

# Schlussbericht vom 25.10.2023

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 38 LBG

## Thema

Modellierung und Bewertung der Logistikketten für den Wasserstofftransport für die Stahlindustrie unter besonderer Berücksichtigung transportbedingter Energieverluste

## Berichtszeitraum

01.12.2020 bis 31.03.2023

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA)

## Forschungseinrichtung(en)

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP

Gefördert durch:

Dieser Schlussbericht wurde von folgenden Autoren erstellt:

M.Sc. Patrick Zimmerman

Dipl.-Ing. Ralf Fiedler

Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML, Hamburg

M.Sc. Leonhard Sattler

Dr.-Ing. Stefan Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Rostock

---

## Kurzzusammenfassung

Industrielle Großverbraucher aus der Roheisenproduktion oder der Chemiebranche können einen erheblichen Teil ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Substitution fossiler Energieträger mit Wasserstoff eliminieren. Die Umstellung der bisherigen Herstellungsprozesse der Stahlwerke von der Hochofenroute auf die Direktreduktion erfordert dabei grünen Wasserstoff in großen Mengen. Die Wasserstoffversorgung im großen Maßstab stellt hierbei laut Stand der Technik ein unbekanntes Feld für alle an diesem Vorhaben beteiligten Parteien (Produzent, Lieferant, etc.) dar. Zusätzlich bilden verschiedene Hochlaufsznarien sowohl bereitstellungs- als auch verbraucherseitig weitere Unsicherheiten.

In diesem Forschungsprojekt werden somit logistische Betrachtungen der Transportketten, durchgeführt vom Fraunhofer CML, und für eine realitätsnahe Abbildung der Szenarien, Implementierungen von Verlustgrößen notwendig, welche angesichts des flüchtigen Wasserstoffes und der hohen Transportmengen einen bedeutsamen Einfluss auf die Logistik haben. Das Fraunhofer IGP entwickelt daher anhand der Datengrundlage und Anwendbarkeit Simulationsmodelle der unterschiedlichen Verlustmechanismen.

Der Transport von Wasserstoff in Mengen, wie sie die Roheisenherstellung oder die Chemieindustrie benötigen, muss über Pipelines abgedeckt werden. Für die kapazitative Auslegung wurde in dem Projekt ein Tool entwickelt, das für die Dimensionierung von Pipelines genutzt werden kann. Es berücksichtigt Materialeigenschaften, ökonomische und Bau-spezifische Faktoren bei der Auslegung von Pipelines. Weiterhin ist anzunehmen, dass die großen H<sub>2</sub>-Verbraucher eine Hochlaufphase durchlaufen werden. In diesen Hochlaufphasen können konventionelle Verkehrsträger wie Lkw, Güterzüge oder Binnenschiffe eingesetzt werden. Um deren Leistungsfähigkeit vor dem Hintergrund der spezifischen Energie- und Ladungsverluste zu bewerten, wurde ein Modell für die Simulation von Logistikkonzepten für die Versorgung von H<sub>2</sub>-Verbrauchern entwickelt. Eine Simulation eines Usecases zeigte auf, dass besonders beim Transport von LH<sub>2</sub> die Energie- und Ladungsverluste eine Rolle bei der wirtschaftlichen Wahl des Verkehrsmittels spielen.

Die Erarbeitung von Verlustgrößen orientiert sich an der zugrundeliegenden Datengrundlage. Sofern für das jeweilige Transportkettenelement der recherchierte Verlustdatensatz als ausreichend bewertet wird, ist dieser einer daran angelehnten Modellbildung vorzuziehen, um Simulationstiefen im sinnvollen Rahmen zu halten. Bei einem Datenmangel absoluter Verluste ist alternativ ein Modell numerischen oder analytischen Ansatzes aufzubauen. Sollte für ein Transportkettenelement ein großer Datenmangel bestehen, wird eine Verlustannahme getroffen. Für alle drei Lösungsansätze gilt das Berücksichtigen globaler Einflussparameter.

Unter Einbringung adäquater Verlustgrößen in Form einer Programmschnittstelle wurden erste holistische Logistik-Simulationsmodelle entwickelt, verifiziert und validiert. Weitere Usecases von KMU können simuliert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

---

## Abstract

Large industrial consumers from the iron and steel industry or the chemical industry can eliminate a considerable part of their CO<sub>2</sub> emissions by substituting fossil fuels with hydrogen. The conversion of the previous production processes of the steel mills from the blast furnace route to direct reduction requires large quantities of green hydrogen. According to the state of the art, the large-scale supply of hydrogen represents an unknown field for all parties involved in this project (producer, supplier, etc.). In addition, various start-up scenarios create further uncertainties both in terms of supply and demand.

In this research project, logistical considerations of the hydrogen supply chains are therefore carried out by Fraunhofer CML, and the implementation of loss parameters is necessary for a realistic representation of the scenarios. These loss parameters have a significant impact on logistics due to the volatile nature of hydrogen and the large transport volumes. Based on the data basis and applicability, Fraunhofer IGP develops simulation models of the different loss mechanisms.

The transport of hydrogen in the quantities required by iron and steel industry or the chemical industry must be covered by pipelines. For the capacity design, a tool has been developed in the project that can be used for pipeline dimensioning. It takes into account material properties, economic, and construction-specific factors in the design of pipelines. Furthermore, it is assumed that large hydrogen consumers will go through a start-up phase. Conventional modes of transport such as trucks, freight trains, or inland waterway vessels can be used during these start-up phases. In order to evaluate their performance in terms of specific energy and cargo losses, a model for simulating hydrogen supply chains has been developed. A simulation of a use case showed that energy and cargo losses play a role in the economic choice of transport mode, especially in the transport of LH<sub>2</sub>.

The development of loss parameters is based on the underlying data basis. If the researched loss dataset is considered sufficient for the respective supply chain element, it should be preferred over a model-based approach in order to keep the simulation depth within a reasonable range. In the absence of absolute loss data, an alternative model of numerical or analytical approach is to be established. If there is a significant lack of data for a supply chain element, a loss assumption is made. For all three solution approaches, global influencing parameters must be taken into account.

The first holistic simulation model for hydrogen supply chains has been developed, verified, and validated by incorporating adequate loss parameters in the form of a program interface. Further use cases of SMEs can be simulated.

The aim of the research project has been achieved.

## Inhaltsverzeichnis

### Content

1	Einleitung / Introduction.....	11
1.1	Problemstellung / Problem definition .....	11
1.2	Motivation / Motivation .....	12
1.3	Zielsetzung / Objective .....	12
2	Stand der Technik / State of the art.....	14
2.1	Grundlagen der Logistik / Basics of logistics .....	14
2.1.1	Ziele der Logistik / Objectives of Logistics .....	14
2.1.2	Gefahrgut-Logistik / Logistics of Dangerous Goods .....	17
2.1.3	Logistikplanung / Logistics Planning .....	19
2.1.4	Simulation von Logistik-Systemen / Simulation of Logistics Systems.....	20
2.2	Grundlagen Wasserstoff / Hydrogen Basics .....	20
2.3	Grundlagen der Verlustarten beim Wasserstoff-Transport/ Fundamentals of the types of losses in hydrogen transport .....	21
3	Wasserstoff-Logistik / Hydrogen Supply Chains .....	29
3.1	Energie- und Ladungsverluste beim Wasserstoff-Transport/ Energy and transfer losses during hydrogen transport .....	29
3.2	Wasserstoff-Logistik konventioneller Verkehrsmittel / Hydrogen Supply Chains for Road, Tracks, and Inland Waterways.....	46
3.2.1	Behälter / Containers .....	46
3.2.2	Prozessketten / Process Chains.....	48
3.2.3	Gefahrgut / Dangerous Goods.....	49
3.2.4	Modellentwicklung / Model building .....	51
3.2.5	Szenarientwicklung / Scenario development .....	57
3.2.6	Ergebnisse / Results.....	58
3.2.7	Interpretation / Interpretation .....	60
3.3	Alternative Pipeline / Alternative Pipeline .....	61
3.4	Web-Tool / Web-Tool.....	66
4	Zusammenfassung / Summary .....	71
5	Ergebnisse und Ausblick / Results and Perspective .....	72
5.1	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen / Comparison of the performed work and the results with the objectives.....	72
5.2	Ausblick / Perspective.....	77

6	Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project.....	78
7	Inhaltsverzeichnis / Bibliography.....	79
8	Anhang A / Appendix A.....	86

