



Sicherer und effizienter Wasserstofftransport über große Distanzen mit LOHC

Modellierung einer H₂-Lieferkette am Beispiel Helgoland-Hamburg

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Finanziert von der
Europäischen Union

NextGenerationEU

Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Olaf Hesebeck – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Amelie Knappe – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Dr. Andrea Deißberger – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Dr. Vinicius Carrillo Beber – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Andreas Krenz – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Tim Strobach – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Mareike Schlag – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Dr. Dennis Weller – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Kai Brune – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Dr. Volkmar Stenzel – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Sven Kardatzke – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Dominik Paulkowski – Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Monja Grote – Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA)
Karin Debacher – Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA)
Ina Baumeister – Hydrogenious LOHC Technologies
Sejir Boubtane – Hydrogenious LOHC Technologies
Andreas Nuß – Hydrogenious LOHC Technologies
Siyang Huang – Hydrogenious LOHC Technologies
Frank Erik Walter – Hydrogenious LOHC Technologies
Dr. Dominik Bruckner – Hydrogenious LOHC Technologies
Christoph Tewis – Tewis Projektmanagement GmbH
Bianca Maierhofer – Tewis Projektmanagement GmbH

Disclaimer

Die Erarbeitung des Positionspapiers erfolgte durch eine ausgewählte Autorenschaft aus dem Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE. Die Inhalte der Autorenpublikation wurden unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt und spiegeln nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Leitprojekts wider.

Impressum

TransHyDE-Projekt Helgoland
Tewis Projektmanagement GmbH
Harburger Schloßstraße 30
21079 Hamburg

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BT-D	Dehydriertes Bezytoluol
BT-H	Hydriertes Bezytoluol
FBG	Faser-Bragg-Gitter
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
H ₂	Wasserstoff
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LNG	Liquified Natural Gas
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
LOHC-BT	Der Liquid Organic Hydrogen Carrier Benzyltoluol
LOHC-D	Dehydrierter Liquid Organic Hydrogen Carrier (unbeladenes LOHC)
LOHC-H	Hydrierter Liquid Organic Hydrogen Carrier (mit H ₂ beladenes LOHC)
PET	Polyethylenterephthalat
PPA	Power Purchase Agreement
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SHM	Structural Health Monitoring
tpd	Tons per day (Tonnen H ₂ pro Tag)
UAV	Unmanned aerial vehicle
UV/VIS	Ultraviolettes und sichtbares Licht
VBH	Versorgungsbetriebe Helgoland

Inhaltsverzeichnis

01 Das TransHyDE-Projekt Helgoland	S.6
1.1. Die TransHyDE-Projekte als Teil der Nationalen Wasserstoffstrategie	S.6
1.2. Das TransHyDE-Projekt Helgoland	S.6
1.3. Projektaufbau: Die Stationen der Transportkette zwischen Helgoland und Hamburg	S.6
1.4. Helgoland als Härtetest-Szenario	S.7
1.5. Die Vorteile von LOHC im Szenario Helgoland-Hamburg	S.8
1.6. Die Projektpartner und ihre Aufgaben	S.8
02 Logistikkonzepte und Machbarkeiten	S.9
2.1. Helgoland-Hamburg: Standortanalyse und Logistikkonzepte an Land und auf See	S.9
2.2. Standortanalyse für die Hydrieranlage	S.9
2.3. Ergebnis der Standortanalyse	S.9
2.4. Logistikkonzept für den Landtransport auf Helgoland	S.11
2.5. Hafentechnische Machbarkeitsstudie Helgoland (Seeseitige Logistik)	S.13
2.6. Ergebnis: LOHC-Umschlag mit Containerschiffen	S.13
2.7. LOHC-Umschlag per Tankschiff	S.14
2.8. Standortanalyse Hamburg	S.15
2.9. Fazit der Standortanalyse Helgoland-Hamburg	S.15
03 LOHC-Technologie: Hydrier- und Dehydrieranlagen	S.16
3.1. Untersuchungen zur Hydrieranlage – auf Helgoland und weltweit	S.16
3.1.1. Der Hydrierprozess	S.16
3.1.2. Flächenbedarfe und Anlagengrößen auf Helgoland	S.16
3.1.3. Wasserstoffmengen-Skalierung für weltweite Standorte	S.17
3.1.4. Vorplanung und Anlagenentwicklung: LOHC-Hydrieranlage	S.17
3.1.5. Vorplanung und Anlagenentwicklung: LOHC-Dehydrieranlage	S.19
3.2. Hydrierungs- und Dehydrierungsprozess: Überschusswärme versus Wärmebedarf – Untersuchungen zur Wärmeintegration	S.19
3.2.1. Wärmeintegration auf Helgoland	S.20
3.2.2. Wärmeintegration für andere Standorte	S.20
3.2.3. Nutzung der Wärme aus der LOHC-Hydrierung in alternativen Konzepten	S.20
3.2.4. Wärme für den Dehydrierungsprozess	S.22

Inhaltsverzeichnis

04 Materialforschung in Verbindung mit LOHC und Wasserstoff	S.23
4.1. Tankkonzepte und geeignet Materialien für die LOHC-Infrastruktur	S.23
4.1.1. Innovatives Konzept für einen LOHC-Tank mit Innenschwimmdecke	S.23
4.1.2. Eignung von Materialien für die LOHC-Infrastruktur: Tankmaterialien	S.24
4.1.3. Kleb- und Dichtstoffe in Tanks und Peripherie	S.25
4.2. Zustandsüberwachung von LOHC und Tanks mit Sensoren und Drohnen	S.26
4.2.1. Qualitätsüberwachung des LOHC-Zustands mittels optisch-spektroskopischer Messtechnik	S.26
4.2.2. Überwachung von Tanks mit faseroptischer Sensorik	S.26
4.2.3. Zustandsüberwachung von Tankanlagen mit Drohnen	S.27
4.3. Druckwasserstoff: Permeation, Versprödung und ökologische Aspekte	S.28
4.3.1. Beschichtungssysteme als Wasserstoff- oder LOHC-Barriere	S.28
4.3.2. Materialtest mit Druckwasserstoff: Durchlässigkeit und Versprödung	S.29
4.3.3. Nachhaltiger Bewuchs- und Korrosionsschutz für Meeresspipelines	S.29
05 Zwischenfazit und Ausblick	S.31

1

Das TransHyDE-Projekt Helgoland

1.1. Die TransHyDE-Projekte als Teil der Nationalen

Wasserstoffstrategie

Wasserstoff (H₂) in seiner Reinform ist farb- und geruchlos, flüchtig und hat eine niedrige Entflammbarkeitsgrenze. Ihn sicher zu speichern und zu transportieren ist bisher in Relation zu anderen Energieträgern wie z.B. Diesel besonders aufwendig und kostenintensiv.¹ Ein Großteil der Speicher- und Transporttechnologien steht noch am Anfang und muss in ihrer Bandbreite erforscht und entwickelt werden.

TransHyDE ist eines der drei Wasserstoff-Leitprojekte, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden, und unterstützt die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie, die 2020 von der Bundesregierung verabschiedet und 2023 fortgeschrieben wurde (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023).

Konkret betrachten die verschiedenen TransHyDE-Projekte den Transport von gasförmigem Wasserstoff in Pipelines und Hochdruckbehältern, den Transport von flüssigem Wasserstoff sowie den Transport von in Ammoniak oder LOHC chemisch gebundenem Wasserstoff. Außerdem prüft TransHyDE, ob und wie LNG-Terminals auf wasserstoffbasierte Energieträger umgerüstet werden könnten.

1.2. Das TransHyDE-Projekt Helgoland

In diesem Whitepaper wird das TransHyDE-Projekt Helgoland umfassend in seinen verschiedenen technischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Dimensionen betrachtet. Das Projekt untersucht seit 2021 modellhaft eine Wasserstoff-Lieferkette per Schiff zwischen Helgoland und Hamburg. Der Fokus liegt auf der LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier), mit der Wasserstoff sicher „verpackt“ und über lange Strecken transportiert werden kann.

Bei LOHC handelt es sich um ölartige organische Trägerstoffe, in die Wasserstoff eingespeichert und nach dem Transport wieder ausgespeichert werden kann. Das Projekt setzt auf die innovative LOHC-Technologie des Unternehmens Hydrogenious LOHC Technologies aus Erlangen. Hydrogenious LOHC Technologies verwendet ausschließlich das LOHC Benzyltoluol (LOHC-BT).

Ziel des Forschungsprojekts ist die Erarbeitung einer reproduzierbaren und skalierbaren Blaupause für weltweite Standorte mit ähnlich herausfordernden Rahmenbedingungen. Eine Umsetzung auf Helgoland selbst ist nicht geplant. Da das Projekt noch bis 2025 läuft, liegen noch nicht alle Ergebnisse vor.

1.3. Projektaufbau: Die Stationen der Transportkette zwischen Helgoland und Hamburg

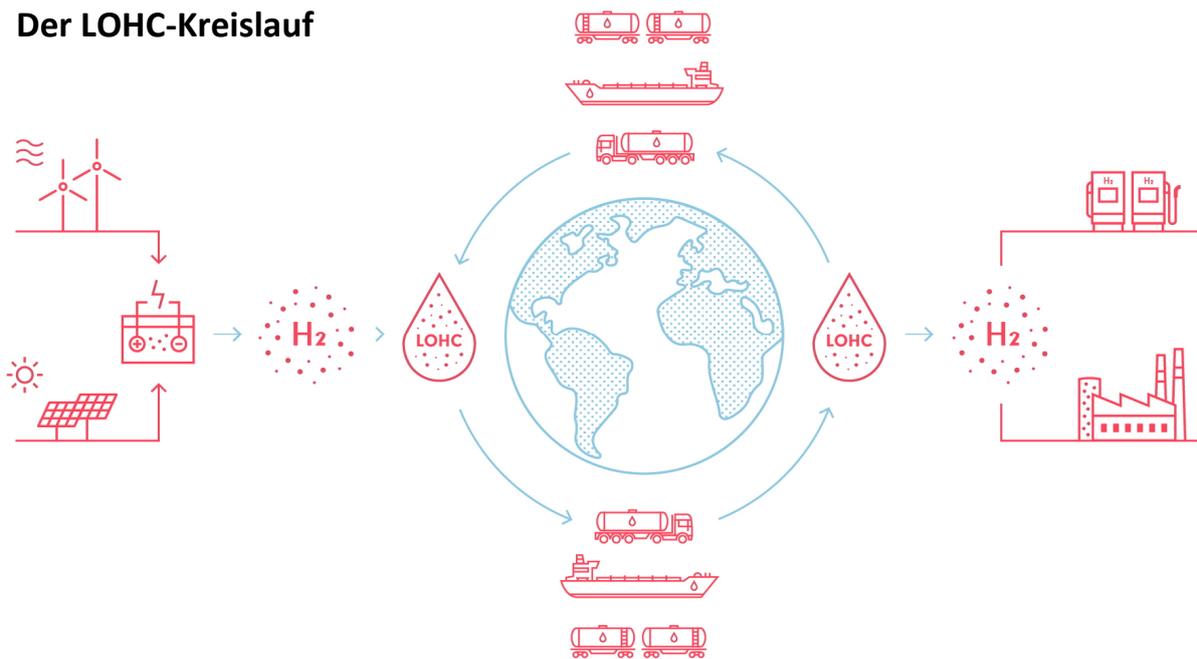
Um zu verstehen, welche Forschungs- und Entwicklungsinhalte das TransHyDE-Projekt Helgoland bearbeitet, ist es notwendig, sich den Aufbau der kompletten Transportkette anzusehen. Der Startpunkt des Projektrahmens ist eine Hydrieranlage auf der Insel Helgoland. Nach Anlandung der Pipeline wird der offshore produzierte, gasförmige grüne Wasserstoff in die Anlage geleitet und in das LOHC eingespeichert.² Die Abwärme, die während der Hydrierung entsteht (etwa 9 kWh/kg H₂ bei 250 °C), könnte unter anderem für die Wärmeversorgung der Helgoländer Haushalte verwendet werden. An das flüssige LOHC gebunden, kann der Wasserstoff nun sicher transportiert werden. Über unterirdische Leitungen würde das beladene LOHC zum Helgoländer Vorhafen transportiert und dort zwischengelagert werden. Anschließend steht ein Schiff bereit, das das mit Wasserstoff beladene LOHC nach Hamburg transportiert.

Im Hafen Hamburg wird der Wasserstoff in einer Dehydrieranlage

¹ Energy Technology 2301042. <https://doi.org/10.1002/ente.202301042>

² Die Produktion von grünem Wasserstoff per Offshore-Elektrolyse sowie die Verlegung der Pipeline nach Helgoland gehören nicht direkt zum Projektrahmen und wird vorausgesetzt. Allerdings erforscht und entwickelt das Fraunhofer IFAM im TransHyDE-Projekt Helgoland biozidfreie Bewuchsschutzsysteme für Meeres-Pipelines.

Der LOHC-Kreislauf



Was ist LOHC?

Die Abkürzung LOHC bedeutet „Liquid Organic Hydrogen Carrier“ und ist ein Überbegriff für verschiedene flüssige organische Trägermaterialien, an die Wasserstoff chemisch gebunden und nach dem Transport wieder durch einen chemischen Prozess freigesetzt werden kann. Den chemisch-katalytischen Prozess zur Einspeicherung des Wasserstoffs in das LOHC nennt man „Hydrierung“ – hierbei wird Energie in Form von Wärme frei (exotherm). Das mit Wasserstoff „beladene“ LOHC kann transportiert werden und wird durch den Buchstaben „H“ für „hydriert“ gekennzeichnet (LOHC-H). Am gewünschten Zielort wird der Wasserstoff durch einen chemisch-katalytischen Prozess namens „Dehydrierung“ unter Zufuhr von thermischer Energie freigesetzt. Nach diesem Dehydriervorgang liegt unbeladenes LOHC vor – dieses wird im Folgenden durch den Buchstaben „D“ gekennzeichnet (LOHC-D). Das LOHC-Trägermaterial wird bei der Freisetzung des Wasserstoffs nicht verbraucht, sondern kann für weitere Wasserstoff-Transporte wiederverwendet werden.

Warum LOHC?

Im Gegensatz zu anderen Wasserstofftransportmethoden kann das LOHC Benzyltoluol (LOHC-BT) bei Umgebungstemperatur und -druck gelagert werden. Darüber hinaus kann sowohl für Kurz- als auch Langstreckentransport die bereits bestehende Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe genutzt werden (Distel et al., 2024). Durch die Nutzung der bestehenden Infrastruktur ist der Wasserstofftransport durch LOHC-BT besonders schnell und kostengünstig zu realisieren (für einen Kostenvergleich siehe beispielsweise Dertinger, 2022). Schließlich weist LOHC im Gegensatz zu anderen Technologien auch über lange Zeiträume keine Wasserstoffverluste auf.

durch einen endothermen katalytischen Prozess wieder freigesetzt und den Anwendern zur Verfügung gestellt. Hierbei werden etwa 11 kWh/kg H_2 bei 300 °C an thermischer Energie benötigt.

Eine weitere Möglichkeit wäre, das beladene LOHC für den Hinterlandtransport per LKW oder Güterzug umzuschlagen.

Die Transportkette gestaltet sich als Kreislauf, in dem das dehydrierte LOHC wieder nach Helgoland verschifft und gegen mit Wasserstoff beladenes LOHC eingetauscht wird.

1.4. Helgoland als Härtestest-Szenario

Der Standort Helgoland ist die ideale Forschungsumgebung für das Projekt, da er viele herausfordernde Umgebungsbedingungen vereint, die weltweit immer wieder an potenziellen Standorten jenseits eines etablierten Industriegebiets relevant sein werden.

Nach dem Prinzip: „Wenn es auf Helgoland funktioniert, dann funktioniert es (fast) überall“ werden hier die Anforderungen für die Umsetzung studiert und auf das Realisierungspotenzial geprüft.

Zu den Standort-Herausforderungen für die Wasserstofflieferkette gehören:

- Ein dynamisches Windprofil und damit abgeleitet ein volatiles Wasserstoffproduktionsprofil
- Harte Witterungsbedingungen der Nordsee (Auswirkungen z. B. auf die Technologie, Materialkorrosion und Widerstandsfähigkeit)
- Umfeld im Meerwasser (ebenfalls Stichwort Materialkorrosion und Widerstandsfähigkeit)
- Einbindung in ein touristisches Umfeld (Stichwort unauffällige Umsetzung der Anlage und Leitungen sowie des Frachturnschlags)
- Wenig Raum und enge Bebauung (zu beachten bei der Größe der Hydrieranlage, der LOHC-Lagerung, den produzierbaren Mengen, konkurrierenden Nutzungen)

1.5. Die Vorteile von LOHC im Szenario Helgoland-Hamburg

Für das Szenario Helgoland-Hamburg wurde bewusst das LOHC Benzyltoluol als Speicher- und Transportmedium gewählt, da es für die vorherrschenden Rahmenbedingungen u.a. folgende Vorteile bietet:

- Politik und Versorgungsbetriebe der Insel Helgoland suchen seit mehreren Jahren nach einer Lösung, die Wärmeversorgung der Insel auf einen klimaneutralen Weg zu bringen. Aktuell wird vor Ort noch mit Heizöl geheizt und die Wärme im Fernwärmenetz bis in die Haushalte verteilt. Beim Hydrierungsprozess entsteht Wärme, die als klimaneutraler Ersatz zum Heizöl dienen könnte. Die Integration der Wärme aus dem Hydrierprozess und die Einbindung in das Helgoländer Fernwärmenetz wurde daher intensiv untersucht und modelliert.
- Nutzung der vorhandenen Infrastruktur: Bei der Logistik können generell Kosten eingespart werden, da Schiffe und weitere Infrastruktur wie Tanks, Container oder Leitungen direkt verwendet werden können und nicht neu konzipiert werden müssen.
- Die Kühlungs-, Kompressionsaufwände und Prozessaufwände der anderen Wasserstoffspeichertechnologien werden durch die (De-)Hydrierungsaufwände ersetzt, was je nach Rahmenbedingungen Vorteile hinsichtlich Gesamtkosten und Komplexität bedeutet.³
- Zudem wurde eine sichere Handhabung von Wasserstoff priorisiert. LOHC hat ein vergleichbares Gefahrenpotenzial wie Diesel und ist schwer entflammbar – ein Pluspunkt für die Akzeptanz in der Bevölkerung auf der Insel.
- Die Hydrieranlage und die benötigte Infrastruktur zur Lagerung und für den LOHC-Umschlag können auf vergleichsweise kleinem Raum umgesetzt werden. Außerdem ist Fachkräftemangel auf der Insel ein herausforderndes Thema. Mit entsprechender Schulung könnte das vorhandene Personal den Umgang mit LOHC ohne großen Aufwand lernen.

