldleitung“ begannen zwar erst Ende Juli 2021, jedoch konnten erste Abstimmungen und fachliche Diskussionen der entsprechenden Zulassungsentwürfe, die das Vorliegen der Zulassungsvoraussetzungen des § 55 Abs. 1 Satz 1 BBergG für beide Betriebspläne feststellen, mit der Behörde noch innerhalb der Projektlaufzeit erfolgen. Auf Basis dieser Abstimmungen wurde nachfolgend eine ausführliche Stellungnahme zu den Zulassungsentwürfen eingereicht und mit dem LAGB erörtert und diskutiert.

Ein Schwerpunkt der weiteren Abstimmungen mit dem LAGB zur Zulassung des HBP lag dabei in der behördenseitig zu diesem späten Zeitpunkt erneut aufgeworfenen Frage, ob das vorliegende Vorhaben nicht doch zumindest einer Umweltverträglichkeitsvorprüfungspflicht unterliegt. Zur Begründung der nochmaligen Überprüfung dieser Fragestellung wurde ausgeführt, dass Untergrundspeicher zur Speicherung von Wasserstoff nicht unter § 1 S. 1 Nummer 6a UVP-V Bergbau subsumierbar seien, da Wasserstoff keinem der dort unter lit. a) bzw. lit. b) als Speichermedium aufgeführten Stoffe zugeordnet werden könne. Daher sei zu prüfen, ob das Vorhaben unter § 1 S. 1 Nummer 9 UVP-V Bergbau fällt und sich daraus in Verbindung mit Nummer 9.3.2 der Anlage 1 zum UVP-G bei den vorliegend geplanten Mengen (ca. 6.000 t) des

zu speichernden Wasserstoffs die Pflicht zur Durchführung einer allgemeinen Vorprüfung gemäß § 7 Abs. 1 UVP-G ergibt. Nach intensiver Diskussion schloss sich das LAGB im Ergebnis allerdings der von VGS vertretenen Rechtsauffassung an, wonach für die unterirdische behälterlose Speicherung von Erdgas und anderen Stoffen ausschließlich die Regelungen des § 1 S. 1 Nummer 6a UVP-V Bergbau maßgeblich sind, wohingegen die Regelungen bzw. Grenzwerte der Anlage 1 zum UVP-G nur dann zur Anwendung kommen können, wenn eine behältergebundene Speicherung vorliegt. Eine Anwendung des § 1 S. 1 Nummer 9 UVP-V Bergbau schied damit aus, da Wasserstoffkavernenspeicher ihrer Art und Gruppe nach der Nummer 6a des § 1 S. 1 UVP-V Bergbau unterfallen. Einer darüberhinausgehend aus VGS-Sicht vertretbaren Einordnung des Vorhabens als Anlage zur unterirdischen behälterlosen Speicherung von „chemischen Erzeugnissen“ gemäß § 1 S. 1 Nummer 6a lit. b) UVP-V Bergbau ist das LAGB hingegen nicht gefolgt. Im Ergebnis besteht jedenfalls auch nach nochmaliger Prüfung der diesbezüglichen Rechtslage für das vorliegende Vorhaben keine Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung bzw. einer allgemeinen oder standortbezogenen Vorprüfung.

Eine weitere Anhörung zu den geänderten Zulassungsentwürfen zum HBP sowie zum „SBP H<sub>2</sub>-Feldleitung“ wurde von Seiten der Behörde nunmehr für Mitte Februar 2022 angekündigt; die endgültige Zulassung wird jeweils bis Ende März 2022 erwartet.

Die Anhörungsverfahren zu den SBP „H<sub>2</sub>-OTA Bautechnik“, „H<sub>2</sub>-OTA Anlagentechnik“ und „H<sub>2</sub>-Kaverne“ fielen gänzlich nicht mehr in den Projektzeitraum. Die Anhörungen zu den beiden erstgenannten SBP für die Errichtung und den Betrieb der Obertageanlage sollen ebenfalls Mitte Februar 2022 beginnen. Das Anhörungsverfahren zum SBP „H<sub>2</sub>-Kaverne“ konnte seitens der Bergbehörde noch nicht angekündigt werden.

#### Genehmigungen nach anderen Rechtsgebieten

Nach anderen Rechtsgebieten (z.B. Wasser, Bau- und Denkmalschutzrecht) zusätzlich erforderliche Genehmigungen werden im weiteren Genehmigungsverfahren (mit u.a. den Ergebnissen der Ausführungsplanung) bei den entsprechend zuständigen Behörden eingeholt. Eine Konzentrationswirkung der Betriebsplanzulassung (Entscheidung über alle für das Vorhaben nötigen Zulassungen/Genehmigungen) wird nur in einem Planfeststellungsverfahren erreicht, welches vorliegend nicht durchzuführen war.

#### 6.2.5 Fazit

Im Ergebnis wurden die Projektziele weitestgehend erreicht. Insbesondere wurde die bergrechtliche Genehmigungsplanung für den Wasserstoffkavernenspeicher entwickelt und beim LAGB als zuständiger Landesbergbehörde zur Zulassung eingereicht. Einzig die beantragten Zulassungen liegen zum Zeitpunkt der Abschlussberichterstattung noch nicht vor, obwohl die Betriebspläne im erforderlichen Umfang bereits im Vorfeld der jeweiligen Zulassungsbeantragung mit dem LAGB fachlich diskutiert und entsprechend überarbeitet wurden. Auch war seit Projektbeginn ein stetiger Austausch zum Projektfortschritt zwischen dem Konsortium und der Bergbehörde gegeben. Zum Projektende hin sowie darüber hinaus wurde zudem regelmäßig der Kontakt zum LAGB gesucht sowie Abstimmungen zum Sachstand der Zulassungen initiiert. Jedenfalls bestehen aus VGS-Sicht am Vorliegen der Zulassungsvoraussetzung des § 55 Abs. 1 Satz 1 BBergG in Bezug auf die zur Zulassung eingereichten Betriebspläne keine Zweifel, zumal dies in den bereits vorliegenden Zulassungsentwürfen zum HBP sowie zum SBP „H<sub>2</sub>-Feldleitung“ für diese Betriebspläne seitens der Bergbehörde bereits festgestellt wurde.

Hinsichtlich der Verfahrensstruktur hat sich im Verlauf des Teilprojekts gezeigt, dass das bergrechtliche Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb eines Wasserstoffkavernenspeichers grundsätzlich identisch mit entsprechenden Verfahren betreffend Erdgaskavernenspeicher ist. Schwierigkeiten hat dabei einzig die rechtliche Fragestellung bereitet, ob für die Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen eine Pflicht zur Durchführung einer UVP bzw. einer allgemeinen oder standortbezogenen Vorprüfung besteht bzw. nach den Schwellenwerten welcher Regelungen die entsprechende Einordnung eines solchen Vorhabens ggf. zu erfolgen hat. In vorliegendem Verfahren wurde das Nichtbestehen einer solchen Pflicht nach derzeitiger Rechtslage festgestellt. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob es in Bezug auf die unterirdische behälterlose Speicherung von Wasserstoff zukünftig gesetzgeberische Änderungen bzw. Ergänzungen des § 1 S. 1 Nummer 6a UVP-V Bergbau geben wird.

Entscheidend bei der Konzipierung eines Wasserstoffkavernenspeichers ist die Verwendung von Materialien und Technologien, die auf die Eigenschaften von Wasserstoff abgestimmt sind. Entsprechend sind der Stand der Technik sowie aktuell vorliegende wissenschaftliche Erkenntnisse zur Eignung von Werkstoffen für den Betrieb mit reinem Wasserstoff sowie entsprechend geeignete Technologien (v.a. Verbindungs- bzw. Schweißtechnologien) im Rahmen des Projektes analysiert und bewertet worden. Die diesbezüglichen Arbeitsergebnisse sind in die bisherige Entwurfs- und Genehmigungsplanung eingeflossen. Soweit im Untertagebereich etwaig relevante Forschungsergebnisse aus dem HYPOS-Begleitforschungsprojekt „H<sub>2</sub>-UGS“ zum Zeitpunkt der Einreichung der Betriebspläne noch nicht vorlagen, wurde mit der Bergbehörde abgestimmt, dass diese Projektergebnisse sowie ggf. weitere neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung im Zuge der Ausführungsplanung geprüft und ggf. in die weiterführende, um die Ergebnisse der Ausführungsplanung ergänzte Genehmigungsplanung aufgenommen wird.

#### 6.2.6 Genehmigungsunterlagen für relevante Anlagenbereiche nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Genehmigungen nach dem BImSchG waren für die Anlagen des Wasserstoffkavernenspeichers nicht zu beantragen. Aufgrund der in der Kaverne zu lagernden Wasserstoffmengen wurden Entwürfe des gemäß 12. BImSchV (Störfall-Verordnung) zu erstellenden Sicherheitsberichts und Alarm- und Gefahrenabwehrplans für den Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt erstellt und anhand der im weiteren Projektverlauf erarbeiteten relevanten Arbeitsergebnisse - insbesondere in den Bereichen Explosions- und Brandschutz - weiterentwickelt. Darüber hinaus wurden durch das DBI Unterweisungsunterlagen erstellt wie z.B. Datenblätter für eingesetzte Betriebsmittel und Anlagenteile. Alle genannten Dokumente sind Grundlage und Bestandteil des Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokuments (SGD) gemäß § 3 Abs. 1 ABergV. Diese Dokumente wurden im Rahmen der Projektlaufzeit gesondert nur für den Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt erstellt, werden aktuell überarbeitet und in ein SGD überführt, welches als Betriebsbereich im Sinne der Störfallverordnung sowohl den Erdgasspeichers UGS Bad Lauchstädt als auch den Wasserstoff-UGS Bad Lauchstädt umfasst.

### 6.2.7 Genehmigungsunterlagen für die H<sub>2</sub>-Pipeline

Grundsätzlich sind die rechtlichen Rahmenbedingungen durch drei verschiedene Regelungsebenen bestimmt: Gesetze, Rechtsverordnungen und das Regelwerk. Die höchstrangige Ebene ist die gesetzliche. Für den Gegenstand Wasserstofftransport war es wichtig zu bestimmen, auf welcher Gesetzesebene eine Umstellung der Erdgasleitung auf den Transport von Wasserstoff stattfindet. Hier bestand die Frage, ob das EnWG (Energiewirtschaftsgesetz) in diesem Fall Anwendung finden kann<sup>12</sup>.

Grundsätzlich sah das EnWG (im Projektzeitraum) lediglich die Einspeisung von Wasserstoff im Erdgasnetz vor. § 3 Nr. 19a EnWG definiert Gas i.S.d. EnWG als „Erdgas, Biogas, (...) Wasserstoff, der durch Wasserelektrolyse erzeugt worden ist, und synthetisch erzeugtes Methan, das durch wasserelektrolytisch erzeugten Wasserstoff und anschließende Methanisierung hergestellt worden ist“. Für Wasserstoff gilt das Gesetz also nur insoweit er durch Wasserelektrolyse erzeugt wurde. Reine Wasserstoffnetze waren noch nicht Bestandteil des EnWG. Die zweite rechtliche Regelungsebene wären in diesem Fall u.a. die nachgelagerten Verordnungen GasHDrLtG, GasNZV, GasNEV. Das anwendbare Regelwerk wäre bei Anwendbarkeit des EnWG die technischen Regeln des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (siehe § 49 Abs. 2 Satz 2 EnWG)

Aufgrund der fehlenden Definition von reinen Wasserstoffnetzen muss die Umstellung einer Erdgasleitung auf Wasserstoff auf Basis des UVPG (Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung) stattfinden. Auf der Ebene der Verordnungen findet vor allem Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (RohrFLtG) Anwendung. Die anzuwendenden technischen Regeln sind die Technische Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL). Die Änderung einer Rohrfernleitung (z. B. Änderung des transportierten Mediums) bedarf grundsätzlich der Planfeststellung nach § 65 Abs. 1 UVPG i.V.m. §§ 7, 9 UVPG, sofern eine Verpflichtung zur Durchführung einer UVP besteht. Für dieses Vorhaben war dementsprechend eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls auf UVP-Pflicht durchzuführen, die Grundlage bildet Ziff. 19.5.3 Anlage 1 zum UVPG.

Bei einem positiven Bescheid der allgemeinen Vorprüfung des Einzelfalls wäre die UVP mit öffentlicher Beteiligung die Rechtsfolge.

Nach § 65 Abs. 2 UVPG bedarf das Vorhaben der Plangenehmigung, sofern keine Verpflichtung zur Durchführung einer UVP besteht. Die Plangenehmigung entfällt in Fällen von unwesentlicher Bedeutung.

Im Zuge dieses Vorhabens wurde ein Antrag beim Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt nach der Vorschrift § 9 (2) Nr. 1, (3), (4) i. V. m. § 7 UVPG im ersten Quartal 2021 gestellt.

Dabei wurde die Umrüstung eines Leitungszuges aus Teilen der bestehenden und aktuell im regulären Betrieb befindlichen Ferngasleitungen FGL 46.04 (Bad Lauchstädt - Milzau) und FGL 201.07 (Milzau - Leuna) für den bidirektionalen Wasserstofftransport geprüft.

Die betreffenden Teile der beiden Ferngasleitungen FGL 46.04 und FGL 201.07 sind Bestandteil des Fernleitungsnetzes der ONTRAS Gastransport GmbH und bilden gemeinsam einen Leitungszug, welcher aktuell der Ein- und Ausspeicherung von Erdgasmengen im Untergrundgasspeicher (UGS) Bad Lauchstädt dient. Diese Ferngasleitungen sind im Netzknoten (NK) Milzau

---

<sup>12</sup> Das EnWG wurde am 26. Juli 2021 in einer novellierten Fassung verkündet, darin enthalten sind Übergangsregelungen zur regulatorischen Behandlung reiner Wasserstoffnetze, siehe BGBl. I S. 3026

sowie an der Molchstation (MS) Leuna mit dem weiteren Fernleitungsnetz verbunden und werden im offenen Verbund betrieben.

Tabelle 9: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) Anlage 1 Liste „UVP-pflichtige Vorhaben“ (Fundstelle: BGBl. I 2021, 565 – 582)

Nr	Art des Vorhabens	1	2
<b>19.5</b>	Errichtung und Betrieb einer Rohrleitungsanlage, soweit sie nicht unter Nummer 19.3 oder als Energieanlage im Sinne des Energiewirtschaftsgesetzes unter Nummer 19.2 fällt, zum Befördern von nichtverflüssigten Gasen, ausgenommen Anlagen, die den Bereich eines Werksgeländes nicht überschreiten, mit		
19.5.1	einer Länge von mehr als 40 km und einem Durchmesser der Rohrleitung von mehr als 800 mm,	X	
19.5.2	einer Länge von mehr als 40 km und einem Durchmesser der Rohrleitung von 300 mm bis zu 800 mm,		A
19.5.3	einer Länge von 5 km bis 40 km und einem Durchmesser der Rohrleitung von mehr als 300 mm		A
<p><b>Legende:</b> Nr. = Nummer des Vorhabens            Vorhaben = Art des Vorhabens mit ggf. Größen- oder Leistungswerten nach § 6 Satz 2 sowie Prüfwerten für Größe oder Leistung nach § 7 Absatz 5 Satz 3            X in Spalte 1 = Vorhaben ist UVP-pflichtig            A in Spalte 2 = allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls: siehe § 7 Absatz 1 Satz 1            S in Spalte 2 = standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls: siehe § 7 Absatz 2</p>			

Der betreffende (umzurüstende) Teil der FGL 46.04 verfügt über eine Länge von 9,10 km und eine Nennweite von DN 500. Der betreffende (umzurüstende) Teil der FGL 201.07 verfügt über eine Länge von 10,98 km und eine Nennweite von DN 500. Für das Vorhaben ist daher gemäß § 1 UVPG i. V. m. Anlage 1 19.5.3 UVPG (Errichtung und Betrieb einer Rohrleitungsanlage, soweit sie nicht unter Nummer 19.3 oder als Energieanlage im Sinne des Energiewirtschaftsgesetzes unter Nummer 19.2 fällt, zum Befördern von nichtverflüssigten Gasen, ausgenommen Anlagen, die den Bereich eines Werksgeländes nicht überschreiten, mit einer Länge von 5 km bis 40 km und einem Durchmesser der Rohrleitung von mehr als 300 mm) eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls nach § 9 (2) Nr. 1, (3), (4) i. V. m. § 7 UVPG durchzuführen. Da es sich bei Wasserstoff um einen Stoff mit dem Gefahrenmerkmal F+ (hochentzündlich) handelt und das Vorhaben gem. §65 (1) UVPG einer Planfeststellung bedarf, unterliegt es den Regelungen der Rohrfernleitungsverordnung (vgl. § 2 (1) Nr. 2 RohrFLtgV).

Die Kriterien zur Erarbeitung der Vorprüfung sind in der Anlage 2 und 3 UVPG aufgeführt. Der Prüfmaßstab, ob erheblich nachteilige Umweltauswirkungen durch das geplante Vorhaben hervorgerufen werden, basiert auf dem „Leitfaden zur Vorprüfung des Einzelfalls im Rahmen der Feststellung der UVP-Pflicht von Projekten“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Im Prüfmaßstab erfolgt eine Betrachtung der potenziellen Umweltauswirkungen des Vorhabens (Art und Ausmaß, grenzüberschreitender Charakter, Schwere und Komplexität, Wahrscheinlichkeit, voraussichtlicher Zeitpunkt des Eintretens, Dauer, Häufigkeit und Umkehrbarkeit, Zusam-

menwirken mit den Auswirkungen anderer bestehender oder zugelassener Vorhaben und Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen) auf die Schutzgüter des § 2 Abs. 1 UVPG. Dies sind:

- „Menschen, insbesondere die menschliche Gesundheit,
- Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
- Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter sowie
- die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.“ (§ 2 Abs. 1 UVPG)

Die allgemeine Vorprüfung des Einzelfalles nach § 9 (2) Nr. 1, (3), (4) UVPG i. V. m. § 7 UVPG zum Vorhaben "Umrüstung der Ferngasleitungen (FGL) FGL 46.04 (Molchstation Bad Lauchstädt - Netzknoten Milzau) und FGL 201.07 (Milzau - Leuna) auf einen bidirektionalen Wasserstofftransport", führt zu dem Ergebnis, dass keine „erheblich nachteiligen Umweltauswirkungen“ im Sinne des UVPG erkennbar sind.

Im Ergebnis der UVP-Einzelfallentscheidung wurde festgestellt, dass eine Umweltverträglichkeitsprüfung für das Vorhaben "Umrüstung der Ferngasleitungen (FGL) FGL 46.04 (Molchstation Bad Lauchstädt - Netzknoten Milzau) und FGL 201.07 (Milzau - Leuna) auf einen bidirektionalen Wasserstofftransport" nicht erforderlich ist, da das Vorhaben aufgrund einer überschlägigen Prüfung keine erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen haben kann, die nach § 25 Absatz 2 UVPG bei der Zulassungsentscheidung zu berücksichtigen wären. ONTRAS wurde dieses Ergebnis im Juni 2021 mitgeteilt.