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitsplan.....	13
Abbildung 2-1: Ziele der Logistik .....	15
Abbildung 2-2: Konfliktäre Beziehung zwischen dem Servicegrad und den Lagerhaltungskosten .....	16
Abbildung 2-3: Gefahrgut und Gefahrstoff entlang des Transports .....	18
Abbildung 2-4: Geltungsbereich des Beförderns nach GGBefG .....	18
Abbildung 2-5: Planungsmatrix der Logistikplanung .....	19
Abbildung 2-6: Vorgehensweise einer Simulationsstudie in Phasen gegliedert.....	20
Abbildung 2-7: Verlustarten der untersuchten Transportkettenelemente.....	22
Abbildung 2-8: Energiebedarf für Wasserstoffkomprimierung .....	24
Abbildung 2-9: Auszug der analytischen Betrachtung der Wärmübertragung im Projekt „LH2-Tanks“ .....	25
Abbildung 2-10: Klassifizierung der Druckbehältertypen .....	26
Abbildung 2-11: Diffusionsprozess in einer gesättigten Behälterwand in Anlehnung an .....	27
Abbildung 2-12: Einflussgrößen des Pipelinedruckverlustes .....	28
Abbildung 2-13: In Matlab berechneter Druckverlauf für eine Beispielpipeline .....	29
Abbildung 3-1: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit von Verflüssigungskapazitäten.....	31
Abbildung 3-2: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit von Eingangsdrukken.....	32
Abbildung 3-3: Gitterdarstellung .....	35
Abbildung 3-4: Vergleich zwischen analytisch ermittelter Konzentrationsverteilung .....	36
Abbildung 3-5: Vergleich experimentell und numerisch ermittelte Diffusion .....	37
Abbildung 3-6: Mittels Finite-Differenzen-Methode ermittelter Konzentrationsverlauf in einer ‚Typ IV‘-Behälterwand .....	39
Abbildung 3-7: Vorgehen bei der Berechnung des Pipeline-Netzwerks .....	40
Abbildung 3-8: Druckverlauf einer Beispielpipeline über die Pipelinelänge .....	41
Abbildung 3-9: Modelliertes Pipelinenetz.....	42
Abbildung 3-10: Pipelinenetz-Validierung.....	43

Abbildung 3-11: Berechnete Massenstromverteilung .....	44
Abbildung 3-12: Iterative Pipelineoptimierung .....	45
Abbildung 3-13: Transportkapazitäten, TRL und Einschränkungen beim Transport von komprimiertem Wasserstoff.....	47
Abbildung 3-14: Transportkapazitäten, TRL und Einschränkungen beim Transport von flüssigem, tiefkaltem Wasserstoff .....	48
Abbildung 3-15: Prozesskette für die Versorgung von DRI-Anlagen mit komprimiertem und flüssigem Wasserstoff.....	49
Abbildung 3-16: Das Input-Output-Modell der Simulation als Zielbild .....	51
Abbildung 3-17: Optionen für den Transport der Energie aus Offshore- Windkraftparks zu Verbrauchsstandorten der Roheseinproduktion .....	52
Abbildung 3-18: Option 2 aufgegliedert in die verschiedenen Transportkombinationen je Behälter .....	53
Abbildung 3-19: Wasserstoff-Quellen (Blau) und -Senken (Grün).....	54
Abbildung 3-20: Jährliche Energieproduktion mit Faktor 1, quellenübergreifend und quellenspezifisch .....	55
Abbildung 3-21: Wasserstoff-Nachfrage in Tonnen an den Hochofenstandorten.....	56
Abbildung 3-22: Input- und Output-Parameter des Simulationsmodells .....	56
Abbildung 3-23: Betrachtete Szenarien.....	58
Abbildung 3-24: Energie- und Ladungsverluste für den Transport von Wasserstoff .....	58
Abbildung 3-25: Anzahl der Tage, in denen der Speicher an der Senke nicht leer war .....	59
Abbildung 3-26: Gesamtkosten für den Transport von Wasserstoff .....	60
Abbildung 3-27: Aufbau des Pipeline-Tools .....	62
Abbildung 3-28: Pipeline-Kosten-Optimierung DN-200, Betriebsdruck: 70 bar .....	65
Abbildung 3-29: Pipeline-Kosten-Optimierung DN-300, Betriebsdruck: 70 bar .....	66
Abbildung 3-30: Startseite Web-Tool .....	68
Abbildung 3-31: Web-Tool.....	69
Abbildung 3-32: Exceltool Seite .....	69
Abbildung 3-33: Anleitung Seite .....	70



## List of figures

Figure 1-1: Work plan .....	13
Figure 2-1: Goals of logistics .....	15
Figure 2-2: Conflicts of service level and inventory costs .....	16
Figure 2-3: Dangerous goods and dangerous substances along transport .....	18
Figure 2-4: Application of transport following respective laws .....	18
Figure 2-5: Planning matrix of logistics planning .....	19
Figure 2-6: Approach of a simulation study .....	20
Figure 2-7: Types of losses of the investigated transport chain elements .....	22
Figure 2-8: Energy requirement for hydrogen compression according to .....	24
Figure 2-9: Excerpt of the analytical consideration of the heat transfer in the project "LH2-Tanks" .....	25
Figure 2-10: Classification of pressure vessel types.....	26
Figure 2-11: Diffusion process in a saturated vessel wall based on .....	27
Figure 2-12: Influencing variables of the pipeline pressure loss .....	28
Figure 2-13: Pressure profile of an example pipeline, calculated using Matlab .....	29
Figure 3-1: Specific energy demand depending on liquefaction capacities .....	31
Figure 3-2: Specific energy demand depending on input pressure.....	32
Figure 3-3: Grid representation.....	35
Figure 3-4: Comparison between analytically determined concentration distribution .....	37
Figure 3-5: Comparison of experimentally and numerically determined diffusion .....	37
Figure 3-6: Concentration profile in a type IV vessel wall determined by means of the finite difference method .....	39
Figure 3-7: Procedure for pipeline network simulation.....	40
Figure 3-8: Pressure curve of an example pipeline over the pipeline length .....	41
Figure 3-9: Modeled pipeline Network .....	42
Figure 3-10: Pipeline network validation .....	43
Figure 3-11: Calculated mass flow distribution .....	44
Figure 3-12: Iterative pipeline optimization .....	45
Figure 3-13: Capacity for transport of compressed hydrogen of the modes of transport .....	47

Figure 3-14: Capacity for transport of liquified hydrogen of the modes of transport.....	48
Figure 3-15: Process chains for supply of DRI-plants with regard to compressed and liquidified hydrogen .....	49
Figure 3-16: Input-output-model for simulation model.....	51
Figure 3-17: Routes for transport of hydrogen from offshore windparks to destination.....	52
Figure 3-18: Transport combination on route 2 for transport of hydrogen from offshore windparks to destination .....	53
Figure 3-19: Hydrogen sources (blue) and hydrogen drains (green).....	54
Figure 3-20: Yearly energy production in german offshore windparks .....	55
Figure 3-21: Demand of hydrogen in tons at specific iron production sites in German hinterland .....	56
Figure 3-22: Input- and output parameters of the simulation model .....	56
Figure 3-23: Scenario building for assessing usecases of hydrogen transport from german offshore windparks to specific hydrogen drains .....	58
Figure 3-24: Energy- and load losses for transport of hydrogen in usecase .....	58
Figure 3-25: Number of days meeting the service level requirements of DRI supply.....	59
Figure 3-26: Overall cost of hydrogen transport in usecase .....	60
Figure 3-27: Interface of the pipeline-tool.....	62
Figure 3-28: Pipeline cost optimisation for a DN-200 pipe, pressure 70 bar .....	65
Figure 3-29: Pipeline cost optimisation for DN-300 pipe and pressure 70 bar .....	66
Figure 3-30: Landing page Web-Tool.....	68
Figure 3-31: Web-Tool .....	69
Figure 3-32: Exceltool page .....	69
Figure 3-33: User guide page.....	70

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1: Grundlegende Eigenschaften des Wasserstoffs nach .....	21
Tabelle 2-2: Gegenüberstellung von PEM- und Alkalischer Elektrolyse .....	23
Tabelle 3-1: Transportmöglichkeiten von Wasserstoff nach den Gefahrgutvorschriften .....	50

## List of tables

Table 2-1: Basic properties of hydrogen according to .....	21
Table 2-2: Comparison of PEM and alkaline electrolysis .....	23
Table 3-1: Options for transport of hydrogen according to the transport law.....	50

## Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

ADN	Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen
ADR	Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
CAPEX	Investitionskosten (engl. capital expenses)
CGH2	Komprimierter Wasserstoff (engl. compressed gaseous hydrogen)
CO2	Kohlendioxid / Kohlenstoffdioxid
DRI	Direct-reduced-iron
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GGBefG	Gefahrgutbeförderungsgesetz
GGVSEB	Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern
H2	Wasserstoff
HDÜ	Hochspannungsdrehstromübertragung
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
KPI	Key-Performance-Indicators
IATA	International Air Transport Association
IMDG	International Maritime Dangerous Goods
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
LH2	Flüssigwasserstoff (engl. Liquefied hydrogen)
LNG	Liquefied Natural Gas
MEGC	Multiple-Element Gas Container
Mt	Mega tonnen
OPEX	Betriebskosten (engl. operational expenses)
PEM	Proton Exchange Membrane
RID	Ordnung über die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
TRL	Technology-Readiness-Level
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## **1 Einleitung / Introduction**