1.6. Die Projektpartner und ihre Aufgaben

Innerhalb der vorgestellten Transportkette gibt es zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, die unter den neun Projektpartnern mit unterschiedlichen Funktionen und Expertisen verteilt sind:

Das TransHyDE-Projekt Helgoland setzt auf die proprietäre LOHC-Technologie des Unternehmens **Hydrogenious LOHC Technologies**, das als H₂-Trägermaterial Benzyltoluol verwendet. Seine Hydrier- und Dehydrieranlagen wurden bereits in unterschiedlichen Größen in kommerziellen Anwendungen demonstriert.

Das **Fraunhofer IFAM – Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung** schafft Grundlagen für eine zukünftige Weiterentwicklung der LOHC-Transportinfrastruktur. Hierzu werden zwölf unterschiedliche Forschungsthemen erarbeitet, beispielsweise die Identifikation von Materialien, die besonders gut für die LOHC-Lagerung geeignet sind, ein innovatives Tankkonzept speziell für LOHC und die Zustandsüberwachung der Tanks.

Hauptakteur für die LOHC-Logistik ist die **Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA)**. Dazu gehört auch die Untersuchung möglicher Standorte in Hamburg für einen LOHC- bzw. Wasserstoff-Zielhafen.

Die **Gemeinde Helgoland** unterstützt das Forschungsprojekt mit Machbarkeitsstudien zum Standort Helgoland.

Die **Versorgungsbetriebe Helgoland GmbH** bilden die Schnittstelle zur Hydrieranlage und der Prozesswärmenutzung. Hier wird geprüft, wie die Einspeisung der Wärme in das Versorgungsnetz erfolgen kann. Außerdem wird modellhaft die Möglichkeit untersucht, die Hydrieranlage auf dem Gelände der Versorgungsbetriebe zu errichten ggf. in bereits bestehende Anlagen zu integrieren.

Die **Hafenprojektgesellschaft Helgoland mbH** kümmert sich um Lösungsentwicklungen und der Untersuchung von Machbarkeiten für den LOHC-Umschlag in den Helgoländer Häfen. Das wiederum bildet eine Schnittstelle zur Seelogistik.

Die **Gascade Gastransport GmbH** berät das Projektteam zu Pipeline-lösungen, da die Offshore-Elektrolyseanlage in diesem Szenario über eine Pipeline mit der Hydrieranlage verbunden werden soll.

Die **Tewis Projektmanagement GmbH** stellt die Projektleitung. Sie koordiniert die einzelnen Vorgänge und sorgt für einen kontinuierlichen Austausch aller Projektpartner. Durch den zielgerichteten Informationsfluss wird ein effizienter Forschungsprozess sichergestellt. Ebenso wird über diese Stelle das Fördermittelmanagement abgewickelt sowie die Öffentlichkeitsarbeit und die Schnittstellenkommunikation zwischen den Verbundprojekten.

Die **cruh21 GmbH** ist für das verbundübergreifende Wissensmanagement zuständig und unterstützt die Schnittstellenkommunikation zwischen den Verbundprojekten.

Im Folgenden werden die einzelnen Forschungs- und Entwicklungsfelder der Partner genauer erläutert.

³ Facilitating hydrogen imports from non-EU countries, Guidehouse (2022)

2

Logistikkonzepte und Machbarkeiten

2.1. Helgoland-Hamburg: Standortanalyse und Logistikkonzepte an Land und auf See

Um eine Logistikkette von Helgoland nach Hamburg zu erforschen und zu entwickeln, wurde diese zunächst in ihre Bestandteile untergliedert und verschiedene Varianten hinsichtlich ihrer logistischen und baulichen Anforderungen, ihrer Machbarkeit und ökonomischen sowie ökologischen Faktoren untersucht. Es wurden daher folgende Elemente in der Prozesskette betrachtet:

- Standort der Hydrieranlage auf Helgoland
- LOHC-Logistik auf Helgoland
- Schiffstransport von Helgoland nach Hamburg
- Logistik und Standort in Hamburg

2.2. Standortanalyse für die Hydrieranlage

Die Standortanalyse umfasst die Untersuchung einzelner Standorte auf der Insel Helgoland hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau und den Betrieb einer LOHC-Hydrieranlage und ihrer weiteren Prozessinfrastruktur wie z. B. Leitungen. Hierfür wurde eine umfassende Standortsuche durchgeführt, als deren Endergebnis Flächen bzw. Flächenkombinationen zu insgesamt sechs Standortvarianten kombiniert werden konnten (siehe Abb. 1). Die Bewertung der Standorte erfolgte u. a. mithilfe von folgenden Kategorien:

- Flächenstruktur
- Bebaubarkeit der Fläche
- Erreichbarkeit der Fläche
- vorhandene Infrastruktur
- Auswirkungen auf Umwelt, Natur und Landschaft
- Platzbedarf für die Hydrieranlage
- Kapazitäten für ober- und unterirdische LOHC-Speicherung

- Anbindung ans Wegenetz, Wärmenetz und an die Kaikante für den LOHC-Umschlag
- Herrichtungskosten für die Flächen (Kampfmittelräumung, Baugrund)
- Skalierungsmöglichkeiten für Hydrieranlage und LOHC-Speicherung

Der Bewertung liegen eine umfangreiche Desktopanalyse, Geländebegehungen und Begutachtungen der Flächen vor Ort sowie Gespräche mit Fach- und Ortskundigen zugrunde. Zudem wurden Vorbelastungen der Flächen sowie die derzeitige Nutzung und Eigentümerverhältnisse berücksichtigt. Ein wesentlicher Faktor für die Standortbewertung war die Wärmeintegration aus dem Hydrierprozess in das vorhandene Wärmenetz, da letzteres nach Möglichkeit nicht verändert werden sollte.

Der Kostenüberschlag wurde bewusst von der Standortanalyse abgegrenzt, um die Teilmenge der Standortanalyse-Kriterien, denen eindeutige Investitionskosten (Capex) und teilweise auch Unterhaltskosten (Opex) zugewiesen werden können, mit finanziellen Realbeträgen evaluieren zu können. Standortanalyse und Kostenüberschlag werden schlussendlich aber in einer Gesamtmatrix inhaltlich wieder zusammengeführt.

2.3. Ergebnis der Standortanalyse

In der Gesamtbewertung schneiden sowohl ein Standort der Hydrieranlage im Nahbereich des Vorhafens als auch auf dem Gelände der Versorgungsbetriebe vorteilhaft ab. Die Skalierungsmöglichkeiten der Hydrieranlage und der LOHC-Infrastruktur sind jedoch eingeschränkt. Bei ersterer Fläche wären der Transport und der Umschlag des LOHC zum Weitertransport sehr gut handhabbar.

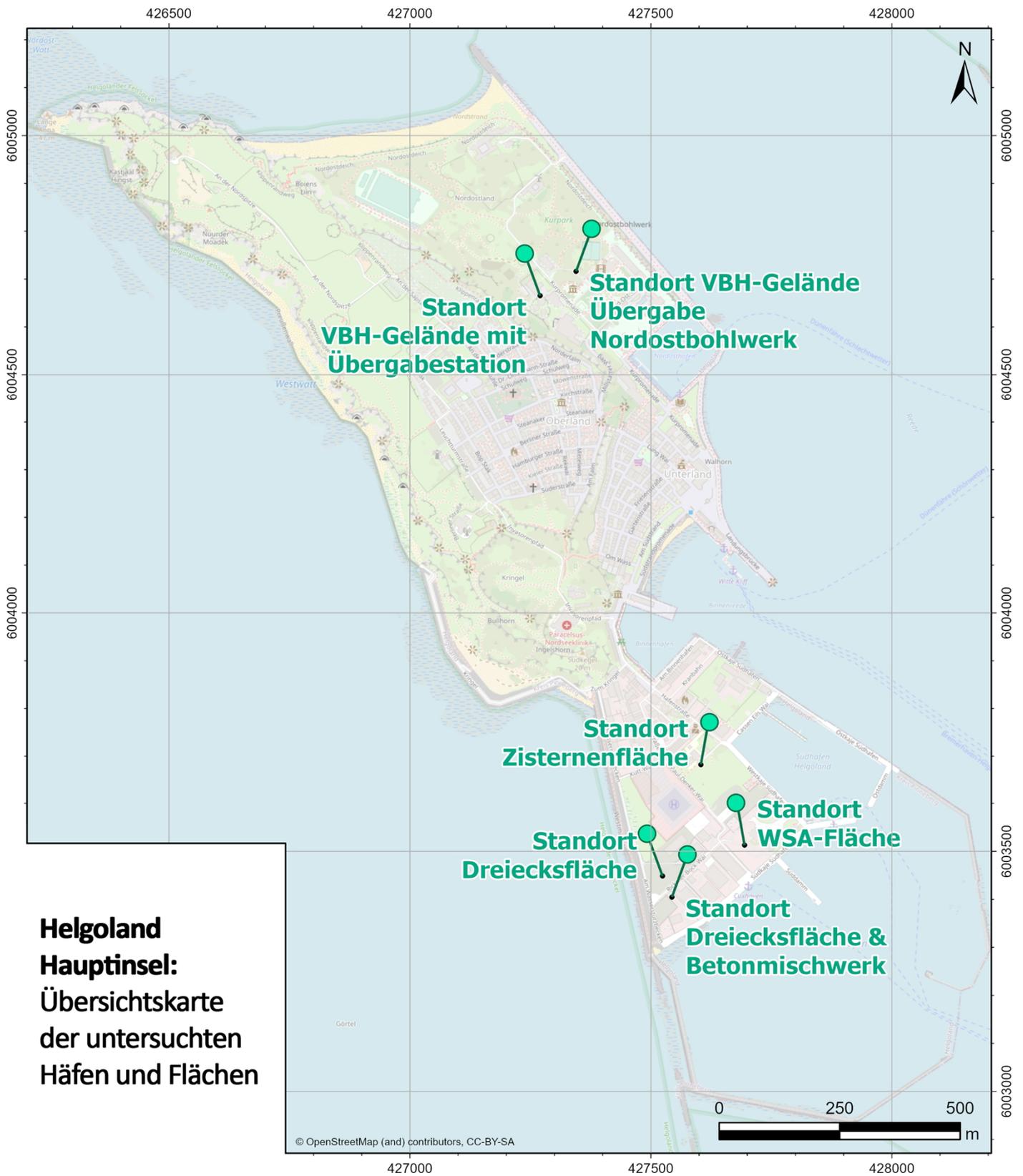


Abbildung 1. Untersuchte Standorte für die Hydrieranlage auf Helgoland.

Auf letzterer könnte die entstehende Abwärme direkt in die Wärmeversorgung der Insel eingebunden werden. Zudem würde durch die nahe Anlandung des Wasserstoffs mittels Pipeline nur eine kleine Wasserstoffleitung auf der Insel errichtet werden müssen. Abbildung 2 zeigt dafür ein exemplarisches Setup. Zur Abwägung der konkurrierenden Aussagen hinsichtlich der Standorte wurden ergänzend eine hafentechnische Machbarkeitsstudie zum Umschlag des LOHC und eine Logistikbewertung für den Transport des LOHC über die Insel Helgoland durchgeführt. Diese hat gezeigt, dass aus nautischer und logistischer Sicht der Vorhafen grundsätzlich der beste Standort auf der Insel Helgoland ist.

2.4. Logistikkonzept für den Landtransport auf Helgoland

Die LOHC-Logistik auf der Insel ist maßgeblich von den zu transportierenden LOHC-Mengen, dem Transportschiff (Container- oder Tankschiff) und dem daraus resultierenden Standort des Hafens (Nord-Ost-Bohlwerk oder Vorhafen) abhängig.

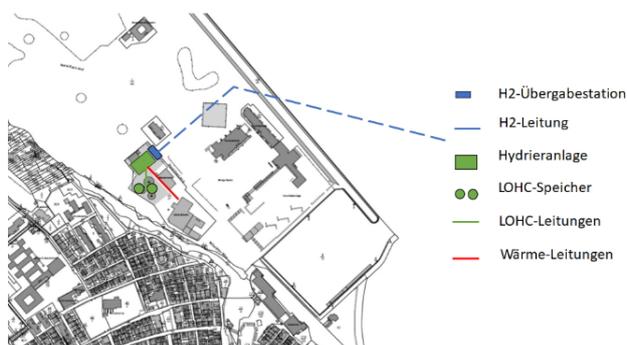
Für das gesamte Logistikmodell wurden zunächst verschiedene Transportprozessketten modelliert, die im Anschluss als Grundlage zur Entwicklung eines generischen Transportmodells dienen. Dieses Modell hilft einerseits, die optimale LOHC-Menge im Logistikkreislauf in Abhängigkeit verschiedener Variablen wie Produktionsmenge, Transportentfernung und Zyklusfrequenz zu bestimmen,

Tabelle 1. Exemplarischer Auszug aus der Matrix zur Bewertung der möglichen Standorte für die Hydrieranlage auf der Insel Helgoland.

Bewertungskriterium	Gewichtung	1	3	5
Infrastruktur	15 %			
Wegnetz	5 %	Ausgebautes Wegnetz ist vorhanden	Anbindung einfach umsetzbar durch wenig aufwendige Baumaßnahmen (Ausbau)	Keine Anbindung vorhanden, Umsetzung nur mithilfe von Neubau von Wegen/Straßen
Wärmenetz	10%	Ausgebautes Wärmenetz ist vorhanden	Anbindung an Wärmenetz in mittelbare Nähe möglich	Anbindung erfolgt über größere Entfernung
Erreichbarkeit	10 %			
Länge der Wasserstoffpipeline	5 %	Kurze Distanz (< 200 m)	Mittlere Distanz (200-400 m)	Große Distanz (> 400 m)
Anbindung an Hafen	5 %	In direkter Nähe (< 50 m)	In mittelbarer Nähe (50-200 m), Pipeline oder Anlagen zu Umtransport nötig	Größere Entfernung (> 200 m), Pipeline oder Anlagen zum Umtransport nötig
Sicherheit	10 %			
Hochwasserschutz	5 %	Vorhanden und intakt, in keinem Szenario Hochwassergefahr	Vorhanden, aber ertüchtigungsbedürftig, Hochwassergefahr ab HW100	Nicht vorhanden, Hochwassergefahr ab HW20
Weitere Sicherheitsrisiken	5 %	Keine Sicherheitsrisiken	Kalkulierbare Sicherheitsrisiken	Erhebliche Sicherheitsrisiken

Fläche am Heizkraftwerk als Standort

Variante Infrastruktur II.4



Fläche am Südhafen als Standort

Variante Infrastruktur II.2



Abbildung 2. Exemplarisches Setup für die bevorzugten Standorte der Hydrieranlage mit Prozessinfrastruktur.

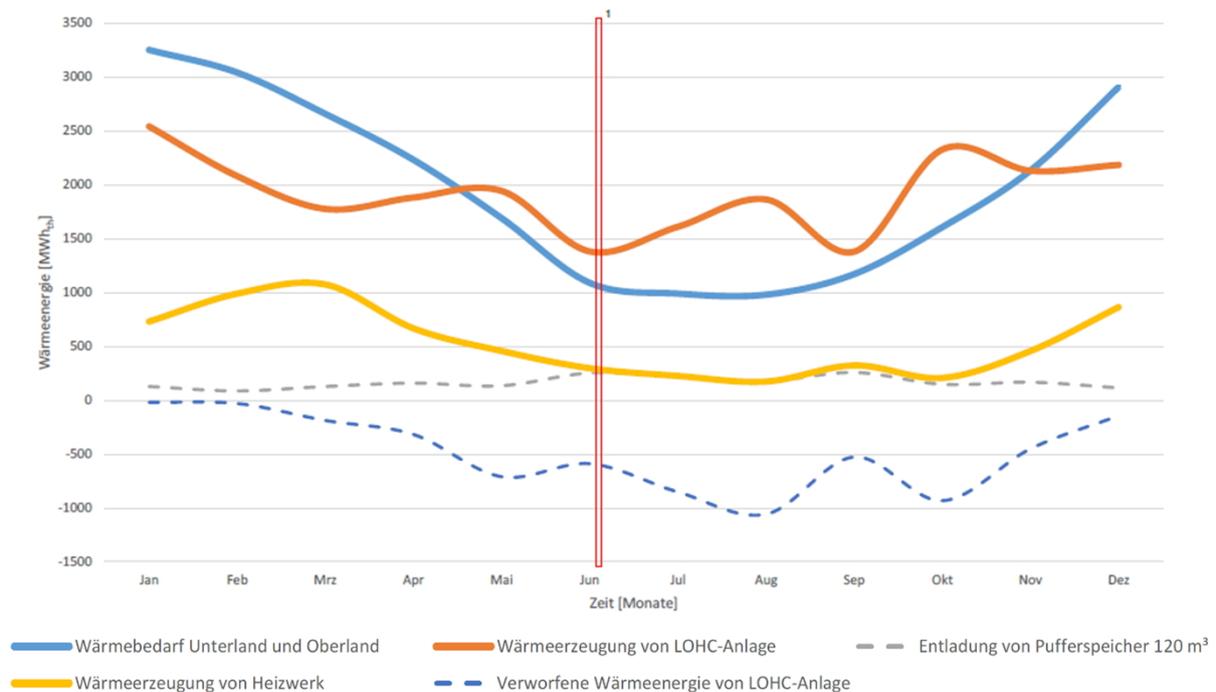


Abbildung 3. Wärmebedarfe und Wärmeproduktion für eine exemplarische 12-t-Hydrieranlage in MWh_{th} pro Monat.

andererseits die Dimensionierung der benötigten Speicher sowohl am Start- als auch Zielort zu berechnen. Zudem wurde berechnet und bewertet, welche Wärmemengen beim Hydrierprozess in das Fernwärmenetz eingespeist werden können. Insbesondere letzterer Aspekt war für die Auslegung der Logistik und der Anlagengröße von erheblicher Bedeutung, da das Ziel der Insel Helgoland das Erreichen der Klimaneutralität ist.

