



TransHyDE-Projekt LNG2Hydrogen

Erarbeitung einer wissenschaftlich fundierten, nachhaltigen Datenbasis und Empfehlung als Entscheidungsgrundlage für die zukunftsfähige und langfristige Nutzung von LNG-Terminal-Standorten als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff und dessen Derivate, Teilvorhaben IFW

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	30.11.2024
Einreichungsdatum (TIB):	01.07.2025
Partnerin/Partner:	Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.
Autorin/Autor:	Dr. Hans Weber, Prof. Dirk Lindackers
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE-LNG-Terminals
Förderkennzeichen:	03HY210L
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

I.	Ursprüngliche Aufgabenstellung	3
II.	Vormaliger Stand des Wissens	3
III.	Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten	4
IV.	Wesentliche Ergebnisse	7
V.	Verwendung der Zuwendung.....	16
V.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
V.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	16
VI.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans .	17
VII.	Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit.....	19
VIII.	Erfolgte Veröffentlichungen	20

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die ursprüngliche Aufgabenstellung des Projekts bestand darin, eine wissenschaftlich fundierte und nachhaltige Datenbasis zu schaffen, die als Entscheidungsgrundlage für die zukunftsfähige und langfristige Nutzung von LNG-Terminal-Standorten als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff und dessen Derivate dient. Ziel war es, die technologischen und regulatorischen Herausforderungen bei der Umstellung bestehender LNG-Infrastrukturen auf verschiedene Wasserstofftransportvektoren systematisch zu analysieren und zu bewerten. Das Projekt sollte dazu beitragen, sowohl kurzfristige als auch langfristige Perspektiven für eine flexible, nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Nutzung der Standorte aufzuzeigen.

Im Mittelpunkt stand eine technologieoffene Untersuchung unterschiedlicher H₂-Transportvektoren, darunter Flüssigwasserstoff (LH₂), Ammoniak, Methanol, LOHC, synthetisches Erdgas und Dimethylether. Für diese Optionen sollten die technischen, materialseitigen und sicherheitsrelevanten Anforderungen der Terminalinfrastruktur bewertet und Innovations- sowie Forschungsbedarfe identifiziert werden. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und Bewertung von Konzepten für die Um- oder Weiternutzung der LNG-Terminals einschließlich der erforderlichen Anpassungen an Komponenten, Werkstoffen und Betriebsverfahren.

Ergänzend sollten ökonomische, rechtliche und regulatorische Fragestellungen untersucht werden, um Hemmnisse und Anpassungsbedarfe für eine spätere Umrüstung frühzeitig zu erkennen und praktikable Lösungsansätze zu entwickeln. Ziel war es, Kriterien und Designparameter für zukunftsfähige „multi-use“-Terminalinfrastrukturen zu definieren und die Voraussetzungen für einen erfolgreichen und nachhaltigen Wandel hin zu einer wasserstoffbasierten Energieversorgung in Deutschland zu schaffen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten es Betreibern und Entscheidungsträgern ermöglichen, bereits in der frühen Planungsphase notwendige Weichenstellungen für Investitionen und Umbauten vorzunehmen.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Im Vorfeld des Projekts war der technische und wissenschaftliche Stand im Bereich Wasserstofftechnologien und deren Integration in bestehende LNG-Terminal-Infrastrukturen durch folgende Aspekte gekennzeichnet:

LNG-Terminals verfügten über eine ausgereifte Infrastruktur, optimiert auf die Eigenschaften von Methan (CH₄). Technische Komponenten wie Speicher, Isolationssysteme, Pumpen und Rohrleitungen waren explizit auf die Anforderungen von LNG ausgelegt. Anpassungsbedarf bestand vor allem in Bezug auf die Umstellung dieser Infrastruktur auf alternative Wasserstofftransportvektoren, insbesondere hinsichtlich Materialverträglichkeit, Isolationsanforderungen und Sicherheitstechnik.

Der Transport und die Lagerung von Flüssigwasserstoff (LH₂) wurden bereits in internationalen Pilotprojekten praktisch umgesetzt, etwa durch das japanische LH₂-Terminal Kobe und den Betrieb des LH₂-Tankers "Suiso Frontier". Hier zeigten sich die Herausforderungen im Bereich der Kryotechnik, insbesondere bei der Vermeidung von Transerverlusten, der Abdampfung und dem Energiebedarf für die Verflüssigung. Erste technische Lösungen lagen vor, beispielsweise in Form von neuartigen LH₂-Pumpen, kontaktlosen Füllstandsonden und der Rückgewinnung von Verflüssigungsenergie durch Sekundärkältekreise. Die internationale Demonstration großskaliger LH₂-Logistik war bereits erfolgt, jedoch bestand keine breit verfügbare Erfahrung bei der Integration dieser Technologien in europäische Hafensysteme.

Ammoniak (NH₃) war als industriell etablierter Wasserstoffträger mit bestehender Logistik und normierter Transportinfrastruktur identifiziert. Die technologischen Schwerpunkte lagen auf der effizienten Ammoniakreformierung und der sicheren Handhabung im Terminalbetrieb. Die Herstellung von grünem Ammoniak befand sich im industriellen Pilotmaßstab, wobei bestehende Infrastruktur und Sicherheitskonzepte als Ausgangsbasis genutzt werden konnten. Die internationale Transport- und Lagerinfrastruktur für Ammoniak war vorhanden und standardisiert.

Methanol (MeOH) und LOHC wurden als weitere Transportoptionen betrachtet. Methanol profitierte von einer global etablierten Transportkette und erprobten Produktionsverfahren. Die Produktion von grünem Methanol war in ersten Pilotanlagen technisch umgesetzt. Für LOHC-Technologien lagen grundlegende technische Erfahrungen hinsichtlich Transportes und Lagerung unter Umgebungsbedingungen vor. Die spezifischen Anforderungen für Umschlag, Lagerung und Dehydrierung an LNG-Terminals waren jedoch noch nicht detailliert untersucht.

In der Industrie für technische Gase, in der Raumfahrt und im Bereich Materialwissenschaften und Kryotechnik bestand detailliertes Wissen über Werkstoffe und Konstruktionsprinzipien für tiefkalte Anwendungen. Forschungsgruppen am IFW Dresden, an der TU Dresden und an weiteren Partnereinrichtungen hatten Erfahrungen im Engineering und der Handhabung kryogener Fluide, Entwicklung von Funktionsmaterialien für Sensorik und Wärmemanagement, Konzeptionierung von Kältenachnutzung und Entwicklung von Kryopumpen sowie in der Auslegung und dem Bau von Testumgebungen und Prototypen gesammelt.

Regulatorisch existierte für LNG ein gefestigter rechtlicher Rahmen, während für Wasserstoff und dessen Derivate (insbesondere LH₂, NH₃, LOHC, MeOH, SNG, DME) offene Fragen bezüglich Planung, Genehmigung, Betrieb und Sicherheit bestanden. Die Übertragbarkeit bestehender Normen und Regelwerke auf neue Wasserstofftransportvektoren war nicht systematisch bewertet. Forschungsbedarf bestand insbesondere bei der Bewertung regulatorischer Hemmnisse und bei der Entwicklung geeigneter Normen für Misch- oder Mehrfachnutzungsterminals.

Vorhandene Studien, insbesondere die Studie des Fraunhofer ISI (2022), lieferten eine strukturierte Übersicht der technischen, werkstofflichen und wirtschaftlichen Fragestellungen zur Umrüstung von LNG-Terminals auf Wasserstoff oder Ammoniak. Jedoch erfolgten keine tiefergehenden ingenieurtechnischen Auslegungen, Simulationen oder Materialanalysen. Insbesondere fehlten systematische techno-ökonomische Vergleiche und detaillierte Prozessauslegungen für eine Vielzahl von Wasserstoffvektoren sowie Analysen der Schnittstellen zur nachgelagerten Transportkette und zur Integration in bestehende Versorgungsnetze.