## 7 Entwicklung eines Geschäftsmodells für den Betrieb von H<sub>2</sub>-Untergrundgasspeicher und Transportpipeline

### 7.1 Übersicht zu den Kosten für die Speicherplattform (AP 6.1)

#### Elektrolyse

Zusätzlich zu den technischen Kenndaten wurden auch die ökonomischen Daten der 30 Varianten, die aus den Simulationen abgeleitet wurden, aufbereitet und den Partnern zur Verfügung gestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen an dieser Stelle nicht sämtliche Werte aufgeführt werden. Stattdessen wird sich auf die Wiedergabe der beiden günstigsten Optionen, wie sie in 4.1 identifiziert wurden, beschränkt:

Tabelle 10: Technische und ökonomische Kenndaten Elektrolyse

Variante	A35_O_6h_0	A35_O_6h_5
Nennleistung inkl. Peripherie [MW]	35,00	35,00
Reinheit Wasserstoff [%]	100,00	100,00
Taupunkt Wasserstoff [°C]	≤ -70	≤ -70
O <sub>2</sub> -Gehalt Wasserstoff [ppm]	mit H <sub>2</sub> O zusammen < 10	mit H <sub>2</sub> O zusammen < 10
N <sub>2</sub> -Gehalt Wasserstoff [ppm]	≤ 400	≤ 400
Maximaldruck Wasserstoff [bar]	14,00	14,00
Maximaltemperatur Wasserstoff [°C]	57,00	57,00
<b>Speichersystem:</b>		
Maximalfüllung Speicher [MWh]	0,00	5,00
Mindestfüllung Speicher [MWh]	0,00	0,96
Maximale Ausspeicherung 15 min [MWh]	0,00	1,75
Ausspeicherleistung [MW]	0,00	7,00
Maximale Einspeicherung 15 min [MWh]	0,00	3,43
Einspeicherleistung [MW]	0,00	13,71
<b>Stromverbrauchsverteilung:</b>		
Stromverbrauch produktiv [MWh]	144.374,40	146.385,13
Verbrauch durch Teilstandby [MWh]	98,94	123,28
Standbyverbrauch [MWh]	191,36	156,89
Abgeregelte Strommenge [MWh]	10.218,77	8.178,95
Maximalleistung Notstromaggregat [MW]	0,35	
Minimalleistung Notstromaggregat [MW]	0,03	
Durch Notstromaggregat zur Verfügung gestellt (von Standbyverbrauch) [MWh]	34,24	

Variante	A35_O_6h_0	A35_O_6h_5
<b>Standby und Shutdown:</b>		
Standbyzeiten [h]	546,75	448,25
Maximale Dauer am Stück [h]	5,75	5,75
Minimale Dauer am Stück [h]	0,25	0,25
Starts aus Standby	596	329
Anlaufzeit aus Standby [s]	60,00	60,00
Shutdownzeiten [h]	1.487,75	1.201,25
Maximale Dauer am Stück [h]	38,75	38,50
Minimale Dauer am Stück [h]	6,00	6,00
Starts aus Shutdown (erster immer zu Beginn der Simulation)	119	103
Anlaufzeit aus Shutdown [s]	600,00	600,00
<b>Produktionskennwerte:</b>		
H <sub>2</sub> -Produktion im ersten Jahr [t]	2.650,67	2.688,23
Betriebsstunden gesamt	6.749,50	7.134,50
Volllaststunden	1.702,75	1.704,00
Überlaststunden	0,00	0,00
Mindestvolumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]	483,50	483,05
Höchstvolumenstrom im Jahresverlauf [Nm <sup>3</sup> /h]	7.110,84	7.110,66
Nennvolumenstrom (NUR @ BoL !!!) [Nm <sup>3</sup> /h]	7.114,08	7.114,08
Höchste Flusssteigerungsgeschwindigkeit [Nm <sup>3</sup> /h <sup>2</sup> ]	27.390,89	27.297,12
Höchste Flussverringderungsgeschwindigkeit [Nm <sup>3</sup> /h <sup>2</sup> ]	-28.252,90	-24.358,84
<b>CAPEX und OPEX:</b>		
Lebensdauer Anlage [a]	20,00	20,00
CAPEX Elektrolyse [EUR]	36.400.000,00	36.400.000,00
Abschreibung Elektrolyse [EUR/a]	1.820.000,00	1.820.000,00
CAPEX Speicher	0,00	3.000.000,00
Abschreibung Speicher [EUR/a]	0,00	150.000,00
Zeit bis Stacktausch [a]	11,65	11,05
Anzahl der Tauschvorgänge über Lebensdauer	1,00	1,00
Gesamtkosten Stackwechsel	14.000.000,00	14.000.000,00
Abschreibung Stackwechsel (über volle Lebensdauer Anlage) [EUR/a]	700.000,00	700.000,00
OPEX Wartung	350.000,00	350.000,00
OPEX Strom (ohne Notstromaggregat)	8.726.174,99	8.847.152,01
OPEX Wasserverbrauch	147.455,78	149.545,47
OPEX Wasseranschluss	16.390,84	16.390,84

Variante	A35_O_6h_0	A35_O_6h_5
OPEX Wasser (Summe aus Verbrauch und Anschluss)	163.846,62	165.936,31
OPEX gesamt im ersten Jahr	9.240.021,61	9.363.088,32
Gestehungskosten ohne Abschreibung [EUR/kg]	3,486	3,483
Gestehungskosten mit Abschreibung [EUR/kg]	4,437	4,476
<b>Mit variabler Lebensdauer:</b>		
Produktion Jahr 1 (t/a)	2.650,67	2.688,23
OPEX Jahr 1 (EUR/a)	9.240.021,61	9.363.088,32
Lebensdauer (=2*Stacktauschzeit) (a)	23,29	22,11
CAPEX gesamt (EUR)	50.400.000,00	53.400.000,00
Abschreibung pro Jahr (EUR/a)	2.163.577,50	2.415.515,63
Kosten gesamt pro Jahr (EUR/a)	11.403.599,11	11.778.603,94
H <sub>2</sub> -Gestehungskosten inkl. Abschreibung (EUR/kg)	4,30	4,38

Hier sei noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass die ermittelten Kosten ausschließlich für das erste Jahr des Betriebs zutreffen. Die Kosten werden für die danach folgenden Jahre jeweils leicht steigen, da die Effizienz der Elektrolyse durch Degradationsvorgänge stetig leicht absinkt.

Der letzte Bereich der Tabelle, der mit „variabler Effizienz“ bezeichnet ist, wurde im Rahmen von Betrachtung von möglichen Geschäftsmodellen für den wirtschaftlichen Betrieb ermittelt (Kapitel 7.2).

Wasserstoffkaverne / Pipelinetransport (VERTRAULICHER Teil)

Für die Modellierung des Systems und dessen Kosten werden standortspezifische Eingabeparameter des Kavernenspeichers verwendet. Die technischen Berechnungen für die Wasserstoff-Quelle des Systems wird durch die Untersuchungen des Elektrolysefahrplans des IWMS bestimmt. Dabei wird das berechnete Profil des 35 MW alkalischen Elektrolyseurs ohne zusätzlichen Speicher und ohne Überlastfähigkeit als Basis genutzt. Der damit erzeugte Wasserstoff kostet in der Gesteuerung ca. 4,38 €/kg<sup>13</sup>. Auf der Abnahmeseite wird ein Profil hinterlegt, welches eine konstante Abnahmemenge an Wasserstoff beinhaltet, die in Summe der jährlich erzeugten Wasserstoffmenge entspricht. Der notwendige Speicherfüllstand zu Beginn des Jahres ergibt sich aus der technischen Modellierung. Für den Speicher fließen die Angaben zu Kissengas- und Arbeitsgasvolumen als auch minimaler und maximaler Betriebsdruck in die Berechnung ein. Die technischen Spezifikationen Länge, Außendurchmesser, Wandstärke, Rauheit und Betriebsdruck werden für die Transportleitung hinterlegt. Die ökonomische Modellierung beinhaltet grundsätzlich die Bestimmung von Investitionsannuitäten der im System vorhandenen Komponenten, sowie aller Betriebskosten nach VDI 2067. Mit Hilfe dieser Berechnungsmethode können die notwendigen Investitionskosten und Restwerte der Investitionen nach dem Betrachtungszeitraum berechnet und daraus eine Annuität gebildet werden. Der Betrachtungszeitraum wird auf 10 Jahre fixiert. Zur Berechnung werden die grundlegenden ökonomischen Parameter kalkulatorischer Zins und Inflation festgelegt.

Für die Berechnung der Investitionen werden mehrere Komponenten der OTA und UTA bzw. Aufwendungen zu Gruppen zusammengefasst, dabei gibt es Komponenten, deren Investitionsannuitäten abhängig der gegebenen Abschreibungsdauern bestimmt werden. Der Zubau des Speichers erfolgt im Jahr 2027, weshalb dessen Investitionskosten inflationsbereinigt werden. Zusätzlich wird von fixen jährlichen OPEX in Prozent der Gesamtinvestition für Wartung und Instandhaltung ausgegangen.

Neben den Investitionsannuitäten und deren Betriebskosten für Wartung & Instandhaltung sind vor allem die Kosten für den Speicherbetrieb entscheidend. Die Betriebskosten (generelle, Betriebskosten, Energiekosten, Betriebsführung, etc.) werden für einen halben Kavernenumschlag pro Jahr berechnet. Einfluss auf die gesamten Betriebskosten kann die Ausnutzung des Speichers als auch die Erzeugungsmenge des verwendeten Elektrolyseurs haben.

Aus der durchgeführten Systemmodellierung lassen sich technische und ökonomische Ergebnisse entnehmen. Zunächst resultiert aus der Modellierung, die Höhe der jährlichen Wasserstoffmenge und eine konstante Abnahmemenge, welche dem Durchfluss durch die Pipeline entspricht. Daraus wird zudem die maximale Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten führen dazu, dass der Ausgangsdruck der Pipeline nur wenig unter dem Eingangsdruck liegt.

---

<sup>13</sup> Fraunhofer IWMS (2021): Auswertung Elektrolysefahrpläne

Für Berechnung des Wasserstoff-Preises werden zunächst die jährlichen Annuitäten und Betriebskosten für Wartung und Instandhaltung der enthaltenen Komponenten bestimmt und dabei die Betriebskosten der Kaverne bei einem halben Umschlag pro Jahr berücksichtigt. Die Summe der jährlichen Kosten je Menge an eingespeisten Wasserstoff pro Jahr ergeben die Kosten für Speicherung, Verdichtung und Transport des Wasserstoffs. Damit liegen die Gesamtkosten des Wasserstoffs an der Einspeisestelle, unter den hier getroffenen Annahmen, bei ca. 7,4 €/kg. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass dies Gesteungskosten und keine Vermarktungspreise des Wasserstoffs sind.

Neben der Pipeline wurde auch eine grobe Modellierung des Kavernenspeichers durchgeführt. Dabei hat sich ergeben, dass der Speicher vor dem Berechnungsjahr neben dem Kissengas mit weiterem Wasserstoff gefüllt werden muss, um mit dem vorgegebenen Wasserstoffherzeugungprofil den konstante Volumenstrom an der Anschlussstelle Leuna zu gewährleisten.

Für den Kavernenspeicher wurde zudem eine umfangreiche Betrachtung der Investitionskosten am Standort Bad Lauchstädt durchgeführt. Das erstellte Kostenmodell erfasst zahlreiche Einflüsse und daraus konnten Investitions- und Betriebskosten für den Kavernenspeicher abgeleitet werden. Durch die Partner VGS, ONTRAS; Fraunhofer IMWS und DBI Gastechnologisches Institut gGmbH wurden die Kosten für die zu errichtende SPF zusammengetragen. Die OTA und UTA Anlagen eines Kavernenspeichers bestehen aus vielen Segmenten mit jeweils einer Vielzahl von Einzelkomponenten die individuell analysiert und bewertet wurden. Die Kostenermittlung der einzelnen Komponenten in der Tabelle 11 wurden geclustert und zusammengefasst und sind mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Die Kosten weisen nach dem derzeitigen Stand eine Unschärfe von +/- 15 % auf.

Tabelle 11: CAPEX und OPEX für die SPF

Beschreibung	CAPEX in €	OPEX pro Jahr in €
OTA inkl. Feldleitung	68.100.000	3.400.000
UTA und Kaverne Bad Lauchstädt (exkl. Kavernenherstellung)	10.000.000	
Wasserstoff-Pipeline und Anbindung an das Wasserstoffnetz im Chemiepark Leuna	7.150.000	150.000
Elektrolyse	36.400.000	9.400.000
<b>Gesamtkosten</b>	<b>121.650.000</b>	<b>12.950.000</b>

## 7.2 Betrachtung von möglichen Geschäftsmodellen für den wirtschaftlichen Betrieb (AP 6.2)

Entsprechend der Planung sollten Optionen erwogen werden, die auf eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit des Betriebes ausgerichtet sind. Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, konnte eine starke Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit der 30 untersuchten Varianten vom Abschreibungszeitraum erkannt werden, da technologiebedingt im Laufe der ursprünglich angestrebten Nutzungszeit von 20 Jahren für den Elektrolyseur mindestens einmal ein degradationsbedingter Wechsel der Stacks notwendig ist. Dieser Wechsel ist mit sehr hohen einmaligen Kosten verbunden, die im Rahmen der Betrachtungen als gleichmäßige Abschreibungen auf die Nutzungszeit verteilt wurden.

Durch unterschiedliche Betriebsflexibilitäten der betrachteten Anlagen ergaben sich für alle Anlagen unterschiedliche Betriebsdauern pro Jahr, was ebenfalls zu unterschiedlich starker Degradation pro Jahr führt. Folglich ergeben sich kürzere Stackwechselintervalle für besonders flexible Anlagen, die die effektiven spezifischen Wasserstoffgestehungskosten verzerren.

Um diesen Einfluss zu bereinigen, wurde die im Rahmen der Simulationen ermittelten Lebenszeiten der Stacks bei allen Varianten genutzt und eine neue Gesamtnutzungsdauer der Anlagen festgelegt, die exakt der doppelten prognostizierten Lebensdauer eines Stacksatzes entspricht. Somit wird sichergestellt, dass in der betrachteten Nutzungsdauer genau ein Stackwechsel erfolgt und dessen Kosten über die maximal mögliche Abschreibungsdauer verteilt werden. Die sonstigen Berechnungsgrundsätze blieben gleich, sodass sich folgende Darstellung ergibt:

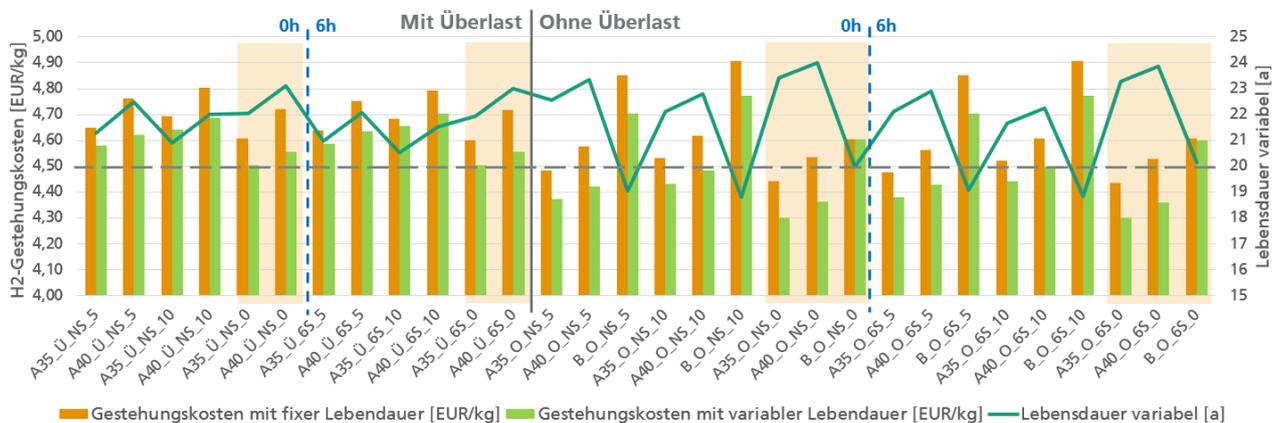


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Wasserstoffgestehungskosten bei fixer Lebensdauer von 20a (orange) und variabler Lebensdauer (grün) (Variable Lebensdauer = 2 \* Stacklebensdauer in Abhängigkeit des Betriebsverlaufes, dunkelgrün)

Die grau gestrichelte, horizontale Linie in Abbildung 29 entspricht der zunächst angenommenen festen Abschreibungszeit von 20 Jahren. Die dunkelgrüne Linie zeigt die nun angesetzte Gesamtnutzungsdauer in Abhängigkeit von der je nach Variante individuellen Stacknutzungszeit.

Als Resultat zeigt sich, dass die spezifischen Wasserstoffgestehungskosten für alle Varianten, deren nun angesetzte Gesamtnutzungsdauer von Ursprungswert abweicht, reduziert werden können. Es sollte entsprechend je nach zu erwartendem Windenergieertrag und der somit zu erwartenden Betriebszeit pro Jahr im Rahmen von Planungstätigkeiten erwogen werden, die geplante Nutzungsdauer individuell an die vorliegenden Rahmenbedingungen anzupassen.

Im hier betrachteten konkreten Fall können die Kosten für die Variante A35\_O\_6h\_0 von 4,44 EUR/kg H<sub>2</sub> auf 4,30 EUR/kg H<sub>2</sub> reduziert werden. Für die gleichartige Variante, die lediglich um einen 5 MWh Speicher ergänzt wurde (A35\_O\_6h\_5) können die Kosten auf diese Weise von 4,48 EUR/kg H<sub>2</sub> auf 4,38 EUR/kg H<sub>2</sub> vermindert werden. Dabei wird die Gesamtnutzungsdauer für beide Varianten erhöht (um 3,3 Jahre ohne Speicher bzw. um 2,1 Jahre mit Speicher).

### Wasserstoffkavernenspeicher

Im Rahmen des Projekts wurde der Markt für reinen Wasserstoff und die notwendige Speicherkapazität analysiert. Dabei wurden Sondierungsgespräche mit potenziellen Kunden geführt, auch überregional. Im Einzugsbereich des Vorhabens befinden sich Stahlwerke und zukünftige Produktionsanlagen für nachhaltige Treibstoffe. Diese Industrien haben bei Umstellung auf Wasserstoff ein besonders hohes Potenzial für die Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen. Gleichzeitig benötigen sie eine leistungsfähige und durch Speicher abgesicherte Wasserstoffversorgung. Ein Kavernenspeicher für Wasserstoff kann diese Bedingung erfüllen und damit eine der Grundvoraussetzungen zum Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft schaffen.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass der Speicher von Anfang an in ein flächendeckendes deutsches Wasserstoffnetz eingebunden sein muss. Netz und Speicher können nicht organisch mit der Wasserstoffnachfrage wachsen, sie müssen in einem Schritt und im Vorlauf zu den Prozessumstellungen in der Industrie hergestellt werden. Dies bedeutet, dass Versorger hohe Anfangsinvestitionen in kurzer Zeit stemmen müssen, während der dazugehörige Markt sich erst mit zeitlichem Nachlauf und graduell entwickelt.

Eine solche Investition wäre mit erheblichen wirtschaftlichen Risiken verbunden, die das normale Geschäftsrisiko eines Infrastrukturbetreibers weit übersteigen. Eine Umlegung der hohen Anlaufkosten würde zu hohen Arbeitspreisen für die Wasserstoffspeicherung führen und damit der Entwicklung eines Marktes für Speicherkapazitäten entgegenstehen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Realisierung eines Vorreiterprojektes für die industrielle Wasserstoffspeicherung in Kavernen ohne eine fundamentale staatliche Förderung nicht möglich erscheint.

Im Falle einer staatlichen Teilförderung der Anfangsinvestitionen ergibt sich jedoch ein tragfähiges Geschäftsmodell für einen Wasserstoffkavernenspeicher im industriellen Maßstab.