Herausfordernd bei dieser Betrachtung war der zyklische Wärmebedarf und die damit einhergehende Einwirkung auf den eher kontinuierlichen Hydrierprozess. Abbildung 3 zeigt die Gegenüberstellung der Wärmebedarfe und der Wärmeproduktion für eine exemplarische 12-t-Hydrieranlage. Dabei werden ca. 22.000 MWh jähr-

lichem Wärmebedarf einer potentiellen Wärmeabnahmemenge des Hydrierprozesses von 26.000 MWh gegenübergestellt. Die dafür erforderliche Wasserstoffmenge beträgt 2.000 t pro Jahr.

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass ein kontinuierlicher Hydrierprozess wesentlich wichtiger für den Gesamtkreislauf ist als ein Fokus auf eine „ausgewogene“ Wärmeproduktion. Im weiteren Schritt wurden die beiden favorisierten Standorte der Hydrieranlage auf dem Südhafengelände und dem Gelände der VBH ergänzend hinsichtlich des LOHC-Transports untersucht. Im Wesentlichen sollte der Transport des LOHC dann mittels unterirdischer Pipeline über die Insel erfolgen. Weitere untersuchte Varianten, wie ein Transport über die Insel mit Containern, konnten insbesondere aus touristisch-



Abbildung 4. Das Gelände der Versorgungsbetriebe Helgoland im Nordosten der Insel, Bild: Jakob Martens.



Abbildung 5. Visualisierung der Unterbringung der Hydrieranlage auf dem Gelände der Versorgungsbetriebe Helgoland, Bild: Jakob Martens.

en Gesichtspunkten nicht favorisiert werden. Für die abschließende Erstellung einer Vorzugsvariante musste noch die hafentechnische Machbarkeit auf der Insel Helgoland betrachtet werden.

2.5. Hafentechnische Machbarkeitsstudie Helgoland (Seeseitige Logistik)

Analysiert wurden zwei Transportoptionen für LOHC von Helgoland nach Hamburg. Die Optionen des Transports in Tankcontainern auf Containerschiffen und die Beförderung in Tankschiffen.

Für den Tankschifftransport wurden verschiedene land- und see-seitige Logistikvarianten abgebildet. Für den Umschlag des LOHC über Tankschiffe wurden insgesamt drei Varianten über den Vorhafen (Helgolandkai und Süddamm 2) sowie das Nord-Ost-Bohlwerk betrachtet. Der Umschlag von LOHC-Tankcontainern wird innerhalb von zwei Varianten über den Vorhafen abgebildet, welche sich im Wesentlichen durch die landseitige Logistikkette – über die sogenannte Dreiecksfläche bzw. das VBH-Gelände und die Dreiecksfläche

– unterscheiden.

Die Konzeptionierung der Umschlaglogistik auf Helgoland beschränkt sich wie bereits erwähnt darauf, dass der LOHC-Transport auf Helgoland von den Versorgungsbetrieben zum Südhafengelände ausschließlich per unterirdischer Pipeline erfolgen kann.

Daraus abgeleitet, wurde der optimale Logistikstandort für die Übergabe des LOHC im Vorhafen festgelegt. Hier können dann sowohl der Umschlag mittels Container als auch Mittels Tankschiff erfolgen. Ein exemplarisches Beispiel ist in Abbildung 6 dargestellt.

2.6. Ergebnis: LOHC-Umschlag mit Containerschiffen

Vergleichsweise hohe Betriebskosten werden für den Umschlag von LOHC in Tankcontainern über Containerschiffe erwartet – diese liegen im Vergleich zum Tankschiff bei ca. 150 %. Dies begründet sich im Wesentlichen durch die jährlichen Absetzungen für die Abnutzung, Aufwendungen für Instandhaltung und Reparatur der Container sowie den Betrieb der vorzuhaltenden Umschlaggeräte. Auch die

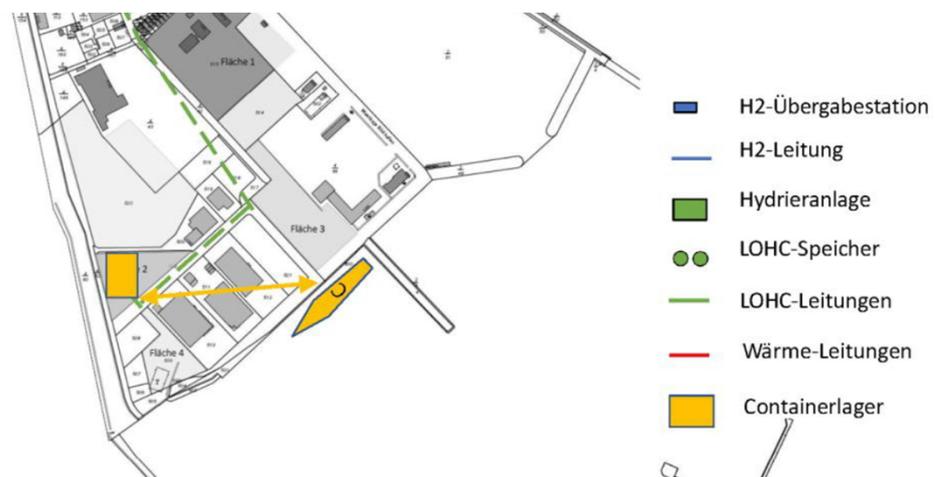


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Logistik mit Containern.



Abbildung 7. Exemplarische Visualisierung der Logistik per Containerschiff im Vorhafen mit Hafemobilkran und Reach-Stacker, Bild: Jakob Martens.

landseitige Logistik ist für die Varianten mit Tankcontainer als herausfordernd zu bezeichnen. Abhängig vom Lagerstandort für die Tankcontainer sowie von der Entfernung und damit dem Transportweg zum Helgolandkai im Vorhafen ist die Akzeptanz Erwartung in der Öffentlichkeit und Wirtschaft ein potenzielles Ausschlusskriterium für die Tankcontainerlogistik. Zudem ist der Flächenverbrauch für die Befüllung und Zwischenlagerung der Container sowie das Handling auf der Kaianlage recht aufwändig. Der Flächenbedarf für den Umschlag liegt bei ca. 5.600m², bei einer avisierten Containermenge von 70 Stück, die im Kreislauf bewegt werden müssen.

2.7. Ergebnis: LOHC-Umschlag mit Containerschiffen

Der Umschlag mittels Tanker ist etwas vorteilhafter als per Container, da wesentlich weniger oberirdische Lagerfläche verloren geht (Annahme: 50 % der erforderlichen Tanks befinden sich unterirdisch,

sodass eine Flächenbilanz von nur 1.000 m² an oberirdischer Fläche verbleibt) und die Handhabung am Helgolandkai im Vorhafen relativ einfach ist.

Mit im Vergleich um ca. 50 % geringerer Investitions- und Betriebskosten gegenüber der Containervariante geht der LOHC-Umschlag über Tankschiffe am Helgolandkai im Vorhafen einher. Darüber hinaus weist diese Variante über alle betrachteten Kriterien und evaluierten Logistikvarianten die beste Gesamtbewertung auf. Eine Herausforderung bleibt jedoch die bereits im Status quo stark verdichtete seeseitige Anlegerfrequentierung im gesamten Vorhafen mit gemeindeeigenen und nichtgemeindeeigenen Hafenanlagen bzw. das Erfordernis zur Abwägung und Regelung von Nutzungsbedarfen am Helgolandkai und darüber hinaus. Letzter Punkt wurde durch eine weiterführende Studie vertieft. In dieser Studie wurde die Erweiterung der Hafenfläche am Helgolandkai analysiert, die den Neubau



Abbildung 8. Visualisierung des LOHC-Umschlags per Tankschiff am Helgolandkai, Bild: Jakob Martens.

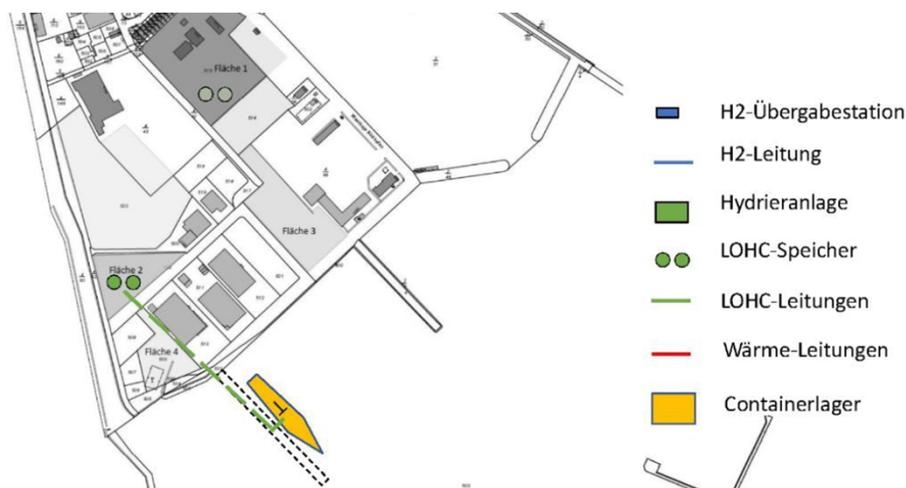


Abbildung 9. Schematische Darstellung der Logistik per Tankschiff am Süddamm 2 mit LOHC-Speicher auf der Dreiecksfläche.

des Fingerpiers „Süddamm 2“ beinhaltet.

Die Investitionskosten für den Süddamm 2 in Höhe von ca. 50 Mio.€ speisen sich im Wesentlichen aus den Kosten für die Errichtung der Fingerpier (ca. 35 Mio.€), aber auch von den erforderlichen Kosten für die Kampfmittlräumung (ca. 10 Mio.€). Hohe Investitionskosten korrespondieren gleichzeitig mit eher hohen periodischen Absetzungen für Abnutzung und in der Folge einer entsprechend hohen Betriebskostenbelastung. Anhand von Erfahrungswerten auf Helgoland ist von einem dauerhaften Instandhaltungsaufwand von ca. 1 Mio.€ pro Jahr auszugehen.

2.8. Standortanalyse Hamburg

Die möglichen Logistikketten, die zuvor auf Helgoland betrachtet wurden, wurden mit den Gegebenheiten in Hamburg reflektiert. Auch hier sind sowohl Tankschiffe als auch Container möglich. Für die im Projekt vorgesehenen Mengen an LOHC (im Kreislauf befinden sich bei einer 12-t- Hydrieranlage ca. 2.000 m³ LOHC) eignet sich die Containerlogistik gut, da es in Hamburg bereits eine existierende Infrastruktur für Container gibt. Es kann so auf höhere Infrastrukturkosten für das Containerhandling sowie für Speicher verzichtet werden. Die Tankschiffösung erweist sich erst bei größeren Mengen (ab 10.000 Jahrestonnen Wasserstoff) als das wirtschaftlichere Szenario. Ab dieser Menge gleichen sich die höheren Investitionskosten für einen Tankschiffhafen mit Speichertanks mit den niedrigeren Umschlagskosten aus. Für die im TransHyDE-Projekt Helgoland betrachteten Mengen ergibt sich über die vollständige Transportkette gerechnet ein Vorzugsszenario für die Containerlogistik mit vorhandener Containerinfrastruktur auf Hamburger Seite.

Dennoch wurde im Hamburger Hafen eine Standortanalyse durchgeführt, die einen potenziellen Standort für ein Importterminal zum Umschlag von Wasserstoff aus Tankschiffen identifiziert hat. Ein solcher Standort muss einerseits über eine ausreichende Wassertiefe, Flächenverfügbarkeit und geeignete Kaianlagen verfügen, andererseits ist auch die Anbindung an das Hinterland und damit Verkehrsinfrastruktur wie Autobahnen, Schienen und die Wasserstoffpipeline

essenziell für einen effizienten Umschlagbetrieb.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, die von einem externen Ingenieurbüro erstellt wurde, konnte die grundsätzliche Machbarkeit eines Umschlagsterminals für LOHC (und andere Derivate) im Hamburger Hafen festgestellt werden – siehe nachfolgender Abschnitt. Während der Durchführung der Machbarkeitsstudie wurde sehr schnell klar, dass für die Wasserstoffmengen, die im TransHyDE-Projekt Helgoland angenommen werden, der Platzbedarf kein begrenzender Faktor ist. Auf Hamburger Seite bietet sich durchaus Skalierungspotential.

Zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz einer Wasserstofftransportkette mittels LOHC wurden Möglichkeiten zur Wärmeintegration aus benachbarten Industrieprozessen untersucht (s. Abschnitt 3.2).

2.9. Fazit der Standortanalyse Helgoland-Hamburg

Die Vorzugsvariante wurde anhand der verschiedenen Studien wie folgt festgelegt:

- Hydrieranlage mit einer Einspeicherkapazität von 12 Tonnen H₂ in LOHC-BT pro Tag (tpd) auf dem Gelände der Versorgungsbetriebe Helgoland, um eine möglichst gleichmäßige Wärmeintegration zu gewährleisten
- Transport des LOHC mittels unterirdischer Pipeline bis zum Südhafengelände
- Umschlag des LOHC am Helgolandkai – vorzugsweise durch eine neu errichtete Pier (Süddamm 2) mittels Container oder Tanker (wobei Tanker bevorzugt werden würden)

Betrachtet man das Ergebnis der verschiedenen Varianten aus Sicht des Standorts Helgoland, so kann LOHC die Wärmeversorgung der Insel sicherstellen (vgl. Abb. 3). Die bauliche und logistische Umsetzung auf der Insel ist möglich. Auf Helgoland ist der Umschlag per Tankschiff dem Containertransport vorzuziehen, möglicherweise wäre mit der Containerlösung nicht die notwendige Akzeptanz in der Bevölkerung zu erlangen.

3

LOHC-Technologie: Hydrier- und Dehydrieranlagen

3.1. Untersuchungen zur Hydrieranlage – auf Helgoland und weltweit

Ein zentraler Bestandteil des TransHyDE-Projekts Helgoland ist die Machbarkeitsstudie zur theoretischen Umsetzung einer Hydrieranlage auf der Insel. Hierbei haben sich im Vorfeld u. a. folgende Fragestellungen ergeben: Wie groß darf die Anlage räumlich sein? Welche Standorte kommen auf Helgoland in Frage? Wo und wie kann das LOHC zwischengelagert werden? Wie können die Anlagen mengenmäßig am besten hochskaliert werden?

Zu Beginn der Studie wurden verschiedene Szenarien der Wasserstoff-Produktion untersucht. Der Wasserstoff-Produzent nannte als Vorzugsvariante eine Produktionsmenge von jährlich 2.000 bis 3.500 Tonnen. Die Kapazität der Hydrieranlage wurde anhand der geplanten Produktionsmenge aus der Elektrolyse definiert, woraus sich eine Anlage in der Größenordnung von 12 t H₂ pro Tag ergab. Da für den Wasserstoff-Produzenten auch kleinere Produktionskapazitäten in Frage kommen, wurde bei der Standortuntersuchung auch eine Hydrieranlage mit 5 t H₂ pro Tag als Alternative in Betrachtung gezogen.

3.1.1. Der Hydrierprozess

Das unbeladene LOHC Benzyltoluol (BT-D) soll auf Helgoland mit Wasserstoff in einer Hydrieranlage (StoragePLANT) beladen werden. Der Prozess der Hydrierung ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. An der Anlage sind zwei Tanks vorhanden, ein Edukt-⁴ sowie ein Produkttank. Die katalytische Reaktion findet im sogenannten Hydrierreaktor statt – dem Herzstück des gesamten Prozesses. Das BT-D wird durch Wärmerückgewinnung vorgewärmt und zusam-

men mit dem vorgewärmten, komprimierten Wasserstoff (ca. 15-30 barg) in den Reaktor befördert. Dort findet die exotherme Reaktion statt: Der Wasserstoff wird chemisch an das Benzyltoluol gebunden und dann auf dem Seeweg mit der vorhandenen Infrastruktur für flüssige Brennstoffe weitertransportiert. Die bei der Hydrierung frei-werdende Wärme kann über einen Thermalölkreislauf und einen Wärmeübertrager abgeführt werden. Verschiedene Wärmenutzungskonzepte werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert.

3.1.2. Flächenbedarfe und Anlagengrößen auf Helgoland

Die Machbarkeitsbetrachtung zur Umsetzung einer Hydrieranlage auf der Insel Helgoland konnte bereits abgeschlossen werden. Als Standorte kommen das Gelände der Versorgungsbetriebe Helgoland (VBH) oder der Südhafen in Betracht. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein internes Modellierungstool entwickelt, um einen besseren Überblick über die technischen Anforderungen bei einer direkten Kopplung der Hydrieranlage an die Windenergieanlage mit integrierter Elektrolyseeinheit zu schaffen.

Außerdem wurden die möglichen Flächenbedarfe für die Hydrieranlage, die auf dem Gelände der VBH erforderlich sind, ermittelt. Die erste Betrachtung des Logistikkonzeptes auf der Insel Helgoland sowie der Abgleich der möglichen Flächenbedarfe mit dem Lageplan des Geländes der VBH haben gezeigt, dass auf der Insel die Rahmenbedingungen bestehen, die grundsätzlich für sowohl die kleinere Hydrieranlage (5 tpd⁵) als auch die größere Anlage (12 tpd) geeignet sind. Es gibt demnach ausreichend Platz für das Anlagengerüst und auch die Lagerung des LOHC-Materials.

