



# Wasserstoff-Forschung SH KOMPAKT

Sammelband:  
Beiträge zum HY.SH Forschungssymposium 2024

**Herausgegeben vom  
Landeskompetenzzentrum für Wasserstoffforschung Schleswig-Holstein (HY.SH):**

*„Mit dieser gemeinschaftlichen Veröffentlichung wird die Wasserstoffforschung in Schleswig-Holstein sichtbar. Insbesondere geben wir jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Gelegenheit, ihre Ergebnisse in der Öffentlichkeit zu diskutieren.“*

Gerlind Wagner-Vogel, Projektleiterin HY.SH



**Auf Initiative des Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE) an der TH Lübeck:**

*„Dank des H2Fonds und der tollen Unterstützung des Landeskompetenzzentrums Wasserstoffforschung SH konnten wir unsere Expertise im Bereich der Wasserstofftechnologie auf- sowie ausbauen und schlussendlich den Ansatz der hybriden Energiespeichertechnologie für die Energie- und Mobilitätswende entwickeln.“*

Clemens Kerssen, stellv. Leiter Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE)



## **Vorwort**

Anlässlich des dritten HY.SH Forschungssymposiums an der TH Lübeck 2024 stellt das Landeskompetenzzentrum Wasserstoffforschung einige Beiträge in einer kompakten Veröffentlichung vor, die innerhalb der letzten drei Jahre an den Hochschulen und Außeruniversitären Forschungseinrichtungen des Landes Schleswig-Holstein entstanden sind. Einige der wissenschaftlichen Ergebnisse wurden mit Hilfe des H2Fonds – Zeit für Wasserstoff! erarbeitet.

In den letzten drei Jahren konnten 36 Projekte über den H2Fonds mit einem Gesamtbudget von 920.000 Euro gefördert werden. Die von den Forschenden selbst gewählten Forschungsfragen sind so vielfältig, wie die Wasserstoffforschung selbst ist: Neben der Erzeugung, Infrastruktur, Anwendung kommen auch Fragen der Regulatorik, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit hinzu. Außerdem werden Forschungsfragen auf verschiedenen Ebenen diskutiert: von einem kleinen elektronischen Bauteil, welches die Effizienz erhöht bis hin zu einer globalen Perspektive der Importstrukturen.

Im Fokus des dritten Symposiums an der Technischen Hochschule Lübeck stand in diesem Jahr das Thema Leistungselektronik, welche als Schlüsseltechnologie für die erfolgreiche Energiewende gesehen werden kann. Darüber hinaus konnten an diesem Forschungsstandort erhebliche Kompetenzen im Bereich Energiemanagementsysteme und Hybride Speichertechnologien sowie ein H<sub>2</sub>-Reallabor für die Lehre und Forschung aufgebaut werden.

Wir danken allen beitragenden Autorinnen und Autoren für Ihre Bereitschaft, Ihre Forschungsergebnisse zu präsentieren, zu diskutieren und stetig weiterzuentwickeln. Damit liefern sie einen erheblichen Beitrag zur Energiewendeforschung des Landes Schleswig-Holstein.

Wir weisen darauf hin, dass für den Inhalt der Artikel die Autorinnen und Autoren selbst verantwortlich sind.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	3
<b>1 Wasserstoff in Forschung und Lehre - ein Reallabor in der Entstehung</b> Clemens Kerssen, Maik Baumann und Niklas Thom	5
<b>2 Quadruple Active Bridge for Highly Reliable and Efficient Integration of Various Energy Storages and Renewable Sources into DC-Grid</b> Martin Votava und Marco Liserre	9
<b>3 Vorstellung einer ökonomischen Fahrweise für eine Wasserstoff-Methanol Prozesskette - Westküste100</b> David Wekerle und Klaas Völtzer	13
<b>4 Eignung der Schleswig-Holsteinischen Gasnetze für den Transport von Wasserstoff</b> Salah Habouti, Oliver Opel und Marlies Wiegand	18
<b>5 Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff zur Defossilisierung des Schwerlastverkehrs in der EU</b> Susanne Royer und Sebastian Wirth	22
<b>6 Research towards hydrogen-based decarbonization of ships and maritime transport systems</b> Florian Schlieker, Martin Bergström and Ishan Sontakke	27
<b>7 Künstliche Intelligenz für die Serienfertigung von H<sub>2</sub>-Speichern bei thyssenkrupp Marine Systems</b> Moritz Jens, Jonas Neustock, Marvin Timm und Alexander Mattes	30
<b>8 Erneuerbare Energieträger für die maritime Wirtschaft in Schleswig-Holstein: Ergebnisse einer Expert:innen-Befragung</b> Jan Simon Bischoff, Sebastian Scholz und Frank Meisel	34
<b>9 Ausgewählte Inhalte des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes</b> Sina Freitag	38
<b>10 Die Rolle von Wasserstoff in der kommunalen Wärmeplanung - Rechtsrahmen und Planungsrealitäten in Schleswig-Holstein</b> Marina Blohm, Ilka Hoffmann und Josephine Semb	42
<b>11 Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability</b> Marina Blohm und Franziska Dettner	46
<b>12 Berufe und Kompetenzen für die Wasserstoffwirtschaft</b> Lena Thiessen, Frank Schiller, Tim Warszta und Kaire Holts	50
<b>Impressum</b>	55

# **Wasserstoff in Forschung und Lehre - ein Reallabor in der Entstehung**

*Clemens Kerssen (M.Sc.), Maik Baumann (M. Eng.), Niklas Thom (M.Sc.)*

*TH Lübeck, Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE)*

## **Abstract**

Das Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE), fokussiert sich auf die technische Analyse der Mobilitäts- und Energiewende. Ziel ist die Entwicklung praxistauglicher Lösungen mit hohem Technologiereifegrad. Beginnend mit der Schnelladetechnik über die Entwicklung von Ladeparklösungen ist man zu Betrachtung dezentraler Energiesysteme bestehend aus Erzeugern, Verbrauchern und Speichern gekommen. Für die Saisonale Speicherung und eine bessere Regelbarkeit von Erzeuger und Verbraucherverhalten wird im Reallabor ein Hybridspeichersystem integriert. Dieses stellt das ohnehin komplexe Energiemanagementsystem vor neue Anwendungsszenarien.