### Transportpipeline

Für den wirtschaftlichen Betrieb einer reinen H<sub>2</sub>-Pipeline gab es zum Zeitpunkt der Projektdurchführung zwei Möglichkeiten. Handelt es sich bei dem transportierten Wasserstoff um Biogas i. S. d. §3, Nr. 10f EnWG und wird zur energetischen Verwertung verwendet, ist ein Betrieb nach dem EnWG und der daraus resultierenden Verordnungen und techn. Regeln im Rahmen des regulierten Netzbetriebes möglich. Entsprechend ließen sich die Kosten gemäß ARegV, GasNZV, GasNEV, etc. abbilden und daraus ein wirtschaftliches Modell analog der Erdgaswelt ableiten. Sowohl für ONTRAS als Transporteur, als auch für die angeschlossenen Kunden, würde sich in diesem Fall ein tragfähiges Modell ergeben, in denen eine Preisstruktur ähnlich der Erdgaswelt ausgestaltet wäre.

Im vorliegenden Fall ist eine Aufnahme des H<sub>2</sub>-Transportes in das regulierte Umfeld der ONTRAS nicht möglich. Zum einen liegt beim Abnehmer im Chemiepark Leuna keine energetische

Verwertung vor, zum anderen gibt es keinen klaren regulatorischen Rahmen für den Hochlauf der H<sub>2</sub>-Infrastruktur im Energiemarkt. Die anfallenden Kosten müssen verursachergerecht auf die Netzkunden umgelegt werden. Gerade bei Forschungsvorhaben führt dies zu einer ungleich höheren Belastung als in Bestandsstrukturen. Zudem müssen zur Ausgestaltung viele Rahmenbedingungen angenommen und mit den weiteren Partnern Einigkeit darüber erreicht werden.

Die Untersuchungen im Projekt haben gezeigt, dass die Nutzung einer Bestandsstruktur dazu beitragen kann, tragfähige Geschäftsmodelle für den Transport von Wasserstoff von Beginn an am Markt zu etablieren, ohne die Kunden im Anfangsstadium zu sehr zu belasten. Für den zügigen Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft muss jedoch gewährleistet sein, dass Gasfernleitungsnetzbetreiber auch Wasserstofftransportinfrastruktur betreiben und Eigentum an dieser halten dürfen. Der gemeinsame Betrieb von Gas- und Wasserstoffinfrastruktur im regulierten Umfeld könnte eine sichere und marktgerechte Umstellung bestehender Erdgasleitungen auf den Transport von Wasserstoff bzw. dessen Beimischung sicherstellen und beschleunigt die integrierte Planung der zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

---

Das vorliegende Forschungsvorhaben H<sub>2</sub>-Forschungskaverne – Entwicklung einer H<sub>2</sub>-Speicherforschungsplattform für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt. Dazu wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Technologie- und Anforderungsbewertung sowie die wirtschaftliche Betrachtung der Elektrolyse

Die fortschreitende Entwicklung der Elektrolysetechnologie während der Durchführung des Vorhabens hat gezeigt, dass sowohl die Alkali-Elektrolyse als auch die PEM-Elektrolyse ähnliche Performance-Daten liefern können. Damit werden für die spätere Entscheidung auf eine der genannten Technologien die konkreten wirtschaftlichen Angebotsdaten (Investitionskosten) eines Ausschreibungsverfahrens das wesentliche Entscheidungskriterium werden. In beiden Technologien haben sich insbesondere für Großanlagen über 10 MW Niederdrucksysteme aufgrund der höheren Effizienz und des geringeren Anlagenaufwandes herauskristallisiert.

Im Ergebnis der Standortanalyse konnte gezeigt werden, dass eine Lokalisierung der Elektrolyseanlage in der Nähe des Speichers Bad Lauchstädt einige Vorteile gegenüber der Integration in den Chemiapark Leuna hat. Zu den Vorteilen gehören die räumliche Nähe zu Windparks und zu einem der großen Umspannwerke, die verfügbaren Flächen direkt am Untergrundgasspeicher und den daraus erwachsenden Optionen für eine spätere Erweiterung.

- Konzepterstellung und Dokumentation für die Anlagenteile OTA, UTA und Pipeline in Vorbereitung auf die grundsätzlichen Genehmigungen

Im Projekt wurde ein komplettes, detailliertes Anlagenlayout für die Speicheranlage und die Pipelineanbindung entwickelt, die die Spezifika einer Wasserstoffspeicherung berücksichtigt. Dazu gehören die Auslegung der Anlagen für die wesentlich von Erdgas abweichenden Gaseigenschaften, die Sicherheitsaspekte hinsichtlich des Brand- und Explosionsschutzes sowie die besonderen Anforderungen an die Gasreinheit. Die Aspekte wurden in das System integriert und stellen ein erstes vollständiges Gesamtdesign für einen Wasserstoff-Untergrundgasspeicher dar.

Zum Gesamtkonzept gehört ebenso ein detailliertes Betriebskonzept sowohl für die Elektrolyseanlage als auch den Untergrundgasspeicher und die Anschlussleitung.

- Durchführung von beispielhaften Genehmigungsverfahren für OTA, UTA und Pipeline bis zum Status Entwurfsplanung und Ausschreibungsgrundlagen (Hauptbetriebsplan, Struktur Sonderbetriebspläne)

Das Genehmigungsverfahren für den Wasserstoff-Untergrundgasspeicher am öffentlichen Gasnetz ist das erste Verfahren dieser Art in Europa. Dies stellte eine besondere Herausforderung sowohl für die Projektpartner als auch für das zuständige Bergamt dar. Im Ergebnis wurde ein beispielhaftes Verfahrenskonzept aus Hauptbetriebsplan (HBP) und mehreren Sonderbetriebsplänen (SBP) erarbeitet. Das Verfahren lehnt sich grundsätzlich an das für Erdgas an, ist im Detail jedoch auf die Bedingungen für Wasserstoff ausgerichtet. Das gestaffelte Verfahren erlaubt darüber

hinaus die Erkenntnisse aus der Forschung in die Umsetzung einfließen zu lassen und gesicherte Erkenntnisse zu verankern. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten so der HBP und die wesentlichen SBP fertiggestellt eingereicht, und mit der zuständigen Behörde diskutiert und abschließend zur Zulassung eingereicht werden. Mit Redaktionsschluss des Abschlussberichtes lagen die Zulassungsentwürfe für den HBP und den SBP „H<sub>2</sub>-Feldleitung vor, die eine Zulassung auch der verbleibenden SBP erwarten lassen.

Die regulatorischen Rahmenbedingungen für das Genehmigungsverfahren zur Umstellung der Pipeline auf H<sub>2</sub> haben im Laufe des Vorhabens eine positive Entwicklung genommen. So ist nicht zuletzt durch die Erkenntnisse aus dem Vorhaben, zu denen eine vollständige Bereitstellung der Genehmigungsunterlagen gehörte, die Genehmigungspflicht in eine Anzeigepflicht umgewandelt worden.

- Zusammenstellung der Investitions- und Betriebskosten für die Gesteungskostenanalyse der H<sub>2</sub>-Wertschöpfungskette

Für die Wertschöpfungskettenelemente Elektrolyse, Untergrundgasspeicher und Pipelineanbindung wurden eine ausführliche Kostenanalyse durchgeführt, die für den Forschungsbetrieb der Speicherforschungsplattform einen Rahmen des Gesteungskostenband auf der Basis aktueller Betriebsbedingungen und Auslastungen erlaubt. Der direkte Betrieb des Elektrolyseurs an einem Windpark und bestehenden Größenverhältnisse für die bereits vorhandene Speicherkaverne und die auf H<sub>2</sub> umzustellende Pipeline-Anbindung führen zu einer lediglich ca. 50 %-igen Auslastung von Elektrolyse und Speicher sowie einer Auslastung von ca. 5 % für die Pipelineanbindung. Darüber hinaus ist die Größe der Anlagen im Vergleich zu bisherigen Erdgasspeichern lediglich als sehr klein zu bezeichnen. Damit haben CAPEX und die fixen OPEX noch einen hohen Anteil an den Gesteungskosten. Die Finanzierung solcher Pilotprojekte erfordert damit eine fundamentale staatliche Förderung, ohne die die gesamtgesellschaftliche Aufgabe der Versorgungssicherheit nicht möglich erscheint.

Dennoch konnte gezeigt werden, dass die H<sub>2</sub>-Gesteungskosten erste wirtschaftliche Geschäftsmodelle für frühe Märkte (z.B. Mobilität) erlauben. Dazu gehört auch das Abbauen von legislativen Hemmnissen für den Betrieb der Anlagen, wie z.B. die Befreiung der EEG-Umlage für die H<sub>2</sub>-Erzeugung sowie die Harmonisierung des regulatorischen Rahmens für den Betrieb von H<sub>2</sub>-Pipelines für die Versorgung von Öffentlichkeit und Industrie. Darüber hinaus können eine deutlich höhere Auslastung und eine Skalierung der Anlagen zu einer wesentlichen Kostensenkung beitragen.

Mit dem Anschlussvorhaben Reallaborvorhaben Energiepark Bad Lauchstädt wird erstmals die gesamte Lieferkette in einem systemrelevanten Maßstab demonstriert. Erst durch die Realisierung der Kombination treten Fragen zutage, die sich aus dem Zusammenspiel der Komponenten sowie den ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen ergeben. Sie treten als Hemmnisse für eine großtechnische Umsetzung in Erscheinung und behindern als nahezu unüberwindliches Risiko die Investition in die neuen Technologien. Es ist Aufgabe des Reallaborvorhabens die Hemmnisse als Gesamtbild zu identifizieren und zielgerichtete Lösungen zur Senkung des unternehmerischen und volkswirtschaftlichen Risikos zu schaffen. Weiterhin werden weitere und neue Forschungsschwerpunkte adressiert:

- Entwicklung der Gasreinigung und Qualitätssicherung im Zusammenspiel zwischen Elektrolyse, Speicher und H<sub>2</sub>-Pipeline

- Weiterentwicklung von Anlagenlayout nach Erkenntnissen aus der Detailentwicklung aus allen Komponenten
- Entwicklung eines Anbindungskonzeptes und Leistungssteuerung für EE-Strom (Insel- und Netzparallelbetrieb)
- Beispielhafte Genehmigungsverfahren für Windpark und Elektrolyse
- Weiterentwicklung der Sonderbetriebspläne (H<sub>2</sub>-Speicher), Ergänzende Genehmigungen für H<sub>2</sub>-Pipeline, entsprechend den Detailentwicklungen zu den Demonstratoren.

Das Ziel des Reallabors Energiepark Bad Lauchstädt ist, mittels Sektorenkopplung erneuerbaren Strom für energetische und stoffliche Nutzungspfade zur Verfügung zu stellen. Dazu sind Voraussetzungen zu schaffen, mit denen eine Versorgungssicherheit trotz fluktuierender Energieerzeugung gewährleistet werden kann. Den Nucleus stellt dabei die großtechnische Speicherung von aus erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff dar. Damit werden fluktuierende Erzeugungsleistungen für unterschiedliche Verwertungspfade geglättet bzw. bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt.

Das Vorhaben Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt soll durch Wasserstoffherzeugung einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Chemieindustrie und der Energieversorgung in Deutschland leisten und darüber hinaus eine weltweit einzigartige Speichermöglichkeit von Strom aus erneuerbaren Energien aufzeigen. Für die von der Braunkohle geprägte Region stellt dieses Vorhaben ein Reallabor für den Strukturwandel aus der fossilen in eine klimaneutrale Grundstoff- und Energieversorgung dar. Dabei kann das Vorhaben auf vorhandene Infrastrukturelemente und auf Vorarbeiten aus der Grundlagenforschung der HYPOS-Initiative zurückgreifen.

Der Energiepark Bad Lauchstädt verfolgt den Ansatz, Strom aus einem neu zu errichtendem Windpark mittels Netzparallelbetrieb mit Überschusseinspeisung direkt über eine Großelektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln. Dieser Wasserstoff wird in einer eigens dafür ausgestatteten Salzkaverne gespeichert. Unterirdische Salzkavernen eignen sich am besten, Wasserstoff aus regenerativen fluktuierenden Energiequellen großtechnisch, sicher und effizient zu speichern. Diese Form der Energiespeicherung wurde bisher in Deutschland und im kontinentalen Europa nicht umgesetzt. Der erzeugte und gespeicherte Wasserstoff wird über eine Anbindungsleitung an das Wasserstoffnetz für die stoffliche Nutzung im Chemiepark Leuna zur Verfügung gestellt. Als weitere Anwendungssektoren steht die Direktnutzung des Wasserstoffs für Mobilität und für den urbanen Bereich zur Wärme- und Stromerzeugung.

Das Vorhaben Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt hat zum Ziel, richtungsweisende Technologiekonzepte der Sektorenkopplung unter realen Netzbedingungen zu demonstrieren. Dabei werden die einzelnen Systemkomponenten in ausreichend systemrelevanter Größe ausgelegt. Die Erweiterbarkeit bzw. spätere Ausbaumöglichkeiten der Systemkomponenten spielen dabei eine entscheidende Rolle.

## 9 Ergänzende Inhalte

---

### 9.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen sind Bestandteil des zahlenmäßigen Nachweises und werden in den partnerspezifischen Dokumenten dargestellt.

### 9.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Grüner Wasserstoff rückt als essentieller zukünftiger Energieträger in Deutschland immer stärker in den Fokus, als Speichermedium für Erneuerbare Energien und als verbindendes Element in der Sektorenkopplung. Mit zunehmendem Bedarf an grünem Wasserstoff werden daher größere Speicherkapazitäten für die Versorgungssicherheit der angeschlossenen Verbraucher in Chemieindustrie, Mobilität und der urbanen Energieversorgung benötigt. Es konnten alle notwendigen Details für den Betrieb eines Wasserstoffkavernenspeichers unter den Bedingungen der Nutzung von volatilen und regenerativen Energien erarbeitet werden. Mit der Entwicklung der Entwurfs- und Genehmigungsplanung einschließlich des geotechnischen Nachweises sowie der Durchführung des Genehmigungsverfahrens für die Errichtung und den Betrieb eines H<sub>2</sub>-Kavernenspeichers am Betriebsstandort Bad Lauchstädt der VGS konnte die notwendige Basis dafür geschaffen werden, die Forschungskaverne Lt 9 sowie perspektivisch weitere Kavernen und Speicheranlagen für den Wasserstoffbetrieb zu errichten bzw. umzunutzen und mittels der entwickelten Genehmigungsprozesse die notwendigen Zulassungen zu erwirken.

Die im Projekt erarbeiteten Konzepte zur Umstellung der vorhandenen Erdgastransport-Infrastruktur, vor allem hinsichtlich Mess- und Regeltechnik, Genehmigungsabläufen und Zuständigkeiten und der identifizierten technisch notwendigen Maßnahmen inkl. deren Bewertung, bilden die damit verifizierte Grundlage für Strategien und Planungsarbeiten zum sicheren und klimaneutralen H<sub>2</sub>-Transport.

Auf der Basis tragfähiger Geschäftsmodelle für den Betrieb von Untergrundgasspeichern und die Umnutzung der bestehenden Erdgastransport-Infrastruktur für den Wasserstofftransport können auch wettbewerbsfähige Geschäftsmodelle für die Nutzung des Wasserstoffs in der Chemieindustrie sowie der urbanen Energieversorgung Fuß fassen.

Die Bemessung der zu erwartenden Wasserstoffmenge und deren effektive Gestehungskosten auf Basis der zur Verfügung stehenden Windstrommengen war sowohl für die Auslegung der OTA als auch die Erstellung eines Geschäftsmodelles notwendig. Weiterhin war es nötig, die wirtschaftlichste Variante unter den im Rahmen der Projektvoraussetzungen möglichen Varianten zu identifizieren, damit die Kaverne in Phase III und darüber hinaus möglichst wettbewerbsfähig operieren kann.

### 9.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Vorhaben H<sub>2</sub>-Forschungskaverne stellt einen wesentlichen Zwischenschritt von den Grundlagenuntersuchungen zur grundsätzlichen Eignung von konkreten geologischen Strukturen und Ausrüstungen für die Errichtung von Kavernenspeichern im Vorhaben H<sub>2</sub>-UGS und dessen Vorarbeiten dar und liefert die wissenschaftlichen Grundlagen für die Errichtung von Wasserstoffkavernen. Die Speicherforschungsplattform wird mit ihren weiteren Phasen II (Errichtung) und III (Forschungsbetrieb) zum internationalen Leuchtturmprojekt und zu einem Reallabor für die Erprobung der für die Energiewende erforderlichen Erzeugung, Großspeicherung und den Transport von regenerativer Energie in Form von Wasserstoff.

Mit den hier im Projekt gewonnenen Erkenntnissen konnten eine Reihe von Unsicherheiten beseitigt und ein hinreichend genaues Bild der Umstellung einer Erdgasleitung auf den Transport von Wasserstoff skizziert werden. Die Ergebnisse bildeten zum einen die Grundlage der Antragstellung des TP5 im "Reallabor Energiepark Bad Lauchstädt" und dienen zum anderen als technische Grundlage für die Umsetzung im Projekt selbst.

Die Auslegung der Elektrolyse und die Ermittlung der Wasserstoffmengen und -kosten dienen sowohl der Bemessung aller nachfolgenden Funktionseinheiten als auch der Erstellung von Geschäftsmodellen. Durch den Vergleich verschiedener möglicher Konfigurationen konnten generelle Tendenzen identifiziert werden, was die anzustrebenden Größenordnungen der Anlagenkomponenten im Verbund angeht. In Phase II wird nun, soweit bekannt, eine kleinere Elektrolyse angesetzt als in Phase I ursprünglich vorgesehen, da sich dies bei gleichbleibend großem Stromangebot im Rahmen der Arbeiten in Phase I als vorteilhaft für eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage gezeigt hat. Die in Phase I ermittelten zu erwartenden Wasserstoffflüsse und Eigenschaften der Elektrolyse gehen direkt in die Bemessung des Kompressors ein. Planungsgrundlagen für nachfolgende Phasen wurden ermittelt.

Die in vorliegendem Projekt entwickelte und bei der zuständigen Landesbergbehörde eingereichte Genehmigungsplanung einschließlich des geotechnischen Nachweises bildet die genehmigungsrechtliche Grundlage für die Errichtung, die Inbetriebnahme und den Betrieb der in Phase II.1 und Phase II.2 des Reallaborvorhabens zur Realisierung vorgesehenen Anlagenteile des Wasserstoffkavernenspeichers. Dabei konnten im Laufe des Genehmigungsverfahrens wertvolle Erfahrungen bei Betreiber und Behörde gesammelt und die mit solchen Verfahren einhergehende Risiken für die weitere Projektrealisierung gesenkt werden.

Der Fokus bei der Entwurfs- und Genehmigungsplanung lag dabei auf den Schwerpunkten Störfallbetrachtungen, Emissionen sowie sicherheitstechnischen Fragestellungen zum Umgang mit Wasserstoff. Auf der Grundlage der hierbei gewonnenen Erkenntnisse können Normen und Regelwerke erweitert bzw. erforderliche Regelwerksanpassungen adressiert werden.

Im Zuge des Reallaborvorhabens wird aus der im Rahmen der „H<sub>2</sub>-Forschungskaverne“ entwickelten Entwurfsplanung die Ausführungsplanung für den Wasserstoff-UGS erarbeitet und die entsprechenden Ergebnisse in die bisherige Genehmigungsplanung überführt.

#### 9.4 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens kam es zu keinem bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.

#### 9.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Projektergebnisse der Projektpartner werden im gemeinsamen Abschlussbericht der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Während der bisherigen Projektlaufzeit wurden durch Vorträge und Artikel Experten und Branchenakteuren die im Projekt generierten Ergebnisse vor- und zur Diskussion gestellt.