⁴ Unbeladenes Ausgangsmaterial BT-D

⁵ Tons per day: Tonnen Wasserstoff pro Tag

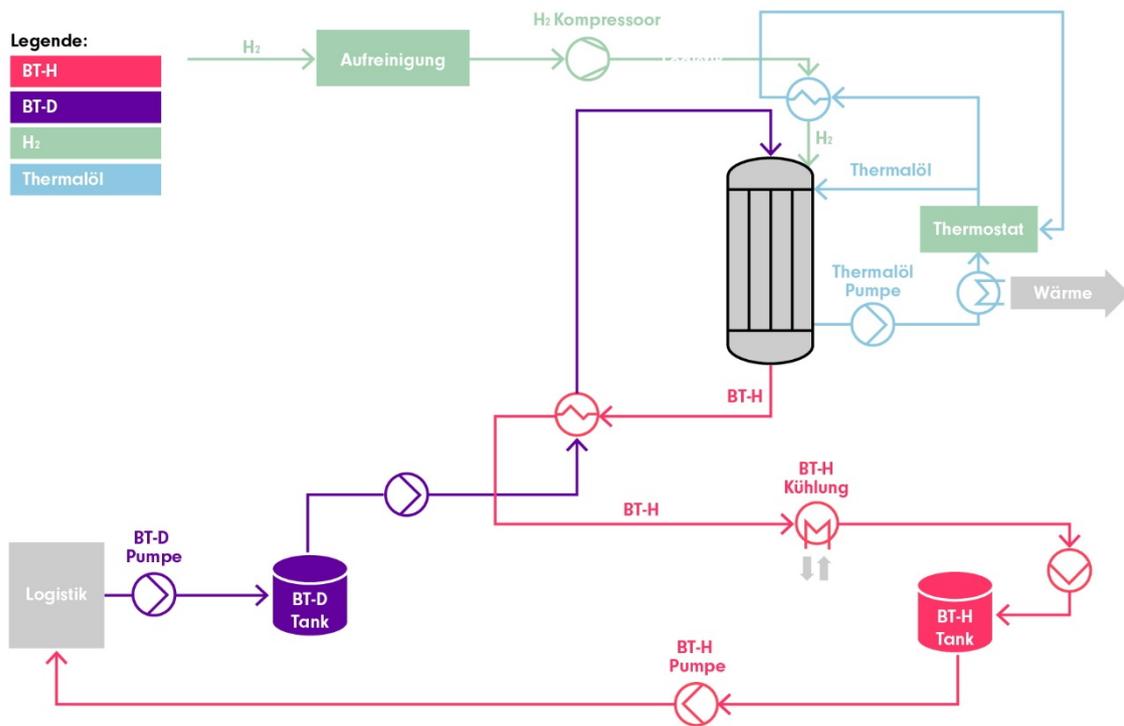


Abbildung 10. Blockschaltbild der StoragePLANT mit Hauptkomponenten und Stoffflüssen von beladenem Benzyltoluol (BT-H), unbeladenem Benzyltoluol (BT-D), Wasserstoff (H₂) und Thermalöl zur Reaktorkühlung.

3.1.3. Wasserstoffmengen-Skalierung für weltweite Standorte

Nach der Machbarkeitsbetrachtung zur Umsetzung der Hydrieranlage wurde der Fokus der folgenden Engineering-Arbeiten auf eine Hydrieranlage mit 24 tpd gelegt. Bei der Entwicklung der Anlage wurden Rahmenbedingungen von Helgoland als hypothetischer Standort verwendet. Gleichzeitig wurden auch weitere Standorte mit ähnlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Die Arbeitsergebnisse tragen dazu bei, eine reproduzierbare und skalierbare Blaupause für weltweite Standorte zu entwickeln.

3.1.4. Vorplanung und Anlagenentwicklung: LOHC-Hydrieranlage

Im Rahmen des Pre-Engineerings⁶ wurde zuerst eine Basis of Design⁷ erstellt. Schwerpunkte bei der Entwicklung der Hydrieranlage waren ein niedriger Betriebsdruck, eine erhöhte Anlagendynamik und eine neue Kühlmethode für den Reaktor. Um diese technischen Anforderungen zu erfüllen, wurden verschiedene Reaktorkonzepte verglichen und weitere Schlüsselkomponenten untersucht. Dabei war eine Vielzahl von Kriterien zu berücksichtigen, wie z. B. Komplexität des Designs, Anlagenbau und Betrieb, die benötigte Grundfläche, Investitions- und Betriebskosten, Verfügbarkeit der Komponenten auf dem Markt usw.

Die Pipeline verbindet die Wasserstoffherzeugung mit der Hydrieranlage. Zudem wirkt das Pipelinevolumen als Puffer für die Hydrieranlage. Die erforderliche Dynamik der LOHC-Hydrieranlage hängt stark vom Durchmesser und der Länge der installierten Pipeline ab, die die Wasserstoffherzeugung und die Hydrierung voneinander entkoppelt. Außerdem spielt neben der installierten Länge auch die Differenz zwischen Auslegungsdruck der Pipeline und Reaktionsdruck der Hydrierung eine Rolle. Je größer die Differenz ist, desto stärker wirkt

die Pipeline als Puffer. Neben der maximalen Wasserstoffreaktionskapazität gibt es weitere Freiheitsgrade der LOHC-Hydrieranlage, die variiert werden können. So lassen sich beispielsweise die minimale Teillast, die maximale Laständerungsgeschwindigkeit bezogen auf den Massenstrom sowie die Art der möglichen Betriebspunkte (diskontinuierlich oder kontinuierlich) variieren. Um mit der konkreten Auslegung beginnen zu können, müssen vorher die Randbedingungen festgelegt werden.

Diese Randbedingungen ergeben sich aus den konkreten Standortbedingungen auf der Insel Helgoland. Es wurden die Windprofilen über mehrere Jahre in stündlicher Auflösung ausgewertet. Für die Teillast der Anlage hat sich der Bereich zwischen 33 % und 100 % für die betrachteten Fälle als ausreichend erwiesen. Um die Anforderungen an die Dynamik der Hydrieranlage weiter zu erhöhen und ggf. Grenzen zu identifizieren, wurde auf die Wahl diskreter Betriebspunkte verzichtet und stattdessen eine kontinuierliche gleitende Betriebspunktwahl im Teillastbereich angestrebt.

Dadurch konnte die Dimensionierung der Wasserstoffpipelines klein gehalten werden bzw. auf eine Pipeline oder einen Druckspeicher gegebenenfalls verzichtet werden. In der folgenden Abbildung 11 wurde das Windprofil direkt ausgewertet und die daraus resultierende Laständerung zwischen zwei Datenpunkten bzw. innerhalb einer Stunde berechnet. Dargestellt ist die Häufigkeit der jeweiligen Laständerung (prozentuale Änderung des Wasserstoffmassenstroms pro Stunde).

In der folgenden Abbildung 12 sind die gleichen Daten in einer anderen Form, nämlich als kumulative Verteilung, dargestellt. Um 95 % der auftretenden Fälle abzudecken, muss die LOHC-Anlage mindestens für eine Laständerung von 30 % pro Stunde, bezogen auf den

⁶ Pre-Engineering: Vorplanung

⁷ Basis of Design (BOD): Die wesentlichen Eigenschaften werden in Bezug auf Typ, Funktion, Abmessung, Leistung im Betrieb, physikalische Eigenschaften, Aussehen und andere Merkmale festgelegt.

Lastgradienten

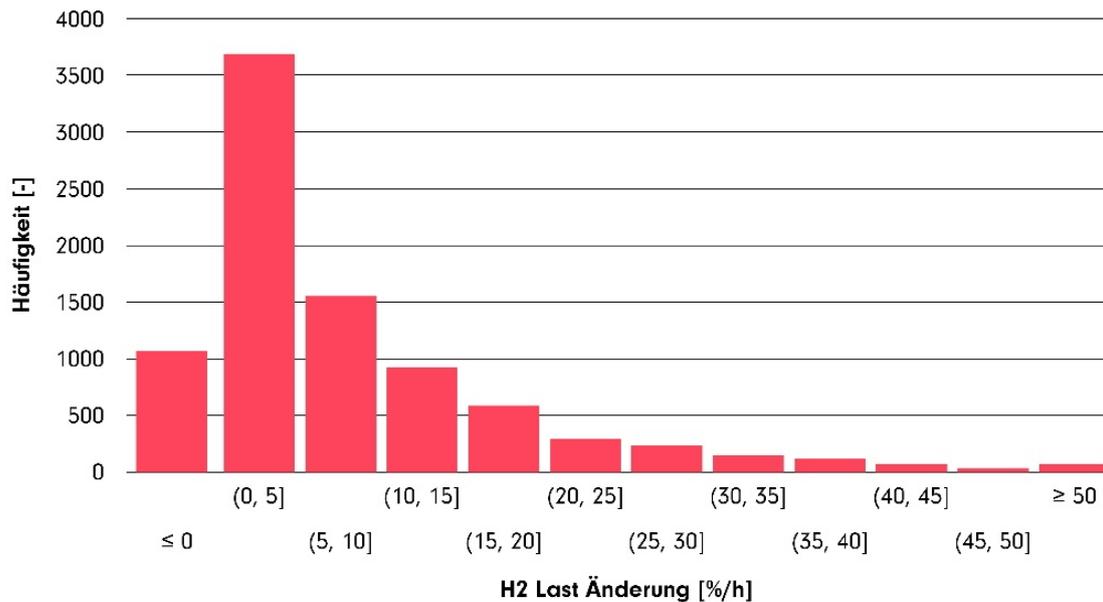


Abbildung 11. Häufigkeit der Laständerung des Wasserstoff-Massenstroms.

Eingangsmassenstrom von Wasserstoff und unbeladenem LOHC, ausgelegt werden. Da in diesem Projekt die Grenzen der Anlagendynamik identifiziert werden sollen, wird dies als erster Ausgangspunkt der Anforderung an die Anlagendynamik formuliert. Für die überschüssigen 5 % der Fälle, welche eher selten auftreten, müssen Lösungen gefunden werden.

Da in den hier gezeigten Betrachtungen das Windprofil direkt ausgewertet wurde, müssen sowohl Stromerzeugung (Windkraftanlagen), als auch Wasserstoff-Erzeugung (Elektrolyseur) und Wasserstoffspei-

cherung (Pipeline) einbezogen werden. Je nachdem welche Dynamik vom Elektrolyseur realisiert werden kann, muss ein alternativer Wasserstoff- oder Stromabnehmer identifiziert werden.

Angenommen der in diesem Szenario Helgoland geplante Elektrolyseur könnte die Dynamik des Windprofils direkt abbilden, müsste die geplante Pipeline diese überschüssigen Volumina aufnehmen können. Alternativ könnten beispielsweise weitere H₂-Abnehmer identifiziert werden oder der Wasserstoff thermisch verwertet werden.

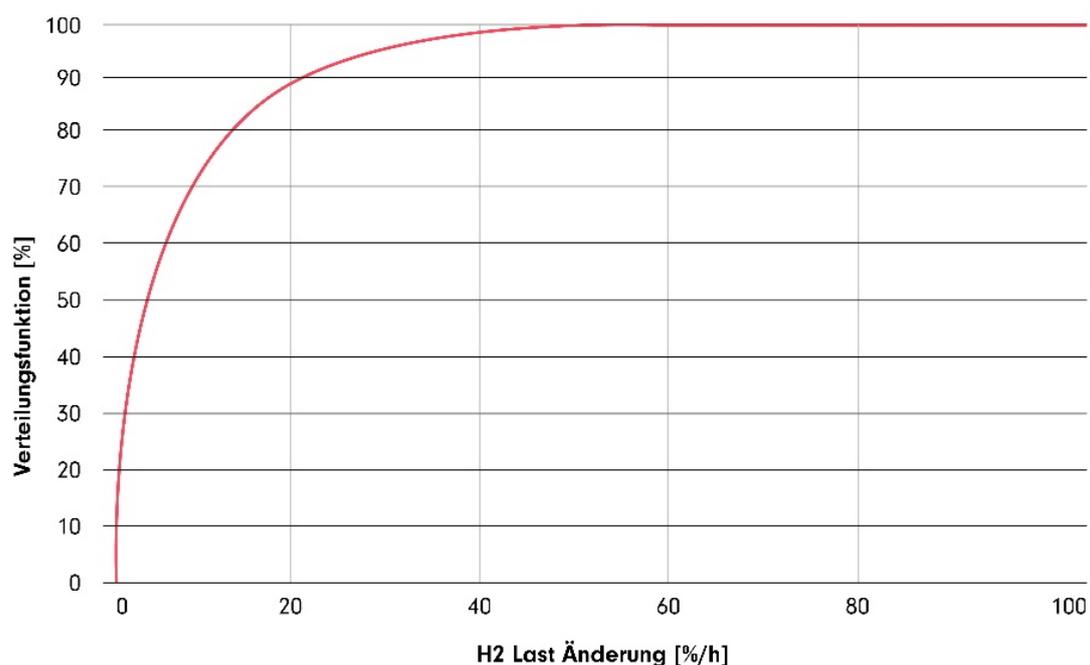


Abbildung 12. Kumulative Verteilung der Laständerung des Wasserstoff-Massenstroms.

Erste Ergebnisse aus diesem Engineering-Arbeitspaket (Basic Engineering) zeigen, dass die LOHC-Hydrieranlage die vorgegebenen dynamischen Anforderungen im 95 %-Rahmen erfüllen und mit der fluktuierenden Wasserstoffbereitstellung umgehen kann.

Für die konkreten Engineering-Arbeiten wurden zuerst verschiedene Optionen bewertet, um anschließend mit einer favorisierten Option weiterzuarbeiten. Kriterien für die Evaluation waren Capex, Opex, Platzbedarf, Technologiereife sowie Komplexität. Beispielsweise wurde das Reaktorkonzept bewertet, der Reaktionsdruck in Kombination mit dem Pipelinedruck gewählt, sowie verschiedene Kühlmethoden evaluiert.

Aufbauend auf die konzeptionellen Arbeiten wurde der Reaktor ausgelegt und ein Engineering Data Sheet (EDS) erstellt. Aufbauend auf dem Reaktor EDS wurde ein Process Flow Diagramm (PFD) und eine Streamtable aufgesetzt.

Der Fokus bei den Arbeiten wurde auf die Funktion der ‚Blaupause‘ für weltweite Standorte gesetzt. Daher wurden bewusst einige Randbedingungen offengelassen, um eventuelle Grenzen des Anlagen-designs aufzeigen zu können. Im weiteren Verlauf wurde das PFD weiter ausdetailliert und schlussendlich ein Process and Instrumentation Diagram (PID) erstellt. Begleitend dazu wurde eine Prozessbeschreibung erstellt, sowie eine Gefahrenidentifikation durchgeführt. Anschließend wurden die Großkomponenten spezifiziert und ein erstes Layout erstellt. Dieses Layout kann zukünftig für verschiedene Standorte spezifisch angepasst werden.

3.1.5. Vorplanung und Anlagenentwicklung: LOHC-Dehydrieranlage

Die grundsätzliche Funktionsweise einer Dehydrieranlage (Release-

PLANT) ist im Blockschaltbild in Abbildung 13 dargestellt. Über die Logistikkette wird die Anlage mit dem beladenen Benzyltoluol (BT-H) versorgt. Dieses wird zunächst in einem Speichertank zwischengespeichert, bevor es dann über einen Wärmetauscher zur Vorwärmung in den Dehydrierreaktor gepumpt wird. Dort findet schließlich bei hohen Temperaturen bis 300 °C sowie niedrigen Drücken von 2-3 barg die katalytische Freisetzung des Wasserstoffs statt.

Diese Dehydrierreaktion ist endotherm und benötigt Wärme, welche dem Reaktor über einen Thermalölkreis mit einem Thermostat zur Regelung zugeführt wird. Als heißer Produktstrom verlassen der freigesetzte Wasserstoff sowie das nun entladene BT-D den Reaktor und werden zur Vorwärmung des Edukts über den Wärmetauscher verwendet. Nach der anschließenden Phasentrennung wird der Wasserstoffstrom weiter aufbereitet, um die vom Abnehmer geforderten Werte zu Temperatur, Reinheit und Druck zu erfüllen und schließlich dem Abnehmer übergeben. Das BT-D wird hingegen abgekühlt und in einem Produkttank gespeichert, bis über die Logistik ein Abtransport zur StoragePLANT erfolgt.

3.2. Hydrierungs- und Dehydrierungsprozess: Überschusswärme versus Wärmebedarf – Untersuchungen zur Wärmeintegration

Während des Hydrierungsprozesses entsteht Wärme (etwa 9 kWh/kg H₂ bei 250 °C), für den Dehydrierungsprozess wird Wärme benötigt (etwa 11 kWh/kg H₂ bei 300 °C). Zum Thema „Wärmeintegration“ wurden Möglichkeiten untersucht, wie die überschüssige Wärme auf Helgoland und anderen Standorten genutzt werden könnte und welche Optionen es gibt, Wärme dem Dehydrierungsprozess zuzuführen.