Wasserstoff gilt als ein zukunftsweisender Energieträger, um die Energiewende zu vollziehen und somit die globale Erderwärmung zu begrenzen. Für die Produktion von Wasserstoff werden keine fossilen Stoffe benötigt: Wasser sowie grüne Elektrizität reichen für die Produktion von grünem Wasserstoff aus. Bei der Nutzung des Wasserstoffs z.B. bei der warmen oder kalten Verbrennung wird kein CO<sub>2</sub> emittiert. Politik, Industrie und Gesellschaft sehen in Wasserstoff ein großes Potential, einen wesentlichen Beitrag für die Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens zu leisten. Besonders die Stahl- und die Chemieindustrie können Wasserstoff als Substitut in ihren derzeitigen Prozessen verwenden und fossile Energieträger bzw. Energieträger mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen ersetzen. Bis zu 20 % der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in der deutschen Stahlindustrie verortet. (Umwelt Bundesamt 2020; Hölling et al. 2020) In der Chemiebranche sind 10 – 15 Mt CO<sub>2</sub>-Einsparpotential pro Jahr möglich. (Hebling et al. 2019) Die in Zukunft zu erwartenden Verschärfungen in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Emissionen werden dazu führen, dass der Bezug von klimaneutralen Energieträgern zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil wird, insbesondere bei industriellen Großverbrauchern. Die wirtschaftliche Versorgung industrieller Großverbraucher mit grünem Wasserstoff als Grundstoff und Energieträger ist daher von großem Interesse in der Politik und Wirtschaft. Die am 09.06.2020 beschlossene und fortgeführte Wasserstoff-Strategie unterstreicht dieses Interesse. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020)

### **1.1 Problemstellung / Problem definition**

Industrielle Großverbraucher von Wasserstoff stehen vor der Herausforderung, ihre Anlagen und Prozesse auf Wasserstoff umzustellen und dabei die Versorgung ihrer Produktionen mit großen Mengen Wasserstoff sicherzustellen. Bevor sehr große Mengen Wasserstoff verbraucht werden, wird die großindustrielle Nutzung von Wasserstoff mit einer Hochlaufphase verbunden sein, in der noch kleinere Mengen Wasserstoff benötigt werden. Nicht nur die Großunternehmen stehen dabei vor Fragen nach den richtigen Transportmitteln und Behältern für die Wasserstoff-Logistik, sondern auch Logistikunternehmen aus dem konventionellen Transport. Der pipelinegebundene Transport stellt auch neue Fragen an die Wasserstoff-Logistik. Das betrifft die Gestaltung der Transportketten, verfügbare Mengen, Transportmittel und -behälter- (auch Pipelines), Speicherung (Lager) sowie die Stabilität der Logistikketten. Investitionsausgaben (CAPEX) und operationale Kosten (OPEX) sind unbekannt, solange die Ausgestaltung der Logistikketten nicht entschieden ist.

## **1.2 Motivation / Motivation**

Wasserstoff wird eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft spielen. Die zukünftig zu transportierenden Mengen sind deutlich größer als das, was derzeit an Wasserstoff auf Straßen und in Pipelines transportiert wird. Das Wissen um die Wasserstoff-Logistik ist derzeit nur bei wenigen vorhanden und darüber hinaus auch nur auf die Straßenlogistik für kleine Mengen und auf Industrie-Pipeline für größere Mengen beschränkt. Es fehlt sowohl den großen zukünftigen Wasserstoffverbrauchern aus Stahl- und Chemieindustrie als auch Logistikunternehmen oft an dem nötigen Wissen, um Logistikkonzepte für die Versorgung mit Wasserstoff effizient und sicher zu entwickeln. Es bestehen Unklarheiten über verschiedene Aspekte der Wasserstoff-Logistik, wie beispielsweise die verfügbaren Mengen an Wasserstoff, geeignete Transportmittel, den Umschlagprozess, Speichertechnologien und die Stabilität der gesamten Logistikkette. Eine besondere Unklarheit liegt in den Energie- und Ladungsverlusten, die entlang der Transportkette entstehen. Um dieses Wissensdefizit zu beheben und Unternehmen bei der Planung von Wasserstofftransporten zu unterstützen, wird erstens Basiswissen für die Wasserstoff-Logistik und begleitende Energie- und Ladungsverluste aufbereitet. Zweitens wird ein innovatives Modell entwickelt, das es ermöglicht, Wasserstofftransporte unter Berücksichtigung der Energie- und Ladungsverluste effektiv zu planen und mögliche Herausforderungen beim Aufbau einer Wasserstoff-Transportkette vorab zu identifizieren. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in der Logistikbranche profitieren von diesem Modell, da ihre Aufgabe der Wasserstoff-Transport ist. Das Simulationsmodell steht den KMU zur Verfügung und ermöglicht es ihnen, die Wirtschaftlichkeit von Anfragen für den Transport von Wasserstoff zu untersuchen. Dies ist von großer Bedeutung, da es bei solchen Transporten häufig um den Erwerb von speziellem und kapitalintensiven Equipment geht, das langfristig an einen Kunden gebunden ist. Durch die Simulation können die KMU mögliche Szenarien durchspielen und die Rentabilität ihrer Investitionen analysieren, bevor sie endgültige Entscheidungen treffen. Das Projekt H2-Logistik schafft somit nicht nur Basiswissen, sondern bietet auch konkrete Unterstützung für Unternehmen, um den Transport von Wasserstoff effizient und erfolgreich zu gestalten. Durch die Anwendung des Modells können die Unternehmen ihre Prozesse optimieren, Kosten einsparen und gleichzeitig am Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft teilhaben.

## **1.3 Zielsetzung / Objective**

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines holistischen Modells zur Simulation der gesamten Wasserstoff-Logistikkette zwischen der Erzeugung in einem Offshore-Windpark und dem Verbrauchsort bzw. der Einspeisung des Energieträgers. Der Fokus des Modells liegt auf der Versorgung von industriellen Großverbrauchern wie der Stahlindustrie oder Chemieindustrie mit Wasserstoff im Hinterland bzw. in Hafennähe.

Da der Energieträger über große Distanzen hinweg befördert werden muss, finden transportbedingte Energie- bzw. Ladungsverluste spezielle Berücksichtigung.

Die Arbeitshypothese besagt, dass die dynamische diskrete Simulation konkreter Anwendungsfälle die Entwicklung und Bewertung von Logistikketten zur Wasserstoff-Versorgung von Industriestandorten ermöglicht. Damit werden die – aktuell im Rahmen des Umstiegs auf Energieträger aus regenerativen Energiequellen bestehenden – Unsicherheiten beseitigt. Die Berücksichtigung der Energie- und Ladungsverluste ermöglicht eine detaillierte Abbildung der Logistikkette. Die Gestaltung geeigneter Logistikketten kann in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen (v.a. Transportmengen und -strecken) hinsichtlich verschiedener Parameter (Zeit, Kosten, Ladungs- oder Energieverluste) erfolgen.

Die Bereitstellung des Simulationsmodells über ein Web-Tool nach Abschluss des Projekts adressiert insbesondere die Dienstleister der Logistikketten. Diese werden in die Lage versetzt, das Modell entsprechend ihrer jeweiligen, spezifischen Anforderungen für ihre Planungen einzusetzen und geeignete Anwendungsfälle für ihre Leistungen zu identifizieren.

Das Ziel soll über den in Abbildung 1-1 dargestellten Projektplan erarbeitet werden. Nach der Systemanalyse werden umfangreiche Daten zu den Logistikprozessketten erarbeitet. Anschließend wird zunächst ein formales Modell erstellt. Über die Absprache mit dem Schwesterprojekt „PowerH2“ soll ein Abgleich der Transportmöglichkeiten über See erfolgen. Nach dieser Abstimmung soll das Modell in der Simulationsumgebung implementiert werden. Danach können die zu untersuchenden Logistikketten simuliert und analysiert werden. Begleitend zur Erstellung der Simulation finden stetig Arbeiten zur Verifikation und Validierung statt. Zum Abschluss sollen die Ergebnisse visualisiert und veröffentlicht werden.