Vor Projektstart bestand ein fortgeschrittenes Grundlagenwissen zu einzelnen Wasserstofftechnologien, deren Logistikketten und Materialanforderungen. Offen waren jedoch insbesondere die systematische Bewertung der Umrüstbarkeit von LNG-Infrastruktur, die Übertragbarkeit und Anpassung regulatorischer Rahmenbedingungen sowie die techno-ökonomische Ausgestaltung und Bewertung verschiedener Wasserstofftransportvektoren im Kontext zukünftiger Terminalinfrastrukturen.

III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Das Teilvorhaben befasste sich mit der technischen, materialeitigen und konzeptionellen Bewertung der Umnutzung von LNG-Terminals für den Import und die Nutzung von Flüssigwasserstoff (LH₂). Die Arbeiten wurden durch IFW, TUD, HTW und SciDre schwerpunktmäßig in den Arbeitspaketen AP2, AP3, AP4, AP6, AP7 und AP8 durchgeführt.

Technologische Bestandsaufnahme (AP2)

Im Rahmen von AP2 wurde eine umfassende Analyse der technologischen Ausgangslage für die Nutzung von LNG-Terminals zur Aufnahme von Flüssigwasserstoff durchgeführt. Zunächst erfolgte eine systematische Definition der relevanten Wasserstoffvektoren (M2.1), wobei physikalische, energetische und sicherheitsrelevante Eigenschaften von LH2 im Mittelpunkt standen.

Die Bestandsaufnahme von LNG-Terminals (im gesamten Verbund) und die Analyse deren Komponenten zeigte, dass bestehende LNG-Terminals zwar über etablierte Anlandestrukturen und logistische Knotenpunkte verfügen, jedoch bei zentralen Elementen wie thermischer Isolation, Werkstoffbeständigkeit und Verdampfungseinrichtungen nicht ohne Weiteres auf LH2 übertragbar sind.

Tanks, Pumpen, Rohrleitungen und Verdampfer wurden systematisch analysiert. Es zeigte sich, dass die thermische Isolation herkömmlicher LNG-Komponenten für LH2 nicht ausreicht und daher wesentliche Bauteile nicht weiterverwendet werden können. Eine vollständige Umnutzung ist daher nicht möglich, eine Umrüstung oder ein Retrofit nur eingeschränkt realisierbar.

In der Marktübersicht (M2.2) wurden Verflüssigungskapazitäten, Transportschiffe, Terminalinfrastrukturen sowie erwartete LH2-Nachfrage analysiert. Eine besondere Rolle spielten darüber hinaus die Bewertung technologischer Reifegrade (TRL) und die Identifikation kritischer Komponenten wie LH2-Tanks und LH2-Pumpen.

Der technologische Reifegrad für LH2-spezifische Komponenten ist deutlich geringer als für LNG. Insbesondere großvolumige LH2-Tanks und effiziente Transferpumpen befinden sich teils noch im Entwicklungs- oder Prototypenstadium.

Auf den Erkenntnissen aufbauend wurden Konzepte für die Um- und Weiternutzung der bestehenden LNG-Terminalinfrastruktur diskutiert und LH2-Terminalkonzepte entwickelt (AP3).

Terminalkonzeption und Prozessauslegung (AP3)

Eine große Herausforderung stellte die Definition von Systemgrenzen und einer Referenzgröße dar, die alle Wasserstoffvektoren vergleichbar macht. Im Verbund wurde sich auf die Einspeisung von gasförmigem Wasserstoff in die Pipeline geeinigt, im Maßstab konventioneller LNG-Terminals, bspw. des FSRU in Wilhelmshaven.

Ziel von AP3 war folglich die Ausarbeitung eines vollständigen verfahrenstechnischen Terminalkonzepts für die Importlogistik von LH2 mit einem Durchsatz von 100 TWh pro Jahr. Basierend auf dieser Zielgröße wurden Transportvolumen (ca. 42 Mio. m³ LH2 pro Jahr), Tankvolumen im Terminal (ca. 775.000 m³) und Schiffsfrequenz (265 Tanker pro Jahr bei 160.000 m³ Tankvolumen) berechnet. In der Konzeption wurden zudem unterschiedliche Betriebsszenarien diskutiert, bspw. das Verhältnis Pipelineeinspeisung zu Hinterlandtransport von LH2 oder konstanter Sendout vs. Peakshaving zur Netzstabilisierung. Letztgenannte können für Betreiber mitunter wirtschaftlich attraktiver sein. Das IFW hat dazu ein Terminalkonzept mit Sektorenkopplung und verschiedenen Betriebsszenarien ausgearbeitet (siehe Abs. IV. Wesentliche Ergebnisse).

Unter dem Lead von Linde wurde ein modulares Terminaldesign entwickelt, welches Anlandung, Lagerung, Verdampfung, Druckaufbau und Netzeinspeisung umfasst. Fünf Module zu je 20 TWh pro Jahr erreichen den erforderlichen Durchsatz und wären mit Komponenten heutiger und absehbar verfügbarer Technologie 2035 umsetzbar.

Ein zentrales Element war die konzeptionelle Auslegung großvolumiger Flachbodentanks für LH2 ohne Vakuumisolation, da diese nur bedingt skalierbar ist. Dafür wurden von der TUD vielversprechende Mehrschicht-Isolationskonzepte entwickelt und rechnerisch untersucht.

Parallel dazu analysierte die HTW die Integration von Kältenachnutzungssystemen. Über CO₂-basierte Sekundärkältekreisläufe kann die im LH₂ gespeicherte Kälte exergetisch nutzbar gemacht, effizient gespeichert und bedarfsgerecht bereitgestellt werden, etwa zur Versorgung von Industriekälteanwendungen. Die bei der Verdampfung freiwerdende Verflüssigungsenergie könnte als Kälteleistung (bis zu 30MW pro Terminalmodul) oder elektrische Leistung (50-70MW pro Terminalmodul) zurückgewonnen werden. Letztgenannte Technologie könnte ab 2040 umsetzbar sein. Diese Konzepte erhöhen die energetische Gesamtausbeute des Terminals signifikant. Die HTW entwickelte hierzu eine vollständige thermodynamische Auslegung samt Bewertung der Speicher- und Pumpleistungen für verschiedene Betriebsszenarien.

Werkstoff- und Bauteilbewertung (AP4)

Im AP4 wurden Werkstoffe und Komponenten hinsichtlich ihrer Eignung für den Betrieb mit LH₂ bewertet. Dabei zeigte sich, dass die in LNG-Terminals üblichen 9%-Nickel-Stähle für Temperaturen unter -165 °C ungeeignet sind. Als geeignet wurden hochlegierte austenitische Chromnickelstähle identifiziert, die über die notwendige Duktilität und Tieftemperaturfestigkeit verfügen, um Versprödung zu vermeiden.

Für alle wesentlichen Bauteile wie Tanks, Pumpen, Rohrleitungen, Dichtsysteme, mechanische Verbindungselemente und Ventile wurde im Verbund geprüft, ob eine Umrüstung möglich oder ein Neubau erforderlich ist.

In der Bewertung wurde deutlich, dass eine vollständige Weiternutzung bestehender LNG-Bauteile nicht möglich ist. Ein Neubau der Hauptkomponenten unter Nutzung vorhandener Flächen, Fundamente und Anleger erscheint technisch sinnvoller.

TUD und IFW analysierten die Verträglichkeit weiterer kryogener Werkstoffe mit LH₂ sowie einige wenige bekannte Kunststoffe. SciDre untersuchte spezifisch den Einsatz von Supraleitern und Magnetmaterialien in LH₂-Umfüllsystemen.