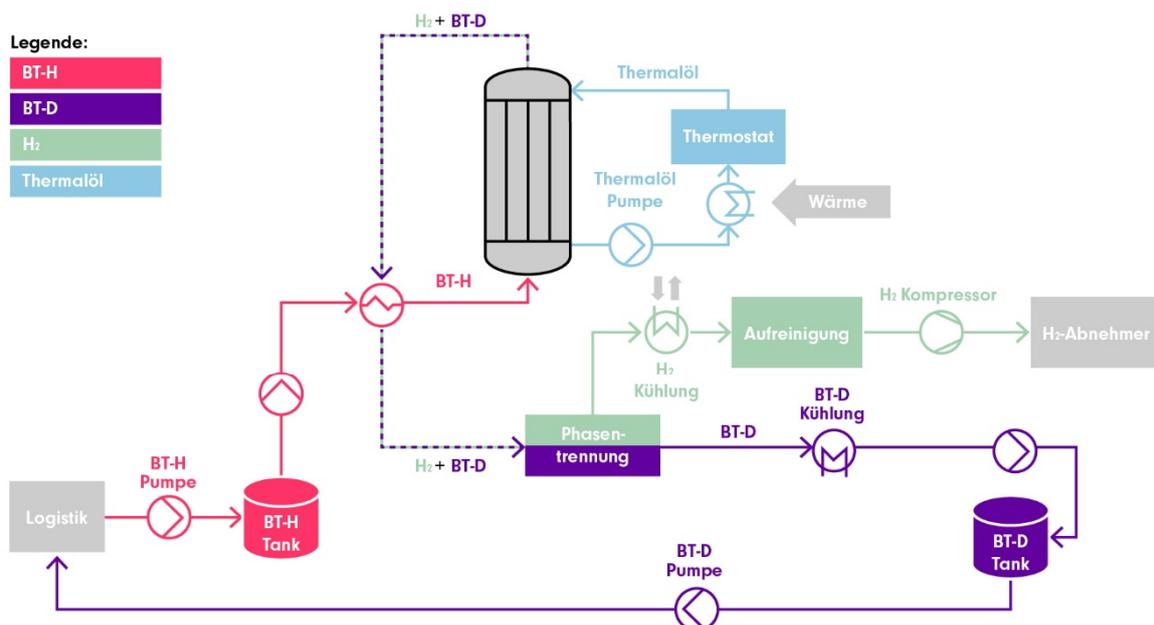


Abbildung 13. Blockschaltbild der ReleasePLANT mit Hauptkomponenten und Stoffflüssen von beladenem Benzyltoluol (BTH), unbeladenem Benzyltoluol (BT-D), Wasserstoff (H₂) und Thermalöl zur Reaktorbeheizung.

3.2.1. Wärmeintegration auf Helgoland

Externe Fachberater haben 2022 ihre Analysen abgeschlossen und das Konzept für die Verwendung der Abwärme aus der Hydrierung finalisiert.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurde festgestellt, dass auf Helgoland eine Netzeinbindung der Prozesswärme der Hydrierung in das Fernwärmenetz möglich ist. Die Wärmeeinbindung muss nicht zwingend am Kraftwerk selbst erfolgen, sondern z. B. auch über einen Einspeisepunkt auf dem Südhafengelände, sollte dort die Hydrieranlage aufgebaut und umgesetzt werden. Diese Einschätzung gilt sowohl für eine 5-tpd-, als auch für eine 12-tpd-Hydrieranlage.

Bei einer Einbindung der Wärme auf dem Südhafengelände kommt die Machbarkeitsstudie zu dem Schluss, dass der technische und finanzielle Aufwand der Einbindung vergleichsweise hoch ist. Eine Einbindung der Prozesswärme direkt am Kraftwerk der VBH und damit am bestehenden Einspeisepunkt wird bevorzugt.

Im Winter und in den Übergangszeiten kann der Wärmebedarf (s. Abb. 3) der Insel zum größten Teil durch die Nutzung der LOHC-Wärme gedeckt werden. Es wird ein Nutzungsgrad von 90 % erreicht. Aufgrund der fluktuierenden Windproduktion und der geringen Speicherfähigkeiten muss zeitweise auf die heizölbetriebenen Kessel zurückgegriffen werden, um den Wärmebedarf der Insel Helgoland vollständig decken zu können. Im Sommer produziert die LOHC-Anlage deutlich mehr Wärme, als Helgoland benötigt.

Trotzdem ist auch im Sommer noch der Einsatz von zusätzlicher Wärmeenergie (z. B. Heizölkessel) erforderlich. Dies liegt daran, dass bei Flaute und windschwachen Zeiten die LOHC-Hydrieranlage nicht genügend Wärme produziert, um den Wärmebedarf der Insel decken zu können. Die Kapazität des Wärmespeichers reicht nur bedingt, um Flaute und windschwache Zeiten auszugleichen. Bei windstarken Zeiten wird der Wärmespeicher durch die LOHC-Wärme sehr schnell gefüllt und kann keine weitere Wärme mehr aufnehmen. In dieser Zeit muss die überschüssige Wärme über den elektrischen Kühler der LOHC-Anlage ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Außerdem hat die Standortuntersuchung gezeigt, dass die Einbindung der Prozesswärme direkt am Kraftwerk und damit am bestehenden Einspeisepunkt die bevorzugte Lösung ist, im Vergleich

zu anderen möglichen Einspeisungspunkten.

3.2.2. Wärmeintegration für andere Standorte

Im weiteren Projektverlauf wurde geprüft, welche besonderen Anforderungen für die Wärmeintegration entstehen, wenn eine größere Hydrieranlage zum Einsatz kommt als die bisher untersuchten Anlagengrößen mit Tagesleistungen von 5 bzw. 12 tpd Wasserstoffverarbeitung. Dabei werden standortbezogene Randbedingungen stark abstrahiert. Ziel ist es, konzeptionell die besonderen Anforderungen aufzuzeigen, die bei einem höheren Abwärmeaufkommen entstehen würden. Damit werden die Grundlagen für weltweite Standorte geschaffen und die Skalierbarkeit in Richtung größerer Hydrieranlagen modellhaft nachgewiesen.

Es wurden dabei verschiedene Netz-Vorlauftemperaturen und Rohrdurchmesser für die Wärmeauskopplung untersucht und für die jeweiligen Anlagenkonzeptionen und Anforderungen der Wärmeabnehmer (z.B. Fernwärmenetz zwischen 75 °C und 100 °C) konfiguriert. Im Ergebnis wurden nachgewiesen, dass die anlagentechnische Integration in eine skalierte Hydrieranlage ohne weiteres möglich ist und sich auch mit größeren Anlagen eine schnellere Amortisation erreichen lässt.

3.2.3. Nutzung der Wärme aus der LOHC-Hydrierung in alternativen Konzepten

Wie zuvor dargelegt, wurde die Möglichkeit der Nutzung von Reaktionswärme aus der LOHC-Hydrierung für die kommunale Wärmeversorgung der Insel Helgoland untersucht. Für einen Markthochlauf mit Projekten in denen H_2 großskalig produziert und in BT eingespeichert werden kann, übersteigt die verfügbare Menge an Prozesswärme aus der Hydrieranlage die benötigte Wärmemenge im kommunalen Wärmenetz in Helgoland deutlich. Daraus resultiert das Potenzial, diese zusätzliche Wärme in alternativen Konzepten zu nutzen, die erarbeitet und wissenschaftlich untersucht werden sollen. Das Ziel ist, zwei verschiedene Szenarien der Wärmenutzung bei einer Hydrieranlage auf konzeptioneller Ebene zu untersuchen (Abbildung 14).

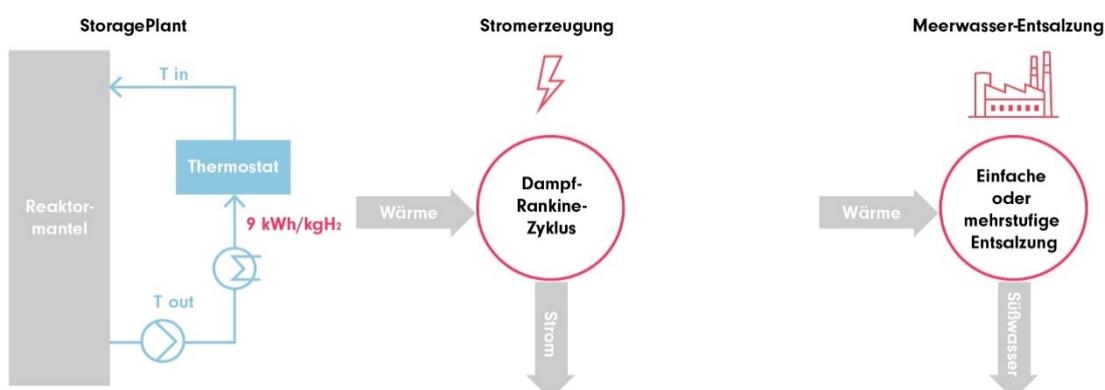


Abbildung 14. Möglichkeiten zur Abwärmenutzung aus der StoragePLANT.

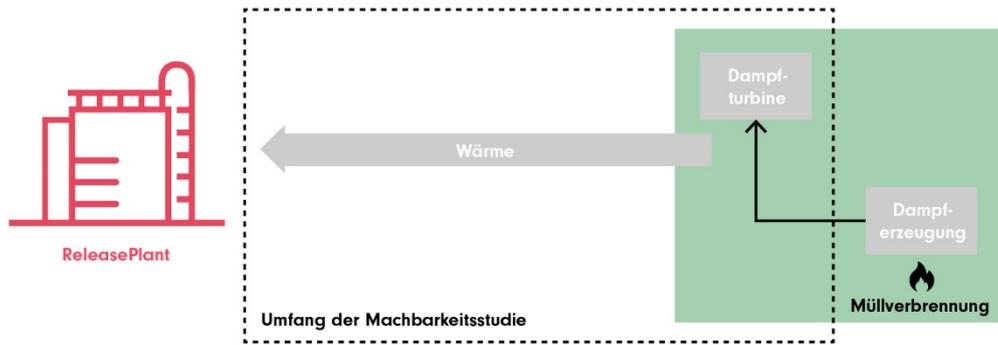


Abbildung 17. Umfang der Machbarkeitsstudie: Konzept zur Wärmeauskopplung aus der Müllverbrennungsanlage und Wärmetransport zur ReleasePLANT.

3.2.4 Wärme für den Dehydrierungsprozess

Parallel wurden Untersuchungen durchgeführt, ob und wie Abwärme aus anderen Industrieprozessen für die Dehydrieranlage genutzt werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass es in Häfen ggf. ein Potenzial dafür gibt: Ein Müllverbrennungskraftwerk wurde als eine der möglichen Wärmequellen für die Dehydrieranlage identifiziert.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden daher technische und energetische Randbedingungen für den Betrieb einer ReleasePLANT am Standort eines Müllverbrennungskraftwerks untersucht. Das zu untersuchende Konzept war die Auskopplung von Heißdampf aus dem Kraftwerkssystem, um mit der Wärme des Dampfes den endothermen Dehydrierprozess der ReleasePLANT zu versorgen. Hierbei wurde die Integration der Anlage in das Kraftwerkssystem, die technische Auslegung wichtiger Komponenten und eine Aufstellungsplanung entwickelt, sodass die Ermittlung von Investitionskosten und weiterer wirtschaftlicher Kennzahlen möglich war.

Bei der Machbarkeitsanalyse wurde der Energiebedarf der ReleasePLANT bei variablen Betriebspunkten als Ausgangspunkt vorgegeben. Gleichzeitig wurde besonders auf den Betrieb des Müllverbrennungskraftwerks geachtet. Dabei wurden Themen wie z. B. die Erzeugung elektrischer Energie und Fernwärmeauskopplung des Kraftwerks sowie der Eigenbedarf des Kraftwerks sowohl im Sommer als auch im Winter analysiert. Das Ziel war eine optimale Bereitstellung des Wärmebedarfs der ReleasePLANT im Zusammenspiel mit dem Kraftwerk zu finden, die Prozesseffizienz des Kraftwerks durch die Wärmeintegration mit der ReleasePLANT zu erhöhen und die Wertschöpfungskette der Müllverwertung zu erweitern.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Integration der Wärme aus dem Müllverbrennungskraftwerk in den Dehydrierungsprozess technisch ohne großen Aufwand umsetzbar ist. Bei der Auswahl von z. B. Wärmetauschern konnte man sich sogar an Erfahrung mit konventioneller Technik bzw. Komponenten der Müllverwertungsindustrie anlehnen.

Der von der Wärmeintegration verursachte zusätzliche Capex und Opex sind minimal wegen des relativ kleinen Umsetzungsaufwands. Aber es ist wichtig, neben dem Capex und Opex auch potenzielle Opportunitätskosten des Wärmelieferers zu berücksichtigen. Abbildung 18 zeigt die Kostenanteile des in der Studie abgeschätzten Wärmepreises bei einer Wärmeauskopplung aus dem betrachteten Müllverbrennungskraftwerk. Der Wärmepreis aus der Müllverbrennung wird hierbei maßgeblich zu über 90 % von den Opportunitätskosten des Kraftwerks beeinflusst. Diese sind jedoch sehr stark von den gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Energiemarktentwicklung abhängig. Deswegen ist es auf jeden Fall sinnvoll, in einem Umsetzungsprojekt die gesetzlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen sowie deren potenziellen Einfluss auf die möglichen Opportunitätskosten genauer zu analysieren und einen tiefgehenden Vergleich zu rein elektrischer Beheizung mit günstigem grünem Strom (PPA⁸) durchzuführen.

Für eine umfassende Bewertung des Wärmekopplungskonzepts ist zudem die Bestimmung des CO₂-Fußabdrucks der Überschusswärme des Müllverbrennungskraftwerks notwendig. Diese wird in weiteren Projektarbeiten anhand der aktuellen EU-Geszentwürfe untersucht.

Zusammensetzung Wärmepreis

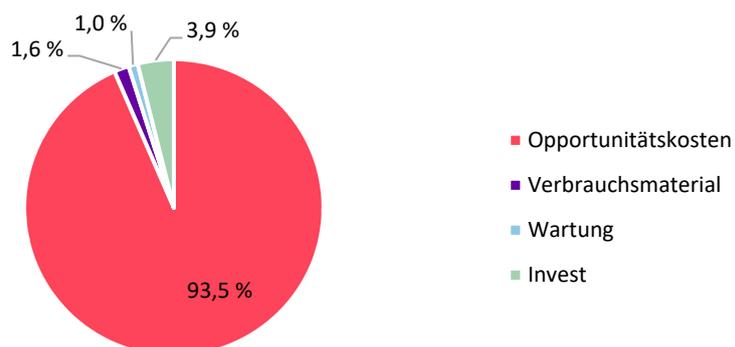


Abbildung 18. Zusammensetzung des Wärmepreises bei Wärmeintegration aus dem Müllverbrennungskraftwerk.

⁸ Power Purchase Agreement

4

Materialforschung in Verbindung mit LOHC und Wasserstoff

Im TransHyDE-Projekt Helgoland liegt ein Großteil der Forschungsleistung beim *Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM*. Die Forschungsthemen lassen sich in drei Bereiche gliedern:

- Tankkonzepte und geeignete Materialien für die LOHC-Infrastruktur: LOHC kann bereits heute mit bestehender Infrastruktur von flüssigen Kraftstoffen transportiert werden. Für einen zukünftigen Aufbau des Wasserstofftransports in großem Maßstab ist jedoch von großem Interesse, welches Optimierungspotenzial durch neue Leichtbaukonzepte oder Werkstoffwahl erschlossen werden kann.
- Zustandsüberwachung von LOHC und Tanks mit Sensoren und Drohnen: Das LOHC-BT ist eine klare bis gelbliche Flüssigkeit, der man nicht eindeutig ansieht, inwieweit sie mit Wasserstoff beladen ist. In der Transportkette sind daher schnelle, inlinefähige Analyseverfahren gefragt, um die Qualität sicherstellen zu können. Neben der Überwachung des LOHC ist auch die der Tanks von Interesse, um die Sicherheit zu gewährleisten und gleichzeitig eine möglichst lange Nutzungsdauer im Sinne der Nachhaltigkeit zu erreichen. Diesbezüglich ist die Einbeziehung von auf künstlicher Intelligenz basierenden Technologien in die Tanküberwachung ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklung.
- Druckwasserstoff – ökologische Aspekte, Permeation und Versprödung: Bevor der Wasserstoff gebunden an LOHC transportiert werden kann, muss er zunächst als Druckwasserstoff per Pipeline vom Elektrolyseur auf der Windenergieanlage zur Hydrieranlage auf Helgoland gelangen. Wegen dieses Transports durch geschützte Meeresgebiete vor der Insel erfolgen Untersuchungen und Entwicklungen bezüglich der Nachhaltigkeit von

Korrosions- und Bewuchsschutz. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Permeation von Wasserstoff durch Metalle, der ggf. resultierenden Wasserstoffversprödung und dem Schutz durch neu entwickelte Beschichtungen.

4.1. Tankkonzepte und geeignet Materialien für die LOHC-Infrastruktur

In diesem Abschnitt wird zunächst ein LOHC-spezifisches Tankkonzept vorgestellt. Anschließend wird die Eignung verschiedener Werkstoffe betrachtet, wobei es sowohl um Materialien für die Tankwand als auch um Dichtstoffe und Klebstoffe geht. Für Klebverbindungen in diesem Kontext werden Fügekonzepte skizziert.