## **1 Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE)**

Das EMLE der Technischen Hochschule Lübeck (THL) wurde 2012 von Prof. Tiedemann mit dem Ziel gegründet, Fragestellungen der Mobilitäts- und Energiewende technisch zu durchleuchten und praxistaugliche Lösungen mit möglichst hohem Technologiereifegrad (TRL) interdisziplinär und holistisch zu entwickeln. Die Forschungsarbeiten finden auf der Systemebene statt, wobei Aspekte der Grundlagenforschung von Partnern beigesteuert werden. Die Systemvalidierung erfolgt bei Industriepartnern, um möglichst authentische und praxisnahe Testdaten erheben zu können.

2012 stand die Mobilitätswende noch in den Kinderschuhen. Die Frage nach Schnellladestationen war noch nicht beantwortet. Gerade in Bezug auf Herausforderungen wie Mess- und Eichkonformität, entsprechenden Payment-Lösungen und einem barrierefreien Zugang oder auch dem Erbringen von Systemdienstleistungen am Energieversorgungsnetz wurden und werden teilweise immer noch realistische Lösungen benötigt. Bei der Arbeit an diesen ersten Forschungsfragen entstand die Schnellladestation *FE-alpha* als Demonstrator mit einer DC-Ladeleistung von 100 kW und einem AC-Ladepunkt mit 22 kW. Aufgrund ihres modularen Aufbaus war *FE-alpha* bereits so konzipiert, dass Ladeleistungen von über 300kW bei Ladespannungen von über 900V realisiert werden können. Um die Netzelastung durch Lastschwankungen zu minimieren und Wandlungsverluste zu vermeiden, wurde im Projekt Power 400 die DC-Schnelladetechnik so weiterentwickelt, dass ein direktes Laden aus einem Batteriespeicher möglich ist. (Drews-Walkling, Kerssen, & Tiedemann, 2021) Die Nutzung von Speichersystemen ermöglicht zudem, das reine Ladekonzept, um weitere wirtschaftliche und technische Aspekte auszudehnen. Es entstand das Ladeparkkonzept mit einer modularen und skalierbaren AC-Ladetechnik mit nahezu beliebig vielen Ladepunkten sowie einer Energiemanagementsystem (EMS) zum Koppeln von Verbraucher- und Erzeugerleistung (Kerssen, Drews-Walkling, Zimmermann, Baumann, & Thom, 2023). Um mehr Regelmöglichkeit und eine Langzeitspeicherung zu ermöglichen, wird das System um einen Hybridspeicher in Form von Wasserstoff ergänzt.

## **2 Aufbau eines Hybridspeichers als Bestandteil des Reallabors**

Der Hybridspeicher basiert auf einem Wasserstoffsystem in Kombination mit Batteriespeichern. Ein wesentlicher Bestandteil des Entwicklungsprozesses war der schrittweise und komponentenbasierte Aufbau. Der Hybridspeicher wurde im 19"-Industriestandard errichtet und besteht aus

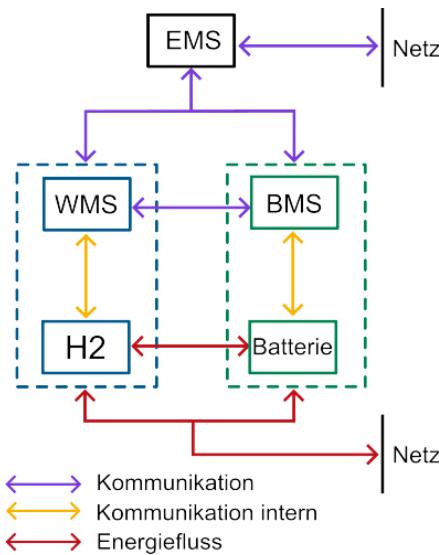


Abbildung 1: Konzept Hybridspeicher mit Batteriemanagementsystem (BMS) und Wasserstoffmanagementsystem (WMS)

nimmt dabei die Auswertung der Sensorik, die Steuerung der Aktorik sowie die Darstellung der Betriebsdaten auf einem Monitor. Darüber hinaus kann das System vom Nutzer über die gleiche Einheit gesteuert werden. Dadurch, dass viele Einzelkomponenten über andere Schnittstellen und Protokolle angesprochen werden müssen, erhöht sich die Komplexität des Systems zusätzlich.

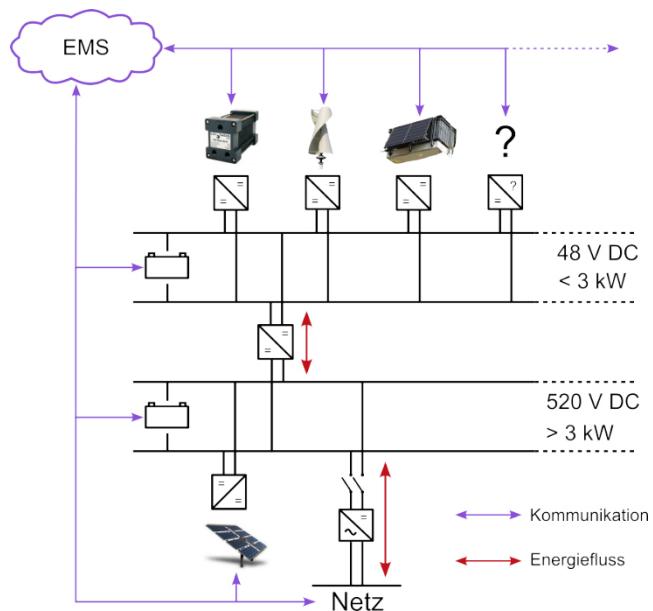


Abbildung 2: Konzept dezentrales Reallabor

integriert. Die erste Ebene umfasst 48 V für Erzeuger und Verbraucher bis 3 kW. Vorgesehene Netzteilnehmer sind Balkonkraftwerke, Kleinwindanlagen, Brennstoffzellen und eine Kaskade von Blei-Gel-Batterien, die Teil des kleineren Hybridspeichers sind. Über bidirektionale DC/DC-Wandler wird die zweite Spannungsebene mit 520 V für Netzteilnehmer über 3 kW sowie der Anbindung an einen 30 kWh LiFePO<sub>4</sub>-Batteriespeicher und das lokale Energieversorgungsnetz bereitgestellt.