Zudem wurde der Stand der Technik für LH₂-Pumpentechnologien erfasst. Während Hochdruck- und Kraftstoffpumpen für kleine Anwendungen verfügbar sind, fehlen derzeit serienreife Transferpumpen im großen Maßstab. Der Marktbedarf und die sicherheitstechnischen Anforderungen machen die Entwicklung effizienter, verlustarmer Pumpensysteme notwendig.

Regulatorische und rechtliche Aspekte (AP6)

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit Genehmigungsfragen, Sicherheitsanforderungen und bestehenden Normen für u.a. LH₂-Infrastrukturen. Es wurde analysiert, inwieweit bestehende Regelwerke aus der LNG- oder Chemieanlagenverordnung übertragbar sind. Besondere Beachtung fanden Anforderungen an Umfüllvorgänge, Explosionsschutz und Betriebssicherheit. SciDre beteiligte sich mit Know-how aus früheren Projekten zu Flüssighelium und LH₂ an der Bewertung von sicherheitsrelevanten Schnittstellen. Erkenntnisse aus Workshops und Fachgesprächen mit Behörden und Prüfstellen flossen ein.

Innerdeutscher Transport (AP7)

Im Kontext der Versorgung des Hinterlands wurden Transportoptionen für LH₂ per LKW, Bahn und Binnenschiff untersucht. Die Technologie für LKW-Transport gilt als etabliert, für die Binnenschifffahrt besteht jedoch Entwicklungsbedarf. Es wurden Transportkapazitäten, Fahrzeugverfügbarkeit und

Logistikprozesse bewertet. Das IFW hat hier mit einem Industriepartner der Logistik Zuarbeit für TRL-Bewertung und Potential-Abschätzung zugearbeitet. Die Ergebnisse zeigten, dass LH2-Importterminals einen Beitrag zur überregionalen Versorgung leisten können, insbesondere solange keine flächendeckende Wasserstoffpipelineinfrastruktur besteht.

Techno-ökonomische Bewertung und Ausblick (AP8)

Dieses Arbeitspaket analysierte die wirtschaftliche Tragfähigkeit des LH2-Importpfades. Es wurden Investitionskosten, Betriebskosten, Energieeffizienz und Skalierbarkeit des Konzepts untersucht. Dabei zeigte sich, dass LH2 im Vergleich zu chemisch gebundenen Vektoren geringere Umwandlungsverluste aufweist, jedoch höhere Anforderungen an Isolation, Material und Verdampfungstechnik stellt. Die Kältenutzung wurde als energetischer Zusatznutzen positiv bewertet. Die langfristige Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit serienreifer Komponenten sowie regulatorischer Planungssicherheit ab.

Für ein Terminal mit 100 TWh/a Importkapazität wurden spezifische Investitionen von 189 €/kWh ermittelt. Die vollständige Umsetzung eines solchen Terminals ist in modularer Bauweise ab 2035 realistisch, wobei fünf Module à 20 TWh realisiert werden müssten. Ein solcher Aufbau ermöglicht eine flexible Reaktion auf den wachsenden Wasserstoffbedarf und die Skalierbarkeit der Infrastruktur.

Das Teilvorhaben hat hier Zuarbeiten mit Stoffdaten als Berechnungsgrundlage zu LH2 geleistet. Außerdem konnte ein Meeting zwischen AP7, AP8 und einem anderen Projektverbund organisiert werden, der einen Austausch zu technoökonomischen Berechnungsmethoden und Modellen zur Bewertung von LH2-Importen ermöglichte.

IV. Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts konnten wesentliche Ergebnisse erzielt werden, die die Grundlage für die zukünftige Ausrichtung von LNG-Terminals als logistische Knotenpunkte für Wasserstoff bilden. Die umfassende technologische Bestandsaufnahme hat gezeigt, dass die bestehenden LNG-Infrastrukturen in vielerlei Hinsicht speziell auf Methan ausgerichtet sind und für die Umstellung auf Wasserstofftransportvektoren wie Flüssigwasserstoff, Ammoniak, Methanol, LOHC, synthetisches Erdgas und Dimethylether gezielte Anpassungen notwendig sind. Die Analyse der technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Anforderungen für die einzelnen Transportvektoren hat ergeben, dass jede Option spezifische Chancen und Herausforderungen mit sich bringt. Flüssigwasserstoff bietet eine hohe Flexibilität und Reinheit, während Ammoniak von seiner etablierten Logistik profitiert. Methanol und LOHC ermöglichen einen einfachen Transport und die Lagerung unter Umgebungsbedingungen, während SNG insbesondere die schrittweise Integration in vorhandene Infrastrukturen erleichtern. Die Entwicklung und Bewertung von Konzepten für die Um- und Weiternutzung bestehender Terminals zeigte, dass ein modularer Ansatz, der die Nutzung verschiedener Energieträger ermöglicht, langfristig die größte Flexibilität und Wirtschaftlichkeit verspricht. Im Zuge der werkstofflichen und konstruktiven Bewertung wurde deutlich, dass nicht alle Materialien der bestehenden Infrastruktur ohne Weiteres für die Anforderungen tiefkalter oder chemisch anspruchsvoller Medien geeignet sind. Risiken wie Versprödung, Korrosion oder Dichtigkeitsverluste müssen durch gezielte Materialauswahl und konstruktive Anpassungen adressiert werden, um eine sichere und langlebige Nutzung zu gewährleisten.

Die Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen hat ergeben, dass der aktuelle Rechtsrahmen für LNG zwar etabliert ist, für Wasserstoff und dessen Derivate jedoch noch wesentliche Anpassungen erforderlich sind, um Planungssicherheit und Rechtssicherheit zu schaffen. Die durchgeführten techno-ökonomischen Bewertungen zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Umrüstungen maßgeblich von der Wahl des Transportvektors, dem notwendigen Anpassungsaufwand und der zukünftigen Nutzung abhängt. Eine frühzeitige Berücksichtigung von Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, die Auswahl geeigneter Materialien und Komponenten sowie der Aufbau eines klaren regulatorischen Rahmens wurden als zentrale Handlungsempfehlungen abgeleitet. Insgesamt liefern die Ergebnisse des Projekts eine solide Basis, um die Transformation von LNG-Terminals hin zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur strukturiert, sicher und wirtschaftlich zu gestalten.

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens sind ausschließlich im Bereich LH2 entstanden und aus Gesamtvorhabensicht in Inhalten und Zuarbeiten in den Dokumentationen, den ausgearbeiteten Übersichten und Tabellen zu den Meilensteinen sowie dem Synthesebericht zu finden.

AP1:

- Kriterienkatalog zur Beurteilung der H2-Readiness für verschiedene Transportoptionen (Terminal und Transportvektoren)

AP2:

- Marktübersicht LH2: Verflüssiger, Schiffe, Terminals
- Technologische Bestandsaufnahme von LH2-Terminals und Komponenten
- Stakeholder Analyse

AP3:

- Ausarbeitung zu verfügbaren LH2-Pumpen und deren Spezifikationen
- Innovatives mehrschichtiges Isolationskonzept für Flachbodentanks ohne Vakuum für LH2
- Konzeptstudie für Kältenachnutzungssystem auf Basis CO₂-basierter Sekundärkältekreisläufe
- Weiteres Terminalkonzept mit Sektorenkopplung unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsszenarien (unter der Auflistung)

AP4:

- Aufstellung Wasserstoffbeständiger kryogener Werkstoffe

AP8:

- Ein LH2-Terminal hat im Vergleich zu anderen Vektoren eine kompakte Fläche, vergleichsweise geringe Capex und Opex, die höchste Effizienz und den kleinsten CO₂-Ausstoß durch Schiffsverkehr.