4.1.1. Innovatives Konzept für einen LOHC-Tank mit Innenschwimmdecke

Im Transportkreislauf des LOHC müssen sowohl mit Wasserstoff beladenes LOHC-H und unbeladenes LOHC-D transportiert und gespeichert werden. Aktuell werden daher bei derzeit verfügbaren Tanksystemen immer zwei Tanks benötigt, die separat gefüllt bzw. abgepumpt werden. Da bei einem Umtankprozess die Gesamtmenge an LOHC konstant ist, sind die beiden Tanks in Summe halb leer. Ziel der neuen Tankkonstruktion ist es, die Zeit und den Platz, die für den LOHC-Umschlag benötigt werden, zu halbieren. Der Ansatz dabei ist, beide Stoffe in einem einzigen Tank unterzubringen. Zur Trennung wird der Tank mit einer beweglichen Innenschwimmdecke ausgerüstet. Sie teilt den Tank in zwei Räume und bewegt sich mit der Füllhöhe mit. Während also das LOHC-D abgepumpt wird, kann zur selben Zeit LOHC-H eingefüllt werden. Die Schwimmdecke funktioniert allein durch den Druck, der durch das Abpumpen und Befüllen

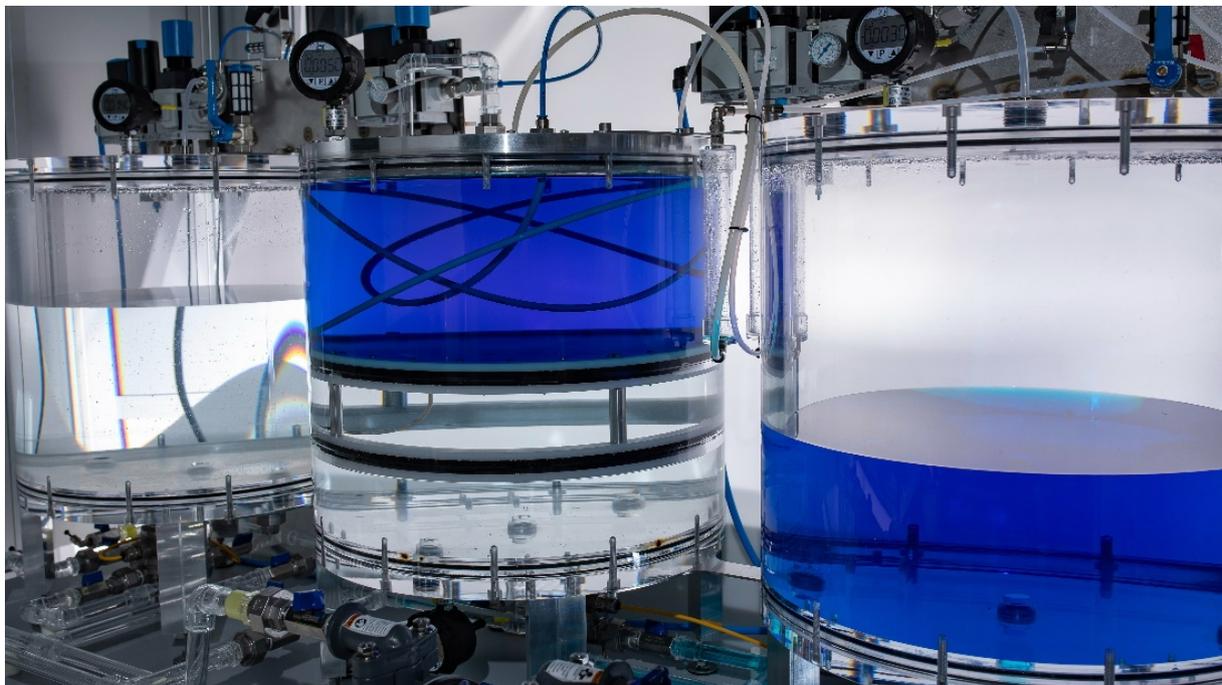


Abbildung 19. Transparenter Tankdemonstrator mit beweglicher Innenschwimmdecke.

entsteht, und wird nicht mechanisch angetrieben. Für dieses Konzept wurde 2023 ein Tankdemonstrator mit drei 60-Liter-Behältern aufgebaut (Abbildung 19). Für die Tankwand wurde im Demonstrator Acrylglas verwendet, um die Bewegungen der Innenschwimmdecke optimal beobachten zu können. Die Betriebsversuche zur Demonstration von Tankprozessen sind erfolgreich und zeigen Dichtigkeit sowie steuerbare Fördermengen.

Die Innenschwimmdecke muss an den Rändern dicht abschließen, damit sich beladenes und unbeladenes LOHC nicht vermischen. Zudem muss sie sich gleichmäßig mit wenig Reibung auf und ab bewegen können, damit sie sich nicht verkeilt oder der Materialabrieb zu stark ist. Dies bedeutet einen Balanceakt zwischen Stabilität und Flexibilität. Eine Minimierung der Reibung wurde durch die Beschichtung der Schlauchdichtung mit den plasmabasierten Beschichtungen Friction^{PLAS}® und Friction^{PLAS}® black erzielt. Durch die Beschichtung lässt sich die Schwimmdecke wesentlich leichter und vor allem ruckfrei bewegen. Darüber hinaus wurden die Schlauchdichtungen der Innenschwimmdecken hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber LOHC-H und LOHC-D getestet und geeignete Dichtungsmaterialien ausgewählt.

4.1.2. Eignung von Materialien für die LOHC-Infrastruktur: Tankmaterialien

Beständigkeit

Die Beständigkeit des Materials in langjährigem Kontakt mit LOHC ist nicht nur für die Schlauchdichtungen beim neuen Tankkonzept relevant, sondern allgemein bei der Wahl optimaler Materialien für die Tankwand, für weitere Dichtungen an Übergangsstellen oder als Klebstoffe. Zunächst soll im Folgenden auf Materialien für die Tankwand oder ihre Innenauskleidung eingegangen werden.

Im Sinne eines schnellen Aufbaus der Wasserstofftransportinfra-

struktur liegt hierbei der Fokus nicht auf der Materialentwicklung, sondern der Untersuchung von etablierten Materialien. Beim Bau von Tanks oder Behältern, die keinen besonders hohen Drücken standhalten müssen, kommen Stahlwerkstoffe, glasfaserverstärkte Kunststoffe und Thermoplaste in großem Umfang zum Einsatz. In bisherigen Anwendungen des Wasserstofftransports per LOHC wurden Stahltanks eingesetzt, deren grundsätzliche Eignung festgestellt wurde. Aktuell laufende Untersuchungen mit Stahl behandeln Detailfragen wie z. B. zu Wechselwirkungen: Tritt bei langfristigem Kontakt des Stahls mit dem LOHC Korrosion in messbarem Umfang auf? Kommt es zu relevanten Veränderungen des LOHC?

Die Beständigkeitsuntersuchung an Kunststoffen erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurden Proben etlicher Materialien über zwei Wochen bei 80 °C im LOHC ausgelagert, wobei die Temperatur um 30 °C höher gewählt ist als die vorgesehene maximale Temperatur des LOHC im Tank, um Transport- und Degradationsprozesse zu beschleunigen. Die Proben wurden u. a. hinsichtlich Änderungen von Masse und Biegesteifigkeit untersucht. Nachdem hierdurch aussichtsreiche Kandidaten unter den Materialien identifiziert wurden, erfolgte ein 16-wöchiger Tauchversuch nach DIN EN 13121-2 bei 50 °C.

Eine sehr gute Beständigkeit gegenüber LOHC zeigte eines von zwei getesteten Vinylesterharzen, das als Matrixmaterial für einen GFK-Tank (glasfaserverstärkter Kunststoff) eingesetzt werden kann. Will man einen Tank aus einem nicht hinreichend beständigen Material bauen, benötigt man eine geeignete thermoplastische Innenauskleidung. In den Tests zeigte PVDF eine ausreichende Beständigkeit für diese Anwendung. Kostengünstigere Innenauskleidungsmaterialien wie PVC erwiesen sich als ungeeignet. Die als Tankmaterial untersuchten Thermoplaste PE und PP zeigten nur eine mäßige Beständigkeit. Die Publikation der Ergebnisse der Beständigkeitsuntersuchungen soll bis Ende 2024 erfolgen.

Permeation

Da Kunststoffe eine erheblich höhere Durchlässigkeit als Stähle aufweisen, wurden anhand von Literaturdaten Abschätzungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Permeation verschiedener Stoffe durch die Tankwand hinreichend gering ist. Die Berechnungen zeigten, dass die aus der Umgebung durch die Tankwand eindringende Menge an Sauerstoff für den Hydrier- und Dehydrierprozess unkritisch ist. Die Permeation von Wasserstoff aus dem Tank hinaus in die Umgebung ist hinsichtlich Brand- und Explosionsschutz unerheblich gering, sofern der Tank im Freien steht. Mit einer maximal möglichen Freisetzung von weniger als 0,002 % des transportierten Wasserstoffs liegen die Verluste während des Transports um mehrere hundert bis mehrere tausend Mal unter den Schätzungen für den Transport von Druck- oder Flüssigwasserstoff (E4tech, 2019), so dass sie wirtschaftlich und in Bezug auf die indirekte Wirkung von Wasserstoff als Treibhausgas vernachlässigbar sind.

Mechanische Anforderungen und Leichtbau

Zum Vergleich der Tankmaterialien hinsichtlich der mechanischen Anforderungen wurden verschiedene Materialkombinationen und Bauarten betrachtet (Stahl: DIN EN 14015, DIN EN 13445-3; GFK: DIN EN 13121-3; Thermoplast: DVS-Richtlinie 2205-2) sowie zwei Tankgrößen. In Auslegungen exemplarischer Tanks wurden Belastungen in Form von Druck, Wind, Schnee und Temperatur berücksichtigt. Rein thermoplastische Tanks sind für die LOHC-Lagerung in großem Maßstab schlecht geeignet, hingegen sind sowohl Tanks aus Stahl als auch aus GFK praktikabel. Bei den GFK-Tanks erwies es sich als günstiger, ein Matrixmaterial mit hoher LOHC-Beständigkeit zu wählen, als durch eine Innenauskleidung für die Beständigkeit zu sorgen. GFK-Tanks sind bei gleichen Anforderungen rund 20 % bis 40 % leichter als Stahl tanks, so dass der Leichtbau bei mobilen LOHC-Tanks (Schiff, Bahn, LKW) deutliche Treibstoffersparnisse ermöglicht. Für einen umfassenderen Vergleich der Alternativen Stahl tank und GFK-Tank hinsichtlich der Nachhaltigkeit wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt, um die Unterschiede zu quantifizieren.

Für das Szenario eines 700 m³ großen, stationären Tanks wies die Bilanz des Stahl tanks geringere CO₂-Emissionen auf als die des GFK-Tanks, sofern bei der Stahlherstellung mindestens 75 % recycelter Stahl verwendet wird. Für den Fall eines per LKW transportierten Tankcontainers war das Ergebnis hinsichtlich Fertigung und End-of-Life ähnlich, wurde aber mehr als kompensiert durch den Effekt des geringeren Kraftstoffverbrauchs beim Transport. In der Gesamtbilanz sparte der mobile LOHC-Tank aus GFK dadurch bei 2 t Tankmasse mehr als 6 t CO₂-Äquivalente gegenüber der Stahlvariante ein, was in der Größenordnung der Emissionen infolge der GFK-Herstellung liegt, also keineswegs vernachlässigbar ist.

Die Masse des transportierten LOHC ist größer als die des leeren Tanks, beispielsweise wiegt ein 25 m³ Tankcontainer aus Stahl typischerweise etwas mehr als 3 t und fasst knapp 22 t LOHC-H. Die Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen durch den Leichtbau sind folglich begrenzt, die größte Wirksamkeit hat weiterhin eine Reduktion des Energie- bzw. H₂-Bedarfs auf Verbraucherseite.

4.1.3. Kleb- und Dichtstoffe in Tanks und Peripherie

Beständigkeit

Die Untersuchung der Beständigkeit gegenüber LOHC ist nicht nur für die im vorangehenden Abschnitt betrachteten Kunststoffe als Werkstoff für die Tankwand essentiell, sondern gleichermaßen für Dicht- und Klebstoffe, die am Tank eingesetzt werden. Daher wurden an einer großen Bandbreite unterschiedlicher Kleb- und Dichtstoffe ebenfalls Beständigkeitsversuche in 80 °C heißem LOHC durchgeführt, um die am besten geeigneten Materialien zu selektieren. Bei den Kleb- und Dichtstoffen muss aber nicht nur gewährleistet sein, dass das Material selbst den Kontakt mit LOHC verträgt, sondern es darf auch nicht die Haftung zum Substrat verlieren, denn der Klebstoff darf nicht von der Tankwand abfallen. Um dies zu untersuchen, laufen Tests an Verbindungen bestehend aus Stahl oder Kunststoffen und dem Kleb- bzw. Dichtstoff in Anlehnung an DIN EN ISO 1465. Letztere Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

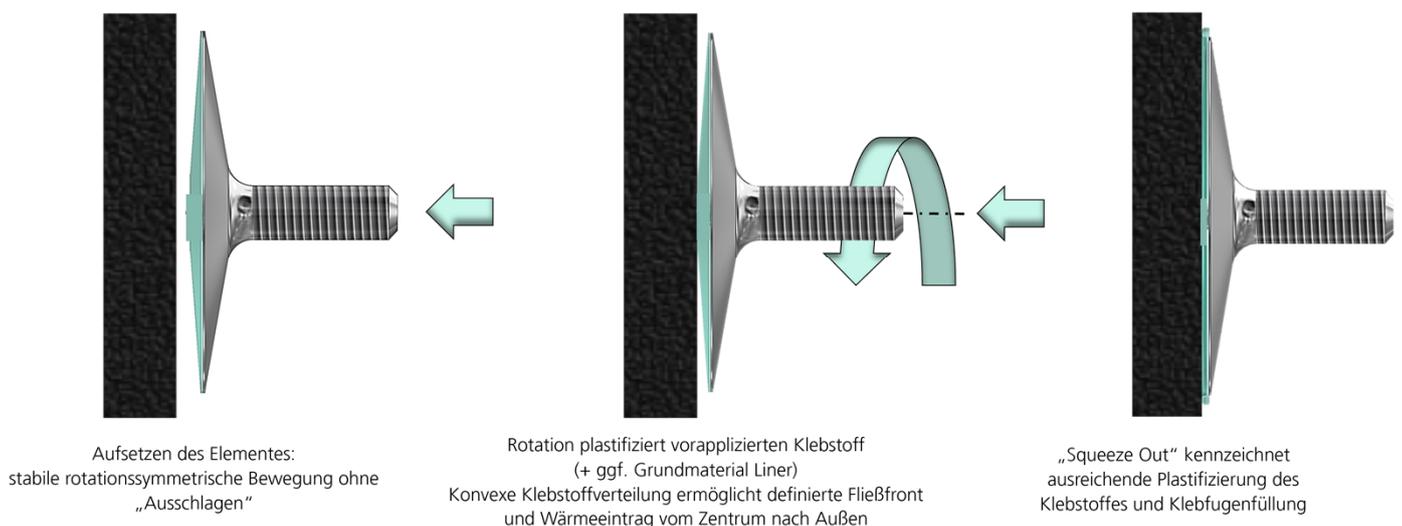


Abbildung 20. Schema Konzept für innovatives Fügen von Montageelementen auf Linermaterial.

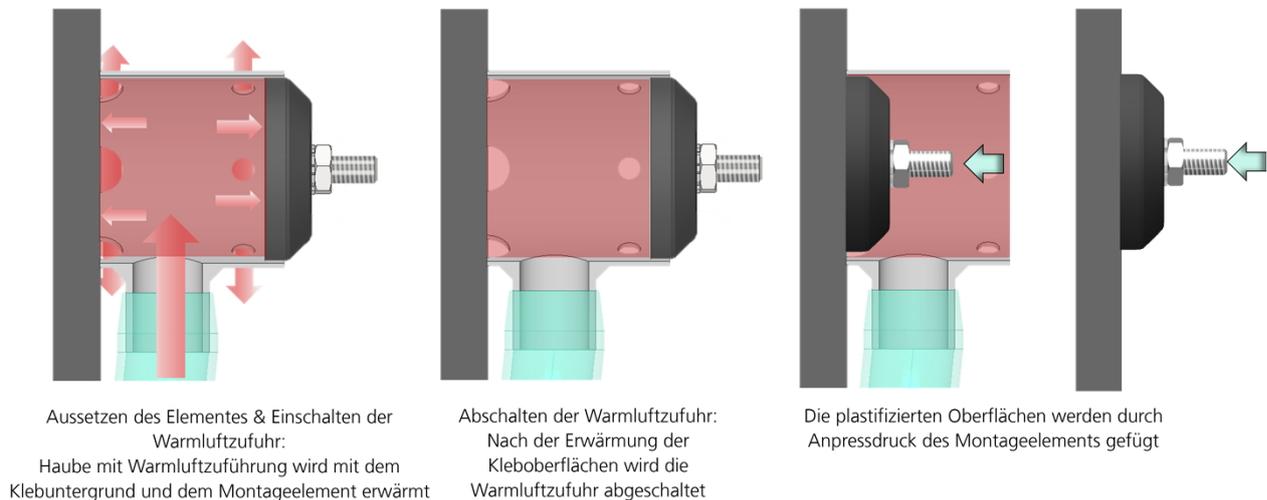


Abbildung 21. Schema-Konzept zur Montage eines Elements mittels Warmluft.

Klebkonzepte

Für eine qualitativ hochwertige Klebverbindung muss nicht nur der verwendete Klebstoff geeignet sein, sondern der Fertigungsprozess und die Gestaltung der Verbindung spielen ebenfalls eine wesentliche Rolle. Daher wurden klebtechnische Konzepte für die LOHC-Tanks erarbeitet.

Abbildung 20 illustriert ein Konzept, das zum klebtechnischen Fügen von Montageelementen auf Linermaterialien entwickelt wurde. Ein Liner, beispielsweise eine 3 cm dicke Schicht aus Polyvinylidenfluorid (PVDF), schützt den darunter liegenden Werkstoff vor Umgebungseinflüssen. Das entworfene Montageelement kann mit einem Klebfilm am Halterelement und durch Rotation mit der Tankwand gefügt werden.

Parallel wurde eine Konzeptstudie für den klebtechnischen Zusammenbau des Tanks, der Funktionselemente und der Wärmeisolationsmaterialien mit LOHC-Kontakt erstellt. Ein Konzept wird in der Abbildung 21 gezeigt. Hier wird ein Funktionselement mit Hilfe von Wärme durch eine Plastifizierung angebracht, denkbar ist dieses Konzept auch unter Verwendung einer gefügten Klebfolie zwischen Fügepartner Tankliner und Fügepartner Funktionselement.

4.2. Zustandsüberwachung von LOHC und Tanks mit Sensoren und Drohnen

Zum Thema der Zustandsüberwachung wird im folgenden Abschnitt von Forschungsarbeiten zur Überwachung des LOHC-Zustands berichtet, ehe es in weiteren zwei Abschnitten um Methoden für die Überwachung der Tanks geht.

4.2.1. Qualitätsüberwachung des LOHC-Zustands mittels optisch-spektroskopischer Messtechnik

Um eine zuverlässige LOHC-Lieferkette realisieren zu können, benötigt man Messmethoden, um die Qualität des gelieferten LOHC zu kontrollieren. Mit möglichst schnell und einfach durchzuführenden Messungen soll überprüft werden, dass der gewünschte Hydriergrad vorliegt, also genügend Wasserstoff im LOHC transportiert wird, und dass die Qualität des LOHC nicht durch Verunreinigungen oder Alterung vermindert ist.