einer Kombination von Druckwassertank, Elektrolyseur, Wasserstofftank, Brennstoffzellensystem, Batteriespeicher sowie verschiedener Sensorik, Aktorik und einer Steuereinheit. Jedes Subsystem verfügt auf Grundlage eines zuvor erstellten und in Abbildung 1 dargestellten Konzepts über ein eigenes Managementsystem, welches die grundlegende Steuerung übernimmt. Die Speisung des Elektrolyseurs erfolgt über einen Druckwassertank. Über einen einstellbaren Druckminderer wird der Ausgangsdruck des Elektrolyseurs angeglichen die Weiterleitung erfolgt entweder zum Wasserstofftank oder, über einen weiteren Druckminderer, zum Brennstoffzellensystem. Der Wasserstoffzufluss zur Brennstoffzelle wird mittels eines eigenen Steuerungssystems reguliert, das Einlass- und Auslassventile, einen elektronischen Druckregler sowie einen Differenzdrucksensor umfasst. Hiermit wird der Wasserstoffzu und -abfluss zyklisch in Abhängigkeit des Verbrauchs reguliert. Magnetventile, ein Rückschlagventil zur Verhinderung von Druckschlägen in den Elektrolyseur und ein Gassensor gewährleisten die Erkennung eines möglichen Gasaustritts und ermöglichen die automatische, gefahrenfreie Unterbrechung des Wasserstoffflusses bei Bedarf. Eine mikrocontrollerbasierte SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) übernimmt dabei die Auswertung der Sensorik, die Steuerung der Aktorik sowie die Darstellung der Betriebsdaten auf einem Monitor. Darüber hinaus kann das System vom Nutzer über die gleiche Einheit gesteuert werden. Dadurch, dass viele Einzelkomponenten über andere Schnittstellen und Protokolle angesprochen werden müssen, erhöht sich die Komplexität des Systems zusätzlich.

Die im Rahmen des Aufbaus und der Inbetriebnahme dieses Kleinsystems gewonnenen Erkenntnisse lassen sich direkt auf das H<sub>2</sub>-Großsystem, welches im Rahmen des Reallabors entsteht, übertragen. Zusätzlich zu Druckwassertank, Elektrolyseur und Brennstoffzelle wird im Großsystem ein Trockner zur Erhöhung der Wasserstoffreinheit sowie eine Umkehrosmose-Anlage integriert, die eine direkte Versorgung mit Wasser aus dem lokalen Wassernetz ermöglicht. Die Speicherung des erzeugten Wasserstoffs erfolgt in einem 12x50-Liter-Gasflaschenbündel. Dies entspricht, ausgehend von den 35 Bar Ausgangsdruck des Elektrolyseurs, einem Heizwert von 63 kWh. Die Funktion des Batteriespeichers übernimmt hierbei eine 30 kWh LiFePO<sub>4</sub>-Batterie. Zum Vergleich: ein 2-Personen Haushalt verbraucht durchschnittlich 8,3 kWh/Tag (e.V, 2023). Im Reallabor wird zudem ein Gleichstromnetz mit zwei Spannungsniveaus

Anhand realer Lastprofile können mit diesem System Untersuchungen zur Dimensionierung von Hybridspeichern als Zwischenspeicher für Ladeinfrastruktur, wie etwa größere Ladeparks, durchgeführt werden. Dabei werden vorhandene regenerative Energiequellen sowie das schonende Laden von Batterien berücksichtigt. Darüber hinaus bietet das System die Möglichkeit, potenzielle Geschäftsmodelle durch Systemdienstleistungen und die Teilnahme am Energiemarkt zu erforschen. Ein zentraler Aspekt des dezentralen Reallabors ist ein übergeordnetes, selbstlernendes EMS.

### 3 Die Bedeutung und Komplexität des Energiemanagements

Ein Energiemanagementsystem (EnMS/EMS) ist ein strukturiertes und systematisches Verfahren zur kontinuierlichen Verbesserung der Energieeffizienz eines Systems. Ziel des EMS ist es, die Energieeffizienz zu steigern und Kosten zu reduzieren, unter der Betrachtung von Umweltaspekten. Die Definition lässt sich auf die Inhalte der Iso 50001, die Norm für Energiemanagementsysteme beziehen, welche die praktische Umsetzung des Energieeffizienz-Gesetzes darstellt. Die Definition ist weit gefasst und im Rahmen der nachfolgenden Textabschnitte ist unter dem Begriff EMS insbesondere das kontinuierliche Überwachen, Automatisieren und Optimieren von Energieflüssen zu verstehen.

Im Praxisbeispiel eines EMS wird ein Haushalt mit einer PV-Anlage und einem Lithiumspeicher betrachtet. Dieser soll die Energieeffizienz steigern und Kosten reduzieren. Bei einem möglichen Netzbezug entstanden für Haushalte mit einem Verbrauch von 2500-5000 kWh durchschnittliche Kosten von 40,2 Cent/kWh im Jahr 2023 (Statista, study\_id10091\_strom-und-energiepreise-in-deutschland, 2024). Die Einspeisevergütung nach dem EEG beträgt 8 Cent/kWh (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien EEG, 2023).

Berechnet man über den Ertrag sowie die Gestehungskosten von durchschnittlich 1.000 kWh/kWp und 1.175 €/kWp (Statista, statistic\_id156490 Solaranlage Preise In Deutschland bis 2021, 2024), kostet über eine Lebenszeit der PV-Anlage von 20 Jahren die erzeugte kWh 5,9 Cent. Soll der erzeugte Strom zwischengespeichert werden, kostet die Speicherung 15,7 Cent/kWh. Für die Berechnung wurden die Gestehungskosten mit der garantierten Speicherkapazität über die Lebenszeit unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades berechnet. Eines der gängigsten EMS für den Anwendungsfall ist die Eigenverbrauchsoptimierung mit Überschusseinspeisung. Am wirtschaftlichsten ist es, Energie unmittelbar selbst zu verbrauchen. Gegenüber dem Bezugskosten spart man so 34,1 Cent/kWh. Ist der Eigenverbrauch nicht möglich, wird die Energie für die Nacht gespeichert. So werden immer noch 18,47 Cent/kWh gegenüber dem Netzbezug eingespart. Ist der Speicher voll und es wird noch immer keine Energie benötigt wird ins Netz eingespeist und ein Gewinn von 2,1 Cent/kWh erzielt.

Als Betrachter geht man auf Grund der wirtschaftlichen Gegebenheiten davon aus, dass ein Großteil der Energie selbst verbraucht wird, um den Gewinn zu maximieren. Doch schaut man auf die Jahresbilanz einer PV-Anlage in häuslicher Durchschnittsgröße (8 kWp PV-Leistung mit einem 5 kWh Speicher) stellt man fest, dass insbesondere im Sommer nur ca. 30% der erzeugten Energie direkt oder indirekt verbraucht werden und das bei einem Autarkiegrad von über 80% bei unserer Beispieldanlage. 70% der erzeugten Energie wird eingespeist.