Das Teilvorhaben des IFW hat mit den Verbundpartnern entscheidende Grundlagen für die Nutzung von LNG-Terminals als LH2-Importinfrastruktur geschaffen. Die Analysen haben gezeigt, dass ein direkter Umbau bestehender Anlagen nicht möglich ist, wohl aber die Nutzung von Standorten und Teilkomponenten. Technologisch wurden verlässliche Konzepte für Großtanks, Kältenutzung und Materialauswahl entwickelt. Die realistische Umsetzungsperspektive ab 2035 macht LH2 zu einem strategisch tragfähigen Vektor in der nationalen Importstrategie.

AP3: Terminalkonzept für den Importvektor Flüssigwasserstoff

Die folgenden Überlegungen gehen davon aus, dass die aktuell in Planung befindlichen deutschen LNG-Terminals ab 2043 kein Erdgas mehr in das Leitungsnetz einspeisen, ihre Aufgaben in der Energieversorgung jedoch weiter mit einem Grünen Energieträger zu erfüllen haben. So sind bei der Auslegung von LNG Terminals grundsätzlich die Beschaffenheit des stromab gelegenen Erdgasnetzes zu betrachten und ihre spätere Umwidmung auf den Wasserstoffbetrieb zu berücksichtigen. Zudem empfiehlt es sich, die in den verschiedensten Sektoren bereits absehbar steigenden Wasserstoffbedarfe mit in die heutige Planung einfließen zu lassen. In diesem Sinne ist der in der Abbildung 1 schematisch dargestellte Aufbau eines LNG-Terminals der Ausgangspunkt der weiteren Überlegungen.

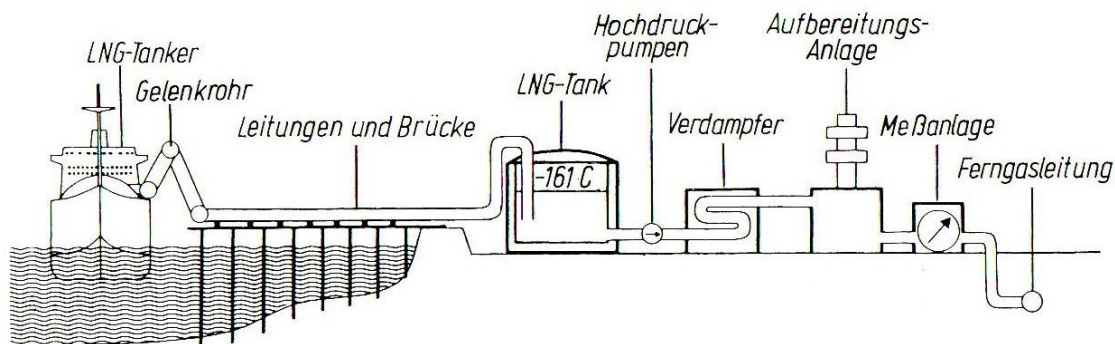


Abbildung 1: Schema eines LNG-Terminals und seiner Hauptkomponenten (Cerbe, 1999)

Aus dem Schema sind die Hauptfunktionen des Terminals leicht erkennbar:

- Strategischer Zugang zum nicht leitungsgebundenen Erdgasmarkt über den Seeweg
- Anlandung und Zwischenspeicherung von tiefkalt verflüssigtem Gas
- Regasifizierung der Flüssigkeit und Einspeisung in das Leitungsnetz

Der letzte Aufzählungspunkt ist an dieser Stelle besonders hervorzuheben, weil das deutsche Erdgasnetz mit seiner Leitungslänge von mehr als 500.000 km an das europäische Fernleitungsnetz angebunden ist. Über das inländische Verteilnetz werden aktuell Haushalte, Industrie und die Stromwirtschaft mit Erdgas versorgt. In diesen Sektoren findet bereits heute eine Transformationsbewegung in Richtung Wasserstoff statt und die zukünftigen Wasserstoffnutzer erwarten daher an den unterschiedlichen Entnahmestellen im Land die bedarfsgerechte Lieferung in garantierter Qualität. Für den zukünftigen Wasserstoffbetrieb der umgewidmeten LNG-Terminals bedeutet das die Kompatibilität zum entstehenden Wasserstoffnetz des European Backbone.

Über die Pipelinegasversorgung hinaus orientiert sich der Mobilitätssektor insbesondere bei Schienen- und Nutzfahrzeugen sowie der Luftfahrt und der Küsten- bzw. Binnenschifffahrt auch auf den Einsatz von flüssigem Wasserstoff als Treibstoff. Hier gibt mit Blick auf Reichweite, bzw. Betriebszeit vor allem die hohe Energiedichte von LH₂ den Ausschlag. Bei der Planung der LNG-Terminals sollte daher die Analogie zum Import von Diesel mitberücksichtigt werden.

Betriebszenarien für ein LH₂-Terminal

- Import von LH₂ mit Regasifizierung und Einspeisung in ein Wasserstoffnetz: analog zum LNG kann die Bereitstellung von Gas aus einer zu verdampfenden Flüssigkeit mit hoher Dynamik erfolgen, weil zwischen Tank und Pipeline keine weiteren chemischen Prozesse nachgeschaltet sind. Durch das Zuschalten von Pumpen lassen sich die sendout-Raten in die Pipeline sehr schnell vervielfachen (z.B. im LNG-Terminal Revithoussa bis zum Faktor 8, s.u.) und damit Druckschwankungen im Leitungssystem ausgleichen. LH₂-Terminals sind neben der Grundlastversorgung auch die idealen peak shaver des zukünftigen Wasserstoffnetzes und tragen zu seiner Stabilisierung bei. Vor dem Hintergrund, dass zukünftig auch in Deutschland Wasserstoff regenerativ erzeugt werden wird (siehe Ziele des Leitprojektes H2Mare), bekommt dieser Aspekt eine besondere Bedeutung. Neben der bekannten diskontinuierlichen Entnahme von H₂-Gas aus dem Netz ist auch seine Produktion tageszeitlichen und metrologischen Schwankungen unterworfen. Peak shaving ist eine unverzichtbare Aufgabe der Flüssigimport-Terminals und muss zukünftig auch mit Wasserstoff erfüllt werden. **1)**
- In der Nähe des LH₂-Terminals sollte ein Abnehmer für gasförmigen Wasserstoff bei geringem Druck vorhanden sein. Je nach realisiertem Tankkonzept auf den Transportschiffen, kann LH₂ bei atmosphärischem Druck mittels einer Pumpe oder durch Druckaufbau im Tank in den Lagerbehälter an Land umgefüllt werden. Das im zweiten Fall anfallende flash gas wird idealer Weise direkt, z.B. durch Verstromung verwertet. Alternativ kann das flash gas auch mittels Kompressoren direkt in die Pipeline eingespeist werden.
- Import von LH₂ unter Nutzung der Kälte:
Vor nahezu jeder energetischen oder stofflichen Anwendung wird LH₂ durch die Zufuhr von Umgebungswärme verdampft und Wasserstoff wieder gasförmig. Dabei wird die "Energie" der Kälte, ca. 0,7 kWh/kg, endgültig verworfen. Mit Hilfe eines Sekundärkältekreislaufes kann die LH₂-Kälte von -253°C in einen für übliche Kälteanwendungen nutzbaren Bereich von ca. -40°C und höher verschoben werden. In dem Sekundärkreislauf wird die Kälte quasi ohne weiteren Energieaufwand gespeichert, kann beliebig weit transportiert und bei Bedarf für Prozesskälte, Klimatisierung, Lagerung, etc., bereitgestellt werden. Durch die in diesen Kälteprozessen erzielbare Stromersparnis, liefert LH₂ mehr Energie im Empfängerland ab, als im Heizwert des chemischen Energieträgers enthalten ist. In der Abbildung 2 ist das Prinzip sowie die Integration im Terminal an Stelle der üblichen Verdampfer schematisch dargestellt. Im Sekundärkältekreislauf wird als Kältemittel CO₂ verwendet. Um die angestrebte Temperatur des H₂ zu erreichen, bedarf es im Wärmeübertrager einen, im Vergleich zum LH₂, 8-fach höheren CO₂-Massenstrom. Die Nachnutzung von Kälte sollte bereits bei der Einspeisung von LNG vorgesehen werden und bei der Terminal-Standortentwicklung einfließen. Ein Kälteverbund zu Industrie, Handel oder Haushalten im Umland steigert die Effizienz der logistischen Kette.