<b>Maßnahme</b>	<b>Zeitraum</b>	<b>Status</b>
Pressemitteilung	April 2019	erledigt
Vortrag, 10. DBI-Fachforum ENERGIESPEICHER	September 2019	erledigt
Artikel, energie   wasser-praxis kompakt (DVGW)	November 2019	erledigt
Vorträge, 7. HYPOS-Forum	November 2021	erledigt
Vortrag, 11. DBI-Fachforum ENERGIESPEICHER	September 2020	erledigt
Veröffentlichung Abschlussbericht (TIB)	2022	In Planung
Artikel in Fachjournal	2022	In Planung

## 10 Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1:	Einordnung des Projektes in die Gesamtzielstellung zur Errichtung einer Speicherforschungsplattform für Wasserstoff .....	6
Abbildung 2:	Systemkomponenten der SPF am Standort Bad Lauchstädt und Einbindung in die HYPOS-Wasserstoffversorgung .....	7
Abbildung 3:	Systemgrenzendefinition Standort Bad Lauchstädt (inklusive Wasseraufbereitung) .....	14
Abbildung 4:	Systemgrenzendefinition Standort Leuna (exklusive Wasseraufbereitung) .....	14
Abbildung 5:	Auszug Errichterdocumentation – Beispiel Prüfprotokoll.....	16
Abbildung 6:	Auszug Errichterdocumentation – Beispiel Strangschema.....	16
Abbildung 7:	Detailplan Trassenverlauf.....	17
Abbildung 8:	Detailplan Höhenschnitt.....	17
Abbildung 9:	H <sub>2</sub> -OTA Layout mit Kennzeichnung der Phase II.1 und II.2 .....	26
Abbildung 10:	Verteilung des Stromverbrauches vs. H <sub>2</sub> -Produktion .....	35
Abbildung 11:	Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Betriebszustände.....	36
Abbildung 12:	Spezifische Wasserstoffgestehungskosten vs. Produktionsmenge.....	37
Abbildung 13:	Geordnete Jahressgänge von elektrischer Leistung (links, unterschieden in anliegend, genutzt und abgeregelt) sowie resultierendem H <sub>2</sub> -Produktgasfluss für Simulationsvariante A35_O_NS_0 .....	39
Abbildung 14:	Geordnete Jahressgänge von elektrischer Leistung (links, unterschieden in anliegend, genutzt und abgeregelt) sowie resultierendem H <sub>2</sub> -Produktgasfluss für Simulationsvariante A35_Ü_6h_10 .....	40
Abbildung 15:	Vergleich der Permeabilität von Steinsalz bei Untersuchungen mit Stickstoff und Wasserstoff im Zuge unterschiedlicher Belastungen (Differenzdrücke). Der funktionale Zusammengang zwischen Permeabilität und Druckdifferenz lässt sich in geschlossener Form durch eine Tangens-Hyperbolicus-Funktion beschreiben. Im Diagramm ist dafür die untere und die obere Einhüllende der Permeabilität abgebildet. ....	44
Abbildung 16:	CAD-Modell der Kaverne Lt 09 (links) und gesamtes FLAC <sup>3D</sup> -Modell (rechts). Das Modell besitzt in x- und y-Richtung eine horizontale Kantenlänge von 280 m. Dies entspricht den Bohrlochabständen zwischen benachbarten Kavernen im UGS Bad Lauchstädt. ....	46
Abbildung 17:	Zeitlicher Ablauf der gebirgsmechanischen Berechnung und simuliertes Druck- und Temperaturregime im jährlichen Speicherbetrieb mit Wassererstoff (Maximaler Betriebsspeicherdruck $p_{MAX} = 140$ bar, Minimaler Betriebsspeicherdruck $p_{MIN} = 30$ bar).....	47
Abbildung 18:	Gebirgsmechanische Bewertungskriterien beim Anfahren des maximalen Betriebsspeicherdruckes von $p_{MAX} = 140$ bar. Links zeigt den Nachweis der	

	geologischen Dichtheit. Eine Verletzung des Kriteriums ist nur in einer konturnahen Saumzone (roten Bereiche) zu erwarten. Die technische Dichtheit (rechtes Bild) der Casing-Installation ist aufgrund einer ausreichend wirkenden radialen Druckeinspannung erfüllt. ....	49
Abbildung 19:	Gebirgsmechanische Bewertungskriterien beim Anfahren des minimalen Betriebsspeicherdruckes von $p_{\text{MIN}} = 30$ bar. Links zeigt den Nachweis der geologischen Dichtheit (Absenkungen der Hauptspannungen unter Kavernendruck). Eine Verletzung des Kriteriums ist nur in einer konturnahen Saumzone (roten Bereiche) zu erwarten. Die dilatant beeinflussten Bereiche (rechtes Bild) konzentrieren sich ebenfalls nur auf den unmittelbaren Konturbereich der Kaverne. ....	50
Abbildung 20:	Blockschaltbild für das Gesamtvorhaben Energiepark Bad Lauchstädt inkl. Schnittstellen.....	56
Abbildung 21:	Fläche und Anlagenteile der Stromversorgung / 3D-Darstellung .....	57
Abbildung 22:	Fläche und Anlagen der Gasaufbereitung / 3D-Darstellung.....	58
Abbildung 23:	Fläche und Anlage der GDR(M)A, Druckluftherzeugung und EMSR / 3D-Darstellung.....	59
Abbildung 24:	Hauptversorgungstrassen West-Ost.....	59
Abbildung 25:	Molchschleuse und Nebenanlagen / 3D Darstellung .....	61
Abbildung 26:	Anlagen des Verdichters / 3D-Darstellung.....	63
Abbildung 27:	Filter / Abscheider der H <sub>2</sub> -OTA (nach Ausspeicherung Kaverne) sowie der Transportleitung 3D-Darstellung.....	63
Abbildung 28:	Genehmigungsbereiche der Teilanlagen, Land Sachsen-Anhalt .....	76
Abbildung 29:	Gegenüberstellung der Wasserstoffgestehungskosten bei fixer Lebensdauer von 20a (orange) und variabler Lebensdauer (grün) (Variable Lebensdauer = 2 * Stacklebensdauer in Abhängigkeit des Betriebsverlaufes, dunkelgrün).....	89

## 11 Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1:	Qualitätsanforderungen Wasserstoff .....	9
Tabelle 2:	Zielgrößen, Steuer- und Messvariablen der Elektrolyse.....	10
Tabelle 3:	Anschlussgrößen Wasser.....	12
Tabelle 4:	Kosten für benötigte Medien der potentiellen Elektrolysestandorte.....	21
Tabelle 5:	Zusammenstellung Stromnebenkosten .....	21
Tabelle 6:	Anlagenkonfigurationen.....	32
Tabelle 7:	Stoffdaten eingesetzter Stoffe auf der OTA .....	73
Tabelle 8:	Liste der Ausbläser OTA .....	74
Tabelle 9:	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) Anlage 1 Liste „UVP-pflichtige Vorhaben“ (Fundstelle: BGBl. I 2021, 565 – 582).....	82
Tabelle 10:	Technische und ökonomische Kenndaten Elektrolyse.....	84
Tabelle 11:	CAPEX und OPEX für die SPF.....	88

## 12 Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

---

<i>Ar</i>	<i>Argon</i>
<i>BMA</i>	<i>Brandmeldeanlage</i>
<i>CH<sub>4</sub>-OTA</i>	<i>Obertageanlage des Erdgasspeichers UGS Bad Lauchstädt</i>
<i>BMBF</i>	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>
<i>CH<sub>4</sub>-Speicher</i>	<i>Erdgasspeichers UGS Bad Lauchstädt</i>
<i>DBI</i>	<i>DBI – Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg</i>
<i>DP</i>	<i>Design Pressure (Auslegungsdruck)</i>
<i>DVGW</i>	<i>Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.</i>
<i>E-Technik</i>	<i>Elektrotechnik</i>
<i>EE</i>	<i>Erneuerbare Energien</i>
<i>EMSR</i>	<i>Elektro-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik</i>
<i>Ex e</i>	<i>Erhöhte Sicherheit</i>
<i>Ex i</i>	<i>Eigensicherheit</i>
<i>Ex-Zone</i>	<i>Explosionszone</i>
<i>GA</i>	<i>Gasaufbereitung</i>
<i>GC</i>	<i>Gaschromatograph</i>
<i>GDRA</i>	<i>Gas-Druckregelanlage</i>
<i>GDRMA</i>	<i>Gas-Druckregel- und Messanlage</i>
<i>g. e. A.</i>	<i>gefährliche explosionsfähige Atmosphäre</i>
<i>GefStoffV</i>	<i>Gefahrenstoffverordnung</i>
<i>GEB</i>	<i>Gaserstbefüllung</i>
<i>GWA</i>	<i>Gaswarnanlage</i>
<i>HAZOP</i>	<i>Hazard and Operability (Sicherheitsbetrachtung und Risikoanalyse)</i>
<i>HBP</i>	<i>Hauptbetriebsplan des H<sub>2</sub>-UGS Bad Lauchstädt</i>
<i>HSE</i>	<i>Health Safety Environment</i>
<i>HYPOS</i>	<i>Hydrogen Power Storage &amp; Solutions</i>
<i>H<sub>2</sub></i>	<i>Wasserstoff</i>
<i>H<sub>2</sub>-FL</i>	<i>H<sub>2</sub>-Feldleitung</i>
<i>H<sub>2</sub>-OTA</i>	<i>wasserstoffspezifische Obertageanlage</i>
<i>H<sub>2</sub>S</i>	<i>Schwefelwasserstoff</i>
<i>KAL</i>	<i>Kavernenanschlussleitung</i>
<i>KH</i>	<i>Kugelhahn</i>

<i>KKS</i>	<i>Kathodischer Korrosionsschutz</i>
<i>kV</i>	<i>elektrische Spannung in Kilovolt</i>
<i>KW</i>	<i>Kohlenwasserstoff</i>
<i>kW<sub>el</sub></i>	<i>Elektrische Leistung in Kilowatt</i>
<i>MSR</i>	<i>Mess-, Steuer- und Regeltechnik</i>
<i>NaOH</i>	<i>Natriumhydroxid</i>
<i>Nm<sup>3</sup></i>	<i>Normkubikmeter</i>
<i>NS</i>	<i>Niederspannung</i>
<i>NSA</i>	<i>Niederspannungsanlage</i>
<i>NSHV</i>	<i>Niederspannungshauptverteilung</i>
<i>N<sub>2</sub></i>	<i>Stickstoff</i>
<i>OTA</i>	<i>Obertageanlage</i>
<i>ONTRAS</i>	<i>ONTRAS Gastransport GmbH</i>
<i>PGC</i>	<i>Prozess-Gaschromatograph</i>
<i>PLS</i>	<i>Prozessleitsystem</i>
<i>SBP</i>	<i>Sonderbetriebsplan</i>
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<i>SGD</i>	<i>Sicherheits- und Gesundheitsschutz-Dokument</i>
<i>SIL</i>	<i>safety integrity level</i>
<i>SPF</i>	<i>Speicherforschungsplattform</i>
<i>SPS</i>	<i>Speicher-Programmierbare-Steuerung</i>
<i>TEG</i>	<i>Triethylenglykol</i>
<i>TFRL</i>	<i>Technischen Regel für Rohrfernleitungsanlagen</i>
<i>TRBS</i>	<i>technischen Regeln für Betriebssicherheit</i>
<i>TRGS</i>	<i>Technischen Regeln für Gefahrstoffe</i>
<i>UEG</i>	<i>Untere Explosionsgrenze</i>
<i>UGS</i>	<i>Untergrundspeicher</i>
<i>UNIPER</i>	<i>Uniper Hydrogen GmbH</i>
<i>UTA</i>	<i>Untertageanlage</i>
<i>VGS</i>	<i>VNG Gasspeicher GmbH</i>
<i>UTA</i>	<i>Untertageanlagen</i>

## 13 Literaturverzeichnis

---

EnWG (2021 BGBl. I S. 3026

GÜNTHER, R.-M. (2009): Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz, Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-4

IFB (1987): Untersuchungen zum Bruch- und Verformungsverhalten des Deckgebirges. Institut für Bergbausicherheit, Leipzig (nicht veröffentlicht)

IfG (2011a): Gebirgsmechanische Modellierung zum Nachweis der Standsicherheit im Speicherbetrieb und der Zulässigkeit maximaler und minimaler Speicherdrücke für neu anzulegende Kavernen des UGS Bad Lauchstädt. 07.09.2011. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

IfG (2011b): Gesteinsmechanische Untersuchungen an Steinsalz der Bohrungen Lt 09 und Lt 10 für die Anlage von Kavernenspeichern im Bereich des Teutschenthaler Sattels. 02.08.2011 (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

IfG (2014): Gebirgsmechanische Untersuchung und Bewertung der Perkolation von Wasserstoff - Laborbericht - 13.01.2014. (unveröffentlicht für UGS Mittenwalde GmbH)

IfG (2019): Senkungsprognose für das Kavernenfeld des UGS Bad Lauchstädt. 28.02.2019 (Entwurfassung bei VNG Gasspeicher GmbH unveröffentlicht)

ITASCA (2019): User's Guide for FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 7.0, ITASCA Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota USA.

KIRCH, M.; AMRO, C. FREESE, C. (2020): Evaluierung der Bohrintegrität von Wasserstoffspeicherkavernen – Evaluation of the well integrity of hydrogen storage caverns. EEK – Erdöl Erdgas Kohle 136 Jg. Ausgabe 5 / 2020

SOCON (2016): Bericht über die Ergebnisse der echometrischen Hohlraumvermessung in der Kaverne Lauchstädt K Lt 9. 8. Messung (Vollvermessung). 05.02.2016. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

UGS (2010): Geologischer Abschlussbericht zur Bohrung Bad Lauchstädt Ug Lt 9/2009 02.03.2010. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

UGS (2020): Statusbericht Kaverne Lt 09. Solung vom 19.02.2016 bis 17.04.2020. 24.11.2020. (unveröffentlicht für VNG Gasspeicher GmbH)

## 14 Anlagen

---

### 14.1 Inhaltsverzeichnis Hauptbetriebsplan

Abbildungsverzeichnis .....	7
Tabellenverzeichnis .....	7
1 Einleitung .....	8
1.1 Gegenstand des Betriebsplans .....	8
1.1.1 Allgemeines .....	8
1.1.2 Genehmigungsverfahren .....	8
1.1.3 Bergrechtliche Grundlagen .....	8
1.2 Gesamtvorhaben „Energiepark Bad Lauchstädt“ .....	9
1.3 Bergrechtliches Teilvorhaben H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt .....	12
1.3.1 Entwurfsplanung und bergrechtliches Genehmigungsverfahren .....	12
1.3.2 Realisierung des bergrechtlichen Vorhabens .....	12
1.3.3 Machbarkeit der Wasserstoffspeicherung, Begleitforschung .....	13
2 Allgemeine Angaben zum H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt .....	15
2.1 Angaben zum Unternehmen .....	15
2.2 Angaben zum Standort .....	15
2.2.1 Lage der untertägigen Anlage des Wasserstoffspeichers .....	15
2.2.2 Geplante Lage der obertägigen Anlagen des Wasserstoffspeichers, Grundstücke und Dienstbarkeiten .....	16
2.2.3 Untergrundverhältnisse .....	16
2.3 Angaben zur Umgebung und Abstände zu umliegenden Objekten .....	18
2.4 Bewertung des Standortes .....	20
2.4.1 Störfallbezogene Bewertung .....	20
2.4.2 Seismologische Bewertung .....	20
3 Status der Wasserstoffspeicheranlage .....	22
3.1 Status der untertägigen Anlagen .....	22
3.2 Status des Kavernenplatzes .....	23
3.2.1 Gestaltung .....	23
3.2.2 Ausrüstung .....	23
3.3 Status der obertägigen Anlagen .....	23
4 Errichtung der Wasserstoffspeicheranlage .....	24
4.1 Untertageanlage .....	24
4.1.1 Einführung .....	24
4.1.2 Wasserstoffspezifische Begleitforschung .....	24
4.1.3 Umrüstung zum Speicherbetrieb .....	25
4.2 Kavernenbetriebsplatz .....	25
4.3 Obertagespeicherdesign .....	26
4.3.1 Feldleitung (Anbindung H <sub>2</sub> -OTA – Kaverne) .....	26
4.3.2 Technisches Obertagespeicherdesign .....	26
4.3.3 Wasserstoffmengen .....	32
4.4 Regelwerke .....	34
4.5 Genehmigungsumfang und Zeitplan .....	34
4.6 Risikobeurteilung (HAZOP) .....	34

5	Inbetriebnahme.....	35
5.1	Allgemeines .....	35
5.2	Inbetriebnahme der untertägigen Ausrüstung.....	35
5.3	Gaserstbefüllung.....	35
5.4	Inbetriebnahme der obertägigen Anlagen.....	36
6	Betrieb Wasserstoffspeicheranlage.....	37
6.1	Allgemeines zum Betrieb .....	37
6.2	Prozess der Betriebsführung .....	37
6.2.1	Allgemeines.....	37
6.2.2	Prozesssicherung.....	37
6.3	Überwachung.....	39
6.4	Betriebsarten des Wasserstoff-Untergrundgasspeichers .....	40
6.4.1	Allgemeines/Parameter.....	40
6.4.2	Einspeicherung .....	40
6.4.3	Ausspeicherung .....	40
6.4.4	Vorgaben zum Betrieb des Speichers .....	41
6.5	Betrieb der Obertageanlage in Phase 2.1.....	41
6.5.1	Gasaufbereitung.....	41
6.5.2	Mengenmessung.....	41
7	Überwachung des Anlagenbetriebes.....	43
7.1	Überwachung der Untertageanlagen.....	43
7.1.1	Kaverne.....	43
7.1.2	Untertagetechnik.....	43
7.2	Überwachung der obertägigen Anlagen inklusive Feldleitung.....	43
7.3	Instandhaltung der Speicheranlagen .....	43
8	Gefahrenschwerpunkte, Notfallorganisation und Schutzmaßnahmen .....	44
8.1	Notfallmanagement, Bereitschaftsorganisation, Störungsbeseitigung.....	44
8.2	Brandschutz.....	44
8.3	Explosionsschutz .....	45
8.4	Objektschutz .....	46
8.5	Informationen der Behörden, der Medien und der Bevölkerung.....	46
9	Arbeits- und Umweltschutz.....	47
9.1	Arbeitssicherheit .....	47
9.2	Gefahrstoffe und Abfälle.....	47
9.3	Wasser- und Abwasseranlagen.....	47
9.4	Umweltschutz.....	48
9.5	Wiedernutzbarmachung der Betriebsfläche.....	48
	Literaturverzeichnis.....	49
	Anlagen.....	50
	Anlage 1    Geplante Sonderbetriebspläne, Genehmigungen und bergbehördlichen Zulassungen	51

Anlage 2	Zeitplan Gesamtvorhaben „Energiepark Bad Lauchstädt“ .....	52
Anlage 3	Lage des Bergwerkseigentums „Teutschenthal-Ost-1“ .....	53
Anlage 4	Flächenlayout der H <sub>2</sub> -OTA .....	54
Anlage 5	Flächenlayout (Gesamtübersicht) .....	55
Anlage 6	Verlauf der Feldleitung .....	56
Anlage 7	Geologischer Riss .....	57
Anlage 8	Geologisches Profil Kavernenbohrung Ug Lt 09/2009 .....	58
Anlage 9	Einwirkungsbereich nach EinwirkungsBergV .....	59
Anlage 10	Übersicht Industriestandort UGS Bad Lauchstädt .....	60
Anlage 11	Eingriffsbewertung - Landschaftspflegerischer Begleitplan .....	61
Anlage 12	Auswirkungsbetrachtung im Störfall .....	62
Anlage 13	Geologisch-technischer Zustand der Kaverne (Formblatt 5) .....	63
Anlage 14	Bestandsplan Betriebsplatz Lt 09 .....	64
Anlage 15	Blockschaltbild für das Gesamtvorhaben Energiepark Bad Lauchstädt inkl. der Schnittstellen .....	65
Anlage 16	Regelwerke .....	66