Hier wird bereits das Potential für den Einsatz von Hybridspeichertechnik und der Langzeitwasserstoffspeicherung ersichtlich, da im Sommer ein bedeutender Energieüberschuss erzielt wird. Dieser Eindruck bestätigt sich, wenn der deutsche Strommarkt betrachtet wird. Die schwankende Einspeiseleistung von regenerativen Energiequellen führt zu Preisschwankungen mit zwei klaren Abhängigkeiten. Zum einen sind bei Erneuerbaren Energien oftmals die Erzeugungskosten günstiger. Zum anderen spielt die Abhängigkeit zwischen Angebot und Nachfrage in die Preisbildung ein. Wird das EMS aus dem bisherigen Rechenbeispiel genutzt, um Preisschwankungen am Energiemarkt auszunutzen zu können und somit auch systemdienlich zu agieren, dann wird das EMS sehr viel komplexer. Für das Rechenbeispiel wird der maximalen Energiepreis vom 29.08.2022 mit 87,1 Cent/kWh angenommen. Der Zeitpunkt ist freigewählt und es kommt regelmäßig zu

Ausschlägen in der gleichen Größenordnung. Zudem dient das Rechenbeispiel zur Darstellung der Komplexität und entspricht nicht der wirtschaftlichen Realität, da die Großhandelspreise einer idealisierten Betrachtung ohne Steuern, Netzentgelten, etc. entsprechen. Es ergeben sich durch die Einbindungen der Großhandelspreise neue Regelalgorithmen. Das EMS könnte Energie aus dem Speicher zu Spitzenzeiten einspeisen, um so zum ausgewählten Zeitpunkt 65,6 Cent/kWh Gewinn zu erzielen. Eine andere Regelmöglichkeit ist es die Energie günstig aus dem Netz zu beziehen, um diese einzuspeichern oder direkt zu verbrauchen, wenn dies wirtschaftlich sinnvoll ist. Für die Reglungen müssen gute Prognosen des Energieverbrauches und der Produktion integriert werden. Das EMS ist nun sehr schnell von einem System mit drei „If-Else-Bedingungen“ auf ein System, das ohne künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen kaum zu realisieren ist, angewachsen. Dabei wurde die Einbindung saisonaler Speicher (Hybridspeicher) noch nicht betrachtet. Auch die Einbindung von Ladeinfrastruktur insbesondere bidirektionales- und batterieschonendes Lademanagement werden mit dem Aufbau unsers eigenen EMS im Rahmen des Reallabors betrachtet. Das EMS wird als Cloudnativ System aufgebaut und basiert auf verschiedenen Programmteilen die in Containern, also ausführbare Softwareeinheiten, verpackt sind. Durch die Struktur wird eine Modularität mit genügend Flexibilität erreicht, um neue Algorithmen zu testen und das System stetig mit neuen Akteuren zu erweitern. Durch den Aufbau als Cloudumgebung lässt sich das System auch mit EMS-Teilnehmern über das Labor hinaus verknüpfen.

## Literaturverzeichnis

Drews-Walkling, P., Kerssen, C. und Tiedemann, R. (2021). „Power 400 - High Power Charging System with Battery Buffer,” in *ETG Congress 2021*, Online.

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien EEG, 2023.

Kerssen, C., Drews-Walkling, P., Zimmermann, M., Baumann, M. und Thom, N. (2023). „HYBRIDE, DEZENTRALE ENERGIESPEICHERSYSTEME UND INTELLIGENTES ENERGIEMANAGEMENT AM BEISPIEL MODULARER UND SKALIERBARER LADEPARKS,” in *Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik*, Stralsund.

Statista (2024), „statistic\_id156490 Solaranlage Preise In Deutschland bis 2021,” Statista.

Statista (2024), „study\_id10091\_strom-und-energiepreise-in-deutschland,” Statista.

V. B. e.V (2023), „Stromverbrauch im Haushalt [Online],“ <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/strom-sparen/strom-sparen-im-haushalt-einfache-tipps-10734> (Zugriff am 27. September 2024).

# Quadruple Active Bridge for Highly Reliable and Efficient Integration of Various Energy Storages and Renewable Sources into DC-Grid

Martin Votava<sup>1</sup>, Marco Liserre<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chair of Power Electronics, Kiel University, Kiel, Germany

<sup>2</sup> Fraunhofer Institute for Silicon Technology ISIT, Fraunhoferstr. 1, Itzehoe, Germany

## Abstract

The increasing integration of renewable energy sources and energy storage systems demands efficient and cost-effective power conversion technologies. To address this, the paper explores the optimal design of a Quadruple Active Bridge converter (QAB), with a focus on the magnetic core and power semiconductors. The design optimization is driven by two primary criteria: capital investment cost and converter efficiency. Results are compared with an equivalent solution utilizing Dual Active Bridge converters (DAB) to highlight the advantages of the QAB architecture.

## 1 Introduction

Reliability and efficiency in power conversion technologies are often enhanced through innovative solutions that reduce the number of power conversion stages. As power systems transition from conventional AC to DC, DC-based microgrids are gaining traction, particularly due to the inherent DC nature of both renewable energy sources and energy storage systems. These microgrids are better suited to handle the dynamic demands of distributed generation and storage.

One common approach, as shown in Fig. 1(a), is to integrate renewables and energy storage systems using DABs (Xun et al., 2023). This approach is inherently fault-tolerant; for example, if the converter connecting the grid fails, the load can still be supplied by the PV and energy storage systems. An innovative solution is to replace the DABs (highlighted in light blue) with QABs (Xun et al., 2023) displayed in Fig. 1(b). This decreases the number of semiconductors used. Thereby reduce power losses and increase reliability.