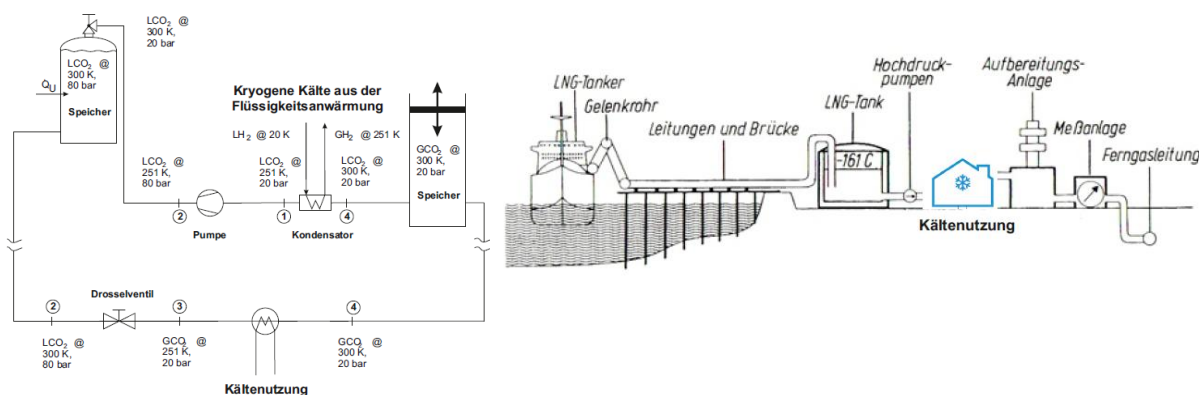


Abbildung 2: Kältenachnutzung in LNG- bzw. LH₂-Terminal mittels sekundärem Kältekreislauf

Import von LH₂ für die direkte Versorgung von bereits heute bekannten LH₂-Nutzern

- Mobile Anwendungen, vorwiegend in Nutz- und Schienenfahrzeuge sowie in der Luft- und Schifffahrt
- Industrielle Verwendung von LH₂ aufgrund des hohen Reinheitsgrads (99,999990 %) des aus dem der Flüssigkeit gewonnen Wasserstoffgases, z.B. Halbleiter- und chemische Industrie
- Import von LH₂ für den beschleunigten Hochlauf des Wasserstoffmarktes (Virtuelle Pipeline): Für LH₂ existiert eine ausgereifte und etablierte Technologie für die Speicherung und den Transport. Der Transport an Land ist gängige Praxis und entsprechend reguliert. Von einem LH₂ Terminal lassen sich daher in kurzer Zeit Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zu den H₂-Anwendern einrichten. Die „virtuelle Pipeline“ hilft die Zeit zum Ausbau eines flächendeckenden H₂-Leitungsnetzes überbrücken. Aus diesem Grund sollte an den geplanten LNG-Terminals parallel der Import von LH₂ vorgesehen werden.
- Import von LH₂ für den parallelen Transport von chemischer und elektrischer Energie: Die kryogenen Bedingungen in LH₂ – Rohrleitungen erlauben den verlustfreien Stromtransport mittels supraleitender Kabel, die konstruktiv in das Leitungssystem eingelassen sind. So können chemische und elektrische Energie parallel, beide in hoher Dichte und auf gleicher Trasse transportiert werden. Für ein LH₂-Terminal ist die Einspeisung von off-shore-Windstrom naheliegend.

1) Ergänzung zu den Aspekten sendout-Dynamik und peakshaving

Grundsätzlich ist der peakshaving-Begriff, der sich weitestgehend auf die vom Terminal ausgeglichene Lastdynamik des Netzes in kurzen Zeitperioden bezieht, weiter zu fassen und ist eher synonym und allgemein für Flexibilität und Dynamik des sendouts zu verstehen. Durch das hohe Dichteverhältnis von Flüssig- und Gasphase lässt kurzfristig eine hohe Laständerungsgeschwindigkeit erreichen. Diese Fähigkeit gehört zu den intrinsischen Eigenschaften eines Flüssiggasterminals, speziell zu denen von LNG-Terminals und geschieht in der Regel durch das Zu- oder abschalten von HD-Pumpen und Verdampfern. Peakshaving wird nicht nur aus technischen Gründen, z.B. der Stabilisierung des Netzes im Tagesgang oder Versorgung diskontinuierlicher Verbraucher benötigt, sondern dient auch

kommerziellen Aspekten. Mit dem variablen sendout eines Flüssiggasterminals werden Marktschwankungen für Gasversorgungsunternehmen lukrativ nutzbar.

Für die Beurteilung, in welcher Weise der zukünftige Wasserstoffbetrieb eines Importterminals zu erfolgen hat, ist es wichtig seine jeweilige Einbettung in das Leitungsnetz und der Versorgung der daran angeschlossenen Verbraucher zu kennen. Wie bei LNG-Terminals entscheiden die Elastizität des Leitungsnetzes und die Nachfrageprofile über die erforderliche sendout-Flexibilität des Terminals. Die oben zu den Betriebsszenarien eines LH₂-Importterminals gemachten Aussagen, stützen sich daher auf Beispiele dreier existierender LNG-Terminals:

- FSRU Esperanza/Wilhelmshaven
- Revithoussa/Griechenland
- Gate Terminal Rotterdam/Niederlande

Diese Beispiele sind gewählt worden, weil sie exemplarisch für drei unterschiedliche Terminal-Typen stehen, deren Auslegung, technische Realisierung und Betrieb unter verschiedenen, Rahmenbedingungen erfolgte, die zudem zeitlichen Veränderungen unterliegen.

FSRU Esperanza

Technische Ausstattung:

- Tank capacity: 263.000 m³ LNG
- Carrier capacity: max. 180.000 m³ LNG
- 3 HP-Pumps (65-95 bar) 92 m³ – 275 m³ LNG/h

<https://ltew.uniper.aws.ixishosting.co.uk/en/fsru>

Betrieb:

Im Rahmen der installierten Pump- und Verdampfungskapazität lässt sich die FSRU prinzipiell flexibel betreiben. Am aktuellen Einsatzort Wilhelmshaven dient Esperanza jedoch der Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit des deutschen Ergasnetzes. Diese war speziell im Jahr 2022 durch den kriegsbedingten Ausfall der russischen Lieferungen gefährdet. Deutschland sah sich, ohne nennenswerte Erdgasproduktion und einer hohen Abhängigkeit vom Russischen Gas, von einer akuten Mangelsituation bedroht. In diesem Sinne wird Esperanza, wie in Abbildung 3 dargestellt, mit einem größtenteils konstanten sendout gefahren, um die entstandene Lieferlücke zu schließen.



Abbildung 3: Sendout FSRU Esperanza,
links 06.01.2023 – 06.11.2023, rechts 06.10.2023 – 06.11.2023 <https://alsi.gie.eu>

Getrieben durch die ab Februar 2022 veränderten energiepolitischen Verhältnisse, waren ihre kurzfristige Verfügbarkeit und Anschlussfähigkeit an das deutsche Fernleitungsnetz die wesentlichen

Auswahlkriterien für die FSRU Esperanza. Deshalb liefern sowohl ihre technischen Randbedingungen als auch der aktuelle Einsatzzweck nur wenige Erkenntnisse für einen zukünftigen Wasserstoffbetrieb am Standort Wilhelmshaven.

