Fraunhofer ISE

Leitprojekt TransHyDE

TransHyDE-Projekt LNG2Hydrogen

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

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I: Kurzbericht

Stand:	30.06.2025
Einreichungsdatum (TIB):	30.06.2025
Partnerin/Partner:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Autorin/Autor:	Anna Wunsch, Marius Holst (Projektleitung ISE), Paul Beutel, Ramy Essam, André Sternberg
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE-LNG-Terminals
Förderkennzeichen:	03HY210G
Disclaimer:	*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 3
Tabellenverzeichnis 3
I. Ursprüngliche Aufgabenstellung 4
II. Vormaliger Stand des Wissens 4
III. Ablauf des Vorhabens 4
IV. Wesentliche Ergebnisse 5
V. Literaturverzeichnis 8

Abbildungsverzeichnis

Abbildung IV-1: Wasserstoffimportkosten über die analysierten H2-Vektoren für die drei Kostenszenarien..... 6
Abbildung IV-2: Treibhausgasemissionen für die analysierten H_2-Transportvektoren flüssiger Wasserstoff (LH2), Ammoniak (NH3), synthetisches Erdgas (SNG), Methanol (MeOH) und Dimethylether (DME) für alle Exportländer. Speicher beinhaltet einen Pufferspeicher für gasförmigen Wasserstoff sowie je einen Speicher für den H_2-Transportvektor im Exportland und in Deutschland. Transport beinhaltet die Herstellung der Schiffe sowie die Bereitstellung und Verbrennung des Treibstoffes (eMethanol). 7

Tabellenverzeichnis

Tabelle IV-1: Bilanzergebnisse der Terminalkonzepte für Ammoniak und Methanol: Ergebnisse des Fraunhofer ISE..... 5

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Fraunhofer ISE war im Projekt an vier Arbeitspaketen beteiligt. Im AP2 bestand die Aufgabe darin, eine Übersicht über bereits existierende Terminals für verschiedene Transportvektoren zu erstellen und den aktuellen Stand von Transportschiffen für die verschiedenen Vektoren darzustellen. Ziel von AP3 war es zunächst, gemeinsam die Randbedingungen und Systemgrenzen für die Terminals zu definieren. Auf dieser Grundlage sollte eine verfahrenstechnische Auslegung von H2-Importterminals für Ammoniak und Methanol erfolgen und es sollte eine Zuarbeit für weitere Vektoren geleistet werden. Neben der technischen Auslegung und der Bestimmung von Massen- und Energiebilanzen sollte zudem eine Kostenschätzung durchgeführt und die Nutzung von LNG-Komponenten für die verschiedenen Vektoren betrachtet werden. In AP7 sollte die Zuarbeit für inländische Transportlösungen erfolgen. AP8 wurde vom Fraunhofer ISE geleitet. In diesem Arbeitspaket sollte eine Analyse der gesamten Prozesskette von der EE-Produktion an verschiedenen Standorten weltweit bis zur H_2-Freisetzung aus den Terminals erfolgen. Des Weiteren sollte für ausgewählte Pfade eine LCA-Analyse durchgeführt werden.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Fraunhofer ISE verfügt über fundierte Erfahrungen in der Analyse und Modellierung von Elektrolysesystemen, Syntheseprozessen und Wasserstoffinfrastrukturen, die auf praktischen Laborversuchen und Demonstrationen basieren. Dank langjähriger simulativer und laborbasierter Versuche besteht eine tiefgehende Expertise im Bereich der Synthese und Reformierung von Methanol und DME. Das Fraunhofer ISE hat in der Vergangenheit eine Vielzahl von Projekten zum Import von Wasserstoff- und Wasserstoffderivaten durchgeführt und verschiedene Produktionsstandorte bewertet (u.a. [1–3]). Für die Rückumwandlung zu Wasserstoff der verschiedenen Vektoren lag jedoch nur eine unzureichende Datenbasis vor. Auch für die Weiternutzung von LNG-Infrastruktur gab es zuvor keine Arbeiten am Fraunhofer ISE. Im Rahmen dieses Projekts sollte erstmals ein umfassender Vergleich der Derivatimporte hinsichtlich der Importterminals durchgeführt werden, einschließlich der anschließenden Rückumwandlung in gasförmigen Wasserstoff (gH2).