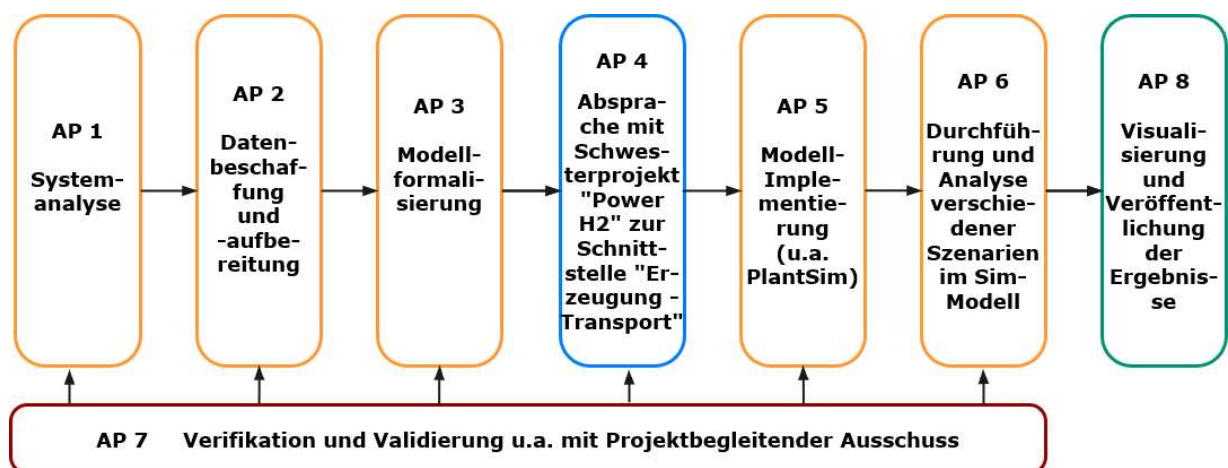


Abbildung 1-1: Arbeitsplan

Figure 1-1: Work plan



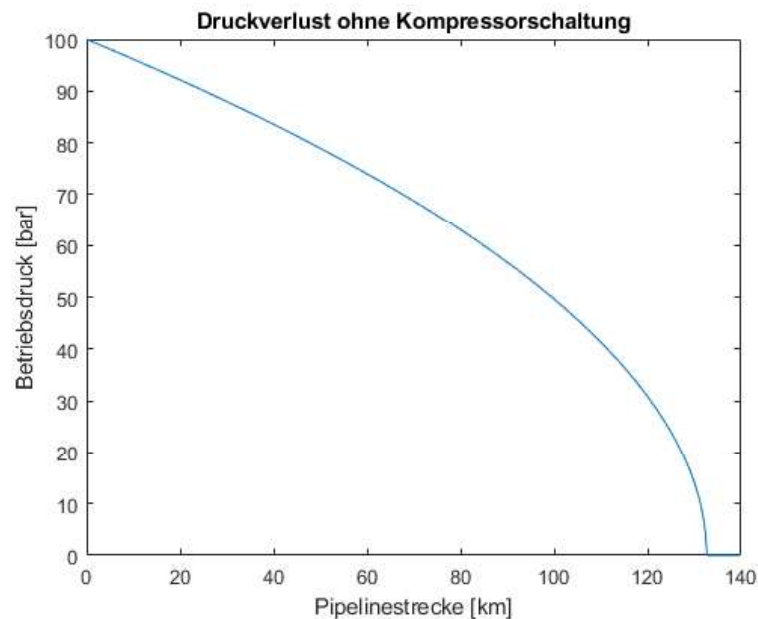


Abbildung 2-13: In Matlab berechneter Druckverlauf für eine Beispielpipeline  
Figure 2-13: Pressure profile of an example pipeline, calculated using Matlab

### 3 Wasserstoff-Logistik / Hydrogen Supply Chains

#### 3.1 Energie- und Ladungsverluste beim Wasserstoff-Transport/ Energy and transfer losses during hydrogen transport

Die als Einflussparameter zu bestimmenden Energie- und Ladungsverluste einer Wasserstofflogistiksimulation bedeuten in vielfacher Hinsicht eine Herausforderung. Konkrete Verlustdaten sind unzureichend, Randbedingungen für Analyseansätze unterliegen Annahmen, Parameterabhängigkeiten können teils lediglich mit Unsicherheiten abgeschätzt werden. Um den Projektanspruch gerecht zu werden ist für alle verlustrelevanten Ereignisse folgender Lösungsansatz in Anlehnung an die Arbeitspakete AP 1.2, AP 2.2, AP 3.2 und AP 7 gewählt worden. Im ersten Schritt wird für den jeweiligen Verlustmechanismus Grundlagenliteratur in Hinblick auf Modellierungsmöglichkeiten und Verlustgrößen gesichtet. Eine anschließende Recherche am Markt zeigt die tatsächlichen Verlustgrößen. Auf Basis dieser Informationen wird entschieden, ob eine tiefere Modellbildung zweckmäßig ist. Falls möglich, wird eine Validierung des Modells verfolgt. Generell werden für die Verlustermittlung folgende Leitlinien festgelegt:

- Realdatensätze werden Grundlagendatensätzen vorgezogen, da produktspezifische Herstellerwerte die Realverluste präziser darstellen
- Verlustmodelle jeglicher Art stellen eine Idealisierung dar und sind erst im Falle unzureichender Real- und Grundlagendatensätze aufzubauen
- Modellierungstiefen (Analytik oder Numerik) orientieren sich an den zur Verfügung stehenden Randbedingungen und Nutzen
- Eine Simulationsvalidierung wird allgemein angestrebt

Diese Leitlinien werden für alle Verlustmechanismen, die in Kapitel 2.3 eingeführt wurden, angewandt.

Für die Transportgutbereitstellung durch Elektrolyse unterscheidet die Literatur in Zusammenhang mit der Wasserstoffherstellung hauptsächlich zwischen Alkalischer und PEM-Elektrolyse. Anhang A-1 zeigt eine erste Datenerfassung, hauptsächlich aus diversen Berichten. Der Energiebedarf einer Wasser-Elektrolyse lässt sich nach (Angloher und Dreier 2000; Taibi et al. 2008) auf ca. 55 kWh für die Herstellung von einem Kilogramm Wasserstoff mit einem Wirkungsgrad von 60 % abschätzen. Nach weiterführenden Herstelleranfragen und einem Workshop mit dem Schwesterprojekt „PowerH2“ hat sich mit den bereits in Anhang A / Appendix A dargestellten Merkmalen die PEM-Elektrolyse als Schlüsseltechnologie für die Problemstellung äußerst hoher Volumenströme bei fluktuierender Stromeinspeisung herausgestellt. Der von „PowerH2“ bereitgestellte Anhang A-2 gibt einen Überblick über Elektrolysemodule im Großmaßstab. Der spezifische Energiebedarf wird hierbei mit einem Wert von 55,7 kWh/kg bestätigt, der mit Bezugnahme auf den unteren Heizwert einem Wirkungsgrad von 60,0 %, auf den oberen Heizwert von 71,3 % entspricht. Für eine adäquate Energieverlustbestimmung kann somit an dieser Stelle ein Verlustwert nach Formel 1 bestimmt werden. Die nach der Elektrolyse vorliegende Wasserstoffmasse  $M_{H_2}$  wird durch die um den Wirkungsgrad der Elektrolyse geminderten Offshore-Windenergiebetrag  $E_{el,off}$  mit dem Heizwertdurchschnitt des Wasserstoffes berechnet.

$$M_{H_2} = E_{el,off} \cdot \left(1 - \frac{0,6 + 0,713}{2}\right) \cdot \text{Heizwertdurchschnitt} \quad \text{Formel 1}$$

Anhand der soliden Datengrundlage ist dieses Vorgehen als berechtigt hinzustellen. Für passende Modellbildungen sind detaillierte Anlagenkenntnisse notwendig, exemplarisch nachvollziehbar in (Thomas 2019). Derartige Nachmodellierungen würden den Verlustwert unnötig spezifizieren, die Allgemeingültigkeit würde verloren gehen. Der zusätzliche Aufwand würde den Projektrahmen übersteigen und ein solider Modellaufbau ohnehin fraglich, da ohne konkreten Projektpartner Randbedingungen fehlen.

Dem Verlust bei der Verflüssigung wird in der Grundlagenliteraturrecherche eine große Bedeutung zugeschrieben. Im Allgemeinen existiert eine Vielzahl von direkten oder bereichsweisen Angaben.

Anhang A-3 fasst die gesichteten Daten zusammen. Als globale Einflussparameter lassen sich primär die Anlagengröße, erfasst in Verflüssigungsmenge pro Tag, und sekundär der Lieferdruck des Wasserstoffes vor der Verflüssigung festlegen. Bezüglich des Einflusses auf den spezifischen Energieaufwand der Verflüssigung eines Kilogramms an Wasserstoff ist bei genauerer Betrachtung die Datenlage unvollständig und inkohärent. Ein Verständnis dafür bietet eine Visualisierung der Daten in Abbildung 3-1. Realwerte sind ebenfalls mit aufgeführt.

### **3.2.5 Szenarientwicklung / Scenario development**

Das entwickelte Modell bildet alle Elemente eines Logistiksystems ab. In Szenarien können nun unterschiedliche Ausprägungen des Logistiksystems eingestellt und hinsichtlich der Output-Parameter untersucht werden. Beispielsweise kann die Belieferung mit Lkw oder Güterzug erfolgen. Die Untersuchung des einzelnen Verkehrsmittels in einem Logistiksystem wird in Szenarien durchgeführt.