## 14.2 Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Feldleitung

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>	
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>4</b>	
<b>1</b>	<b>Allgemeine Angaben</b>	<b>5</b>
1.1	Antragstellender Unternehmer	5
1.2	Gegenstand des Sonderbetriebsplans	5
1.3	Übergeordneter Hauptbetriebsplan	5
1.4	Umfang des Sonderbetriebsplans	6
1.4.1	Verlegung der Feldleitung	6
1.4.2	Informations-, Steuer- und Energieversorgung	6
1.4.3	Platzanpassung inkl. Gasanschluss	7
1.5	Lage des geplanten Vorhabens	7
1.6	Eigentums- und Rechtsverhältnisse	7
1.7	Zeitplan für die Realisierung des Vorhabens	8
1.8	Gesetze, Normen, Regelwerke	8
<b>2</b>	<b>Auslegung und Planung der H<sub>2</sub>-Feldleitung</b>	<b>9</b>
2.1	Technische Daten	9
2.1.1	Auslegungsparameter	9
2.1.2	Daten der Rohrleitungen	9
2.2	Werkstoffauswahl und Verbindungstechnologien	10
2.2.1	Werkstoffauswahl für die Rohrleitungen	10
2.2.2	Verbindungstechnologien	10
2.2.3	Endgültige Festlegung	11
2.3	Verlegetrasse und Schutzstreifen	11
2.4	Armaturen und Gastechnischer Anschluss	11
2.4.1	Armaturen	11
2.4.2	Gastechnischer Anschluss	11
2.5	Prüfung und Abnahme	12
2.5.1	Prüfung der Rohrleitungen	12
2.5.2	Abnahmeprüfung vor Inbetriebnahme/Überwachung	13
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Realisierung</b>	<b>13</b>
3.1	Vorbereitende Untersuchungen	13
3.1.1	Natur- und artenschutzrechtliche Maßnahmen	13
3.1.2	Untersuchungen zur Kampfmittelfreiheit	13
3.1.3	Archäologische Untersuchungen	13
3.2	Tiefbau Feldleitung	14
3.2.1	Kreuzung von befestigten Straßen	14
3.2.2	Arbeitsstreifen	14
3.2.3	Verbau	15
3.2.4	Grundwasser	15
3.3	Anpassung Kavernenplatz	15
3.4	Rohrbau Feldleitung	15
3.5	Rohrbau Kavernenanschluss	16
3.6	E-/MSR-Umfang	16
3.6.1	E-Erschließung (6 kV / 0,4 kV), Trafostation	16
3.6.2	Elektroanlagen Kavernenplatz	17
3.6.3	MSR- und Automatisierungstechnik	18
3.6.4	Schutzhaus (E-MSR-Container)	21
3.6.5	Erdung, Blitzschutz, Potentialausgleich	21
3.6.6	Korrosionsschutz	22

3.8.7	Abnahme E-MSR- und KKS-System	23
4	<b>Brand- und Explosionsschutz</b>	23
5	<b>Überwachung der Leitungstrasse</b>	23
6	<b>Dokumentation</b>	23
7	<b>Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz</b>	24
7.1	Grundsätze und Sicherheits- und Gesundheitsschutz-Dokument	24
7.2	Sicherheitsanforderungen und Schutzmaßnahmen	24
7.2.1	Einweisung / Unterweisung	24
7.2.2	Arbeitsfreigabe	25
7.2.3	Umweltschutz / Abfallentsorgung	26
7.2.4	Erste Hilfe	26
7.2.5	Sicherheitsabstimmungen / Sicherheitskontrollen	26
7.3	Bergrechtliche Bestellung der verantwortlichen Personen	27
8	<b>Vorgesehene Realisierungstermine</b>	27
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		28
<b>Anlagen</b>		30
Anlage 1	Übersicht H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt	30
Anlage 2	Verlauf der H <sub>2</sub> -Feldleitung	31
Anlage 3	Bauwerks-/Kreuzungsverzeichnis (ausgehend von der H <sub>2</sub> -OTA)	32
Anlage 4	Betroffene Grundstücke H <sub>2</sub> -FL	34
Anlage 5	Gesetze, Normen, Regelwerke	35
Anlage 6	R&I-Schema Feldleitung und GTA	36
Anlage 7	Regelgrabenprofil	37

#### Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1:	Zeitplan des Reallaborvorhabens „Energiepark Bad Lauchstädt“	8
--------------	--	---

#### Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1:	Bauablaufplan	27
------------	---------------	----

### 14.3 Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Untertage

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	5
<b>1 Allgemeine Angaben .....</b>	<b>6</b>
1.1 Antragstellender Unternehmer.....	6
1.2 Gegenstand des Sonderbetriebsplans .....	6
1.3 Übergeordneter Hauptbetriebsplan .....	6
1.4 Umfang des Sonderbetriebsplans .....	7
1.5 Lage der Kaverne, Eigentums- und Rechtsverhältnisse .....	7
1.6 Zeitplan für die Realisierung des Vorhabens .....	8
1.7 Gesetze, Normen, Regelwerke .....	9
<b>2 Technische Angaben/ Ist-Zustand der Kaverne .....</b>	<b>10</b>
2.1 Bohrungsdaten.....	10
2.2 Technische Bohrlochsituation / Verrohrung .....	10
2.3 Kavernendaten / Speicherparameter.....	11
<b>3 Umrüstung der Kaverne zur Gasratbefüllung .....</b>	<b>11</b>
3.1 Eignung der Kaverne zur Wasserstoffspeicherung.....	11
3.2 Ausbau Solerohrtouren und Endvermessung unter Sole .....	12
3.2.1 Auslagerung des Spermediums (Blanket).....	12
3.2.2 Ausbau des noch in der Bohrung befindlichen Solgestänges .....	12
3.3 Einbau der Letzten zementierten Rohrtour .....	13
3.3.1 Allgemeines .....	13
3.3.2 Material im Bereich unterhalb des Packers der LzRT .....	13
3.3.3 Zementation der LzRT.....	14
3.3.4 Vorbereitungen des Einbaus der LzRT.....	14
3.3.5 Einbau der LzRT.....	15
3.3.6 Nach Einbau der LzRT .....	15
3.4 Dichtheittest der letzten zementierten Rohrtour.....	15
3.5 Förderinstallation und Gasförderkopf .....	16
3.5.1 Förderrohrtour.....	16
3.5.2 Gasförderkopf.....	16
3.5.3 Packer.....	18
3.5.4 Untertagesicherheitsabsperrventil (UTSAV).....	18
3.5.5 Einbau der Gasförderinstallation .....	19
3.6 Soleentleerungsstrang und Soleentleerungskopf.....	19
3.6.1 Allgemeines .....	19
3.6.2 Material.....	19
3.6.3 Einbau.....	20
3.7 Arbeits- und Zeitplan zu den Umrüstungsmaßnahmen .....	20
<b>4 Aufbau und Betrieb der Soleentleerungsanlage .....</b>	<b>20</b>
4.1 Geltende Vorschriften und technische Regeln .....	20

<b>4.2</b>	<b>Anlagenbeschreibung</b> .....	20
<b>4.3</b>	<b>Verfahrensbeschreibung</b> .....	21
4.3.1	Verfahrensbeschreibung Soleentleerungsanlage .....	21
4.3.2	Gaserstbefüllung.....	23
4.3.3	Hydraulik, Gasdruck, Thermodynamik, Gebirgsmechanik .....	24
4.3.4	Sicherheitstechnische Forderungen.....	25
<b>4.4</b>	<b>Angaben zur Maschinentechnischen Anlagenausrüstung</b> .....	25
<b>4.5</b>	<b>Angaben zur E/MSR-Ausrüstung</b> .....	25
<b>4.6</b>	<b>Funktionsbeschreibung</b> .....	28
<b>4.7</b>	<b>Wiederkehrende Prüfungen</b> .....	28
<b>4.8</b>	<b>Betrieb</b> .....	28
	<b>Ausbau Soleentleerungsstrang einschließlich Begleitmaßnahmen</b> .....	27
<b>5.1</b>	<b>Vorbereitende Arbeiten (Wireline-Service)</b> .....	27
5.1.1	Kaliber- und Dummyfahrt .....	27
5.1.2	Gasumschluss/Perforation.....	27
5.1.3	Trennen des SES, Nachweis der Trenntaufe.....	27
5.1.4	Setzen Steigraumsicherung .....	28
5.1.5	Setzen eines Back-Pressure-Valves in den Tubinghanger.....	28
<b>5.2</b>	<b>Snubbing</b> .....	28
5.2.1	Aufbau der Snubbing-Unit.....	28
5.2.2	Ausbau des Soleentleerungsstranges .....	28
5.2.3	Abbau & Demontage der Snubbing-Unit.....	29
<b>5.3</b>	<b>Abschließende Maßnahmen/Endkomplettierung</b> .....	29
5.3.1	Endaufbau des Gasförderkopfes .....	29
5.3.2	Hohlraumvermessung (Erstvermessung unter Gas).....	29
5.3.3	Einbau, Setzen & Testen des UTSAV.....	29
	<b>Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz</b> .....	30
<b>6.1</b>	<b>Grundsätze und Sicherheits- und Gesundheitschutz-Dokument</b> .....	30
<b>6.2</b>	<b>Sicherheitsanforderungen und Schutzmaßnahmen</b> .....	31
6.2.1	Einweisung / Unterweisung.....	31
6.2.2	Arbeitsfreigabe.....	31
6.2.3	Umweltschutz / Abfallentsorgung.....	32
6.2.4	Erste Hilfe.....	32
6.2.5	Sicherheitsabstimmungen / Sicherheitskontrollen .....	32
<b>6.3</b>	<b>Bergrechtliche Bestellung der verantwortlichen Person</b> .....	33
	<b>Bergbau- und öffentliche Sicherheit</b> .....	33
<b>7.1</b>	<b>Allgemeines</b> .....	33
<b>7.2</b>	<b>Immissionschutz</b> .....	34
<b>7.3</b>	<b>Einrichtungen des Brand- und Explosionsschutzes</b> .....	34
<b>7.4</b>	<b>Gaschutzmaßnahmen</b> .....	34
<b>7.5</b>	<b>Umgang mit wassergefährdenden und gefährlichen Arbeitstoffen</b> .....	34
<b>7.6</b>	<b>Umgang mit Abfällen</b> .....	35

7.7	Monitoring Gaserstbefüllung und Forschungsbetrieb	35
	Abkürzungsverzeichnis	36
	Revisionsindex	38
	Anlagen	39
Anlage 1	Übersicht H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt	39
Anlage 2	Lage der Kaverne	40
Anlage 3	Gesetze, Normen, Regelwerke	41
Anlage 4	Übersicht aktuelle Installation (Formblatt 5)	43
Anlage 5	Kavernenschnitt	44
Anlage 6	Gebirgsmechanische Stellungnahme nach Solung – <i>wird nachgereicht</i>	45
Anlage 7	Nachweis der technischen Dichtigkeit der Installation – <i>wird nachgereicht</i>	46
Anlage 8	Arbeitsprogramm des Einbaus der LzRT und FRT – <i>wird nachgereicht</i>	47
Anlage 9	Installationsschema LzRT und FRT (beispielhaft)	48
Anlage 10	Zeichnung Kavemenkopf nebst Stückliste	49
Anlage 11	Zeichnung Soleentleerungskopf nebst Stückliste	50
Anlage 12	Ausführungsunterlagen für Schweißarbeiten (FRT) – <i>wird nachgereicht</i>	51
Anlage 13	Installationsschema Gaserstbefüllung (beispielhaft)	52
Anlage 14	Aufstellungsplan Soleentleerungsanlage (SEA) – <i>wird nachgereicht</i>	53
Anlage 15	Entleerungsprogramm für Kaverne Lt9 – <i>wird nachgereicht</i>	54
Anlage 16	Ex-Gutachten SEA Kaverne Lt9 – <i>wird nachgereicht</i>	55
Anlage 17	Geprüfte MTA-Ausführungsunterlagen für SEA – <i>wird nachgereicht</i>	56
Anlage 18	E/MSR – Ausführungsunterlagen – <i>wird nachgereicht</i>	57
Anlage 19	R+I Schema SEA Kaverne Lt9 – <i>wird nachgereicht</i>	58
Anlage 20	Verfahrensanweisung Betrieb SEA – <i>wird nachgereicht</i>	59
Anlage 21	Layout der Snubbing-Unit – <i>wird nachgereicht</i>	60

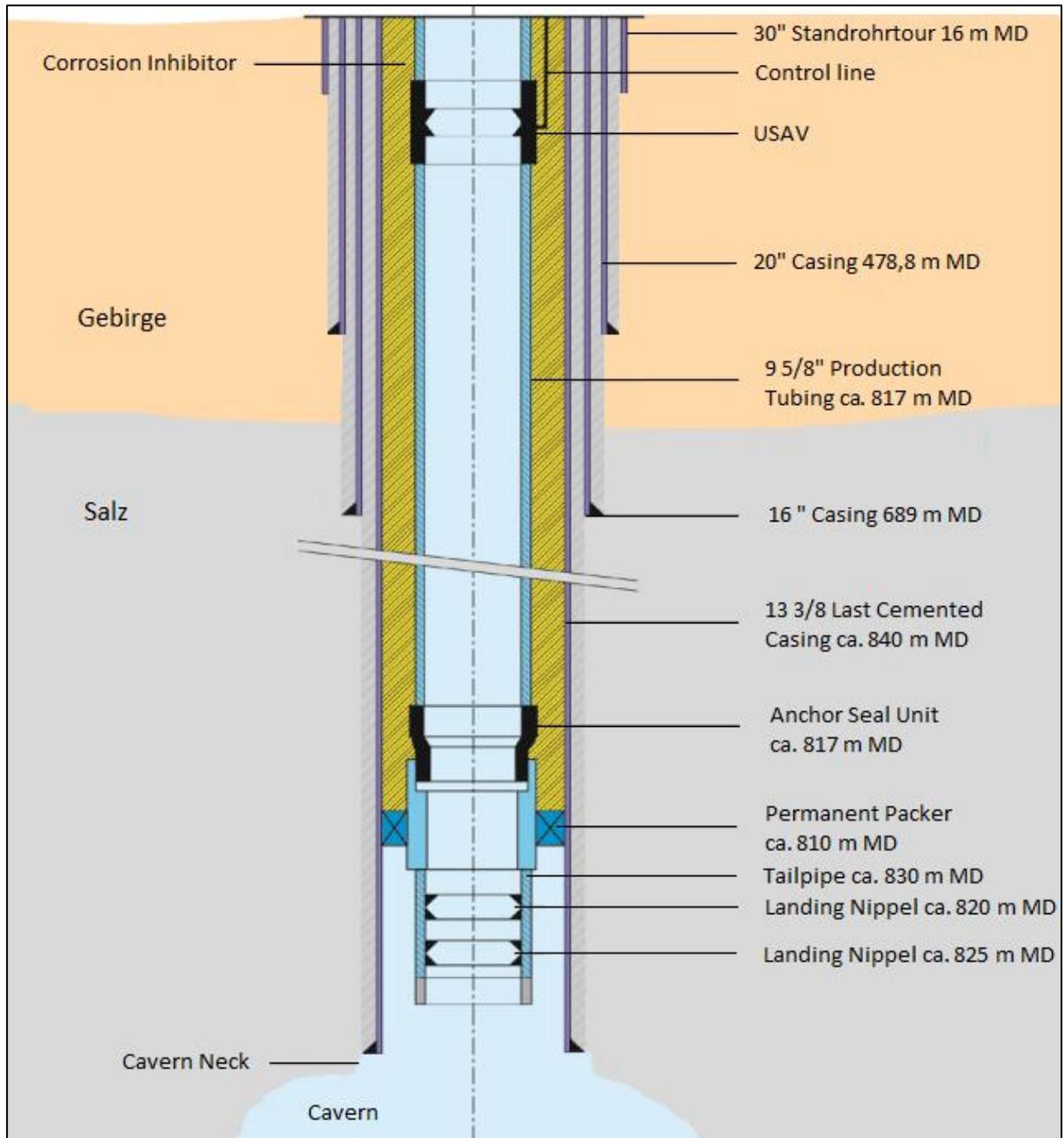
## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitplan des Reallaborvorhabens „Energiepark Bad Lauchstädt“	9
Abbildung 2:	Schematischer Entleerungsprozess	21
Abbildung 3:	Entleerungsprozess (Fließschema)	23

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenndaten der Kaverne Lt9	10
Tabelle 2:	Verrohrung der Kaverne Lt9 (Stand November 2019)	10
Tabelle 3:	Kavernendaten/Speicherparameter	11
Tabelle 4:	Operationen zum Ausbau des in der Bohrung befindlichen Solegestänges	12
Tabelle 5:	Eingebaute Solegestänge	12

#### 14.4 Geplante Installation der LzRT und der FRT





## 14.6 Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Anlagentechnik

<b>1</b>	<b>Allgemeine Angaben .....</b>	<b>6</b>
1.1	Antragstellender Unternehmer .....	6
1.2	Gegenstand des Sonderbetriebsplans.....	6
1.3	Übergeordneter Hauptbetriebsplan.....	7
1.4	Lage des geplanten Vorhabens, Eigentumsverhältnisse.....	7
1.5	Zeitplan für die Realisierung des Vorhabens .....	8
1.6	Gesetze, Normen und Regelwerke .....	9
<b>2</b>	<b>Verfahrensbeschreibung, Fahrweisen.....</b>	<b>9</b>
2.1	Verfahrensbeschreibung.....	9
2.2	Fahrweisen.....	11
2.2.1	Fahrweisen Phase 2.1 .....	11
2.2.2	Fahrweisen Phase 2.2 .....	12
<b>3</b>	<b>Technische Parameter.....</b>	<b>14</b>
3.1	Auslegungsparameter .....	14
3.2	Umgebungsbedingungen .....	14
3.3	Anlagenauslegung .....	15
3.3.1	OT-Piping.....	15
3.3.2	Feldleitung (Phase 2.2.).....	16
<b>4</b>	<b>Hauptausrüstungen .....</b>	<b>17</b>
4.1	Allgemeine Übersicht.....	17
4.2	Kurzbeschreibung der Hauptausrüstungen Phase 2.1.....	17
4.2.1	Gasmengenmessung .....	17
4.2.2	Gasaufbereitung .....	18
4.2.3	Steuerungs- und Regeltechnik.....	23
4.2.4	Piping – Prozessgassystem Wasserstoff.....	24

4.2.5	Gasbeschaffenheitsmessung.....	24
4.2.6	Automatisierungs- und Prozessleitsystem (PLS).....	25
4.2.7	Energieversorgung.....	29
4.2.8	EMSR-Anlagen.....	35
4.2.9	Gefahrenmeldeanlagen.....	36
4.2.10	Hilfssysteme.....	39
4.3	Kurzbeschreibung der Hauptausrüstungen Phase 2.2.....	41
4.3.1	EingangsfILTER (ONTRAS).....	41
4.3.2	Abscheider und Gasdruckregelung (Umhausung GDR(M)A).....	42
4.3.3	Verdichtereinheiten.....	43
4.3.4	Energieversorgung.....	44
4.3.5	Kühleinheiten.....	44
5	Inbetriebnahme.....	44
6	Sicherheitstechnische Betrachtungen.....	44
6.1	Allgemeines.....	44
6.2	Technische Schutzmaßnahmen.....	45
6.3	Organisatorische Schutzmaßnahmen.....	46
6.4	Explosionsschutz.....	46
6.5	Brandschutz.....	48
6.5.1	Zufahrten, Feuerwehrstellflächen, Flucht- und Rettungswege.....	48
6.5.2	Löschwasserreservoir.....	49
7	Umweltschutz.....	50
7.1	Gasförmige Emissionen.....	50
7.2	Geräuschemissionen.....	51
7.3	Wassergefährdende Stoffe.....	51
7.4	Reststoffe, Abfälle.....	52