Im TransHyDE-Projekt Helgoland wird untersucht, welche Messsysteme sich für die Bestimmung der LOHC-Qualität eignen. Außerdem wird ein Messkopf entwickelt, der in Tankstrukturen und Befüllungssysteme integriert oder als mobile Prüftechnik verwendet werden kann. Dazu gehört auch eine entsprechende Softwarelösung inklusive Auswertungsalgorithmus. So soll eine schnelle und zuverlässige Datenauswertung gewährleistet werden.

Untersuchungen zu geeigneten Messsystemen

Zur Zustandsüberwachung von LOHC wurde eine optisch-spektroskopische Messmethode ausgewählt. Für die ersten Untersuchungen standen drei unterschiedliche LOHC-Proben zur Verfügung: unbeladenes, beladenes und unbeladenes, gealtertes Benzyltoluol. Von diesen Proben wurden sowohl UV/VIS⁹- als auch Infrarot-Spektren (IR) aufgenommen. Mit gealtertem LOHC ist hier ein LOHC gemeint, das bereits viele Hydrier-Dehydrier-Zyklen durchlaufen hat. Welche Alterungsmechanismen und Alterungsprodukte in den Zyklen auftreten, ist noch nicht geklärt und Gegenstand laufender Untersuchungen.

Bei den UV/VIS-Messungen zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Eigenschaften des Perhydro-Benzyltoluol zum unbeladenen Benzyltoluol. Außerdem gibt es Hinweise, dass sich eingegrenzte spektrale Bereiche zusätzlich eignen, um eine Differenzierung zwischen Benzyltoluol und gealtertem Benzyltoluol vorzunehmen. Ebenso zeigten die IR-Spektren eine grundsätzliche Eignung zur Ermittlung des Hydriergrads. Derzeit laufen weiterführende Untersuchungen an einer größeren Anzahl in Hydriergrad und Reinheit variierender Proben mit verschiedenen Messsystemen.

4.2.2. Überwachung von Tanks mit faseroptischer Sensorik

Nachdem das Thema des vorangehenden Abschnittes die Zustandsüberwachung des LOHC war, werden im Folgenden Entwicklungsarbeiten zur Zustandsüberwachung von Tankstrukturen mit zwei verschiedenen Methoden vorgestellt. Bei der ersten Methode werden sogenannte Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (FBG) verwendet, die direkt in die Faserverbundstruktur der Tankwand eingearbeitet werden.

⁹ Die UV/VIS-Spektroskopie ist eine Art der Absorptionsspektroskopie, bei der eine Probe mit elektromagnetischen Strahlen verschiedener Wellenlängen in den ultravioletten (UV) und sichtbaren (VIS) Bereichen beleuchtet wird.

Die Daten, die von den FBG-Sensoren erfasst werden, können zum Structural Health Monitoring (SHM) der Tanks verwendet werden. SHM ermöglicht es, den Zustand der Tankstruktur kontinuierlich und in Echtzeit zu überwachen, potenzielle Schäden frühzeitig zu erkennen und dadurch die Lebensdauer der Struktur zu verlängern und die Wartungs- und Reparaturarbeiten zu optimieren.

FBG-Sensoren sind optische Sensoren, die zur Echtzeit-Messung von Dehnung und Temperatur eingesetzt werden. So könnte z. B. die Dehnung oder Verformung von relevanten Stellen eines Tanks (Wände, Deckel, Schweißnähte, Montageöffnungen etc.) überwacht werden. Die Vorteile dieser Sensoren sind ihre geringe Größe, ihre hohe Mess-Empfindlichkeit, ihre Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und ihre Fähigkeit, in Umgebungen mit hohen Temperaturen und chemischen Belastungen zu arbeiten.

Erste Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen der Projektbearbeitung wird die FBG-Sensortechnologie hinsichtlich ihrer Eignung zur Überwachung von Tankstrukturen experimentell untersucht. In diesem Zusammenhang werden Untersuchungen an Testbauteilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit integrierten FBG-Sensoren bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung von Belastungszuständen und Strukturschädigungen durchgeführt.

Nachdem bereits das Antwortverhalten der integrierten FBG-Sensoren bei Behälterbefüllung und Druckbeaufschlagung näher untersucht wurde, konzentrieren sich weitergehende Untersuchungen auf die Detektion von Strukturschäden durch den Vergleich der gemessenen Dehnung bei wiederholter Belastung.

Außerdem werden fortlaufende Untersuchungen zur chemischen Beständigkeit der Sensorfasern im Kontakt mit Perhydrobenzyltoluol (LOHC-H) durchgeführt. Zwischenergebnis: Nach 24 Monaten Kon-

takt mit dem Medium konnte keine Beeinflussung der Oberfläche der Sensorfaser nachgewiesen werden.

4.2.3. Zustandsüberwachung von Tankanlagen mit Drohnen

Die zweite Methode zur Überwachung der LOHC-Tanks, die im TransHyDE-Projekt Helgoland erarbeitet wird, verwendet keine integrierten Sensoren zur ständigen Überwachung, sondern inspiziert den Tank von außen. Anstatt diese Inspektion herkömmlich manuell durchzuführen, sollen Drohnen, auch UAV genannt (Unmanned Aerial Vehicles), mit speziellen Messköpfen diese Arbeiten künftig vereinfachen.

„Berührende Inspektion“ heißt die Technik, bei der sich die Drohne im Standflug mit einem Endeffektor an eine Oberfläche andockt und Messungen mit speziellen Sensoren durchführt. So können Daten z. B. zu Wandstärke oder Lackschichtdicke erfasst werden. Der Einsatz von Drohnen bietet hier den Vorteil schnell und einfach an schwer erreichbare Stellen zu gelangen. Dieses Konzept ist nicht nur für die Tanküberwachung interessant, sondern auch auf die Inspektion von Offshore-Infrastruktur zu übertragen.

Zwei besonders interessante UAV-Konzepte für berührende Inspektion sind die Skygauge sowie der TriCoper von Voliro (Abbildung 22 a, b). Aufgrund des noch frühen Entwicklungsstatus der beiden Lösungen wurde entschieden, parallel zur Beschaffung einer geeigneten Drohne auch eigene Endeffektor-Ansätze für berührende Messungen an zunächst vertikalen Oberflächen zu untersuchen. Hierzu wurden erste Designs und Prototypen mittels 3D-Druck gefertigt und getestet (Abbildung 22 d), bei denen ein Schichtdickensensor durch einen Federmechanismus auf die Oberfläche gedrückt wird.

Im Rahmen eines Unterauftrags für die Entwicklung eines UAV-

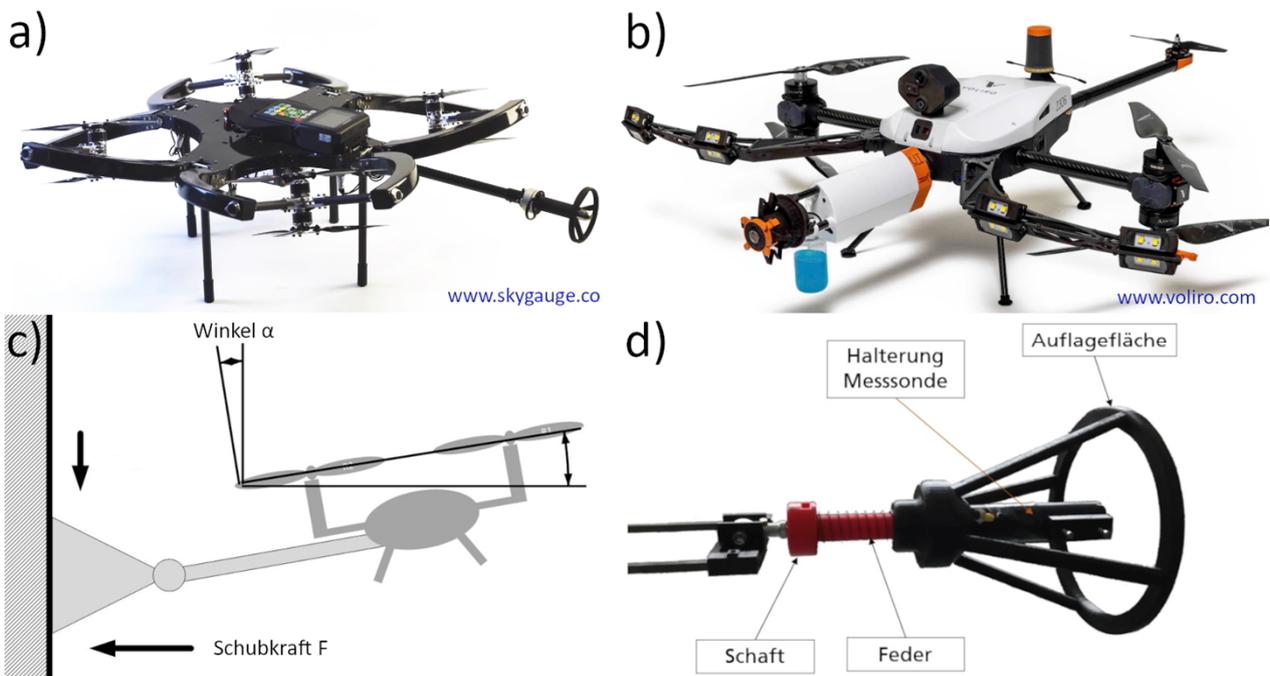


Abbildung 22. a) „Skygauge“ und b) „TriCoper“ als potenziell geeignete verfügbare Lösungen zur berührenden Inspektion von Infrastrukturen, c) Konzeptdesign für d) mittels 3D-Druck gefertigter Prototyp von Payload-Ansätzen für berührende Messungen an vertikalen Oberflächen.

angepassten Messkopfes zur Wandstärkemessung wurde ein Sensor-Prototyp, basierend auf EMUS (Elektromagnetisch angeregtem Ultraschall), aufgebaut. Im nächsten Schritt erfolgt die Integration des Sensors ins Drohnensystem, abschließend wird der Einsatz an Tanks der Versorgungsbetriebe auf Helgoland getestet.

4.3. Druckwasserstoff: Permeation, Versprödung und ökologische Aspekte

Bevor der Wasserstoff in der Hydrieranlage auf Helgoland an das LOHC gebunden wird, muss dieser per Pipeline vom Elektrolyseur an der Windenergieanlage auf die Insel gebracht werden. Bei den letzten Forschungsarbeiten, die hier vorgestellt werden, geht es daher auch um Druckwasserstoff.

4.3.1. Beschichtungssysteme als Wasserstoff- oder LOHC-Barriere

Aus verschiedenen Gründen kann ein Konstruktionsmaterial, welches ansonsten technisch und wirtschaftlich günstige Eigenschaften zum Tankbau aufweist, für Wasserstoff oder LOHC ungeeignet sein. Gründe hierfür sind z.B. eine fehlende Beständigkeit eines polymeren Werkstoffs gegenüber LOHC oder die Versprödung eines metallischen Werkstoffs durch Druckwasserstoff. In diesen Fällen kann eine Barrierebeschichtung die Nutzung dieser Materialien ermöglichen.

Derartige Barrierebeschichtungen werden als Kompositmaterial aus Lackharzen und plättchen- bzw. schuppenförmigen Barrierepigmenten zusammengesetzt (Abbildung 23). Auf diese Weise kann die Funktion der Barriere durch die Plättchen hergestellt werden, während die notwendigen mechanischen und chemischen Eigenschaften der Schicht im Wesentlichen von der Auswahl des Harzes abhängen.

Nach einer Voruntersuchung zur Kompatibilität verschiedener Be-

schichtungen bezüglich LOHC lag der Arbeitsschwerpunkt auf der Optimierung des Lacksystems als Wasserstoffdiffusionsbarriere.

Zur Quantifizierung der Wirksamkeit wurde die Permeation beschichteter PET-Folien¹⁰ gemessen, die durch die Beschichtung erheblich verzögert wurde. Der gesamte Gasfluss konnte durch den Einsatz der Barrierebeschichtung ebenfalls reduziert werden. Derzeit laufen Untersuchungen mit weiteren Barrierepigmenten, die die Gesamtpermeation weiter reduzieren sollen. Zum Verständnis der Wirkungsweise wurde die Schichtbeschaffenheit von lackierten Stahlblechen per Querschliff und Elektronenmikroskopie untersucht (Abbildung 23).

Nach der Optimierung der Lackformulierung wurde die Optimierung des Lackierprozesses gestartet. Zur systematischen Untersuchung des Effekts der Prozessparameter wurden mit einem Lackierroboter Folien beschichtet, die nun hinsichtlich Permeation und Morphologie untersucht werden.

Des Weiteren wurde die Beständigkeit der optimierten Beschichtung gegenüber dem LOHC untersucht und ihre Kompatibilität mit verschiedenen Tankwerkstoffen und Dichtstoffen mittels Gitterschnittprüfung gemäß ISO 2409 getestet.

Um zu prüfen, ob die hinsichtlich Wasserstoffpermeation optimierte Beschichtung auch geeignet ist, empfindliche Tankmaterialien vor dem Eindringen oder einem chemischen Angriff des LOHC zu schützen, wurden Proben eines Vinylesterharzes mit nur mäßiger Beständigkeit verwendet. Ohne Beschichtung zeigten die Proben im Immersionstest (Tauchttest) eine Massezunahme von 18 % infolge eingedrungenen LOHCs. Durch eine Barrierebeschichtung wurde die Masseänderung auf unter 1 % verringert. Quellung und Aufweichung der Proben wurde durch die Barriere mindestens stark reduziert, für eine genauere Quantifizierung der Schutzwirkung sind weitere Versuche in Vorbereitung.

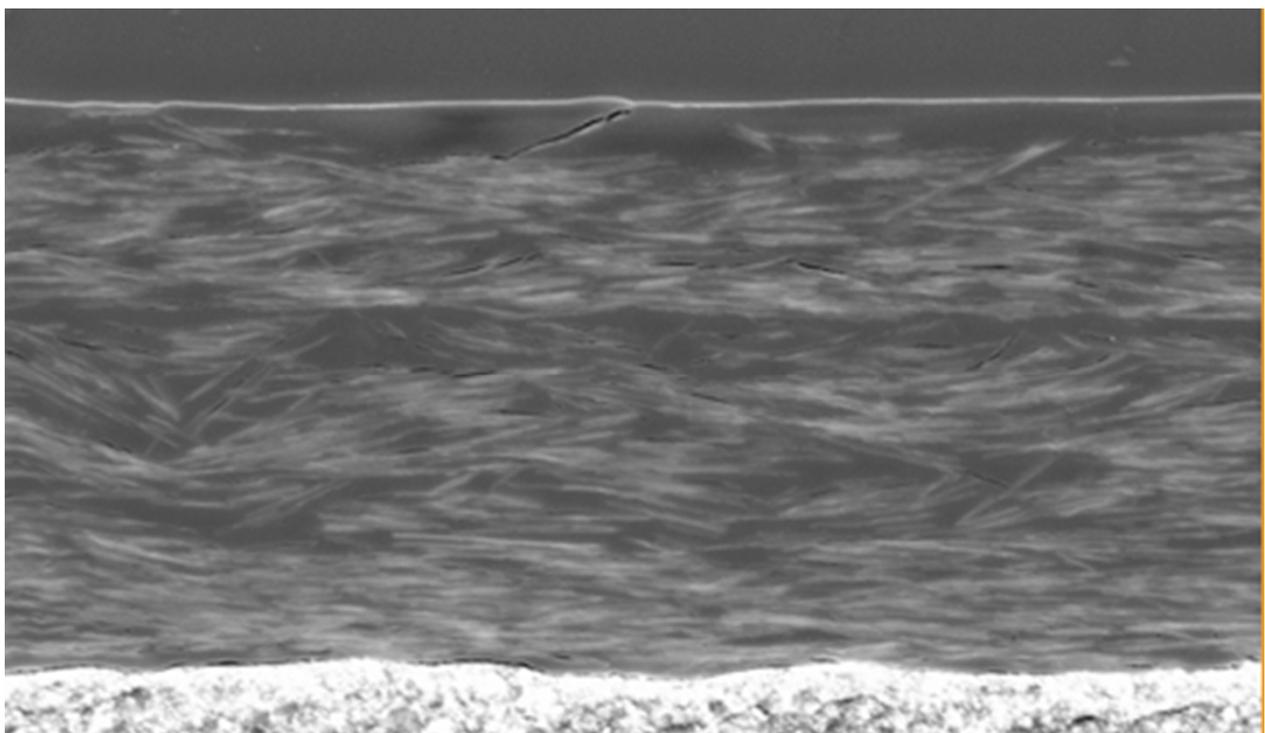


Abbildung 23. Querschliffe durch Barrierebeschichtungen. Die plättchenförmigen Pigmente sind als helle Bereiche gut zu erkennen.

¹⁰ Kunststofffolien aus Polyethylenterephthalat

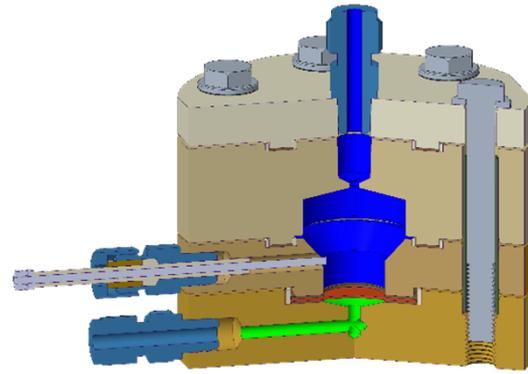


Abbildung 24. Stachurski-Devanathan-Zelle, links: klassisch mit elektrochemischer Wasserstoffbeladung, rechts: modifiziert, mit Druckwasserstoffbeladung (schematisch).