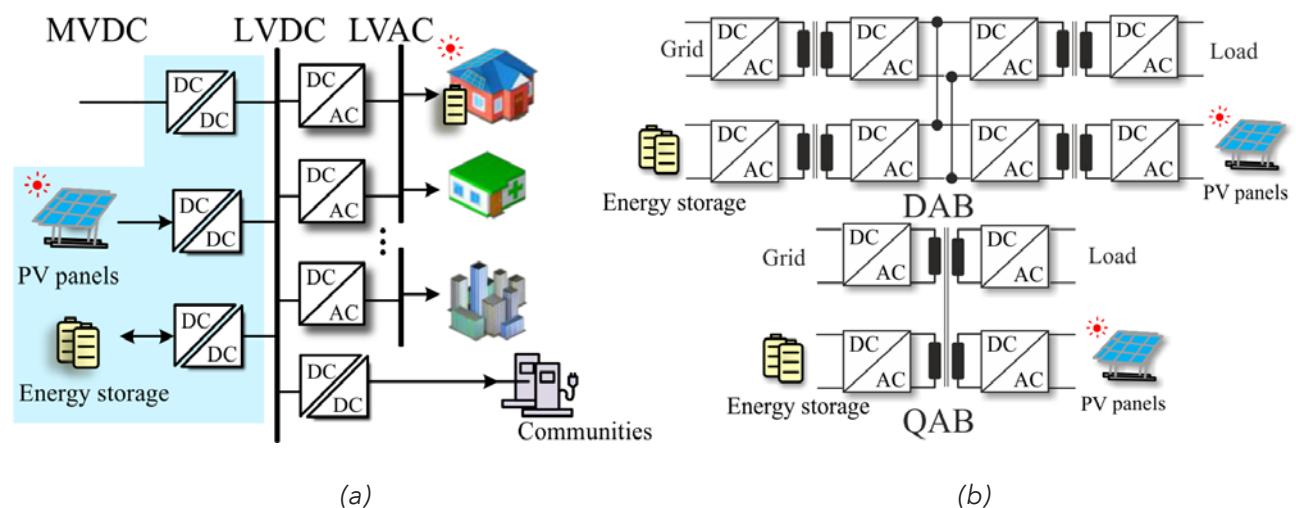


Figure 1: (a) DC-microgrid architecture consisting of DAB, (b) QAB configuration replacing DABs highlighted blue.

## 2 Power losses in QAB

In the operation of a Quadruple Active Bridge (QAB) converter, the primary power losses occur in power semiconductors, transformer winding and magnetic core. Power semiconductors are both caused by current flowing through MOSFET on-state resistance ( $R_{DSon}$ ) and switching losses:

$$P_{cond} = R_{DSon} I_{RMS}^2, P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) f I_{RMS}, \quad (1)$$

where  $E_{on}$  and  $E_{off}$  are the energy loss coefficients and  $f$  is the switching frequency. Compared to DAB Transformer winding losses are mostly given by the copper losses:

$$P_{cu} = R_w I_{RMS}^2, \quad (2)$$

where  $R_w$  is the winding resistance. Core losses are approximated using Steinmetz's equation:

$$P_{core} = k f^a B^b, \quad (3)$$

where  $k$ ,  $a$  and  $b$  are the Steinmetz coefficients.

## 3 QAB design optimization

The task of optimization is to find suitable parameters to reduce the total cost ( $C_{tot}$ ), considering both upfront CAPEX and future OPEX. As OPEX occurs over time, it is reduced to present value using a discount rate ( $r$ ), which represents the time value of money, making it comparable to CAPEX.

$$C_{tot} = \text{CAPEX} + \sum_{n=1}^{n_{end}} \frac{\text{OPEX}}{(1+r)^n}, \quad (4)$$

where  $n$  denotes the year. CAPEX primarily consists of the costs for the power module and the magnetic components, while other expenditures are not considered in this analysis. OPEX is driven by energy losses multiplied by the electricity cost. The objective is subjected to multiple constraint including the maximum junction temperature of power semiconductor, the maximum  $B$  to avoid magnetic core saturation, minimum output power to ensure that both the load can be fully fed either by the battery or the grid.

### 3.1 Data center

The optimization algorithm is evaluated in the data center application shown in Fig. 1(a), which consists of four ports: connecting to the grid, supplying the load, managing the battery, and integrating photovoltaic (PV) energy. The energy flow, represented by the daily maximum, minimum, and average, is shown for the load port, battery port, and PV panel port in Fig. 2. The energy flow going through grid port can be determined as the sum of three aforementioned power flows.

The system is subject to the following constraints: the junction temperature of individual chips inside power modules must not exceed 150°C, the peak magnetic flux density  $B$  must remain below 0.3 T, and the nominal power of the converter on the battery side must be at least 80 kW. CAPEX is limited to the cost of power modules and magnetic core material. The optimization algorithm adjusts both the cost of individual converters and the cost of magnetic core material.

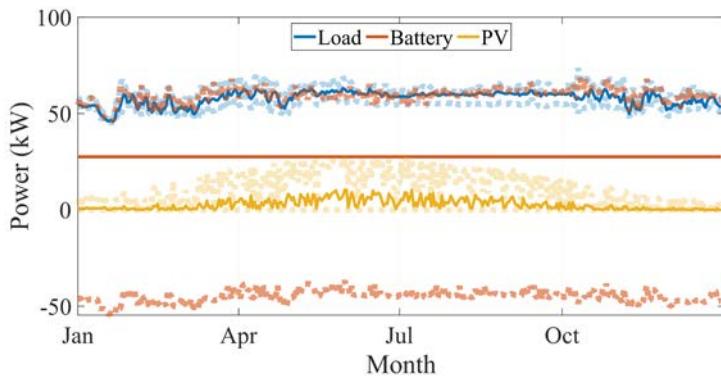


Figure 2: Energy flow between the ports of QAB - daily absolute mean value (solid lines), daily minimum and maximum (dotted lines).

### 3.2 Results

The results of optimization vary with discount rate ( $r$ ), which acts as weighting coefficient between CAPEX and OPEX. The optimal ratio between CAPEX and OPEX given by a series of discount rate is shown in Fig. 2 for both QAB and DAB. In the same plot, an additional axis on the right shows the efficiency, allowing for a comparison of efficiency versus CAPEX. The plots are limited to  $r$  of zero. Beyond this point, the total cost increases, making further analysis impractical. The comparison shows the superior performance of QAB over DAB, indicating higher efficiency and lower OPEX with less CAPEX.

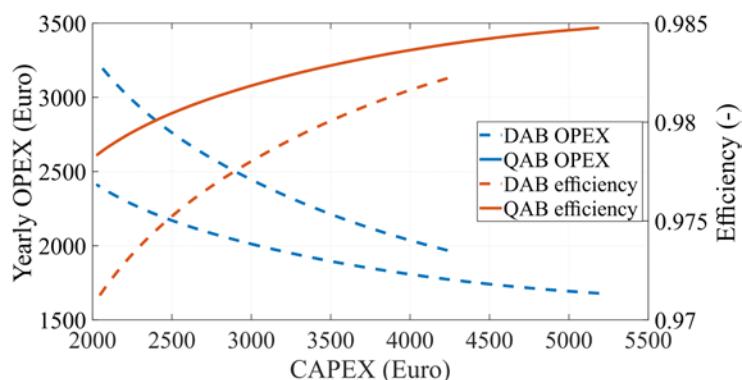


Figure 3: Pareto front optimization for both DAB and QAB, yearly OPEX vs. CAPEX and efficiency vs. CAPEX with respect to different values of  $r$ .