III. Ablauf des Vorhabens

Für die Aufgaben in AP2 wurden intensive Recherchen zu existieren Terminals durchgeführt und verschiedene Datenbanken ausgewertet. Des Weiteren wurde der aktuelle Stand der Technik und Entwicklungen für Transportschiffe ausgewertet und zusammengefasst. In AP3 wurden, basierend auf den im Projekt definierten Rahmenbedingungen und Systemgrenzen, verfahrenstechnische Konzepte für Wasserstoffimportterminals für die Vektoren Ammoniak und Methanol erstellt. Die Auslegung erfolgte für ein Importterminal mit einer Kapazität von 100 TWh/y. Die entwickelten Prozessketten enthalten alle Prozessschritte und notwendigen Hauptapparate, die zur Umwandlung des jeweiligen Vektors in gasförmigen H_2 benötigt werden. Die Prozesse für NH_3 und MeOH wurden am Fraunhofer ISE mit Aspen simuliert und in Abstimmung mit den Projektpartnern iterativ optimiert. Aufgrund von Ähnlichkeiten in den Teilprozessen, insbesondere der CO_2-Abscheidung im MeOH-Prozess, fand ein enger Austausch und Abstimmung mit dem DVGW-EBI (SNG-Terminal) und dem IEG (DME-Terminal) statt. Auch mit am Projekt beteiligten Industriepartnern wurden die Prozessschritte intensiv diskutiert und mit bereits industriell realisierten Prozessen abgeglichen. Die Investitionskosten (CAPEX) für die verschiedenen Terminalkonzepte wurden auf Basis der zuvor erstellten Verfahrenskonzepte

berechnet. Die Kostenschätzung befindet sich nach AACE in der Klasse 5 mit einer erwarteten Genauigkeit von -20 % bis -50 % und +30 % bis +100 %.

Die Analyse im Rahmen von AP8 bewertet die gesamte Wasserstoffversorgungskette von der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien über die H_2-Produktion, Derivatsynthese, maritimen Transport. Zudem sind die in AP3 ausgelegten, Derivatspezifischen Importterminals im Modell abgebildet und erlauben so die Betrachtung der gesamten Versorgungskette inklusive der Rekonvertierung in gH_2. Die H_2-Produktion im Exportland erfolgt ausschließlich mit Wind- und PV-Strom und erfüllt die RED II Kriterien. Mehrere Exportländer wurden in Szenarien untersucht, um länderspezifische Gegebenheiten und deren Einfluss auf die H_2-Kosten zu analysieren. Die Modelle wurden in MATLAB/Simulink mittels der hauseigene Simulationstoolbox H2ProSim implementiert und Jahressimulationen durchgeführt, um die finalen H2-Kosten im Importland zu ermitteln. Für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen wird die Methodik des Life Cycle Assessments (LCA) genutzt und es wird ebenfalls die gesamte Wasserstoffversorgungskette betrachtet.

IV. Wesentliche Ergebnisse

In AP2 wurde eine Datentabelle mit existierenden Terminals erstellt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Diese wurde zudem grafisch aufbereitet. Des Weiteren wurde ein Arbeitspapier geschrieben, in welchem der Stand der Technik und Entwicklungen von Transportschiffen dargestellt wurde (Veröffentlichung zum aktuellen Stand noch ausstehend).

In AP3 wurden technische Konzepte für Wasserstoffimportterminals über die Vektoren Ammoniak und Methanol entworfen und diese mittels ASPEN simuliert und die Massen- und Energiebilanzen bestimmt. Die Ergebnisse der Wirkungsgradberechnung der Modellierung aus AP3 sind in Tabelle IV-1 zusammengefasst.