Revithoussa

Technische Ausstattung:

- Tank capacity: 225.000 m³ LNG (2x65.00 + 1x95.000)
- Carrier capacity: max. 290 m vessels (260.000 m³ LNG)
- 8 HP-Pumps (25 -75 bar)
design parameters:
 - normal sendout: 106 m³ LNG/h
 - peak: 554 m³ LNG/h
 - emergency: 831 m³ LNG/h

DEPA OM-Doc.: Process Design Basis

Betrieb:

Die Planungen zu Revithoussa standen in den frühen 90-iger Jahren unter dem Einfluss der politischen Veränderungen in Osteuropa. In dieser Periode wurde die möglichst breite Versorgung Europas mit russischem Erdgas favorisiert und so baute auch der griechische Staat sein bis dahin nur rudimentäres Fernleitungsnetz aus. Bis in die 2000-er Jahre hinein wurde das griechische Netz lediglich über die bulgarische Grenze mit russischem Pipelinegas versorgt. Der Terminal Revithoussa wurde daher parallel zum Netzausbau aus strategischen Gründen als zweiter Einspeisepunkt geplant und öffnete dem Gasversorger DEPA gleichzeitig den Zugang zum globalen LNG Markt, zunächst Skikda/Algerien.

Mit dem russischen Angriffskrieg 2022 kehrten sich in dieser Beziehung die Verhältnisse für Revithoussa um. Bulgarien, wurde seitens Russland durch den Abbruch der Gaslieferungen (90% Anteil) sanktioniert. Der Terminal Revithoussa deckt heute einen Teil der entstandenen Versorgungslücke ab, infolge dessen sich aktuell auch der sendout auf einen relativ konstanten Niveau befindet. Die Abbildung 4 zeigt deutlich diesen Betriebszustand, in dem selbst jahreszeitliche Schwankungen durch die hohe Grundlast nicht mehr erkennbar sind.



Abbildung 4: Sendout LNG-Terminal Revithoussa,
links 06.01.2023 – 06.11.2023, rechts 06.09.2023 – 06.11.2023

Anders sah die Situation z.B. in den Jahren 2018 und 2019 aus. Weder die Pandemie noch der russische Angriffskrieg auf die Ukraine haben zu diesem Zeitpunkt den Energiemarkt aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Abbildung 5 zeigt den Verlauf des sendouts aus der Zeit kurz vor diesen beiden Ereignissen.

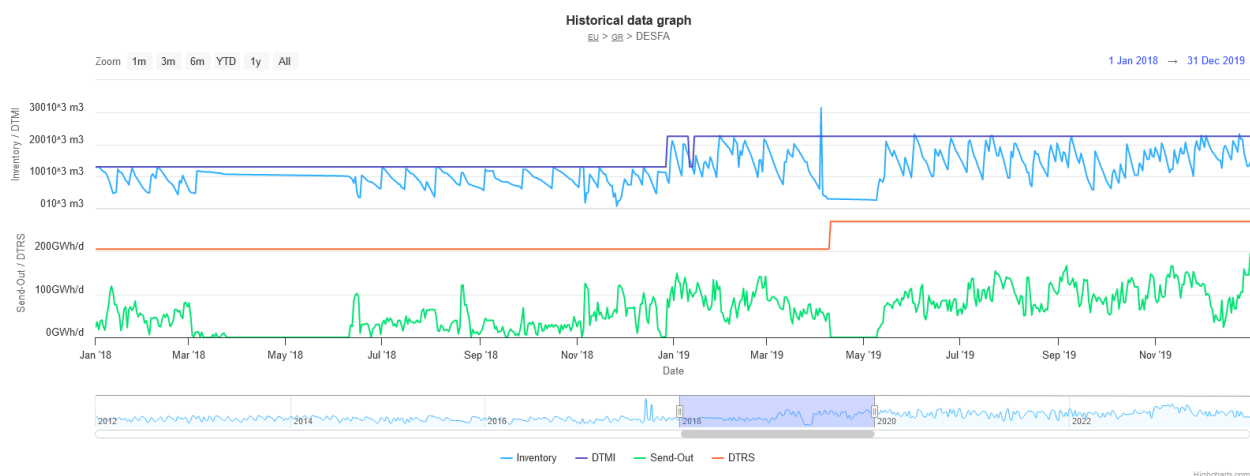


Abbildung 5: Sendout LNG-Terminal Revithoussa, 01.01.2018 – 31.12.2019

Neben der insgesamt niedrigeren Durchschnittsmenge, fällt insbesondere die große Schwankungsbreite auf, in denen der Terminal Revithoussa auf Marktschwankungen reagiert. Dabei werden z.B. in den Monaten April und Mai minimale Mengen abgerufen, um dann kurzfristig auf den Jahresdurchschnitt hochgefahren zu werden.

Gate Terminal Rotterdam

Technische Ausstattung:

- Tank capacity: 540.000 m³ LNG (3 tanks)
 - Carrier capacity: max. 270.000 m³ LNG
 - HP-Pumps
- design parameters:
- max.: 2170 m³ LNG/h

<https://www.gateterminal.com/en/gate-terminal/profil/facts-figures>

Betrieb:

Besonderheiten: Die Niederlande fördern eigenes Erdgas und der Terminal Rotterdam verfügt über einen LNG-Verflüssiger, mit dem Pipelinegas verflüssigt und gespeichert werden kann. Am Standort besteht zudem die Möglichkeit Carrier zu beladen, also prinzipiell LNG zu exportieren. Der sendout in Rotterdam wird daher nicht ausschließlich vom Bedarf und der Marktsituation beim Einkauf und Verkauf von LNG, bzw. Pipelinegas bestimmt, sondern auch von inländischen Produktionsseite beeinflusst. In diesem Sinne sind die in der Abbildung 6 dargestellten zeitlichen Verläufe des sendouts nicht analog mit den zu betrachteten Daten von Esperanza und Revithoussa vergleichbar. Gleichwohl lässt sich erkennen, dass die schwankenden Raten der Jahre 2018 und 2019 einem nahezu konstanten sendout im Jahr 2023 gewichen sind. Hier liegt der Schluss nahe, dass auch der LNG-

Terminal Rotterdam weniger als peakshaver (so wird er übrigens offiziell von der Gasunie bezeichnet), sondern als Basisversorgung für den Ausgleich der entfallenen russischen Lieferungen betrieben wird.



Abbildung 6: Sendout LNG-Terminal Rotterdam,
links 01.01.2018 – 31.12.19, rechts 01.01.2023 – 06.11.2023

Wenngleich diese Betriebsszenarien Verflüssigung von Pipelinegas aus eigener Produktion und Beladung von Transportschiffen in reinen LNG-Importterminals nicht vorgesehen sind, werden sie aber bei der zukünftigen Verwendung von Grünem Wasserstoff in den Leitungsnetzen relevant. Insbesondere im Zusammenspiel mit der Produktion von H₂ aus offshore-Wind (z.B. H2 Mare) drängt sich die Verflüssigung und Speicherung nahezu auf. Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Studie der Gasunie und der TU Delft.

Converting the LNG-Peakshaver to be fit for processing LH2, Reneke Kolff, Delft University of Technology, 2021

Fazit:

Die aktuell geplanten deutschen Importterminals stehen mit weniger als 20 Jahren vor einer relativ kurzen Betriebszeit für den Umschlag von LNG, denen eine deutlich längere Phase der Nutzung für den Wasserstoffimport folgen wird. Die genannten Beispiele zeigen, dass in den Betrachtungszeiträumen von Jahrzehnten ein basic design das lediglich für die Deckung einer Grundlast dimensionierter ist nahezu fahrlässig ist. Ohne dynamische Reserven wird das zukünftige H₂-Netz nicht auskommen, fehlt ihm doch der kontinuierliche Zustrom, wie man ihn bis 2022 aus russischen Quellen kannte. In diesem Sinne ist für ein zukünftigen H₂-Importterminals die technologische Fähigkeit in kurzer Zeit den sendout zu vervielfachen eine notwendige Eigenschaft.