Für die Demonstration der Funktionstüchtigkeit des Simulationsmodells wurden die nachfolgend erläuterten Szenarien für die Quelle-Senken-Beziehung Dörpen-Duisburg aufgestellt und anschließend simuliert.

Die Szenarien sind in Abbildung 3-23 beschrieben. Es wurden sechs Szenarien aufgestellt, in denen der Transport über ein Jahr simuliert wird. Die Ladungsverluste werden nicht über die gesamte Logistikkette, sondern ausschließlich auf dem Prozesskettenschritt des Transports simuliert. Szenarien 1 und 2 befassen sich mit dem Transport per Lkw. In Szenario 1 wird der Transport von komprimiertem Wasserstoff angenommen. In Szenario 2 wird der Transport von flüssigem Wasserstoff betrachtet. Analog dazu wird in Szenario 3 und 4 der Transport mit Güterzügen und in Szenarien 5 und 6 der Transport mittels Binnenschiffe untersucht. Bei der Betrachtung des Transports per Binnenschiff wurde für die ausgewählte Quelle-Senken-Beziehung schnell deutlich, dass hier kein leistungsfähigeres Logistiksystem im Vergleich zum Güterzug vorliegt. Dies liegt an den zu nutzenden Binnenwasserstraßen, die den Einsatz kleinerer Binnenschiffe erfordern. Diese haben eine geringere Transportkapazität als Güterzüge. Daher wurden die Szenarien 5 und 6 nicht weiter betrachtet. Weitere Angaben der Szenarien betreffen die Transportmittelkapazität bezogen auf eine Transporteinheit sowie die Kosten für den Transport pro Kilometer in Euro als auch die Annahme des Wertes des Transportguts, angegeben in Euro pro Kilogramm Wasserstoff.

Auf der Nachfrageseite wird der Verbrauch kontinuierlich von kleinen Mengen zu großen Verbrauchsmengen gesteigert. Das erfolgt in einem Min.-Max.-Intervall mit einem vorgegebenen Sprung, hier als Schritt beschrieben. Die Variation des Verbrauchs führt zu einer Reihe an Experimenten innerhalb eines Szenarios. Die Szenarien sind fortlaufend nummeriert.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Kapitel 3.2.6 dargelegt.

Nr.	Verkehrsmittel	Zustand	Kapazität [t]	EUR / km	EUR / kg H2	Verbrauch (Min.-Max. (Schritt))
1	Lkw	CGH2	1	1,50	5,-	100 - 1.000 (100)
2	Lkw	LH2	4	1,50	5,-	500 – 1.500 (100)
3	Güterzug	CGH2	2,5	39,-	5,-	3.000 – 33.000 (5.000)
4	Güterzug	LH2	3	39,-	5,-	4.000 – 34.000 (5.000)
5	Binnenschiff	CGH2	32	34,-	5,-	-
6	Binnenschiff (Rhein-Schiff)	LH2	112	34,-	5,-	-

Abbildung 3-23: Betrachtete Szenarien (eigene Darstellung)

Figure 3-23: Scenario building for assessing usecases of hydrogen transport from german offshore windparks to specific hydrogen drains (own research)

### 3.2.6 Ergebnisse / Results

Die Szenarien 1 bis 4 wurden mit unterschiedlicher Anzahl an Experimenten und Beobachtungen je Experiment durchgeführt. Die Simulationsläufe wurden nach den KPI Energie- und Ladungsverlust, Lieferqualität und Gesamtkosten (Transportkosten und Verlustkosten) bewertet. Abbildung 3-24 zeigt die Energie- und Ladungsverluste für die Szenarien 1 bis 4.

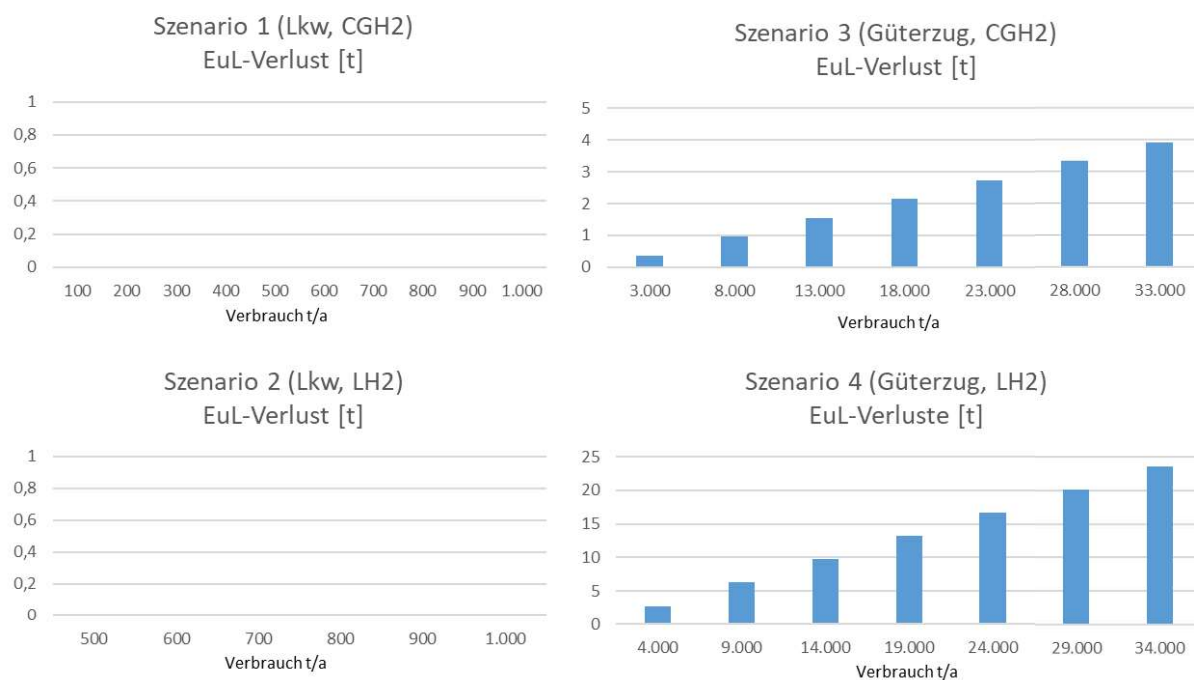


Abbildung 3-24: Energie- und Ladungsverluste für den Transport von Wasserstoff (eigene Darstellung)

Figure 3-24: Energy- and load losses for transport of hydrogen in usecase (own research)

t H<sub>2</sub> / a ein versteckter Verlust von 999 kg entstehen. Dieser würde mit Kosten von ca. 5.000 EUR zu Buche schlagen.

Für den Transport mit dem Güterzug wurde ein jährlicher Bedarf von 1.000 t Wasserstoff bis zu 34.000 t Wasserstoff untersucht. Die Lieferqualität wurde dabei eingehalten, sodass eine Versorgung der DRI-Anlage durchweg gegeben war. Die Permeations- und Boil-Off-Verluste wurden monetär bewertet und sind im Vergleich zum Lkw-Transport signifikant. Sie führen dazu, dass sich auf der Strecke Dörpen bis Duisburg der Transport von LH<sub>2</sub> ab einer Menge von 3.000 t Wasserstoff pro Jahr lohnt. Kleinere Bedarfsmengen können wirtschaftlicher in Form von komprimiertem Wasserstoff transportiert werden.

Die Untersuchung der Energie- und Ladungsverluste bezieht sich in dieser Untersuchung auf den Abschnitt des Transports. Die Erzeugung, Speicherung und Umschlag sind nicht untersucht worden, wenngleich das Modell diese Prozesskettenelemente abbildet. Mit einem Preis von 5 EUR pro 1 kg Wasserstoff wurde ein sehr niedriger Wert angenommen.

### **3.3 Alternative Pipeline / Alternative Pipeline**

Für den Transport von Wasserstoff in großen Mengen werden primär Pipelines betrachtet. Für den Bau einer Pipeline muss eine entsprechende Pipeline ausgewählt werden. Hierfür muss der Durchmesser bekannt sein und anschließend weitere Parameter spezifiziert werden. Im Projekt wurde ein Excel-Tool entwickelt, mit dem Pipeline-Durchmesser nach bestimmten Vorgaben dimensioniert werden können. Mittels des entwickelten Pipeline-Tools soll die Dimensionierung einer Pipeline auf Basis des Wasserstoffbedarfs, des Drucks sowie des Pipelinematerials erfolgen und eine fertige Pipeline dem Anwender empfohlen werden. Das Pipeline-Tool besteht aus zwei unterschiedlichen Teilen. Diese sind in Abbildung 3-27 rot markiert. Im linken Teil des Tools soll die Pipeline anhand des Wasserstoffbedarfs ausgelegt werden. Im rechten Teil des Pipeline-Tools kann eine manuelle Kostenoptimierung der ausgewählten Pipeline erfolgen.