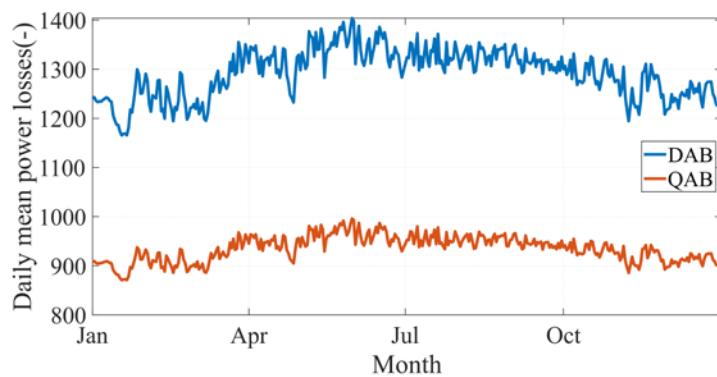


Figure 4: Daily mean power losses of DAB and QAB with  $r$  of 0.12.

$r$  of 0.12 was applied, and the resulting daily mean total power losses are shown in Fig. 4 for both DAB and QAB. This plot illustrates the superior performance of QAB over DAB over a typical year.

## 4 Conclusion

Replacement of DAB converters by QAB converters improves the controllability of energy flow in DC-microgrid application. It further enhanced efficiency, reduces operating cost (OPEX) and capital investment cost (CAPEX). The paper proposed a methodology to obtain power converter design parameters minimizing power converter operating cost with respect to given capital cost. Furthermore, the optimal parameter selection takes the discount rate into account to reduce the value of OPEX, making it comparable with CAPEX.

## References

Xun, Q., Langwasser, M., Gao, F., & Liserre, M. (2023). Optimal sizing and energy management of smart-transformer-based energy storage systems for residential communities. *2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 891-896. <https://doi.org/10.1109/PEDG56097.2023.10215209>

Xun, Q., Pereira, T., & Liserre, M. (2023). Optimal design of multiwinding-transformer-based power architectures in data center applications. *PCIM Europe 2023: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1-8. <https://doi.org/10.30420/566091011>

# Vorstellung einer ökonomischen Fahrweise für eine Wasserstoff-Methanol Prozesskette - Westküste100

David Wekerle<sup>1</sup>, Klaas Völtzer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE), Heide

<sup>2</sup> Fachhochschule Westküste (FHW), Heide

## Abstract

Um nachhaltige industrielle Produktionsketten aufzubauen, braucht es sektorübergreifende Lösungen. Hier setzt das Projekt *Westküste100* an und kombiniert die Produktion von grünem Wasserstoff und Methanol mit der Klinkerproduktion für die Zementherstellung. Das Methanol kann z.B. als Schiffstreibstoff eingesetzt werden. Im Rahmen des Projekts wurde eine optimale Anlagenkonfiguration für eine gesamte Nutzung des anfallenden CO<sub>2</sub> entwickelt und modelliert. Hier versorgen ein 2,8 GW Windpark und eine 300 MW PV-Anlage einen 2,8 GW Elektrolyseur. Der Sauerstoff wird für ein Oxyfuel-Verfahren bei der Zementklinkerproduktion verwendet. Das dabei entstehende Kohlenstoffdioxid hat eine Reinheit von 99,97 % und kann ohne großen Aufwand zu Methanol synthetisiert werden. Aufgrund der Volatilität der erneuerbaren Energien sind Speicher für Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid notwendig. In diesem Artikel wird eine optimale Prozessregelung durch einen modellprädiktiven Regler vorgestellt. Das Optimierungsziel liegt in einer Fahrweise, die ein Abblasen von CO<sub>2</sub> möglichst unterdrückt und den Methanol-Massenstrom maximiert. Weiterhin wird die Funktionsweise der Regelung und die sich ergebenden Methanol-Produktionskosten aufgezeigt.

## 1 Einleitung

Die nachhaltige Produktion von Wasserstoff und Methanol muss sektorübergreifend integriert werden, um Synergien nutzbar zu machen. In der PEM Elektrolyse wird aus grünem Strom grüner Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (CO<sub>2</sub>) produziert. Der Sauerstoff wird genutzt, um ein Oxyfuel-Verfahren für die Zementklinkerproduktion zu ermöglichen. Das entstehende Abgas besteht zu 99.97 % aus Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Durch den hohen Reinheitsgrad, ist die Aufbereitung, um das CO<sub>2</sub> mit dem H<sub>2</sub> zu Methanol zu synthetisieren, gering im Vergleich zu einem herkömmlichen Abgasstrom mit Umgebungsluft. Aufgrund der Fluktuation der Erneuerbaren Energiequellen sind Speicher für H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> notwendig. Für einen möglichst effizienten Betrieb der Prozesskette, wird ein modell-prädiktiver Regler (MPC) eingesetzt. Dieser nutzt ein internes Modell des Systems, um die zukünftigen Zustände des Systems aufgrund von Wetterprognosen vorherzusagen und damit die Speicherstände zu regeln, sodass auch bei längeren Phasen geringerer Stromproduktion möglichst kein CO<sub>2</sub> abblasen werden muss und die Methanolproduktion maximiert wird.

## 2 Modellierung der Prozesskette

Im Folgenden soll die Modellierung der einzelnen Bestandteile der Prozesskette näher beleuchtet werden. Die Prozesskette ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

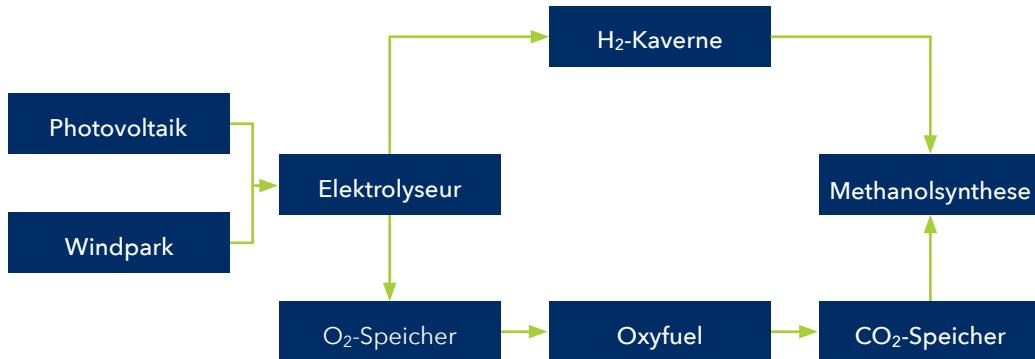


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesskette

### 2.1 Photovoltaik und Windpark

Die Photovoltaik (PV)-Anlage und der Windpark werden durch Zeitreihen der Leistung abgebildet. Die Zeitreihe der PV-Anlage beruht dabei auf dem PV-Gis-Modell für einen Standpunkt bei Heide (Gambardella, 2012). Die Zeitreihe für die Leistung des Offshore-Windparks wurde vom Projektpartner Oersted für einen gewählten Standort in der Nordsee mit Hilfe des *turbo-park-models* generiert (Pedersen, 2020). Beide Zeitreihen wurden auf 1 MW normalisiert, um die Skalierung innerhalb des Modells variabel zu halten. Das betrachtete Szenario umfasst eine PV-Leistung von 300 MW<sub>peak</sub> und eine Windparkleistung von 2,8 GW.