V. Verwendung der Zuwendung

V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zählten vor allem die Personalkosten, da die Durchführung anspruchsvoller wissenschaftlicher Analysen, die Entwicklung technischer Konzepte und die Koordination der verschiedenen Arbeitspakete qualifiziertes Fachpersonal auf Seiten der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen erforderte. Die Personalmittel ermöglichten die kontinuierliche Bearbeitung der Arbeitspakete, die enge Abstimmung zwischen den Projektpartnern und die Integration von Fachexpertisen aus unterschiedlichen Disziplinen.

Die Unteraufträge an die TU Dresden, die HTW Dresden und SciDre beruhen auf fachlicher Notwendigkeit. Die Alleinstellungsmerkmale der Unterauftragnehmer beruhen auf langjähriger wissenschaftlicher, technischer und praktischer Erfahrung in Fachgebieten, die das IFW nicht abdeckt und überdies Synergien im und für das Fachgebiet des Flüssigwasserstoffs schaffen. Sie grenzen sich scharf voneinander ab und ermöglichen gemeinsam eine Skalierbarkeit und Sektorenkopplung. Für die Einbringung der Kompetenzen in das Projekt, namentlich und stark vereinfacht: Kryotechnik, Kryotankentwicklung, Entwicklung und Auslegung von Sekundärkältekreisläufen zur Nutzung der Kälte beim Regasifizieren, Entwicklung von Pumpen für tiefkalte Flüssigkeiten mit schwebenden Lagern auf Basis magnetischer oder supraleitender Materialien und langjährige praktische Erfahrung im Handling mit kryogenen Flüssigkeiten, insbesondere LH₂, war die Vergabe der Unteraufträge notwendig.

- F+E Mitarbeit der TUD zum Thema Berechnung und Auslegung von Terminal-Komponenten und Isolationskonzepten
- F+E Mitarbeit der HTW Dresden zum Thema LH₂-Verdampfer und Kältenachnutzung
- F+E Mitarbeit von SciDre zu LH-Terminal-Infrastruktur, Transferpumpen, Bauteil- und Werkstoffbewertung, sowie rechtlichen und regulatorischen Aspekten bei LH₂-Umfüllvorgängen.

Reisekosten sind geringer ausgefallen als erwartet. Aufgrund der Vielzahl an Verbundpartnern war eine Terminfindung schwierig, sodass einige Projekttreffen virtuell substituiert wurden.

Insgesamt spiegeln die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises eine projektadäquate und zielgerichtete Mittelverwendung wider, die den besonderen Anforderungen einer technologieoffenen, interdisziplinären Forschung und Entwicklung im Bereich der Transformation von LNG-Terminals in Wasserstofflogistiknotenpunkten gerecht wurde. Alle Ausgaben wurden im Rahmen der geltenden Förderrichtlinien und nach den Grundsätzen der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit nachgewiesen und dokumentiert.

V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten erwiesen sich als notwendig und in ihrer Tiefe und Breite angemessen, um die anspruchsvolle Zielsetzung einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Transformation von LNG-Terminals zu Standorten für Wasserstoff und dessen Derivate fundiert vorzubereiten. Bereits zu Projektbeginn wurde deutlich, dass die Umstellung von etablierten LNG-Infrastrukturen auf neue Wasserstofftransportvektoren weit über reine Umbaumaßnahmen hinausgeht und ein umfassendes Verständnis der technischen, materialwissenschaftlichen, wirtschaftlichen sowie regulatorischen Rahmenbedingungen erfordert.

Vor diesem Hintergrund war es unabdingbar, zunächst eine umfassende technologische Bestandsaufnahme durchzuführen und die spezifischen Anforderungen sowie Eigenschaften der einzelnen Wasserstofftransportvektoren zu analysieren. Diese Arbeiten lieferten die Grundlage, um realistische und zukunftsfähige Nutzungskonzepte für bestehende Terminals zu entwickeln und die Kompatibilität der vorhandenen Infrastruktur im Detail zu bewerten. Die genaue Untersuchung der eingesetzten Materialien und Bauteile war erforderlich, um Risiken wie Versprödung und Korrosion frühzeitig zu adressieren und gezielte Empfehlungen für notwendige Material- oder Komponentenauswahl aussprechen zu können. Auch die regulatorischen und genehmigungsrechtlichen Analysen waren essenziell, da die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb von LNG-Terminals klar definiert sind, für die Nutzung mit Wasserstoff und seinen Derivaten jedoch zahlreiche offene Fragen und Unsicherheiten bestehen. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen haben daher nicht nur bestehende Hemmnisse und Lücken im Regelwerk identifiziert, sondern zugleich auch Ansätze für eine Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens aufgezeigt, was für die spätere Umsetzung in der Praxis von zentraler Bedeutung ist.

Die techno-ökonomischen Bewertungen, die integraler Bestandteil des Projekts waren, ermöglichten eine objektive Einschätzung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Umrüstungs- und Nutzungsszenarien. Durch die Kombination von technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekten konnten Investitionsbedarfe, Betriebskosten sowie Chancen und Risiken für verschiedene Transportvektoren transparent dargestellt werden. Dies erlaubt eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Betreiber, Investoren und politische Akteure. Die Angemessenheit der Projektarbeiten zeigt sich nicht zuletzt im interdisziplinären Ansatz und in der systematischen Verknüpfung von ingenieurtechnischem, materialwissenschaftlichem, ökonomischem und juristischem Fachwissen. Durch die Einbindung aller relevanten Kompetenzen wurde sichergestellt, dass die Projektergebnisse nicht nur den aktuellen Stand der Wissenschaft widerspiegeln, sondern auch praxistaugliche und umsetzbare Empfehlungen für die Umrüstung und Nutzung von LNG-Terminals liefern.

Zusammenfassend war das breite Arbeitsspektrum des Projekts angesichts der Vielschichtigkeit und Komplexität der Aufgabenstellung zwingend notwendig und in seinem Umfang und Anspruchsgrad vollumfänglich angemessen. Nur durch diese ganzheitliche Betrachtung konnten belastbare Lösungen entwickelt und Grundlagen geschaffen werden, die eine nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Nutzung der LNG-Terminals als Bausteine einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft ermöglichen.

VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse bieten einen vielseitigen und nachhaltigen Nutzen für eine breite Anwendergruppe und besitzen ein erhebliches Verwertungspotenzial im Sinne des festgelegten Verwertungsplans. Bereits in der Projektplanung wurde darauf geachtet, dass die gewonnenen Erkenntnisse nicht nur den aktuellen wissenschaftlichen Diskurs bereichern, sondern vor allem auch in der Praxis, bei der zukünftigen Ausrichtung und Umgestaltung von LNG-Terminals, unmittelbar eingesetzt werden können.