Tabelle IV-1: Bilanzergebnisse der Terminalkonzepte für Ammoniak und Methanol: Ergebnisse des Fraunhofer ISE

	NH3	MeOH
Vektor-Bedarf pro kg H_2 ***in kg Vektor / kg H_2*** ***(kg Vektor / kWh H_2 LHV)***	7,0 (0,2)	6,7 (0,2)
Energetische Effizienz Terminal ***in %***	91	84,4

Für das NH3-Terminal ergab sich eine energetische Effizienz von 91 %. Durch die großen Temperaturunterschiede zwischen den Eduktströmen (NH_3, Luft) und der Prozesstemperatur (>800°C), sowie dem zweistufigen Reformerkonzept gelingt in diesem Ansatz eine sehr gute Wärmerückgewinnung, wodurch thermische Verluste stark begrenzt werden können. Für das MeOH-Terminal konnte eine energetische Effizienz von 84,4% erreicht werden. Durch die geringere Prozesstemperatur (250°C) und den deutlich komplexeren Prozess ist das Potenzial der Wärmerückgewinnung hier geringer.

Die CAPEX für ein Terminal mit einer Importkapazität von 100 TWh/y für Lagerung und Umwandlung liegen für das NH_3-Terminalkonzept bei 6,42 Mrd. € und für das MeOH-Terminalkonzept bei 8,9 Mrd. €. Die Zusammensetzung der Kosten ist in Abbildung IV-1 zusammengefasst und dargestellt. Die spezifischen Investitionskosten liegen bei etwa 582 €/kWh H_2 für das NH_3-Terminalkonzept und bei etwa 797 €/kWh H_2 für das MeOH-Terminalkonzept.

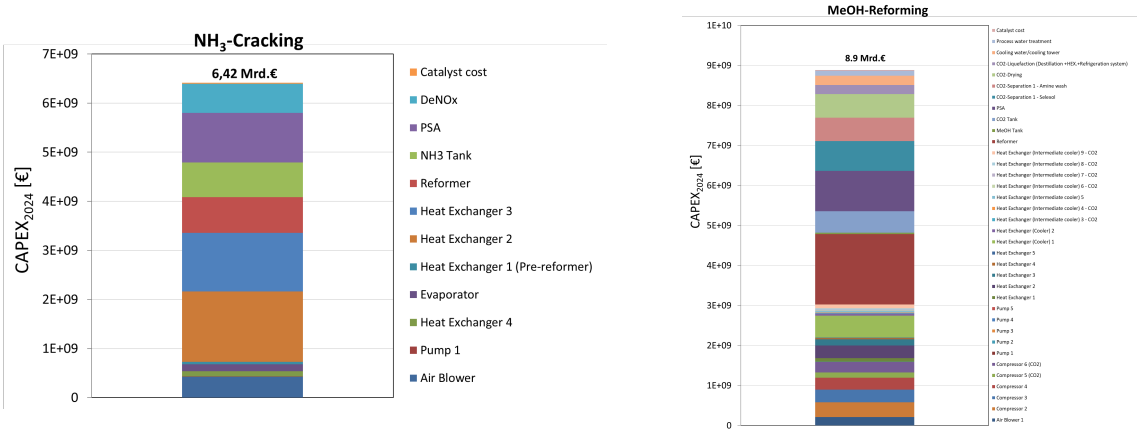

Abbildung IV-1: CAPEX Importhub des NH3-Terminalkonzept (links) und MeOH Terminalkonzept (rechts)

Abbildung IV-1 zeigt eine zusammenfassende **Übersicht über die ermittelten H_2-Importkosten** im Rahmen der techno-ökonomischen Analyse in AP8 für die jeweiligen Transportvektoren, unter Berücksichtigung der drei Kostenszenarien (Low/Mid/High). Die Auswertung berücksichtigt die Importkosten aus den sieben analysierten Regionen. Durch unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Einstrahlungswerten der verschiedenen Regionen sowie unterschiedlicher Transportdistanzen ergeben sich die gezeigten Wertebereich der H_2-Vektoren.