### 2.2 Elektrolyseur

Der Elektrolyseur wird in dem betrachteten Skalierungsszenario mit einer Nennleistung von 2,8 GW modelliert. Als Grundlage dient ein 6 MW Elektrolyseur (Kopp, 2018), mehrere dieser werden als Module zusammengeschaltet. Für die Generierung der Kennlinie des Elektrolyseurs wird angenommen, dass immer so viele Module aktiv sind, dass der Elektrolyseur insgesamt den optimalen Arbeitspunkt in Hinblick auf den Wirkungsgrad nutzt.

### 2.3 Oxyfuel-Verfahren

Der Stromverbrauch, der O<sub>2</sub> - Bedarf und der resultierende CO<sub>2</sub> - Massestrom des Oxyfuel-Verfahrens werden anhand der durch den Projektpartner Holcim bereitgestellten Daten mit Kennlinien modelliert.

### 2.4 Methanolsynthese

Der Verbrauch von H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>, sowie die Methanolproduktion und der Stromverbrauch der Syntheseanlage wurden anhand der vom Projektpartner Thyssen Krupp erhaltenen Daten ermittelt und modelliert.

### 2.5 Speicher

Für O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> sind Flüssiggasspeicher vorgesehen, der H<sub>2</sub> wird in einer Kaverne gespeichert. Die Gase werden nur bei Überproduktion in die Speicher eingelagert. Im Modell werden in jedem Zeitschritt die Speicher bilanziert und integriert. Die Verluste und die Größe der Speicher sind in Tabelle 1 dargestellt. Der Speicherstand der Kaverne für H<sub>2</sub> darf aufgrund des für die strukturelle Integrität notwendigen Kissengases nicht unter 800 t sinken. Des Weiteren darf das Druckspiel innerhalb von 24 Stunden nicht größer als 10 bar beziehungsweise kleiner als -10 bar sein. Der maximale Speicherstand wurde anhand des Kavernenvolumens und der Eigenschaften von H<sub>2</sub> ermittelt (Lemmon, 2023).

Tabelle 1: Parameter der Speicher

Produkt	Min. Speicherstand	Max. Speicherstand	Verluste
Einheit	t	t	%/h
Sauerstoff	0	10000	0,01208 (Linde AG, 2021)
Kohlenstoffdioxid	0	130000	0,00583 (Linde AG, 2021)
Wasserstoff	800	1500	0,00417 (Wilkinson, 2016)

### 3 Methodik

#### 3.1 MPC

Der modell-prädiktive Regler nutzt, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, ein internes Modell des Systems, um die zukünftigen Systemzustände vorherzusagen und mit einer Optimierung die Stellgrößen zu ermitteln, die eine Kostenfunktion minimieren. In dieser Kostenfunktion werden Abweichungen von den Sollspeicherständen sowie das Abblasen von Gasen beim Überschreiten der maximalen Füllstände bestraft. Für die Vorhersage werden die aktuellen Systemzustände der Speicher, die hier auch den Regelgrößen (CV) entsprechen, sowie gemessene Störgrößen (DV), hier eine Prognose der Leistungen von Windpark und PV-Anlage, verwendet. Die Optimierung wird in jedem Zeitschritt für N zukünftige Zeitschritte durchgeführt (Prädiktionshorizont). Die nächste Stellgröße wird umgesetzt und die Optimierung wird erneut auf Grundlage der neuen Eingangsdaten durchgeführt (Camacho, 2004) (Schwenzer, 2021). Es zeigte sich, dass ab einem Prädiktionshorizont von 160 h ein Abblasen von CO<sub>2</sub> bei dieser Anlagenkonfiguration vermieden werden kann.

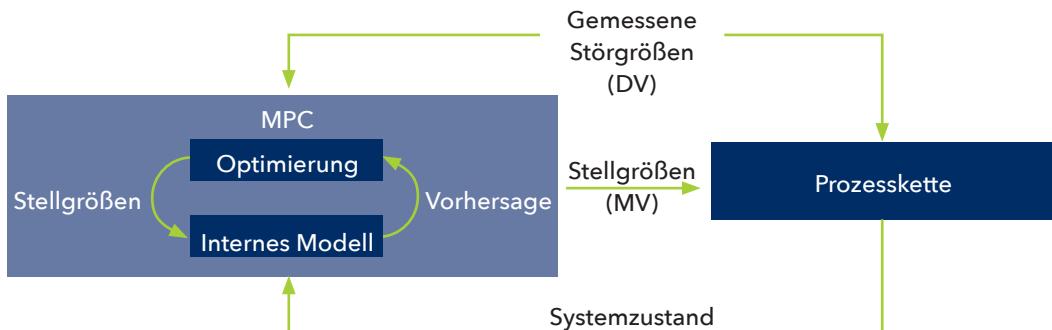


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines MPC

#### 3.2 Ökonomie

Zur Berechnung der Kosten des Gesamtsystems wurden die CAPEX und OPEX für die einzelnen Komponenten des Systems geschätzt und in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Annahmen für Capex und Opex der einzelnen Systemkomponenten

Name	Capex		Opex	
	Kosten	Einheit	Kosten	Einheit
Windpark	$2.5 \cdot 10^6$	€ / MW nom. Cap.	0.02	% der Capex
PV-Anlage	$0.7 \cdot 10^6$	€ / MW nom. Cap.	0.02	% der Capex
Elektrolyseur	$1.6 \cdot 10^6$	€ / MW nom. Cap.	0.03	% der Capex
Methanolsynthese	$8 \cdot 10^6$	€ / (t/h) nom. Cap.	0.05	% der Capex
H <sub>2</sub> -Kaverne	$0.3 \cdot 10^6$	€ / t nom. Cap.	0.03	% der Capex
O <sub>2</sub> -Speicher	$0.001889 \cdot 10^6$	€ / t nom. Cap.	0.02	% der Capex
CO <sub>2</sub> -Speicher	$0.001889 \cdot 10^6$	€ / t nom. Cap.	0.1	% der Capex