<b>8 Arbeitsschutz</b> .....	<b>52</b>
<b>Revisionsindex</b> .....	<b>54</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>55</b>
<b>Anlagen</b> .....	<b>59</b>
Anlage 1: Übersicht H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt .....	59
Anlage 2: Gesetze, Normen und Regelwerke .....	59
Anlage 3: Aufstellungskonzept der H <sub>2</sub> -OTA .....	63
Anlage 4: Lastenhefttabelle .....	64
Anlage 5: R&I-Schema der OTA .....	65
Anlage 6: Auszug Ergebnisse zu Rohrkenntlinien (rote Bereiche kennzeichnen die Begrenzungen max. Druckverluste / Strömungsgeschwindigkeiten) .....	66
Anlage 7: R&I Schemata Gasaufbereitung .....	67
Anlage 8: Absorberdesign .....	68
Anlage 9: Baubeschreibung Hauptkomponenten Absorber und Membraneinheit .....	69
Anlage 10: Konzept zur Inbetriebnahme .....	72
Anlage 11: Aufstellungskonzept (H <sub>2</sub> -OTA Layout) mit Ex-Zonen .....	73

## 14.7 Inhaltsverzeichnis Sonderbetriebsplan Bautechnik

<b>1</b>	<b>Allgemeine Angaben</b>	<b>5</b>
1.1	Antragstellender Unternehmer	5
1.2	Gegenstand des Sonderbetriebsplans	5
1.3	Hauptbetriebsplan und Sonderbetriebspläne der OTA	6
1.4	Lage des geplanten Vorhabens, Eigentumsverhältnisse	6
1.5	Zeitplan für die Realisierung des Vorhabens	6
1.6	Gesetze, Normen und Regelwerke	7
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung Kurzbeschreibung</b>	<b>8</b>
2.1	Beschreibung Obertageanlage	8
2.1.1	Fläche	8
2.1.2	Anlage	8
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Bauumfänge</b>	<b>10</b>
3.1	Bauumfänge Phase 2.1	10
3.1.1	Allgemeines zur Erschließung der (Kern)komponenten	10
3.1.2	Zufahrt / Straßen	11
3.1.3	Anlagenkomponenten der Stromversorgung	11
3.1.4	Anlagenkomponenten der Gasaufbereitung	12
3.1.5	Anlagen der Gasdruckregelung und Gasmengenmessung (GDR(M)A), EMSR	15
3.1.6	Trassen für Ver- und Entsorgungsleitungen, Trassen für OT-Piping	16
3.1.7	Erschließung Wasser / Abwasser	17
3.1.8	Molchschleuse, Schiebergruppe, Stationsschrank und Ausbläser Schiebergruppe	17
3.1.9	Fundamentisolierungen- und Erdungssysteme	18
3.1.10	Objektschutz sowie Flucht- und Rettungswege	18
3.1.11	Anlagen der Löschwasserversorgung	19
3.2	Bauumfänge Phase 2.2	19
3.2.1	Verdichteranlage inkl. Nebenanlagen und Kühlung	19
3.2.2	Filtergruppe ONTRAS und Filter / Abscheider	21
3.2.3	Kanäle für Ver- und Entsorgungsleitungen, Trassen für OT-Piping	21
3.2.4	Fundamentisolierungen- und Erdungssysteme	21
3.3	Gesamtflächenbilanz für die H <sub>2</sub> -OTA	21
<b>4</b>	<b>Weitere Genehmigungsverfahren</b>	<b>22</b>
4.1	Eingriffsbewertung / Eingriffsgenehmigung	22
4.2	Baugenehmigungsverfahren	22
4.3	Genehmigungen nach Wasserrecht	23
4.4	Genehmigungen nach weiteren Rechtsgebieten	24

<b>5</b>	<b>Sicherheitstechnische Betrachtungen</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Brandschutz</b>	<b>24</b>
5.1.1	Zufahrten, Feuerwehrestellflächen, Flucht- und Rettungswege	25
5.1.2	Löschwasserreservoir	25
<b>5.2</b>	<b>Explosions- / Blitzschutz</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Umweltschutz</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Arbeitsschutz</b>	<b>27</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>29</b>
	<b>Revisionsindex</b>	<b>31</b>
	<b>Anlagen</b>	<b>33</b>
Anlage 1:	Übersicht H <sub>2</sub> -UGS Bad Lauchstädt	33
Anlage 2:	Gesetze, Normen und Regelwerke	33
Anlage 3:	Aufstellungskonzept (H <sub>2</sub> -OTA Layout)	36
Anlage 4:	Abmaße, Gesamtfläche und umbauter Raum (H <sub>2</sub> -OTA), Phase 2.1	37
Anlage 5:	Abmaße, Gesamtfläche und umbauter Raum (H <sub>2</sub> -OTA), Phase 2.2	38

## 14.8 Technische/technologische Beschreibung der wesentlichen Anlagenteile

Anlagenteil	(Teil-) Komponenten	Technische/technologische Beschreibung
<b>Realisierung in Phase II.1</b>		
EingangsfILTER	EingangsfILTER	Der EingangsfILTER dient im Wesentlichen zur Abscheidung von festen und flüssigen Begleitstoffen, die ggf. aus der umzuwidmenden Pipeline in die H <sub>2</sub> -OTA eingetragen werden könnten. Der Abscheider übernimmt an dieser Stelle eine Schutzfunktion. Die Anlage wird mit einem Betriebsdruck von max. 30 bar betrieben und ist auf einen Druck von max. 40 bar (DP) ausgelegt.
Bidirektionale Mengenmessung (Gaszähler)	Mengen- und Beschaffenheitsmessung, Druck- und Temperaturmessung	Die Mengenmessung soll die H <sub>2</sub> -Menge bei der Ein- als auch bei der Auspeisung messen (bidirektional). Hierzu kann ein Gaszähler mit bidirektionalen Messeigenschaften oder eine Z-Schaltung eingesetzt werden. Darüber hinaus sind die Gasbeschaffenheit sowie Druck und Temperatur zu messen. Die Anlage wird mit einem Betriebsdruck von max. 30 bar betrieben und ist auf einen Druck von max. 40 bar ausgelegt.
E-Technik	Transformator	Ein Transformator 6 kV/400 V dient der Spannungsversorgung sämtlicher Anlagenteile.
	Niederspannungsschaltanlage (NSA)	Die NS-Schaltanlage dient der Bereitstellung der Spannungsversorgung (230/400 V) sämtlicher Komponenten der Umhausungen der H <sub>2</sub> -Forschungskaverne.
EMSR	Prozess-Gaschromatograph (PGC)	Der PGC dient der Messung und Überwachung der Gasbeschaffenheit des ein- und ausgespeisten Wasserstoffs und der Identifizierung der Begleitgase.
	Volumenstrommessung	Die Volumenstrommessung dient der Erfassung der ein- und ausgespeisten Wasserstoffmengen. Die Volumenstrommessung besteht aus einem bidirektionalen eichfähigen Gaszähler für Wasserstoff in der Messstrecke und der zugehörigen Mengenumwertung und Registriereinheit (Schaltschrank) im EMSR-Raum.
	SCADA	Das Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-System dient der

Anlagenteil	(Teil-) Komponenten	Technische/technologische Beschreibung
		<p>Prozesssteuerung und -überwachung.</p> <p>Es werden aus dem Prozess mindestens folgende Werte erfasst und visualisiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• prozessrelevante Drücke von Kaverne und Wasserstoffanlage (Eingangs-, Ausgangs-, Filterdifferenzdruck usw.)</li> <li>• prozessrelevante Temperaturen</li> <li>• Volumenstrom</li> <li>• Gasqualität (PGC)</li> <li>• Stellung/Endlagen der relevanten Armaturen</li> <li>• Wetterdaten</li> <li>• Bereitschaftssignale von Verdichter, Elektrolyse und Gasaufbereitung</li> <li>• Alarmer und Not-Aus</li> </ul> <p>Es werden vom SCADA-System mindestens folgende Anlagenkomponenten angesteuert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingangsarmaturen</li> <li>• Ausgangsarmaturen</li> <li>• Armaturen zur Steuerung des Gasstroms (Wechsel zwischen Ein- und Ausspeisung)</li> <li>• Regelarmaturen (Druck- und/oder Volumenstromregelung)</li> </ul> <p>Das SCADA-System besteht aus mehreren Schaltschränken mit den zugehörigen Feldgeräten und einem PC-Arbeitsplatz.</p>
	Gaswarnanlage	<p>Die Gaswarnanlage dient der Signalisierung und Warnung vor einer explosionsgefährdeten Atmosphäre im Bereich der gesamten Wasserstoffanlage. Gasdetektoren sind in ausreichender Anzahl an geeigneten Punkten der Anlage zu installieren.</p>
	Brandmeldeanlage (BMA)	<p>Die BMA dient dem vorbeugenden Brandschutz. Es werden an geeigneten Stellen Brandmelder in ausreichender Anzahl installiert und in der BMA zusammengefasst.</p>
	Wetterstation	<p>Eine lokale Wetterstation erfasst Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung und überträgt diese Werte zum SCADA-System. Ein Windsack ergänzt die Wetterstation.</p>
	EMSR (Gasaufbereitung)	<p>Für die Gasreinigung wird eine eigenständige EMSR-Einheit bereitgestellt, die die gesamte Messung, Steuerung und Regelung jeweils</p>

Anlagenteil	(Teil-) Komponenten	Technische/technologische Beschreibung
		übernimmt.
Verbindungsleitungen	-	Zur Verbindung der Anlagenkomponenten auf der H <sub>2</sub> -OTA sind unterschiedliche Rohrleitungsdimensionen mit max. Auslegungsdrücken geplant. Nennweiten zwischen DN 25 und DN 200; Drücke zwischen MOP 30 bis MOP 140 bar.
Gasaufbereitung	Gastrocknung	Der Wasserstoff nimmt bei der Speicherung in der Kaverne Wasser auf bzw. liegt gesättigt nach der Elektrolyse vor und muss getrocknet werden. Der feuchte Wasserstoff wird nach dem Wasserabscheider/Filter und der Druckreduzierung adsorptiv getrocknet. Dazu wird der Wasserstoff über einen Absorber geleitet, wo er im Gegenstrom mit Glykol getrocknet wird (Standard-Glykoltrocknung). Das Glykol wird mittels Membranen wieder getrocknet. Die Anlage wird mit einem Betriebsdruck von ca. 30 bar betrieben und ist auf einen Druck von max. 40 bar ausgelegt. Der Anlagenteil wird für 10.000 m <sup>3</sup> /h (NTP (bezogen auf den Normzustand)) ausgelegt.
	TEG-Regeneration /Membran	Die Entwässerung des Glykols erfolgt mittels anorganischer Membranen in einem Pervaporationsprozess. Das verwässerte Glykol wird den Membranen feedseitig im flüssigen Zustand bei einer Temperatur von bis zu max. 140°C bei geringem Überdruck (Ausgleich von Druckverlusten zur Überströmung) zugeführt. Das im Glykol enthaltene Wasser passiert die Membran, verdampft im unter Vakuum stehenden Permeatraum und wird nach dessen Abkühlung kondensiert und abgeführt. Das getrocknete Glykol verlässt die Membran als Retentat und wird dem Kreislauf erneut zugeführt.
	Zubehör Gastrocknung	Neben den Hauptkomponenten Absorber und der TEG-Regeneration (Membran) sind Bauteile zur Beförderung des flüssigen TEG und des gasförmigen Entspannungsgases (Flashgas) notwendig. Die TEG-Pumpen sind Standardbauteile, das geringe Volumen an Entspannungsgas (Wasserstoff) wird rückverdichtet und vor der Trocknung wieder in die Gasleitung injiziert.
	Gasfeinreinigung	Nach der Trocknung des Gases im Absorber

Anlagenteil	(Teil-) Komponenten	Technische/technologische Beschreibung
		folgt die Gasaufbereitung mittels Molekularsieb, die nur für die chemische Nutzung des H <sub>2</sub> notwendig ist. Zu diesem Zweck werden zwei Adsorber wechselseitig gefahren. Während ein Adsorber sich in der Betriebsphase befindet, wird der andere regeneriert. In der Gasfeinreinigung wird zusätzlich eine Versuchsanlage für die Sauerstoffentfernung und die Tiefentschwefelung implementiert. Der Anlagenteil wird für 10.000 m <sup>3</sup> /h (NTP (bezogen auf den Normzustand)) ausgelegt.
	Kondensatlager	Das Kondensatlager dient zum Sammeln des aus dem Wasserstoff abgetrennten Wassers
<b>Realisierung in Phase II.2</b>		
Verdichter	elektrisch angetriebener 2-stufiger Kolbenverdichter Kühler	Mittels einer Verdichtermaschine wird der Wasserstoff bei der Einspeisung von ca. 30 auf 140 bar, (max. Verdichterleistung) verdichtet. Der max. Volumenstrom liegt dabei bei ca. 10.000 Nm <sup>3</sup> /h. Die elektrische Leistung für den Verdichter ist mit ca. 1.225 kW <sub>el</sub> angegeben. Die Anlage wird mit einem max. Druck von 140 bar betrieben. Der Kühler dient zur Kühlung der Verdichtermaschine sowie indirekt zur Kühlung des verdichteten Wasserstoffs.
Feldleitung	-	Die Feldleitung transportiert den Wasserstoff ca. 1.650 m bis zum Kavernenplatz Lt 09. Nach derzeitigem Stand beträgt die Dimensionierung der Leitung DN200 bei einem max. Auslegungsdruck von 150 bar (DP). Die Feldleitung wird in der Regel mit einem Betriebsdruck zwischen 30 und 140 bar betrieben.
Abscheider/Filter	Staub-/Flüssigkeitsabscheider	Bei der Ausspeisung des Wasserstoffes aus der Kaverne liegt dieser ggf. im wassergesättigten Zustand vor. Zur Abscheidung von freiem Wasser und Verunreinigungen aus dem Gasstrom wird der Wasserstoff, vor der Druckreduzierung, durch einen Abscheider geleitet. Die Anlagenteile werden für den max. Betriebsdruck ausgelegt. Die Komponenten sind redundant zu planen.
Druckregelung	Regelgeräte, Absperr- und Sicherheitseinrichtungen	In der Druckregelanlage ist die Druckreduzierung vom max. Speicherdruck

Anlagenteil	(Teil-) Komponenten	Technische/technologische Beschreibung
		140 auf 30 bar vorgesehen. Zur Gasdruckregelschiene gehören weiterhin Absperr- und Sicherheitseinrichtungen. Die Komponenten sind redundant ausgelegt.
EMSR	EMSR (Verdichter)	Für den Verdichter wird eine eigenständige EMSR-Einheit bereitgestellt, die die gesamte Messung, Steuerung und Regelung jeweils übernimmt.





**H<sub>2</sub>-Forschungskavern**  
 Projekt-Name : H<sub>2</sub>-Forschungskaverne  
 14.07.2020  
 19.05.2021  
 Erarbeitung:  
 Revision 1:  
 Revision 2:  
 Revision 3:

**HAZOP-Studie (Konzept- und Entwicklungsphase)**  
 Moderation: Dr. H. Neumann (TÜV) / M.Hemel (DBI)  
 Teilnehmer: N. Hassanmehdi (DBI), B. Kießler (DBI), Prof. H. Krause (DBI), U. Lubenau (DBI), S. Schmidt (DBI), S. Kallin (VGS), L. Vinkler (VGS), R. Matheus (VGS)  
 Teilnehmer: U. Lubenau (DBI), R. Matheus (VGS), F. Sauer (VGS), A. Rose (PZE), B. Stedler (VGS), S. Heyn (VGS), C. Schuchardt (VGS)  
 Teilnehmer:  
 Teilnehmer:

Nr.	System	Untersystem	ABWEICHUNG	URACHEN	KONSEQUENZEN	SICHERHEITSSAHLMAHME	Gefahr			Risiko vor Aktion		Risiko nach Aktion		Wann	Wer			
							Person	Umwelt	Anlage	schwere	Wahrsch. eintreten	Risiko	schwere			Wahrsch. eintreten	Risiko	
5	Gas-Druckregelanlage (Umhauerung) [2]	MOV-2001/2101 bis MOV-2003	Durchflussmessung (Phase 2.2)	Richtfluss	Qualitätsänderung, Beschädigung der Filter				X	2	4	6	2	2	4	VGS		
			T (weniger)	vorgeschaltetes System, Außentemperatur	Verursagen, Regler versagen	Temperaturüberwachung, Isolation, Belüftung												
			T (mehr)	vorgeschaltetes System, Außentemperatur	Regler versagen	Temperaturüberwachung												
			Durchfluss (weniger)	vorgeschaltetes System	keine	Überwachung Regelgliedern												
			Durchfluss (mehr)	vorgeschaltetes System	Regler versagen	Überwachung Regelgliedern												
6	Feldleitung / Kavernenschluss [1]	GOV-1001 bis GOV-1003	P (weniger)	vorgeschaltetes System	Regler versagen, Beschädigung Zerstörung	Drucküberwachung			X	3	4	7	3	2	5	VGS		
			P (mehr)	vorgeschaltetes System	Wasserstoffaustritt in Raum - Explosion													
			Leckage	Undichtmahl														
			Durchflussmessung (Phase 2.2)															
			T (weniger)	keine	keine	keine												
7	Verdichter (separate HAZOP durch Hersteller) [3]	GOV-1001 bis GOV-1003	T (mehr)	Ausgefallene Gaskühlung	Beschädigung der Rohrvermittlung	Temperaturüberwachung												
			Durchfluss (weniger)	vorgeschaltetes System	keine	keine												
			Durchfluss (mehr)	vorgeschaltetes System	Erosion	Volumenstrommessung												
			P (weniger)	vorgeschaltetes System	keine	Drucküberwachung												
			P (mehr)	vorgeschaltetes System	Druckanstieg, Bersten					X	4	3	7	4	1	5	Hersteller Verdichter	
7	Verdichter (separate HAZOP durch Hersteller) [3]	GOV-1001 bis GOV-1003	Durchflussmessung (Phase 2.2)															
			T (weniger)															
			Durchfluss (weniger)															
			P (weniger)	geringer Eingangsdruck	Funktionsstörungen, Ausfall					X	1	4	3	4	1	3	Hersteller VO	
			P (mehr)	Verdichtungsstörungen, Verschmutzungen, Staub, Flüssigkeiten	Druckanstieg, Bersten					X	4	2	3	4	1	5	Hersteller VO	



**H2-Forschungskavern**

Moderation: Dr. H. Neumann (TÜV) / M.Henel (DBI)

Erarbeitung: 14.07.2020

Revision 1: 19.05.2021

Revision 2:

Revision 3:

Teilnehmer: N. Hassanmayer (DBI), B. Keßler (DBI), Prof. H. Krause (DBI), U. Lubenau (DBI), S. Schmidt (DBI), S. Kälich (VGS), L. Winkler (VGS), R. Mattheus (VGS)  
 Teilnehmer: U. Lubenau (DBI), R. Mattheus (VGS), F. Sauer (VGS), A. Rose (PZE), B. Stedler (VGS), S. Heyn (VGS), C. Schuchardt (VGS)  
 Teilnehmer:  
 Teilnehmer:

**HAZOP-Studie (Konzept- und Entwicklungsphase)**

Nr.	System	Untersystem	ABWEICHUNG	URSACHEN	FOLGEEFFIZIENZEN	SICHERHEIT MASSNAHME	Gefähr			Risiko vor Aktion			Risiko nach Aktion			Wann	Wer		
							Umwelt	Anlage	Innige	Schwere	Wahrsch	erhöhte	Risiko	Schwere	Wahrsch			erhöhte	Risiko
7	Kaverne [1]	T (mehr) Durchfluss (weniger) Durchfluss (mehr) P (weniger) P (mehr)	Sommererwärmung, Verrohrterausgung + Kühler	Schädigung der Verrohrung in der Kaverne				X		4	4	8	4	1	5	VGS, Hersteller Verpichter			

Grundlagen:  
 H2-Forschungskaverne: RM, DBI, 26.05.2021 (Aktualisierung)

Leipzig, 26.05.2021  
 Dr. Harmut Neumann  
 TÜV SÜD Industrie Service GmbH  
 Absatzbereich:BN

Mano Henel  
 DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

H <sub>2</sub> -Forschungskaverne		HAZOP-Studie (Konzept- und Entwicklungsphase)																				
Projektname:	H <sub>2</sub> -Forschungskaverne	Moderation:	Dr. H. Neumann (TÜV) / M. Henel (DBI)																			
Erarbeitung:	14.07.2020	Teilnehmer:	N. Hassamayeh (DBI), B. Käßler (DBI), Prof. H. Krause (DBI), U. Lubenau (DBI), S. Schmidt (DBI), S. Kälon (VGS), L. Winkler (VGS), R. Mattheus (VGS)																			
Revision 1:	19.05.2021	Teilnehmer:	U. Lubenau (DBI), R. Mattheus (VGS), F. Sauer (PZE), B. Siedler (VGS), S. Heyn (VGS), C. Schuchardt (VGS)																			
Revision 2:		Teilnehmer:																				
Revision 3:		Teilnehmer:																				
Nr.	System	Untersystem	ABWEICHUNG	URSACHEN	KONSEQUENZEN	SIKERHEIT MASSNAHME	Person	Umwelt	Anlage	Innoge	Risiko vor Aktion		Risiko nach Aktion		Abschätzung der betrieblichen Notwendigkeit		Schwerewichtigkeit	Wahrheit	Risiko	Wahrheit	Risiko	Wann
												Schwere	Risiko	Schwere	Risiko							

# Abschlussbericht: H<sub>2</sub>-Forschungskaverne

<b>H2-Forschungskaverne</b>		<b>HAZOP-Studie (Konzept- und Entwicklungsphase)</b>	
Projekt-Name: H2-Forschungskaverne		Moderator: Dr. H. Neumann (TUV) / M. Henel (DBI)	
Erarbeitung:	14.07.2020	Ort Workshop: DBI Leipzig	Teilnehmer: N. Hassannayehi (DBI), B. Käßler (DBI), P. Krause (DBI), U. Lubenau (DBI), S. Schmidt (DBI), S. Kalch (VGS), L. Winkler (VGS), R. Mattheus (VGS)
Revision 1:	19.05.2021	Ort Workshop: online	Teilnehmer: U. Lubenau (DBI), R. Mattheus (VGS), F. Sauer (VGS), A. Rose (PZE), B. Siedler (VGS), S. Heyn (VGS), C. Schulhardt (VGS)
Revision 2:		Ort Workshop:	Teilnehmer:
Revision 3:		Ort Workshop:	Teilnehmer:



Nr.	System	Untersystem	ABWEICHUNG	URSACHEN	KONSEQUENZEN	SICHERHEITSGRABNARBE	Daher				Hilfsmaßnahmen	Hilfsmaßnahmen	AKTION / KOMMENTAR	Abschätzung betriebliche Notwendigkeit	Hilfsmaßnahmen		WV	Wann			
							Person	Umwelt	Anlage	Umgang					Schwere	Hilfsmaßnahmen			Schwere	Hilfsmaßnahmen	
Absorber	Durchfluss (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Bildung Prozess, Mengen nicht erreicht	Mengenmessung Wasserstoff, Beteiligungsüberwachung am Regelgerät									Alarm bei Mindermengen, sicherheitstechnische nicht relevant	Ja						
		Packungen verstopft		Veränderung der Trochsenleistung	Teuflungsüberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant						
		Regelströmung		Zerstörung und Verschmutzung des Systems				X	2	4	6				- Differenzdruckmessung installieren	Ja	2	2	4	DBI	
		Filter zu		zu hohe Menge, Glykolström, Teuflungsüberwachung																	
		Durchfluss (mehr)	Regelströmung		Glykolström in Entschwefelung und/oder Feinreinigung - Benetzung der Benetzung	Mengenüberwachung, Teuflungsüberwachung, Beteiligungsüberwachung am Regelgerät									- Alarm bei Übermengen, sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
		Fehlfunktion Ventil		Feuchtheit in Entschwefelung - Benetzung der Benetzung	Messung Feuchte											sicherheitstechnische nicht relevant					
	T (weniger)	Außentemperatur, freies Wasser		Verweilen, kein Durchfluss	Temperaturüberwachung											Ja					
		T (mehr)	Temperaturanstieg bei abgesenktem Absorber durch Benetzung		Druckanstieg über Auslegungsdruck möglich, Besten, Materialermüdung (Dichtungen), Leckage, Glykolabfuhr sind			X	3	4	7				- Druck- und Temperaturüberwachung - Druckentlastung durch BBV - Armaturzufahren	Ja	3	2	5	DBI	
		JT-Effekt														sicherheitstechnische nicht relevant					
		P (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Druckunterschied durch vorgeschaltete Systeme	Differenzdrucküberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant					
		P (mehr)	Druckanstieg durch Vorkammerung von außen (siehe Text)		Druckanstieg über Auslegungsdruck möglich, Besten, Materialermüdung (Dichtungen), Leckage				X	3	4	7				- Druck- und Temperaturüberwachung - Druckentlastung durch BBV - Auffahren der Absorber	Ja	3	2	5	DBI
		P (weniger)	Drucküberschreitung durch vorgeschaltete Systeme		evtl. Mittelgefälle (siehe Durchfluss mehr), Druckstöße, Beschädigung Packung, Beschädigung Absorber-Behälter				X	3	4	7				- Druckabsicherungsbeschädigung - Drucküberwachung	Ja	3	2	5	VGS
Regeneration	Durchfluss (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Bildung Prozess, Mengen nicht erreicht							X	1	4	5		Ja	1	2	3	DBI	
		Regelströmung		Beeinflussung Trocknungsprozess - keine Trocknung	Beteiligungsüberwachung Armaturen											sicherheitstechnische nicht relevant					
		Filter zu		kein Glykolfluss					X	2	4	6				- Differenzdruckmessung - Mengenermessung TEG	Ja	2	2	4	DBI
	Durchfluss (mehr)	Regelströmung		zu hohe Menge, Besten Membran durch Druckanstieg				X	3	4	7				- Mengenüberwachung - Drucküberwachung - Alarm bei Übermengen - Not-Aus	Ja	3	2	5	DBI	
		Fehlfunktion Ventil						X	1	4	5					- Beteiligungsüberwachung Armaturen	Ja	1	2	3	DBI
		T (weniger)	Fehlfunktion Heizer		Ablenkung Wasser aus Glykol kommt zum erliegen, Trocknung fällt aus	Temperaturüberwachung						X				- Alarm sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
	T (mehr)	Fehlfunktion Heizer		Temperaturanstieg über Auslegungstemperatur möglich, Besten				X	3	4	7					- Not-Aus - Temperaturüberwachung	Ja	3	2	5	DBI
				Materialermüdung, Undichtigkeiten	Temperaturgrenzer			X	3	4	7					- Not-Aus - Temperaturüberwachung	Ja	3	2	5	DBI
		P (weniger)	Fehlfunktion Ventil			Drucküberwachung, Beteiligungsüberwachung Armaturen, Überwachung Pumpendruck										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				

1.	TBO-Trocknung	Untersystem	ABWEICHUNG	URSACHEN	KONSEQUENZEN	SICHERHEITSGRABNARBE	Daher				Hilfsmaßnahmen	Hilfsmaßnahmen	AKTION / KOMMENTAR	Abschätzung betriebliche Notwendigkeit	Hilfsmaßnahmen		WV	Wann			
							Person	Umwelt	Anlage	Umgang					Schwere	Hilfsmaßnahmen			Schwere	Hilfsmaßnahmen	
Behälter	P (mehr)	Druckanstieg		Trockenlauf Pumpe, Austritt Glykol, Verkumpfung Kontakt mit Glykol	Füllstandsüberwachung Füllstand, Drucküberwachung Füllstand		X	X			3	4	7	- Not-Aus - Drucküberwachung - Auslösung gemäß Wasserhaushalt Gesetz (WHG) - Aufhängesensoren	Ja	3	2	5	DBI		
		Füllstandsüberschreitungen		Glykolaustritt				X	X			3	4	7	- bei Not-Aus - Füllstandsüberwachung - Sicherheitstechnische Abschaltung der Pumpen	Ja	3	2	5	DBI	
		Drucküberschreitung Beschleunigungsgas		Besten des Behälters				X				2	4	6	- Druckentlastung über BBV - Not-Aus - Drucküberwachung	Ja	2	2	4	DBI	
	P höher im Füllraum	Membranbruch		Kontakt TBO mit Füllraum, Zusammenbruch Vakuüm	Füllstandsüberwachung Füllstand, Drucküberwachung Füllstand										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
		Fehlfunktion Ventil		eingangeses aufstrom von Glykol aus Prozess	Beteiligungsüberwachung Armaturen											sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		Filter zu			Mengenmessung											sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
	Zulfluss (weniger)	Regelströmung			Differenzdrucküberwachung											sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		Filter zu														sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		Zulfluss (mehr)	Fehlfunktion Ventil		zu schnelles aufstrom von Glykol, Überfüllung des Behälters, Glykolaustritt aus Prozess (Reaktordrucke Glykolmenge im Prozess)			X				1	4	5	- Mengenmessung - Beteiligungsüberwachung Armaturen - Überfüllung - Pumpenlaufüberwachung	Ja	1	2	3	DBI	
	T (weniger)	Defekt Förderpumpe/FU						X				2	4	6	- Füllstandsüberwachung	Ja	2	2	4	DBI	
		Fehlfunktion Heizer			Temperaturmessung											sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		P (mehr)	zu hohe Glykollaufmenge		Tank-innendruck steigt, Besten			X				4	4	6	- Drucküberwachung - Not-Aus - BBV - Überfüllung	Ja	2	2	4	DBI	
P (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Leckage				X				4	4	6	- Füllstandsüberwachung - Sicherheitstechnische nicht relevant	Ja	2	2	4	DBI		
	Regelströmung		Förder-/Entleerung, Unterdruck	Beteiligungsüberwachung Armaturen											sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
	Membranbruch														sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
P höher (sicherheitstechnisch relevant)	Druckanstieg		Besten	BBV			X				4	4	6	- Abschaltung der Güterregeneration - BBV - Not-Aus	Ja	2	2	4	DBI		
	Füllstandsüberschreitungen		Leckage				X				4	4	6	- Füllstandsüberwachung	Ja	2	2	4	DBI		
	Beschleunigungsgas						X				4	4	6	- Druckmessung	Ja	2	2	4	DBI		
Leckage	Undichtheit		Glykolaustritt				X	X			1	4	5	- Not-Aus - Auslösung gemäß Wasserhaushalt Gesetz (WHG) - Coppelwägen Behälter - Ausleitung in Wärme - Leckageüberwachung	Ja	1	2	3	DBI		
	Baugdruck (mehr)		Fehler im vorgeschalteten System	Überwachung Auslegungsdruck, Beschädigung Zerstörung Verdichter			X				3	4	7	- Not-Aus - Baugdrucküberwachung	Ja	3	2	5	DBI		
	Baugdruck (weniger)		Fehler im vorgeschalteten System	Fehlfunktion Verdichter	Baugdrucküberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
Resgasverdichter (Brückgas)	Enddruck (mehr)	Fehlfunktion Fehlfunktion		Überwachung Auslegungsdruck, Beschädigung Zerstörung Verdichter			X				3	4	7	- Not-Aus - Enddrucküberwachung - BBV	Ja	3	2	5	DBI		
	Enddruck (weniger)	Verdichter Fehlfunktion		Fehlfunktion des vorgeschalteten Systems	Enddrucküberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
	T (mehr)	Austritt Kühlmittel		Überfüllung Verdichter, Leckage von heißem Resgas			X				3	4	7	- Not-Aus - Temperaturüberwachung - Benetzung	Ja	3	2	5	DBI		
	T (weniger)	Benetzung					X				3	4	7	- Not-Aus - Temperaturüberwachung - Benetzung	Ja	3	2	5	DBI		
	Leckage	Undichtheit		Wasserstoffaustritt in Raum Einspritz			X				3	4	7	- Not-Aus - Brandüberwachungsmasse (gasdichtes Regeneration) - Querrichtung	Ja	3	2	5	DBI		
	Durchfluss (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Bildung Folgeprozess, Zerstörung und Verschmutzung des Systems	Beteiligungsüberwachung Armaturen										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja					
3	Molekularsieb	Durchfluss (weniger)	Regelströmung		Verunreinigung des Folgeprozess	Mengenüberwachung					X	3	4	7	- Differenzdruckmessung - Not-Aus	Ja	3	2	5	DBI	
			Filter zu									X	3	4	7	- Beteiligungsüberwachung Armaturen	Ja	3	2	5	DBI
			Durchfluss (mehr)	Fehlfunktion Ventil		Bildung Folgeprozess				X			3	4	7	- Mengenüberwachung - Beteiligungsüberwachung Armaturen	Ja	3	2	5	DBI
		T (weniger)	Regelströmung		Mix aus Molde und Feuchtigkeits (siehe TBO) überwachung	Mengenüberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		T (mehr)	Fehlfunktion Heizer/Regeneration		Verweilen	Temperaturüberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
		T (weniger)	JT-Effekt		Druckanstieg, Materialermüdung, Leckage geringe Auswirkung, Temperaturerhöhung	Temperaturüberwachung Hotspot										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja				
P (weniger)	Fehlfunktion Ventil		Bildung Folgeprozess	Drucküberwachung, Druckdifferenzüberwachung										sicherheitstechnische nicht relevant	Ja						

# Abschlussbericht: H<sub>2</sub>-Forschungskaverne

Kategorie	Beschreibung	Ursache	Maßnahme	Risiko				Sicherheitsmaßnahmen	Prüfung	Frequenz	DBI			
				1	2	3	4							
3. Katalyse (O <sub>2</sub> -Entfernung)	Registerbrühe		Stellungsüberwachung Armaturen					sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Filter zu			X		3	4	- CO <sub>2</sub> -Überdruckmessung - Nicht-Aus		3	2	5	DBI	
	F (mehr)	Druckanstieg durch Fehlfunktion vorgeschaltetes System		X		3	4	- Drucküberwachung - BSV		3	2	5	DBI	
	Anstieg Durchfluss	evtl. Mitleitffekte (siehe Durchfluss mess)						sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Flussmeter	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Stellungsüberwachung Armaturen				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Taupunktüberwachung	Überladung Molesieb	Gasdesorptionen nicht einricht. Störung Folgeprozess, Minus Feuchtpunkt	Überwachung, Alarm, Taupunktüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Leckage	Undichtheit	Wasserstoffaustritt in Raum Explosion		X		3	4	- Gasleitmänge - Alarm bei Mindestmengen - Querdichtung - ATEX-Ausführung		3	2	5	DBI
	Durchfluss (weniger)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Stellungsüberwachung Armaturen				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Registerbrühe			Mengenüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Filter zu	Vermutung des Folgesystem			X		3	4	- CO <sub>2</sub> -Überdruckmessung - Nicht-Aus		3	2	5	DBI
	Durchfluss (mehr)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Mengenüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Registerbrühe	Minus Kat. und Feuchtpunkt - O <sub>2</sub> -Durchbruch - Spasffaktor Wasserstoff nicht einricht	Bauerstoffsensor - messung	Stellungsüberwachung Armaturen				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
T (weniger)	Heizer defekt	kein Umsatz, O <sub>2</sub> in übergebenen Gas, Störung Folgeprozess	Bauerstoffsensor - messung, Temperaturüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
T (mehr)	Heizer defekt, Exothermer Prozess bei Katalyse	Überschreiten Grenzttemperatur, Drucküberwachung, Verlust Prozesskontrolle, Besten		X		3	4	- Nicht-Aus - Kühlung Reaktor - Temperaturüberwachung Katalysator		3	2	5	DBI	
		Materialermüdung, Leckage		X		3	4	- Nicht-Aus - Kühlung Reaktor - Temperaturüberwachung Katalysator		3	2	5	DBI	
F (weniger)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Drucküberwachung, Druckföhrenüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Registerbrühe							sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Flussmeter							sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Filter zu	Vermutung des Folgesystem			X		3	4	- CO <sub>2</sub> -Überdruckmessung - Nicht-Aus		3	2	5	DBI	
F (mehr)	Druckanstieg	Besten		X		3	4	- Nicht-Aus - Drucküberwachung - BSV		3	2	5	DBI	
	Fehlfunktion Heizer Regeneration			X		3	4	- Temperaturüberwachung - Nicht-Aus		3	2	5	DBI	
Anstieg Durchfluss	evtl. Mitleitffekte (siehe Durchfluss mess)						sicherheitsrechtliche nicht relevant							
O <sub>2</sub> -Durchbruch	Katalysator verbraucht	Gasdesorptionen nicht einricht, Störung Folgeprozess	Bauerstoffsensor - messung				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Leckage	Undichtheit	Wasserstoffaustritt in Raum Explosion		X		3	4	- Gasleitmänge - Alarm bei Mindestmengen - Querdichtung - ATEX-Ausführung		3	2	5	DBI	
Durchfluss (weniger)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Mengenmessung Wasserstoff				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Registerbrühe			Stellungsüberwachung Armaturen				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Durchfluss (mehr)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Schwerfmetallmessung				- Alarm bei Übermengen sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Registerbrühe	Minus Adsorbens	Mengenmessung Wasserstoff					sicherheitsrechtliche nicht relevant							
	Schwefelüberdruck - Zerstörung Katalysator aus O <sub>2</sub> -Entfernung						- Alarm bei Übermengen sicherheitsrechtliche nicht relevant							
T (weniger)	Verfärbungen		Temperaturüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
T (mehr)	Überopbe heißes Gas	Überschreiten Grenzttemperatur, Drucküberwachung, Verlust Prozesskontrolle, Besten		X		3	4	- Nicht-Aus - Kühlung Reaktor - Temperaturüberwachung Katalysator		3	2	5	DBI	
		Materialermüdung, Leckage		X		3	4	- Nicht-Aus - Kühlung Reaktor - Temperaturüberwachung Katalysator		3	2	5	DBI	
		Desorption von Schwefel - Zerstörung Katalysator O <sub>2</sub> -Entfernung					sicherheitsrechtliche nicht relevant							
F (weniger)	Fehlfunktion Ventill	Störung Folgeprozess	Drucküberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant							
Registerbrühe							sicherheitsrechtliche nicht relevant							
4. Entschwefelung (Übernahme Molesiebrockung) 2006 EUR	P (mehr)	Anstieg Druck	Besten		X		3	4	- Nicht-Aus - Drucküberwachung		3	2	5	DBI
	Anstieg Durchfluss	evtl. Mitleitffekte (siehe Durchfluss mess)		X		3	4	- Temperaturüberwachung - Nicht-Aus		3	2	5	DBI	
	Schwefelüberdruck	Adsorbens beenden	Zerstörung Katalysator aus O <sub>2</sub> -Entfernung					- Alarm - Schwefelmessung						
	Leckage	Undichtheit	Wasserstoffaustritt in Raum Explosion		X		3	4	- Gasleitmänge - Alarm bei Mindestmengen - Querdichtung - ATEX-Ausführung		3	2	5	DBI
	Zufuss (weniger)	Fehlfunktion Ventill	langsameres abfließen von Glykol (Glykolein in Leitung)	Stellungsüberwachung Armaturen				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Förderpumpe Defekt			Füllstandmessung				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
				Pumpenlaufüberwachung				sicherheitsrechtliche nicht relevant						
	Zufuss (mehr)	Defekt Förderpumpe/PU	zu schnelles abfließen von Glykol (Residuierte Glykolein im Prozess)		X	X	3	4	- Nicht-Aus - Durchflussmessung		3	2	5	DBI
					X	X	3	4	- Doppelwandige Behälter - Drucküberwachung - Füllstandmessung - Überfüllung - Behälterpollung - Belüftung		3	2	5	DBI
	T (weniger)	Außentemperatur, Behälter defekt	Temp-Innendruck sinkt, Entleeren Tankanlage bzw. Gasen		X	X	3	4	- Temperaturmessung - Drucküberwachung - Belüftung - Isolieren		3	2	5	DBI
	T (hohe) (sicherheitsrechtlich nicht relevant)	Außentemperatur	Tank-Innendruck steigt, Besten	Temperaturmessung, Drucküberwachung, BSV				- Stop Förderpumpe sicherheitsrechtliche nicht relevant						
			Leckage		X		2	4	- Doppelwandige Ausführung oder Auffangwanne - Isolation - oberirdische Verlegung Leitungen					
F (weniger)	sinkende Temperatur	Förderung/Entleerung; Unterdruck	Drucküberwachung, Belüftung				- Nicht-Aus (Pumpen) sicherheitsrechtliche nicht relevant							
	Resulierung Füllstand						sicherheitsrechtliche nicht relevant							
	zu schnelle Entleerung, verschlossene Belüftung			X		3	4	- Belüftung		3	2	5	DBI	
F (mehr)	steigende Temperatur	Außerung Wasser					sicherheitsrechtliche nicht relevant							
	Erhöhung Füllstand	Leckage		X		3	4	- Belüftung - Nicht-Aus (Pumpen) - Doppelwandige Ausführung oder Auffangwanne, Füllstandsüberwachung		3	2	5	DBI	