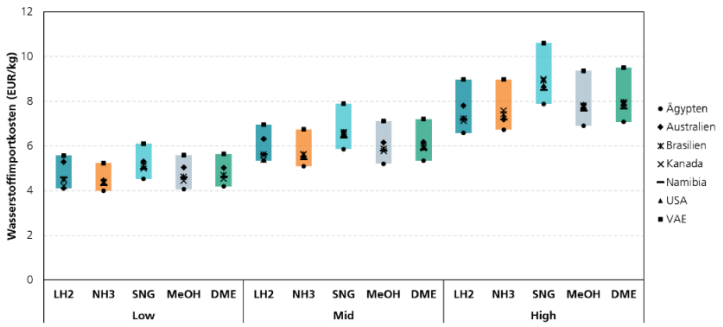

Abbildung IV-1: Wasserstoffimportkosten über die analysierten H2-Vektoren für die drei Kostenszenarien

Abbildung IV-2 zeigt die Treibhausgasemissionen für alle betrachteten H_2-Transportvektoren und Exportländer. Die Ergebnisse zeigen, dass die Treibhausgasemissionen für alle H_2-Transportvektoren und Exportländer unter 1 kg CO_2-eq pro kg H_2 liegen. Die Treibhausgasemissionen werden dabei mindesten zu 50% durch die Bereitstellung des erneuerbaren Stroms (Wind und Photovoltaik) verursacht. Die restlichen Treibhausgasemissionen werden insbesondere durch die Herstellung der Speicher, den Schiffstransport und den Netzstrombedarf des Importterminals in Deutschland verursacht.

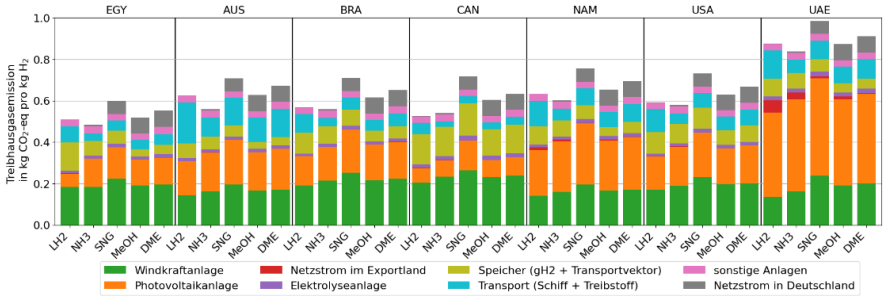

Abbildung IV-2: Treibhausgasemissionen für die analysierten H_2-Transportvektoren flüssiger Wasserstoff (LH2), Ammoniak (NH3), synthetisches Erdgas (SNG), Methanol (MeOH) und Dimethylether (DME) für alle Exportländer. Speicher beinhaltet einen Pufferspeicher für gasförmigen Wasserstoff sowie je einen Speicher für den H_2-Transportvektor im Exportland und in Deutschland. Transport beinhaltet die Herstellung der Schiffe sowie die Bereitstellung und Verbrennung des Treibstoffes (eMethanol).

V. Literaturverzeichnis

[1] Hank C, Sternberg A, Köppel N, Holst M, Smolinka T, Schaadt A et al. Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. Sustainable Energy Fuels 2020;4(5):2256–73.

[2] Christoph Hank, Marius Holst, Lucas Edenhofer, Christopher Hebling. POWER-TO-X COLOMBIA: Fraunhofer ISE Study carried out within the Colombian-German Dialog on Re-Industrialization via Renewable Hydrogen. Freiburg; 2024.

[3] Christoph Hank, Marius Holst, Connor Thelen, Christoph Kost, Sven Längle, Achim Schaadt, Tom Smolinka. Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries; 2023.