In beiden Teilen des Pipeline-Tools erfolgt die Eingabe der Parameter durch den Anwender. Die Zellen, in denen der Anwender Werte und Daten eingeben kann, sind farblich gelb hinterlegt. Im linken Teil des Pipeline-Tools zählen zu den Eingabeparametern der Betriebsdruck der Pipeline in Bar und die Kapazität bzw. der jährliche Wasserstoffbedarf in Tonnen pro Jahr (t/a). Zusätzlich muss der Anwender den Abstand zwischen zwei Verdichterstationen in km angeben. Ein weiterer Eingabeparameter ist die Unsicherheit beim Wasserstoffbedarf. Der letzte Eingabewert vom Anwender für die Pipelineauslegung ist der Kostenfaktor zwischen den Verlegungskosten und den Herstellungskosten. Dieser Kostenfaktor kann vom Anwender individuell eingesetzt werden. Ab Zeile 17 werden die Ergebnisse ausgegeben. Für die Berechnungen wurden sowohl für die Pipelineauslegung als auch für die Kostenoptimierung einige Annahmen und Randbedingungen getroffen. Hierzu zählt, dass Wasserstoff als ideales Gas betrachtet wird und nicht als reales Gas. Dies

vereinfacht die Berechnungen, da mit weniger thermodynamischen Parametern die Rechnung durchgeführt werden kann. Aufgrund dieser thermodynamischen Annahme wird die Reinheit des Wasserstoffs vernachlässigt. Es wird vereinfachend angenommen, dass reiner Wasserstoff vorhanden ist und keine weiteren Gase oder Elemente den Wasserstoff verunreinigen.

Berechnung des Pipeline-Durchmessers		Pipelinedurchmesser Optimierung	
Projekt	H2-Logistik	Projekt	H2-Logistik
Datum	17.10.2022	Datum	17.10.2022
Bearbeiter		Bearbeiter	
<b>Ein- und Ausgangswerte</b>		<b>Ein- und Ausgangswerte</b>	
Betriebsdruck	20 bar	Betriebsdruck	70 bar
Kapazität	300.000 t/a	Pipelineauswahl	DN-200
Abstand zwischen zwei Verdichterstationen	6 km	Stahlsorte der Pipeline	L245NB/L245MB
Stahlsorte der Pipeline	L245NB/L245MB	Faktor Verlegungskosten zu Herstellkosten	2
Bedarfsunsicherheit	0 %	<b>Ergebnis</b>	
Faktor Verlegungskosten zu Herstellkosten	2	Beladegrenze	245 N/mm <sup>2</sup>
<b>Ergebnis</b>		Rechnerische Mindestdicke Rohr (smin) nach DIN 1594	4,67 mm
Mindest Innendurchmesser	0,588 m	Wanddicke vom Rohr DN-200	5 mm
Empfehlung nächstgrößeres Rohr	DN-600	Innendurchmesser vom Rohr DN-200	200,1 mm
Rechnerische Wandstärke Rohr (smin) nach DIN 1594	3,72 mm	Herstellkosten Pipelinerohre	870 €/m
Beladegrenze des ausgewählten Materials	245 N/mm <sup>2</sup>	Kapazität mit dem Rohr DN-200	145.880 t/a
Auswahl des Rohres	DN-600	Sicherheitsfaktor Versorgung	0,69
Wanddicke vom Rohr DN-600	6,3 mm	Druckverlust	2,32 bar
Herstellkosten Pipelinerohre	1.130.000 €/m	Längenspezifischer Druckverlust	38,65 Pa/m
Kapazität mit Rohr DN-600	340.213 t/a	Geschätzte Verlegungskosten der Pipeline DN-200	1740,00 €/m

Abbildung 3-27: Aufbau des Pipeline-Tools (eigene Darstellung)

Figure 3-27: Interface of the pipeline-tool (own research)

Für die Ermittlung des Mindestinnendurchmessers der Pipeline, der in Zelle B18 angegeben ist, wird die analytische Formel 11 nach dem Innendurchmesser umgestellt. Die entsprechenden Werte werden in Formel 11 eingesetzt und anschließend der Mindestinnendurchmesser berechnet. Die Fließgeschwindigkeit des Fluids ist auf einen maximalen Wert von 12 m/s begrenzt, sodass bei den Wasserstoffmolekülen und der Reibung an der Wand kein Staubmitriss entsteht und der Verdichter oder die Pipeline beschädigt werden. Die Dichte des Wasserstoffs ist druckabhängig und wird mittels der Molmasse von 2 g/Mol und der idealen Gas-Gleichung berechnet. Als Randbedingungen wird angenommen, dass ein 24 h Betrieb mit sieben Tagen vorliegt, sodass der Wasserstoffbedarf zu jeder Stunde konstant ist. Zusätzlich ist ein interner Sicherheitsfaktor eingebaut, der den Wasserstoffjahresbedarf um 10 % erhöht. Dies dient zum Ausgleich der Annahmen, wie beispielsweise, dass kein Gas aus der Pipeline oder den Verdichtern in die Umwelt austritt sowie, dass der Massenstrom konstant ist. Die Erhöhung des Wasserstoffbedarfs ist in Formel 11 nicht dargestellt und muss als Faktor von 1,1 mit dem Massenstrom multipliziert werden.

$$\dot{m} = v_{Durchfluss} * \frac{\pi}{4} D_{Innen}^2 * \rho_{Fluid} \quad \text{Formel 11}$$

$$D_{Innen} = \sqrt{\frac{\dot{m}}{(v_{Durchfluss} * \frac{\pi}{4} * \rho_{Fluid})}}$$

Ausgehend vom Mindestdurchmesser wird in Zelle B19 im Excel-Tool die entsprechende Pipeline nach Normbezeichnung für den Einsatz empfohlen. Aufgrund

## 4 Zusammenfassung / Summary

Die Dekarbonisierung der Stahl- und Chemieindustrie in Deutschland wird große Mengen an grünem Wasserstoff benötigen. Die Studie untersuchte die Wasserstoff-Logistik für die Stahl- und Chemieindustrie in Deutschland von der Gewinnung grüner Energie in den deutschen Offshore-Windparks bis zum Verbrauchspunkt im Hinterland Deutschlands. Dazu wurden ein Modell entwickelt, das die spezifischen Elemente der Wasserstoff-Logistik abbildet: Behälter für den komprimierten und flüssigen Wasserstofftransport, Kapazitäten der Verkehrsmittel, Besonderheiten der Routenfindung für Wasserstofftransporte und ökonomische Daten von Wasserstoff-Transporten, Fahrzeiten, Kosten und Bestellmethoden. Ein Fokus lag auf den Energie- und Ladungsverlusten, die entlang der Wasserstoff-Lieferketten entstehen (z.B. Permeation oder Boil-Off). Diese wurden detailliert untersucht und in ein Berechnungsmodul überführt. Unter Berücksichtigung der transportierten Mengen, der Transportzeit, der Jahreszeit, des Aggregatzustandes des Wasserstoffs und weitere Faktoren werden die spezifischen Energie- und Ladungsverluste berechnet. Dieses Berechnungsmodul ist über eine Schnittstelle an das Modell angeknüpft.

Die Simulation einer Wasserstoff-Logistikkette von einem Offshore-Windpark in der Nordsee nach Duisburg ergab, dass der Transport von komprimiertem Wasserstoff mit keinen signifikanten Ladungsverlusten verbunden ist. Beim Transport von Flüssigwasserstoff kann zwar mehr Wasserstoff pro Verkehrsmittel transportiert werden, allerdings spielen die Ladungsverluste in dem beschriebenen Usecase eine größere Rolle. Unter den getroffenen Annahmen zeigt sich ein Wechsel von komprimiertem Wasserstoff auf Flüssigwasserstoff bei einer Bedarfsmengen von 3.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr aus Sicht der Ladungsverluste als ökonomisch sinnvoll. Zu den gezogenen Annahmen zählt, dass die in den Offshore-Windparks gewonnene grüne Energie zunächst mit Seekabeln an Land übertragen wird. Erst an den Endpunkten der Seekabel wurde eine Produktion des Wasserstoffs mittels Elektrolyseure angenommen. Diese Annahme wurde in fachlicher Abstimmung mit dem Schwesterprojekt „Power-H2“ getroffen.

Für die Versorgung der Roheisenproduktion werden mehrere 100.000 t Wasserstoff pro Jahr benötigt. Lediglich Pipelines ermöglichen den zuverlässigen Transport dieser Mengen an Wasserstoff. Aus der Projektbearbeitung heraus zeigte sich, dass die ursprüngliche Zielsetzung um spezifische Betrachtungen der Pipeline-Logistik erweitert werden musste. Daher wurde ein Tool entwickelt, mit dem Pipelines für den Transport von Wasserstoff dimensioniert werden können. Das Tool unterstützt die Planung der Stahl- und Chemieindustrie dabei, für einen gegebenen Jahresverbrauch die passende Pipeline in Durchmesser und Stahlsorte zu ermitteln. Auch die Baukosten für eine Pipeline können berücksichtigt werden. Neben der Ermittlung des passenden Durchmessers der Pipeline enthält das Tool auch eine manuelle Optimierung, mit der unter Angabe des Durchmessers die jährliche Kapazität der Pipeline ermittelt wird. Das Tool wurde für die Betrachtung eines Usecases eines Mitglieds des Projektbegleitenden Ausschusses eingesetzt.