Ein wesentlicher Nutzen ergibt sich für Betreiber bestehender und geplanter LNG-Terminals. Die detaillierten Analysen und entwickelten Handlungsempfehlungen ermöglichen es ihnen, bereits in der

frühen Planungs- und Investitionsphase gezielt Maßnahmen zur Vorbereitung auf eine spätere Umrüstung auf wasserstoffbasierte Energieträger zu ergreifen. Durch die Bewertung technischer, materialseitiger, wirtschaftlicher und regulatorischer Aspekte werden Fehlinvestitionen vermieden, Schnittstellenprobleme frühzeitig erkannt und die Betriebssicherheit sowie die Effizienz zukünftiger Anlagen erhöht. Insbesondere die Ausarbeitung von modularen und flexiblen Terminalkonzepten unterstützt eine bedarfsgerechte und wirtschaftliche Nutzung, da unterschiedliche Wasserstofftransportvektoren und -derivate je nach Marktentwicklung aufgenommen werden können. Darüber hinaus profitieren politische Entscheidungsträger und Behörden vom erarbeiteten Daten- und Bewertungsrahmen. Die Projektergebnisse liefern ihnen belastbare Grundlagen für die Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens und unterstützen die zielgerichtete Ausgestaltung von Normen, Standards und Genehmigungsverfahren. Dies trägt dazu bei, Planungssicherheit für Investoren und Betreiber zu schaffen und die Voraussetzungen für einen beschleunigten Markthochlauf wasserstoffbasierter Energiesysteme zu verbessern.

Ein weiterer Nutzen zeigt sich für die Forschung und Entwicklung. Die erarbeiteten Konzepte, Materialbewertungen und techno-ökonomischen Analysen bieten eine solide Grundlage für weiterführende Projekte im Bereich Wasserstofflogistik, Anlagenbau und Materialwissenschaft. Durch die systematische Zusammenführung von Wissen aus verschiedenen Disziplinen werden neue Forschungsfragen identifiziert, Synergieeffekte erzielt und die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit der beteiligten Einrichtungen gestärkt.

Auch für die Industrie ergeben sich direkte Anknüpfungspunkte. Die in der Praxis validierten und bewerteten Lösungen ermöglichen es Anlagenbauern, Ausrüstern und Zulieferern, innovative Produkte und Dienstleistungen zielgerichtet zu entwickeln und am Markt zu platzieren. Der Transfer der Erkenntnisse in Aus- und Weiterbildungsprogramme unterstützt zudem die Fachkräftesicherung und trägt zum Aufbau eines spezialisierten Kompetenznetzwerks im Bereich Flüssigwasserstoff und alternative Energieträger bei.

Nicht zuletzt ermöglichen die Projektergebnisse, das Potenzial der bestehenden LNG-Infrastruktur auch während der Übergangsphase zu Brückentechnologien effizient zu nutzen und gleichzeitig die Weichen für eine langfristig nachhaltige und CO₂-freie Energieversorgung zu stellen. Die in den Verwertungsplan aufgenommenen Maßnahmen wie regelmäßige Dokumentation, zielgruppenspezifische Aufbereitung, Wissenstransfer durch Workshops, Veröffentlichungen und die Einbindung von Stakeholdern sorgen dafür, dass die Erkenntnisse möglichst schnell und umfassend in relevante Entscheidungs- und Entwicklungsprozesse einfließen.

Insgesamt stellt die Verwertbarkeit der Projektergebnisse einen entscheidenden Beitrag zur Transformation der Energieinfrastruktur dar. Sie schaffen die Grundlage für nachhaltige Investitionen, innovative technische Lösungen und eine zukunftsfähige Entwicklung der gesamten Wasserstoffwirtschaft. Die Ergebnisse bieten somit einen hohen Mehrwert für Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft und stärken zugleich die Rolle der beteiligten Institutionen als Impulsgeber und Kompetenzträger im Bereich der Wasserstofftechnologien.

VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit

Während der Laufzeit des Projekts zeigte sich ein dynamischer Fortschritt im gesamten Projektumfeld, der durch technische, regulatorische und marktbezogene Entwicklungen geprägt war. Bereits zu Projektbeginn war das Thema der Transformation von LNG-Terminals in den Fokus energiepolitischer und industrieller Debatten gerückt, jedoch fehlten vielfach belastbare Entscheidungsgrundlagen, praxisnahe Konzepte und übertragbare Bewertungsmodelle. Mit dem Fortschreiten des Projekts konnten nicht nur neue wissenschaftliche Erkenntnisse generiert werden, sondern es wurde auch ein erheblicher Beitrag dazu geleistet, relevante Akteure miteinander zu vernetzen und den Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaft, Industrie und Politik zu fördern.

Im technischen Bereich beschleunigte sich die Entwicklung alternativer Wasserstofftransportvektoren und die dafür benötigten Technologien. Zahlreiche Pilotprojekte und Demonstrationsanlagen für Flüssigwasserstoff, Ammoniak, Methanol und LOHC wurden initiiert oder weiterentwickelt. Die Diskussion um neue Materiallösungen und Bauteiloptimierungen, insbesondere für tiefkalte Anwendungen und die Langzeitbeständigkeit von Infrastrukturkomponenten, erhielt durch die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wichtige Impulse. Zudem wurden bestehende LNG-Infrastrukturen verstärkt auf ihre Umrüstbarkeit und Kompatibilität mit Wasserstoff und dessen Derivaten geprüft, was zu einem wachsenden Interesse an modularen und flexiblen Terminalkonzepten führte. Regulatorisch kam es zu mehreren Initiativen auf nationaler und europäischer Ebene, die darauf abzielten, die Rahmenbedingungen für den Import, Transport und die Nutzung von Wasserstoff und seinen Derivaten weiterzuentwickeln. Die anhaltende Diskussion über die Anpassung bestehender Normen, Standards und Genehmigungsverfahren wurde durch die Projektergebnisse maßgeblich unterstützt. Erkenntnisse zu rechtlichen Hemmnissen und Vorschlägen für die Fortentwicklung des Rechtsrahmens fanden Eingang in laufende Konsultationsprozesse und wurden von Fachgremien aufgegriffen. Damit konnte das Projekt zur Erhöhung der Planungssicherheit und zur Beschleunigung von Genehmigungs- und Investitionsentscheidungen beitragen.

Auch im Marktumfeld war während der Projektlaufzeit eine spürbare Veränderung erkennbar. Das Interesse von Terminalbetreibern, Energieversorgern, Ausrüstern und Zulieferern an praktikablen und wirtschaftlich tragfähigen Umrüstungsoptionen für LNG-Terminals stieg deutlich an. Die von Seiten der Industrie artikulierte Nachfrage nach belastbaren Bewertungsmaßstäben, konkreten Handlungsempfehlungen und technisch ausgereiften Lösungen unterstrich die Relevanz der im Projekt bearbeiteten Fragestellungen. Gleichzeitig zeigte sich eine wachsende Bereitschaft zu Investitionen in zukunftsfähige Infrastruktur und eine Öffnung gegenüber technologieoffenen und flexiblen Konzepten für Wasserstoff- und Derivatlogistik.

Nicht zuletzt wurde auch im Bereich der Vernetzung und Zusammenarbeit ein deutlicher Fortschritt erzielt. Im Rahmen des Projekts konnten bestehende Partnerschaften zwischen Forschungseinrichtungen, Industrieunternehmen, Fachverbänden und Behörden weiter ausgebaut und neue Kooperationsmodelle initiiert werden. Der enge Austausch zwischen den Akteuren trug dazu bei, einen gemeinsamen Wissensstand zu schaffen, bestehende Erkenntnisse zu bündeln und die Umsetzung innovativer Ansätze zu beschleunigen. Zusammengefasst ermöglichte die Projektlaufzeit nicht nur die Bearbeitung und Vertiefung wissenschaftlicher und technischer Fragestellungen, sondern trug auch maßgeblich dazu bei, den Fortschritt im gesamten Projektumfeld zu fördern. Die erarbeiteten Ergebnisse und der entstandene Dialog bilden eine tragfähige Grundlage für die anstehenden Transformationsprozesse in der deutschen und europäischen Energieinfrastruktur.

VIII. Erfolgte Veröffentlichungen

Es ist derzeit keine weitere Veröffentlichung neben dem Synthesebericht des Verbundes geplant.