Grundlagen:  
H<sub>2</sub>-Forschungskaverne: RL, DBI, 26.08.2021 (Aktualisierung)

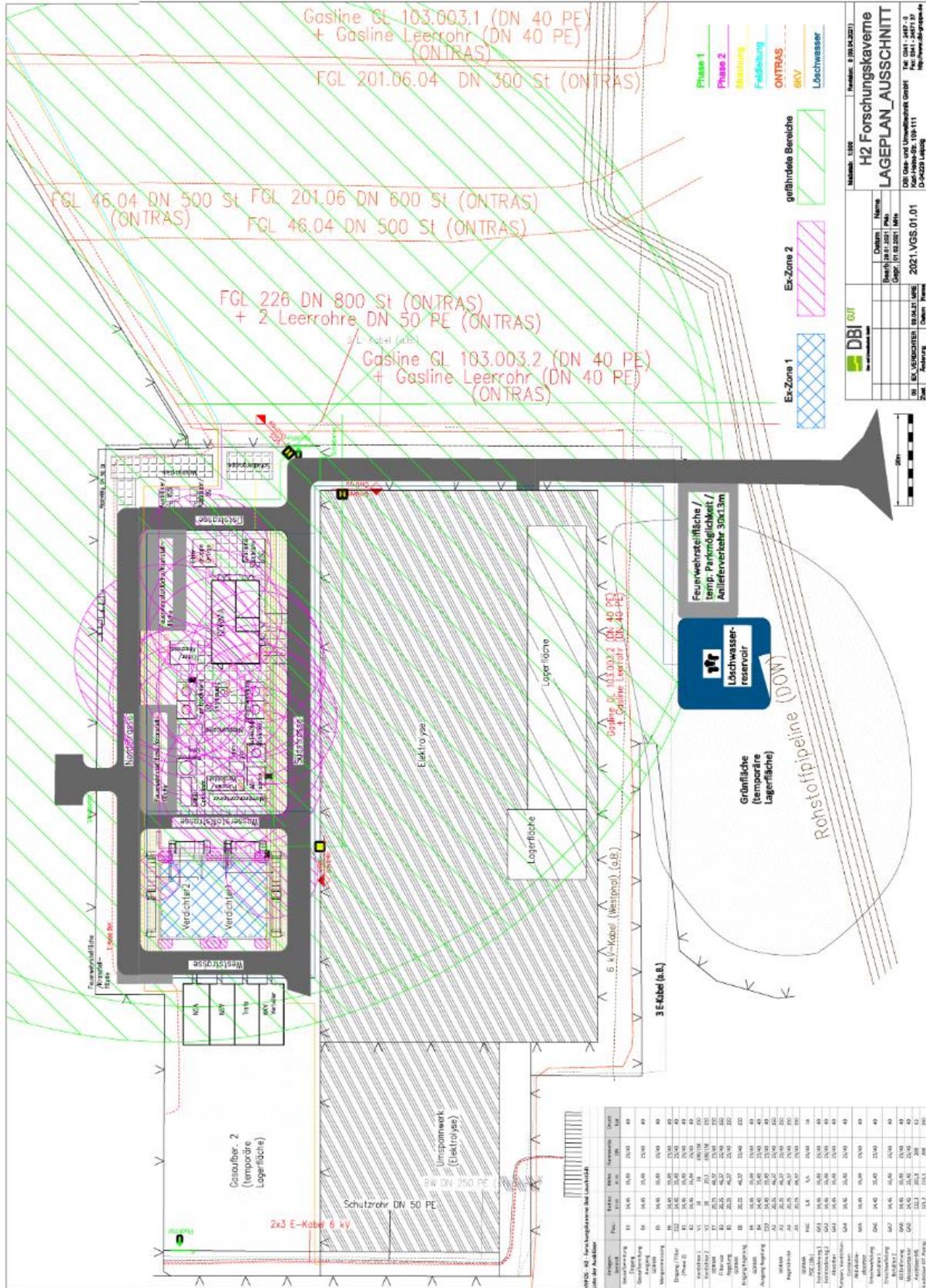
Leipzig, 28.08.2021  
Dr. Helmut Neumann  
TÜV BÜD Industrie Service GmbH  
Anlagenfachbereich

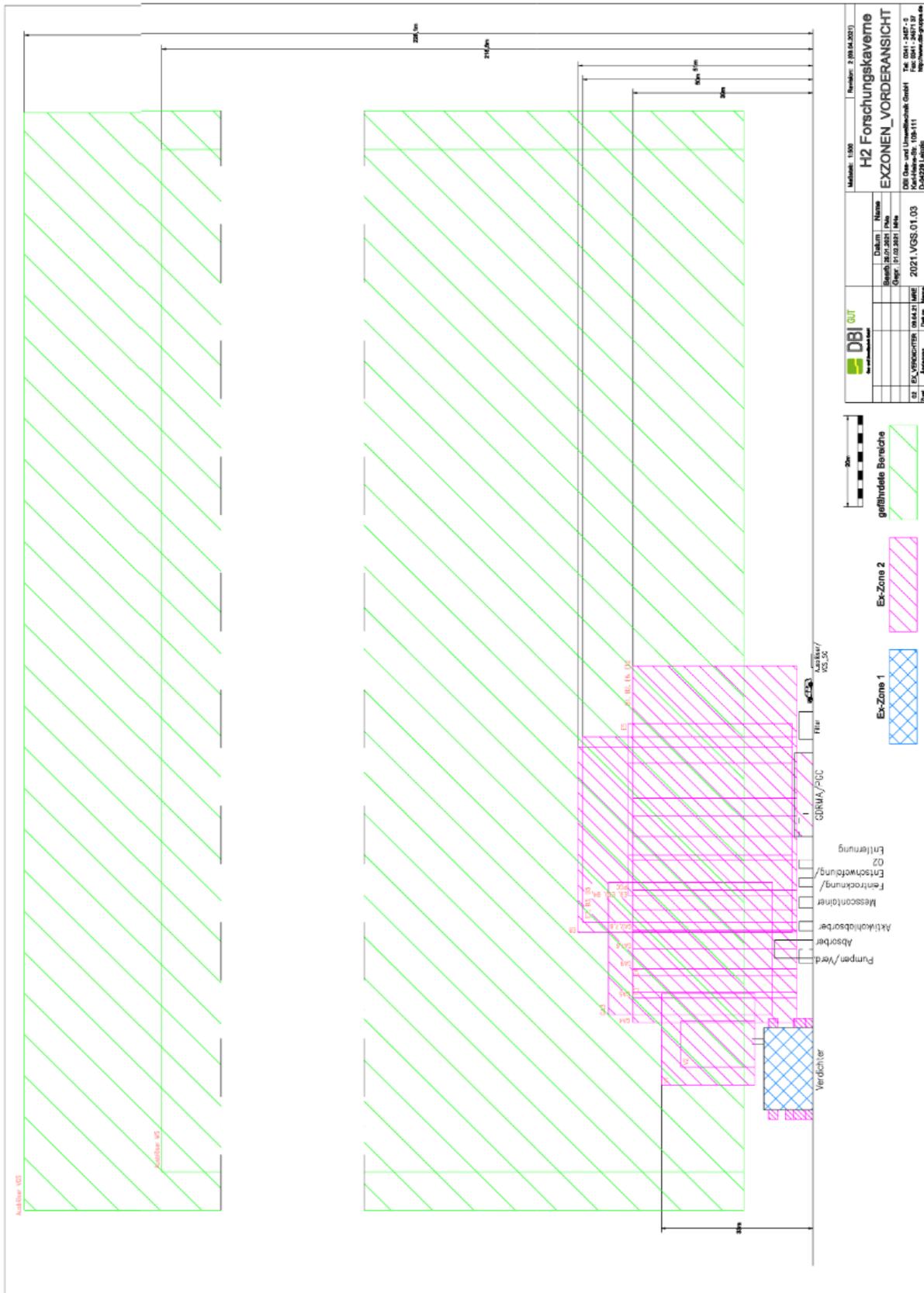
Mario Hentel  
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

## 14.10 Inhaltsverzeichnis Explosionsschutzdokument Untergrundspeicher Bad Lauchstädt

- 0. Vorwort**
- 1. Angabe des Betriebsbereiches**
- 2. Verantwortlicher für den Betriebsbereich**
- 3. Kurzbeschreibungen**
  - 3.1 Geografischen Gegebenheiten
  - 3.2 Bauliche Gegebenheiten
- 4. Verfahrensbeschreibung**
- 5. Stoffdaten**
- 6. Gefährdungsbeurteilung nach § 6 Gefahrstoffverordnung**
  - 6.1 Auftreten von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre im Innern von Apparaturen und der Umgebung der Anlage
  - 6.2 Ausmaß der zu erwartenden Auswirkungen von Explosionen
  - 6.3 Beurteilung weiterer explosionsfähiger Stoffe/Anlagen
- 7. Schutzkonzept**
  - 7.1 Technische Schutzmaßnahmen
    - 7.1.1 primärer Explosionsschutz
      - 7.1.1.1 Technische Dichtheit von Anlagen
      - 7.1.1.2 Lüftungsmaßnahmen
      - 7.1.1.3 Anwendung von stationären Gaswarneinrichtungen
      - 7.1.1.4 Sonstige primäre Explosionsschutzmaßnahmen
    - 7.1.2 sekundärer Explosionsschutz
    - 7.1.3 tertiärer Explosionsschutz
    - 7.1.4 Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen für den Explosionsschutz
    - 7.1.5 Bewertung der Betriebsmittel ohne ATEX-Kennzeichnung
  - 7.2 Zoneneinteilung
    - 7.2.1 Inneres der Apparatur
    - 7.2.2 Umgebung der Apparatur
    - 7.2.3 Begründung zur Einstufung der ~~Methanolbehälter~~ (Emissionsquelle 6)
  - 7.3 Organisatorische Maßnahmen
    - 7.3.1 Prüfungen zum Explosionsschutz
    - 7.3.2 Unterweisung der Mitarbeiter
    - 7.3.3 Schriftliche Anweisungen, Arbeitsfreigabe
    - 7.3.4 Koordination verschiedener Tätigkeiten im Betriebsbereich
    - 7.3.5 Sicherheits- und Gesundheitskennzeichnung
    - 7.3.6 Maßnahmen zur Reduzierung von Gefährdungen bei Instandhaltungsarbeiten
    - 7.3.7 Dichtheit der Anlage, Kontrollgänge, vorbeugende Instandhaltung
    - 7.3.8 Prüfung von Einrichtungen der Prozessleittechnik
    - 7.3.9 Beseitigung von Staubablagerungen
    - 7.3.10 Überflug von Luftfahrzeugen
    - 7.3.11 Wirksamkeitsprüfungen
    - 7.3.12 Einkauf und Neuerrichtung und Änderungen der Prozesse und Verfahren
- 8. Brandgefährdungsbeurteilung**
- 9. Anlagen und mitgeltende Unterlagen**
- 10. Genehmigungsvermerk**

14.11 Aufstellungskonzept (H<sub>2</sub>-OTA Layout) mit Ex-Zonen





## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  „H <sub>2</sub> -Forschungskaverne – Phase I: Entwicklung einer H <sub>2</sub> -Speicherforschungsplattform (SPF) für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt TP1: Entwicklung der Speicherforschungsplattform (SPF) und Integration in die Infrastruktur am Standort Bad Lauchstädt TP2: Wasserstoffbereitstellung für die H <sub>2</sub> -Forschungskaverne mittels Elektrolyse TP3: Geotechnischer Eignungsnachweis am Standort Bad Lauchstädt TP4: Wasserstofftransport auf Basis einer Erdgaspipeline TP5: Entwicklung der Genehmigungsunterlagen zur H <sub>2</sub> -Forschungskaverne	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Henel, Marco (DBI)                      Tümmler, Marcus (IMWS)                      Sauer, Frank (VGS)</li> <li>• Keßler, Benjamin (DBI)                      Kühnel, Moritz (IMWS)                      Kalch, Stefan (VGS)</li> <li>• Lubenau, Udo (DBI)                      Fabig, Tobias (IfG)                      Siedler, Bernd (VGS)</li> <li>• Kleinickel, Cindy (DBI)                      Asmussen-Günther, Grit (IfG)                      Robert Preißner (VGS)</li> <li>• Krause, Hartmut (DBI)                      Tamaske, Eric (ONTRAS)</li> <li>• Neda, Hassannayebi (DBI)                      Decker, Christian (ONTRAS)</li> </ul>	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2020
	6. Veröffentlichungsdatum geplant 2022
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg, Halsbrücker Str. 34, D-09599, Freiberg</li> <li>• IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig</li> <li>• Fraunhofer Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Walter-Hülse-Str. 1, 06120 Halle (Saale)</li> <li>• ONTRAS Gastransport GmbH, Maximilianallee 4, D-04129 Leipzig</li> <li>• VNG Gasspeicher GmbH, Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig</li> </ul>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen DBI: 03ZZ0750A IfG: 03ZZ0750D IMWS: 03ZZ0750E ONTRAS: 03ZZ0750C VGS: 03ZZ0750B
	11. Seitenzahl 132
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 11
	15. Abbildungen 29
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  Das diesem Abschlussbericht zugrundeliegende Projekt ist eines der Leuchtturmprojekte der HYPOS-Initiative - Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany. Das vorliegende Forschungsvorhaben H <sub>2</sub> -Forschungskaverne – Entwicklung einer H <sub>2</sub> -Speicherforschungsplattform für die Speicherung von grünem Wasserstoff am Standort Bad Lauchstädt hat im wesentlichen folgende Ergebnisse erzielt - Technologiebewertung, Anforderungen und Ermittlung von wissenschaftlichen und wirtschaftlich Aspekten - Konzepterstellung und Dokumentation für die Anlagenteile OTA, UTA und Pipeline in Vorbereitung auf die grundsätzlichen Genehmigungen - Durchführung von beispielhaften Genehmigungsverfahren für OTA, UTA und Pipeline bis zum Status „Pre-Basic-Engineering“ und Ausschreibungsgrundlagen (Hauptbetriebsplan, Struktur Sonderbetriebspläne) - Entwicklung einer H <sub>2</sub> -Gestehungskostenanalyse für die Wertschöpfungskette mit Fokus auf die einzelnen Elemente	
19. Schlagwörter H <sub>2</sub> , Wasserstoffspeicherung, Kaverne, HYPOS	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title (translation of original) "H <sub>2</sub> Research Cavern - Phase I: Development of an H <sub>2</sub> storage research platform (SPF) for the storage of green hydrogen at the Bad Lauchstädt location" TP1: Development of the storage research platform (SPF) and integration into the infrastructure at the Bad Lauchstädt location TP2: Hydrogen supply for the H <sub>2</sub> research cavern by electrolysis TP3: Geotechnical suitability verification at the Bad Lauchstädt location TP4: Hydrogen transport on the basis of a natural gas pipeline TP5: Development of the approval documents for the H <sub>2</sub> research cavern	
4. author(s) (family name, first name(s))	5. end of project July 2021
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Henel, Marco (DBI)                      Tümmler, Marcus (IMWS)                      Sauer, Frank (VGS)</li> <li>• Keßler, Benjamin (DBI)                      Kühnel, Moritz (IMWS)                      Kalch, Stefan (VGS)</li> <li>• Lubenau, Udo (DBI)                      Fabig, Tobias (IfG)                      Siedler, Bernd (VGS)</li> <li>• Kleinickel, Cindy (DBI)                      Asmussen-Günther, Grit (IfG) Robert Preißner (VGS)</li> <li>• Krause, Hartmut (DBI)                      Tamaske, Eric (ONTRAS)</li> <li>• Neda, Hassannayebi (DBI)                      Decker, Christian (ONTRAS)</li> </ul>	6. publication date planned 2022
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• DBI – Gasttechnologisches Institut gGmbH Freiberg, Halsbrücker Str. 34, D-09599, Freiberg</li> <li>• IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstraße 60, D-04279 Leipzig</li> <li>• Fraunhofer Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Walter-Hülse-Str. 1, 06120 Halle (Saale)</li> <li>• ONTRAS Gastransport GmbH, Maximilianallee 4, D-04129 Leipzig</li> <li>• VNG Gasspeicher GmbH, Maximilianallee 2, D-04129 Leipzig</li> </ul>	10. reference no. DBI: 03ZZ0750A IfG: 03ZZ0750D IMWS: 03ZZ0750E ONTRAS: 03ZZ0750C VGS: 03ZZ0750B
	11. no. of pages 132
12. sponsoring agency (name, address)	13. no. of references 12
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. no. of tables 11
	15. no. of figures 29
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The available report covers the project "H <sub>2</sub> -Research Cavern", the lighthouse projects of the HYPOS initiative - Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany. The aim was to develop and prepare the construction and commissioning of a hydrogen storage cavern, and thus, lay the foundation for research (and later commercial) operation and to investigate additional hydrogen research topics in the field on a real facility – so called "storage research platform – SPF". "H <sub>2</sub> -Research Cavern" covered the following aspects and achieved the following results	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technology assessment, requirements and determination of scientific and economic aspects</li> <li>- Concept development and generation of a Basic Design for the cavern, wellbore, surface facility and pipeline</li> <li>- Preparation of Main and Special Operation Plans for approval by all authorities involved, incl. continuous exchange with them</li> <li>- Development of an exemplary approval guideline for hydrogen caverns wellbores, surface facilities and pipelines up to the status "pre-basic engineering"</li> <li>- Development of an H<sub>2</sub> production cost analysis for the value chain</li> </ul>	
19. keywords H <sub>2</sub> , hydrogen storage, Cavern, HYPOS	
20. publisher	21. price