## **5.2 Ausblick / Perspective**

Die Wasserstoff-Logistik im Hinterland konzentrierte sich bisher auf die Versorgung von Tankstellen und weniger auf die Versorgung industrieller Verbraucher. Dieser Forschungsbeitrag bietet einen Einstieg in die Wasserstoff-Logistik für industrielle Verbraucher. Für Großverbraucher wird die Forschung zu Pipeline-Transporten und zur Organisation von Fern- und Verteilnetzen an Relevanz gewinnen. Dabei stellen marktwirtschaftliche Fragestellungen eine bedeutende Rolle. Industrielle Wasserstoffverbraucher abseits von Pipeline-Netzen werden sich zunehmend mit einer Wasserstoff-Logistik mit Lkw, Güterzug und Binnenschiff auseinandersetzen müssen. Dazu sind Standortfragen zu klären z.B. wo günstige Punkte für die Entnahme von Wasserstoff aus einem Pipeline-Netz liegen. Weiterhin werden technische Fragestellungen zu einer parallelen bzw. schnellen Befüllung von Wasserstoff-Containern für den Transport mit Güterzügen von Bedeutung werden. Der Transport von Wasserstoff über den Kombinierten Verkehr stellt eine Forschungsfrage für die Weiterentwicklung des Modells dar. Auch die Untersuchung der Wasserstoff-Logistik im Importfall mit Verteilung über Lkw, Güterzug und Binnenschiff wird auf Basis der besonderen Bestimmung in Häfen verstärkt untersucht werden müssen. Ferner sind infrastrukturelle Fragestellungen zu klären. Dies betrifft bspw. die Untersuchung, ob für die Versorgung von industriellen Verbrauchern die Infrastruktur für Transport, Speicherung und Umschlag vorhanden ist oder noch ausgebaut werden muss. In dem Zusammenhang ist zu bedenken, dass in der Wasserstoff-Logistik Gefahrgutlager für den Umschlag und die Zwischenlagerung benötigt werden.



## **6 Zusammenstellung aller Veröffentlichungen / List of publications related to the project**

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [Ban23] Banken, E.; Zimmerman, P.: Auf dem Weg zur Dekarbonisierung der Schifffahrt. In: Schiff&Hafen, Nr. 4, 2023
- [Zim23] Zimmerman, P.: Wasserstofflogistik für die Roheisenherstellung. In: stahl, Nr. 5-6, 2023.
- [Lil21] Lilienthal, L.: Ein literaturbasierter Vergleich der Transportoptionen von Wasserstoff mit anschließenden Empfehlungen für einen effizienten Einsatz innerhalb der Supply Chain. Bachelor Thesis. Hochschule Heilbronn, 2021.

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung der Projektergebnisse in der Fachzeitschrift International Journal of Hydrogen Energy (voraussichtlich 2024)

## 7 Inhaltsverzeichnis / Bibliography

- 50Hertz Transmission GmbH (2023): 50Hertz | Für eine erfolgreiche Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.50hertz.com/>, zuletzt geprüft am 21.07.2023.
- Altmann, Matthias; Gaus, Susanne; Landinger, Hubert; Stiller, Christoph; Wurster, Reinhold (2001): Wasserstofferzeugung in offshore Windparks: "Killer-Kriterien", grobe Auslegung und Kostenabschätzung.
- Amos, W. A. (1999): Costs of Storing and Transporting Hydrogen (National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/TP-570-25106; ON: DE00006574). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/6574>.
- Andersson, Joakim; Grönkvist, Stefan (2019): Large-scale storage of hydrogen. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (23), S. 11901–11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.
- Angloher, J.; Dreier, Th. (2000): Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung: Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (Teil 1).
- Arnold, Dieter; Furmans, Kai; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-/Buch]).
- Ball, Michael; Weindorf, Werner; Bünger, Ulrich (2009): Hydrogen distribution. In: Michael Ball und Martin Wietschel (Hg.): *The hydrogen economy. Opportunities and challenges*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, S. 322–347.
- Ball, Michael; Wietschel, Martin (Hg.) (2009): *The hydrogen economy. Opportunities and challenges*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Bank, M. (2000): Basiswissen Umwelttechnik. Wasser, Luft, Abfall, Lärm, Umweltrecht. 4. Auflage. Würzburg: Vogel.
- Bayle, Julien; Perreux, Dominique; Chapell, David; Thiebaud, Frederic; Nardin, Philippe; MaHyTec (2010): A model to predict the permeation of type IV hydrogen tanks. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21400913>.
- Bensmann, B.; Hanke-Rauschenbach, R.; Peña Arias, I. K.; Sundmacher, K. (2013): Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies. In: *Electrochimica Acta* 110, S. 570–580. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.05.102.
- Bossel, Ulf; Eliasson, Baldur; Taylor, Gordon (2003): The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? In: *Cogeneration & Distributed Generation J.* 18 (3), S. 29–70. DOI: 10.1080/15453660309509023.

- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hg.) (2023a): Nutzungskarten. Nordsee Plattformen Leitungen. Online verfügbar unter [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Nutzungskarten/nutzungskarten\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Nutzungskarten/nutzungskarten_node.html), zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hg.) (2023b): Nutzungskarten. Ostsee Plattformen Leitungen. Online verfügbar unter [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Nutzungskarten/nutzungskarten\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Nutzungskarten/nutzungskarten_node.html), zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- Cardella, U.; Decker, L.; Klein, H. (2017a): Economically viable large-scale hydrogen liquefaction. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 171 (1), S. 12013. DOI: 10.1088/1757-899X/171/1/012013.
- Cardella, U.; Decker, L.; Sundberg, J.; Klein, H. (2017b): Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (17), S. 12339–12354. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.167.
- Cardella, Umberto Federico (2018): Large-Scale hydrogen liquefaction under the aspect of economic viability. Dissertation, München.
- Chopra, S.; Meindl, P. (2013): Supply Chain Management. Strategy, Planning, And Operation. 5th Edition. Harlow: Pearson Education Limited.
- Corsten, H.; Gössinger, R. (2012): Produktionswirtschaft. Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 13. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Crank, John (2011): The mathematics of diffusion. 2. ed., repr. Oxford: Univ. Pr.
- Dahlke, Friederike (2015): LNG-Versorgung des Hinterlandes mit Binnentankschiffen am Beispiel des LNG-Speichers Stuttgart. Online verfügbar unter [https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/15\\_Dahlke\\_LNG-Versorgung-des-Hinterlandes.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/15_Dahlke_LNG-Versorgung-des-Hinterlandes.pdf), zuletzt geprüft am 17.10.2023.
- Daigle, Matthew; Foygel, Michael; Smelyanskiy, Vadim (2011): Model-based diagnostics for propellant loading systems. In: 2011 Aerospace Conference: IEEE.
- Decker, L. (2019): Liquid hydrogen distribution technology, 2019.
- Elgowainy, A.; Reddi, K.; Mintz, M. (2015): H2A delivery scenario analysis model. VERSION 3.0\* (HDSAM 3.0) USER'S MANUAL.
- Flaconneche, B.; Martin, J.; Klopffer, M. H. (2001): Transport Properties of Gases in Polymers: Experimental Methods. In: *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP* 56 (3), S. 245–259. DOI: 10.2516/ogst:2001022.
- Fleischmann, Horst (2008): Grunkonzepte, Grundlagen. Teil A. In: Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 3–12.

- Gardiner, Monterey; Satyapal, Sunita (2009): Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. Online verfügbar unter [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013\\_energy\\_requirements\\_for\\_hydrogen\\_gas\\_compression.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf).
- Gielen, Dolf; Taibi, Emanuele; Miranda, Raul (2019): Hydrogen: A renewable energy perspective. Hg. v. IRENA. Tokyo.
- Grunwald, Malte; Hansen, Louise (2021): Pre-feasibility Study for a Danish-German Hydrogen Network.
- Haeseldonckx, Dries (2009): Concrete transition issues towards a fully-fledged use of hydrogen as an energy carrier. Online verfügbar unter <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/121354>.
- Haoyu Wu; Neveen Al-Qasas; Boguslaw Kruczek; Jules Thibault (2015): Simulation of Time-Lag Permeation Experiments Using Finite Differences. In: *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (JFFHMT)* 2, S. 14–25. Online verfügbar unter <https://jffhmt.aveestia.com/2015/003.html>.
- Herbert, T.; Scholz, R. (2016): Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene. Unter Mitarbeit von T.Herbert. Hg. v. NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Berlin.
- Hirscher, Michael (Hg.) (2010): Handbook of hydrogen storage. New materials for future energy storage. Weinheim: Wiley-VCH.
- Hompel, Michael ten; Heidenblut, Volker (2011): Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. 3., bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.
- Jünemann, R.; Schmidt, T. (2000): Materialflusssysteme. Systemtechnische Grundlagen. 2. Auflage: Springer.
- Klaus, P.; Krieger, W.; Krupp, M. (2012): Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Klell, Manfred; Eichlseder, Helmut; Trattner, Alexander (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Krasae-in, Songwut; Stang, Jacob H.; Neksa, Petter (2010): Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (10), S. 4524–4533. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.109.
- Krüger Modellbau (2023): HO 63000. Online verfügbar unter <https://www.krueger-modellbau.de/kmb/index.php?p=details.ho63000>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.
- Linstrom, Peter (1997): NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69.