4.3.2. Materialtest mit Druckwasserstoff: Durchlässigkeit und Versprödung

Ziel von Untersuchungen hinsichtlich Wasserstoffpermeation und -versprödung ist es, abschätzen zu können, welche Werkstoffe und Beschichtungen sich am besten für Tanks oder eine Wasserstoffpipeline eignen und wie diese sich in Verbindung mit Druckwasserstoff verhalten. Derzeit werden zwei neuartige Testmöglichkeiten aufgebaut.

Spezielle Stachurski-Devanathan-Zelle

Zur Bestimmung der Wasserstoffpermeation durch metallische Werkstoffe wurde eine spezielle Hochdruck-Stachurski-Devanathan-Messzelle entwickelt (Abbildung 24). Hierzu wurde eine entsprechend modifizierte Zelle bis 300 bar konzipiert, die es im Gegensatz zum klassischen Zellaufbau erlaubt, auch beschichtete Proben unter Druckwasserstoff zu untersuchen. Der Prototyp ist aufgebaut und wird noch hinsichtlich der Druckregelung optimiert.

Prüfmaschine zur in-situ Messung der Wasserstoffversprödung

Wasserstoff kann in metallische Werkstoffe eindringen und insbesondere bei hochfesten Stählen zu Versprödungen führen. Dabei wird in einem chemischen Prozess molekular vorliegender Wasserstoff an der Oberfläche zu atomarem Wasserstoff dissoziieren. Dieser Sachverhalt ist, im Gegensatz zum Verhalten des Wasserstoffs im Werkstoffinneren, bisher noch wenig untersucht. Gesucht werden mögliche Barrierebeschichtungen, die diesen Vorgang hemmen, den Wasserstoffeintrag verringern und so die Versprödungsneigung minimieren.

Zur Messung der Versprödung wird eine spezielle Prüfmaschine errichtet, welche die Aufbringung einer mechanischen Last (statisch und dynamisch) bei gleichzeitiger Einwirkung von Druckwasserstoff auf die Probe ermöglicht. In der Probe wird ein Wasserstoffkonzentrationsgradient ähnlich zum Zustand in einer Pipelinewand erzeugt. Die Probengeometrie ist so gestaltet, dass sie für das Aufbringen von Beschichtungen gut geeignet ist. Die Lieferung des Geräts erfolgt voraussichtlich Ende 2024.

4.3.3. Nachhaltiger Bewuchs- und Korrosionsschutz für Meerespipelines

Bewuchsschutz

Meerespipelines sind unterschiedlichen Mikroorganismen ausgesetzt, die sich an der Oberfläche ansiedeln und das Material beschädigen können. Diese Art der mikrobiell beeinflussten Korrosion wird auch als Biofouling, genauer Makro- und Mikrofoiling, bezeichnet. Die Pipelines brauchen also zum einen einen effektiven Schutz gegen Biofouling, und zum anderen sollen diese Beschichtungen umweltfreundlich (biozidfrei) sein. Im TransHyDE-Projekt Helgoland wird untersucht, welche Beschichtungen sich besonders für die Verwendung unter Wasser eignen, und diese Beschichtungssysteme werden weiter optimiert.

Der Test der ausgewählten biozidfreien Beschichtungen erfolgt anhand von beschichteten Pipelineproben, die in der Nordsee an einem Versuchsponton vor Helgoland unter Wasser platziert wurden. Der Bewuchs der Proben wird während einer gesamten Wachstumsaison (Sommerhalbjahr) regelmäßig beobachtet (Abbildung 25). Ein Optimierungsschritt der Beschichtung dauert also ein Jahr, der Abschluss der Optimierung erfolgt in 2024.

Parallel zur Weiterentwicklung der Beschichtungen laufen Untersuchungen, in denen mittels systematischer Variation der Formulierungen, Charakterisierung ihrer Eigenschaften und Bewuchstest vor Helgoland Erkenntnisse zum Wirkmechanismus des Bewuchsschutzes gewonnen werden. Bislang wurde nachgewiesen, dass das Elastizitätsmodul der Beschichtungen nicht direkt mit der Bewuchsschutzleistung korreliert.

Korrosionsschutz

Vor Helgoland werden unter Meerwasserbedingungen unterschiedliche Beschichtungen für Pipelines, die industriell bereits verwendet werden, auf Schadstoffe getestet. Dazu gehören Pipelineproben mit Korrosionsschutzbeschichtungen, aber auch Proben von Kunststoffpipelines. Analysiert und verglichen werden ungenutzte Proben mit vor Helgoland ausgelagerten Proben.

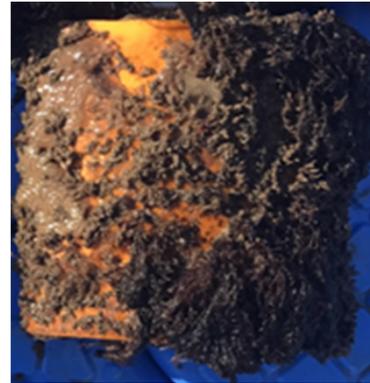
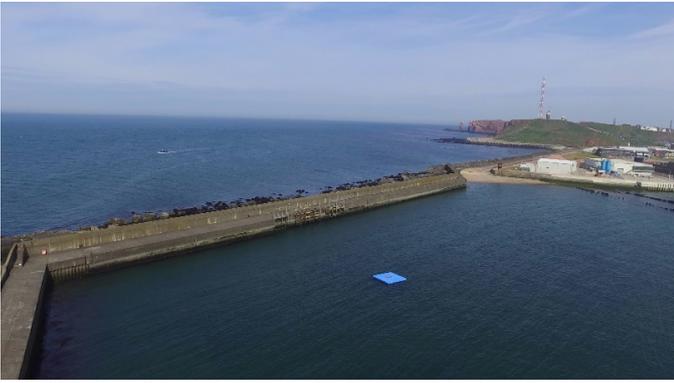


Abbildung 25. Ponton für Bewuchsversuche und Korrosionsprüfstände auf Helgoland (links), bewachsene Pipelineprobe (rechts).

Damit soll abgeschätzt werden, welche Stoffe in welchen Mengen aus den Werkstoffen an die Umgebung abgegeben werden, um so deren Umweltkompatibilität bewerten zu können. Die Auswertung der Helgoland-Proben mit Extraktionsversuchen wird 2024 erfolgen. Entsprechende Tests unter Laborbedingungen wurden bereits abgeschlossen. Bei Polymerwerkstoffen¹¹ für den Pipelinebau u. a. die

Abgabe unterschiedlicher bedenklicher Komponenten nachgewiesen, ebenso bei kommerziellen Beschichtungssystemen auf Epoxidbasis. Diese Ergebnisse müssen für die Helgoland-Proben noch validiert werden. Es scheint aber, dass etliche Stoffe abgesondert werden, die der Wassergefährdungsklasse 2 „deutlich wassergefährdend“ entsprechen.

¹¹ Polymere Werkstoffe sind leicht und weisen eine niedrige elektrische Leitfähigkeit und sehr gute Korrosionsbeständigkeit auf, z. B. Kunststoffe oder Gummi.

5

Zwischenfazit und Ausblick

Im TransHyDE-Projekt Helgoland wird modellhaft eine komplette Wertschöpfungskette für den Transport von Grünem Wasserstoff per LOHC von Helgoland nach Hamburg erforscht und entwickelt. Hierzu wurden alle für die Effizienz und Kosten wesentlichen Aspekte detailliert analysiert, so z. B. die Abwärmenutzung aus dem Hydrierprozess, die Infrastruktur und Rahmenbedingungen auf Helgoland und die Varianten des Seetransports per Tankschiff oder mit Tankcontainern.

Die herausfordernden Rahmenbedingungen der Insel Helgoland kommen einem Härtefallszenario gleich, mit dessen Ergebnissen eine skalierbare Blaupause geschaffen werden soll, die zur wirtschaftlichen und technischen Optimierung des Wasserstofftransports mit LOHC an weltweiten Standorten eingesetzt werden kann. Das Motto des TransHyDE-Projekts Helgoland lautet daher: „Wenn es auf Helgoland funktioniert, dann funktioniert es (fast) überall.“ Schon jetzt kann das Know-How, das durch die Machbarkeitsstudien und die bisherigen Forschungs- und Entwicklungsleistungen gewonnen wurde, über Helgoland hinaus angewendet werden.

Da das Forschungsprojekt bis 2025 läuft, liegen noch nicht alle Ergebnisse in Gänze vor. Das betrifft vor allem das Engineering zur Skalierung der Hydrieranlage sowie laufende Forschungsarbeiten u. a. zur automatisierten Zustandsüberwachung von LOHC und Tanks, zu biozidfreiem Bewuchsschutz und nachhaltigerem Korrosionsschutz sowie zu Wasserstoffpermeation und -versprödung.

Eins der Hauptziele, das bereits erreicht werden konnte, war, die optimale Logistik-Variante für den Standort Helgoland zu erarbeiten. Besonders die drei abgeschlossenen Machbarkeitsstudien (Ramboll, 2022-2023) zu den Helgoländer Häfen als mögliche Standorte für die Hydrieranlage und dem Umschlag und Transport von LOHC haben

einen wertvollen Beitrag geleistet. Nicht nur verfügbare Flächen, wirtschaftliche Faktoren und die Infrastruktur haben hier eine Rolle gespielt. Hervorzuheben sind vor allem die (lokal)politischen, touristischen und gesellschaftlichen Faktoren. Die Vielzahl der Faktoren konnte im TransHyDE-Projekt Helgoland systematisch identifiziert und für den Transport von Helgoland nach Hamburg abgewogen werden. Exemplarisch sollen im Folgenden einige Besonderheiten aufgeführt werden.

So kann z. B. die Akzeptanz in der Bevölkerung eine entscheidende Rolle spielen. Generell ist das Gefährdungspotenzial beim LOHC-Transport vergleichsweise gering, was eine allgemein höhere Akzeptanz erwarten lässt. Dennoch gab es aus Akzeptanzgründen technische und logistische Einschränkungen. Beispielsweise wurde auf Helgoland ein Landtransport mit Containern ausgeschlossen, da es das naturnahe und touristisch geprägte Inselbild zu stark beeinträchtigen würde.

Bei der Wahl eines Umschlaghafens für den LOHC-Transport war es nicht zielführend, allein den Flächenbedarf zu untersuchen. Konkurrierende Nutzungen der Hafenanlagen durch Frachtverkehr, Passagierschiffahrt, Wassersportvereine sowie anderweitige gemeindliche und private Nutzungen mussten einbezogen werden. In der letzten Machbarkeitsstudie wurde sogar aufgrund mangelnder Flächen bzw. konkurrierender Nutzungen die Erweiterung des Helgolandkais im Vorhafen durch einen Fingerpier untersucht, über den der LOHC-Umschlag abgewickelt werden könnte. Ob hinreichend nutzbare Kapazitäten vorhanden sind oder beispielsweise neue Kaianlagen gebaut werden müssen, beeinflusst die Gesamtprojektkosten in hohem Maße.

Für die kurzfristige Umsetzung des Wasserstofftransports per LOHC

ist es vorteilhaft, dass aus technischer Sicht die Nutzung oder Umwidmung bestehender Transport-Infrastruktur für mineralische Kraftstoffe, wie Leitungen oder Tanks, möglich ist, ohne dass hohe Investitionen in spezifische Infrastruktur notwendig sind.

Insgesamt ist zu beachten, dass die Kosten für die Umsetzung stark variieren können, da es auch auf den Zustand der vorhandenen Infrastruktur (Kai- und Hafenanlagen) ankommt. Aufwendige Sanierungen oder Flächenerweiterungen können die Investitionskosten stark in die Höhe treiben. Langfristig sind hohe Investitionen in die Infrastruktur unvermeidlich, wenn Deutschland in großem Maßstab Grünen Wasserstoff importieren und sich dabei nicht auf die Eigenproduktion (z.B. in Offshore-Windparks) verlassen möchte.

Ebenfalls besteht langfristig beim Aufbau neuer Infrastruktur für LOHC in ökonomischer und ökologischer Hinsicht ein Entwicklungspotenzial, beispielsweise durch ein LOHC-spezifisches Tankkonzept, besonders gut geeignete Materialien und Beschichtungen, die ebenfalls innerhalb des Projekts im Bereich Materialforschung erarbeitet werden.

Schon jetzt konnte ein Tankdemonstrator gebaut werden, der die gemeinsame Lagerung von hydriertem und dehydriertem LOHC in einem Tank mit beweglicher Innenschwimmdecke ermöglicht. So kann der Bedarf an Tanks und die benötigte Zeit für Betankung und Entleerung um fast die Hälfte reduziert werden.

Für den Leichtbau von LOHC-Transporttanks mit Hilfe von glasfaserverstärkten Kunststoffen wurden geeignete Werkstoffe identifiziert, die durch eine hohe Beständigkeit gegenüber LOHC eine lange Lebensdauer sicherstellen. Entsprechende Untersuchungen für geeignete Kleb- und Dichtstoffe laufen noch, Klebkonzepte wurden bereits entwickelt. Eine neu entwickelte Barrierebeschichtung zeigte sowohl das Potenzial, die Wasserstoffpermeation zu reduzieren, als auch empfindliche Materialien vor der Einwirkung des LOHC zu schützen.

Im Zuge der Entwicklungsarbeiten zur Skalierung der Hydrieranlagen wurde das Thema „Wärmeintegration“ eingehend betrachtet. Bei Wasserstofftransporten mittels LOHC-Technologie wird im Einspeicherungs-Prozess Wärme freigesetzt, während die spätere Freisetzung des Wasserstoffs aus dem LOHC eine Wärmezufuhr benötigt wird. Für einen energieeffizienten Transport spielt daher die Wärmeintegration eine wichtige Rolle. Zur Idee des LOHC-Transports ab Helgoland gehörte von Anfang an das Heizen der Inselhaushalte mit der Abwärme aus dem Hydrierprozess. Bezüglich des Wärmebedarfs der Dehydrierung wurde die Möglichkeit der Wärmeversorgung aus einer Müllverbrennungsanlage durchkalkuliert. Durch die mögliche Nutzung der Überschusswärme bei der Hydrierung des LOHC sowie die Einbindung vorhandener Prozesswärme bei der Dehydrierung bietet die LOHC-Technologie interessante Synergie-Effekte sowohl auf Erzeuger- als auch auf Verbraucherseite, die aber im Einzelfall bezüglich ganzjähriger Abdeckung und Opportunitätskosten evaluiert werden müssen.

Eine Herausforderung beim Engineering der Hydrieranlage sind die naturgegebenen Fluktuationen in der Produktion erneuerbarer Energie, wie zum Beispiel ein unregelmäßiges Windprofil. Sie müssen ebenso wie andere standortspezifische Randbedingungen in das Design der Hydrieranlagen einfließen. Hierzu wurde eine Methode erarbeitet und die Machbarkeit für den Standort Helgoland gezeigt. Das Szenario Helgoland ist im Status Quo logistisch und wirtschaftlich durchgeplant und die LOHC-Technologie auf einem hohen Readiness-Level (TRL 7/IEA) (Bains et al., 2023, S. 142). Daher ist es grundsätzlich möglich, eine Transportkette mit LOHC umzusetzen. Auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse mit Bezug zu Material in den Wasserstoff- und LOHC-Anwendungen werden nach ihrem Abschluss einen Beitrag zur Optimierung und Weiterentwicklung der Wasserstoffinfrastruktur leisten. Finale Ergebnisse werden voraussichtlich 2025 veröffentlicht.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, NWS 2023, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=9
- [2] P. Bains et al., International Energy Agency: Global Hydrogen Review 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [3] A. Dertinger et al., Covering Germany's green hydrogen demand: Transport options for enabling Imports, Guidehouse, 36-37 (2022), <https://guidehouse.com/-/media/www/site/insights/energy/2022/transport-options-for-covering-germanys-green-hydrogen-demand.pdf>
- [4] T. Zahw et al., Facilitating hydrogen imports from non-EU countries, Guidehouse (Oktober 2022), <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2023/12/Facilitating-hydrogen-imports-from-non-EU-countries.pdf>
- [5] M. Distel et al., Large-Scale H2 Storage and Transport with Liquid Organic Hydrogen Carrier Technology: Insights into Current Project Developments and the Future Outlook, Energy Technology 2301042, <https://doi.org/10.1002/ente.202301042>
- [6] A. Reese et al., Characterization of alloying components in galvanic anodes as potential environmental tracers for heavy metal emissions from offshore wind structures. Chemosphere, Volume 257, 127-182 (2020) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127182, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127182>
- [7] DIN EN 13121-2:2004-01, Oberirdische GFK-Tanks und Behälter, Teil 2: Verbundwerkstoffe – Chemische Widerstandsfähigkeit; Deutsche Fassung EN 131212:2003
- [8] DIN EN 13121-3:2016-10, Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter – Teil 3: Auslegung und Herstellung; Deutsche Fassung EN 13121-3:2016
- [9] DIN EN 13121-3:2022-11 (Entwurf), Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter – Teil 3: Auslegung und Herstellung; Deutsche und Englische Fassung prEN 13121-3:2022
- [10] DIN SPEC 91437:2023-05, Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) auf Basis von Toluol – Bewertung, Prüfung und Sicherstellung der LOHC-Qualität; Text Englisch
- [11] DVS-Richtlinie 2205-2:2021-12, Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten – Stehende runde, drucklose Behälter
- [12] E4tech (UK) Ltd for the Department for Business Energy and Industrial Strategy: H2 emission potential literature review, 2019, BEIS Research Paper Number 22

Projektinterne Studien (nicht öffentlich)

Ramboll, Mai 2022: Standortanalyse zur Flächenbereitstellung

Ramboll, August 2022: Hafentechnische Machbarkeitsuntersuchung für den LOHC-Umschlag auf Helgoland

Ramboll, Juni 2023: Machbarkeitsstudie für den Bau des Süddamm 2 auf Helgoland

INP, Juli 2022: Machbarkeitsstudie zur Wärmeversorgung von Helgoland durch Wasserstoffdirektnutzung

HGC, Dezember 2022: Energieverwendung zur Versorgung der Insel Helgoland

HPC, März 2023: Wasserstoff-Bunkerstation auf Helgoland