- Lü, Yaping; Bülow, Martin (2000): Analysis of Diffusion in Hollow Geometries. In: *Adsorption* 6 (2), S. 125–136. DOI: 10.1023/A:1008913301145.
- Majumdar, A. K.; Steadman, T. E.; Maroney, J. L.; Sass, J. P.; Fesmire, J. E.; Weisend, J. G. et al. (2013): NUMERICAL MODELING OF PROPELLANT BOIL-OFF IN A CRYOGENIC STORAGE TANK. In: T. K. Sri, Bernard Rolfe, X. Wei und Joseba Mendiguren Olaeta (Hg.): Simulation of springback and microstructure analysis of dual phase steels: AIP Publishing LLC, S. 1507–1514.
- Metzler, Ute (2013): Anwendungsbereich Transportplanung. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 277 - 290.
- Miebach, J. (2012): Lieferservice. 5. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Mischner, Jens (2015): Gastransport- und Gasverteilungssysteme.
- Mischner, Jens (2021a): Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen. Online verfügbar unter [https://gwf-gas.de/wp-content/uploads/2021/05/ge\\_05\\_2021\\_fb\\_mischner.pdf](https://gwf-gas.de/wp-content/uploads/2021/05/ge_05_2021_fb_mischner.pdf).
- Mischner, Jens (2021b): Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen. Erdgas, Methan, Wasserstoff, Gemische, Zusatzgas, Austauschgas, Druckverlustberechnung, Strömungsgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit, Wandschubspannung. 05/2021. gwf Gas+Energie. Online verfügbar unter <https://gwf-gas.de/produkt/zur-frage-der-stroemungsgeschwindigkeiten-in-gasleitungen/>.
- Möller, Markus (2004): Mixed Integer Models for the Optimisation of Gas Networks in the Stationary Case. Dissertation, Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/438/1/moeller-20040514.pdf>.
- NASA (2021): Barges Fill NASA Rocket Stage with Liquid Propellant. Online verfügbar unter <https://www.nasa.gov/image-article/barges-fill-nasa-rocket-stage-with-liquid-propellant-2/>, zuletzt geprüft am 17.10.2023.
- Neumann & Esser Group (2021): Kompressorlösungen. Hg. v. Neumann & Esser Group.
- Ni, Meng (2006): An Overview of Hydrogen Storage Technologies. In: *Energy Exploration & Exploitation* 24 (3), S. 197–209. DOI: 10.1260/014459806779367455.
- Ohlen, Nils von (2020): Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030. Entwurf. Hg. v. FNB Gas.
- Ohlig, K.; Decker, L. (2013): The latest developments and outlook for hydrogen liquefaction technology. In: T. K. Sri, Bernard Rolfe, X. Wei und Joseba Mendiguren Olaeta (Hg.): Simulation of springback and microstructure analysis of dual phase steels: AIP Publishing LLC.
- Parks, G.; Boyd, R.; Cornish, J.; Remick, R. (2014): Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs: Systems Integration

- (National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/BK-6A10-58564). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1130621>.
- Petitpas, Guillaume (2018a): Boil-off losses along LH2 pathway (Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), LLNL-TR-750685). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1466121>.
- Petitpas, Guillaume (2018b): Simulation of boil-off losses during transfer at a LH2 based hydrogen refueling station. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (46), S. 21451–21463. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.132.
- Pfohl, H.-C. (2010): Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Quack, H. (2001): Die Schlüsselrolle der Kryotechnik in der Wasserstoff-Energiewirtschaft: Herausforderungen des 21. Jahrhunderts in der aktuellen Forschung. TU Dresden. Online verfügbar unter <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getrecorddetail&idt=13581983>.
- ResearchAndMarkets.com (2021): Disruptive Innovations in Production, Storage, and Transportation of Hydrogen. Online verfügbar unter <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/01/19/2160286/0/en/Disruptive-Innovations-in-Production-Storage-and-Transportation-of-Hydrogen-Foreseeing-Challenges-and-Solutions.html>, zuletzt geprüft am 26.07.2023.
- Reuß, M.; Grube, T.; Robinius, M.; Preuster, P.; Wasserscheid, P.; Stolten, D. (2017): Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. In: *Applied Energy* 200, S. 290–302. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.
- Rosen, Philipp Andreas (2018): Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Sartbaeva, A.; Kuznetsov, V. L.; Wells, S. A.; Edwards, P. P. (2008): Hydrogen nexus in a sustainable energy future. In: *Energy Environ. Sci.* 1 (1), S. 79. DOI: 10.1039/B810104N.
- SCHEICHL, R.; KLOPFER, M.; BENJELLOUNDABAGHI, Z.; Flaconnèche, B. (2005): Permeation of gases in polymers: parameter identification and nonlinear regression analysis. In: *Journal of Membrane Science* 254 (1-2), S. 275–293. DOI: 10.1016/j.memsci.2005.01.019.
- Schewe, Lars; Schmidt, Martin (2019): Gasnetzwerke. In: Optimierung von Versorgungsnetzen: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 173–199. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-58539-9\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-58539-9_13).
- Schindler, Jörg; Schmidt, Patrick (2004): Brennstoffzellen-und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg.

- Schulte, C. (2009): Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain. 5. Auflage. München: Franz Vahlen.
- Schultheiß, Daniel (2007): Permeation Barrier for Lightweight Liquid Hydrogen Tanks. Dissertation, Augsburg.
- Schütz, Stefan; König, Janko; Glandien, Josephine; Weißing, Werner; Gollanek, Stefan (2017): Permeationsuntersuchungen an Kunststoffrohren. In: *Permeationsuntersuchungen an Kunststoffrohren*. Online verfügbar unter <https://gwf-gas.de/produkt/permeationsuntersuchungen-an-kunststoffrohren/>.
- Sherif, S. A.; Barbir, Frano; Veziroglu, T. N. (2005): Towards a Hydrogen Economy. In: *The Electricity Journal* 18 (6), S. 62–76. DOI: 10.1016/j.tej.2005.06.003.
- Richtlinie 3633, Dezember 2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen.
- Smolinka, Tom (2007): Wasserstoff aus Elektrolyse – ein technologischer Vergleich der alkalischen und PEM-Wasserelektrolyse.
- Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garcke, Jürgen (2011): Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien.
- Staffell, Iain; Scamman, Daniel; Velazquez Abad, Anthony; Balcombe, Paul; Dodds, Paul E.; Ekins, Paul et al. (2019): The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. In: *Energy Environ. Sci.* 12 (2), S. 463–491. DOI: 10.1039/C8EE01157E.
- Taibi, Emanuele; Miranda, Raul; Vanhoudt, Wouter; Winkel, Thomas; Lanoix, Jean-Christophe; Barth, Frederic (2008): Hydrogen from Renewable Power. Technology Outlook for the Energy Transition. Hg. v. International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency.
- TenneT TSO GmbH (2023): Tennet | Lighting the way ahead together. Online verfügbar unter <https://www.tennet.eu/de>, zuletzt geprüft am 21.07.2023.
- Thomas, D. (2019): Large scale PEM electrolysis: technology status and upscaling strategies.
- Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen (Hg.) (2014): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Trüeb, E. (1961): Druckverlustberechnung mit Hilfe der Formel von Prandtl-Colebrook. DOI: 10.5169/seals-216895.
- Wang, Yu; Kowal, Julia; Leuthold, Matthias; Sauer, Dirk Uwe (2012): Storage System of Renewable Energy Generated Hydrogen for Chemical Industry. In: *Energy Procedia* 29, S. 657–667. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.09.076.
- Werner, H. (2013): Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.

- Wiendahl, H.-P. (2008): Logistikorientierte Kennzahlensysteme und -linien. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- YANG, C.; OGDEN, J. (2007): Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2), S. 268–286. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- Yin, Liang; Ju, Yonglin (2020): Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes. In: *Front. Energy* 14 (3), S. 530–544. DOI: 10.1007/s11708-019-0657-4.
- Zimmerman, Patrick (26.08.2021): Transport von Wasserstoff über die Schiene. Interview mit Viktoria Pokorny. online.
- Zimmerman, Patrick (22.10.2021): Transport von Wasserstoff über die Schiene. Interview mit Heinz-Jürgen Hiller. Hamburg.