Als Indikator, wie ökonomisch das System und die Fahrweise ist, werden die Methanolgestehungskosten nach Gleichung 1 genutzt.

$$p_{Methanol} = \frac{Capex + Opex + Strafe_{CO_2} - Gewinn_{H_2 \& Strom}}{m_{Methanol}} \quad (1)$$

## 4 Ergebnisse

Als Grundlage für die Ergebnisse wurde die Anlage miteiner Zeitreihe für PV und Windpark-Leistung der letzten 15 Jahre für die ausgewählten Standorte simuliert und optimale saisonale Sollspeicherstände entwickelt. Das Oxyfuel-Verfahren muss das ganze Jahr betrieben werden. Im Durchschnitt erreicht der Elektrolyseur 4.495 und die Methanolsynthese 4.862 Vollaststunden. Ab einem Prädiktionshorizont von 276 h, mit einem Zinssatz von 5 %, betragen die Methanolgestehungskosten 1818,3 €/t. Nimmt man einen Marktpreis von 2000 €/t grünes Methanol an, wird der Break-Even-Punkt nach circa 8 Jahren erreicht. Abbildung 3 zeigt die resultierenden Einnahmen und Kosten für einen Zeitraum von 16 Jahren.

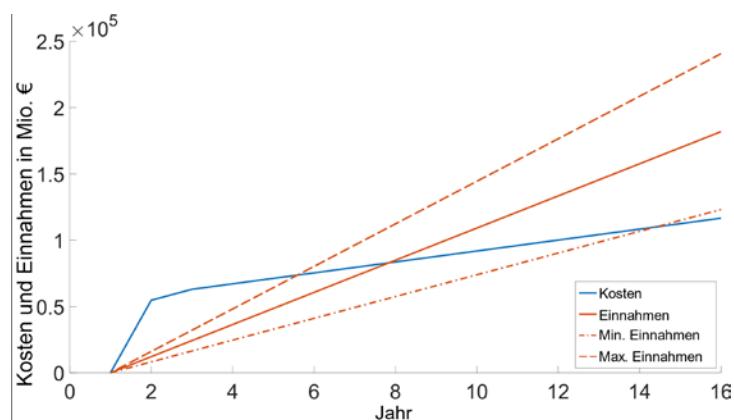


Abbildung 3: Ökonomische Analyse über einen Zeitraum von 16 Jahren

## 5 Fazit

Durch das Verfolgen der Sollspeicherstände, insbesondere für den CO<sub>2</sub>-Speicher, kann das Abblasen von CO<sub>2</sub> ab einem Prädiktionshorizont von 160 h komplett vermieden werden.

Dadurch kann der MPC die Methanolgestehungskosten senken. Um den Preis auf 1818 € zu minimieren, bedarf es eines Prädiktionshorizont von 276 h. Noch längere Prädiktionshorizonte intensivieren den Rechenaufwand und können die Kosten nicht weiter senken. Durch das Hinzufügen eines Batteriespeichers kann der hohe Lastwechsel des Elektrolyseurs reduziert und die Vollaststundenanzahl erhöht werden, das Peak-Shaving würde zum einen die Degradation verringern und zum anderen für einen deutlich konstanteren H<sub>2</sub>-Massestrom sorgen. Dies wird in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht.

## Literaturverzeichnis

Camacho, E.F., C. B. (2004). Model Predictive Control. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>

Gambardella, T. H. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86(6), S. 1803-1815. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>

Kopp, M. (2018). Strommarktseitige Optimierung des Betriebs einer PEM-Elektrolyseanlage. kassel university press GmbH. doi: <https://kobra.uni-kassel.de/items/c2651383-1382-4630-b0d8-22c5fee6f209>

Linde AG, E. D. (2021). Leading International Tank Standard. Abgerufen am 2024. 01 12 von [https://www.linde-engineering.com/en/images/LITS%20Technical%20Data\\_tcm19-5738.pdf](https://www.linde-engineering.com/en/images/LITS%20Technical%20Data_tcm19-5738.pdf)

Lemmon, E.W., I. H. (2023). Thermophysical Properties of Fluid Systems. In E. P. Mallard, *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. Gaithersburg MD, 20899: National Institute of Standards and Technology. doi: <https://doi.org/10.18434/T4D303>

Manzie, R. C. (2015). Optimal move blocking strategies for model predictive control. *Automatica*, S. 27-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.07.030>

Pedersen, N. G. (2020). Modelling cluster wakes and wind farm blockage. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/6/062072>

Schwenzer, M., M. A. (2021). Review on model predictive control: an engineering perspective. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 1327-1349. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>

Wilkinson, A. A. (2016). Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(12), S. 5549-5558. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036>

## Danksagung

Das Projekt Westküste100 erhielt im Rahmen der „Reallabore der Energiewende“ eine Förderzusage im Bereich der Sektorenkopplung und Wasserstofftechnologien.

Die Reallabore werden im 7. Energieforschungsprogramm durch das BMWK gefördert und haben das Ziel, innovative Technologien im industriellen Maßstab unter realen Bedingungen zu erproben.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Eignung der Schleswig-Holsteinischen Gasnetze für den Transport von Wasserstoff

Salah Habouti, Oliver Opel, Marlies Wiegand

Institut für die Transformation des Energiesystems /Fachhochschule Westküste, Heide

## Abstract

Im Projekt HyPipe der FH Westküste wurde das Gasnetz in Schleswig-Holstein auf die Wasserstoff-Tauglichkeit hin untersucht. Zu diesem Zweck wurden vollständige Daten zum Gasnetz von 16 Gasversorgern in Schleswig-Holstein erhoben und auf Basis einer intensiven Recherche ausgewertet. Im Ergebnis kann eine grundsätzliche Verträglichkeit der verwendeten Materialien bestätigt werden. Stahlleitungen sind im Verteilernetz (Mittel- und Niederdruck) nur geringen mechanischen Belastungen ausgesetzt, weshalb Wasserstoffversprödung für die betrachtete Lebensdauer keine technische Relevanz hat. Kunststoffrohre zeigen ebenfalls eine gute Wasserstoffverträglichkeit.

## 1 Einleitung

Derzeit ist das Gasnetz insbesondere im Wärmebereich (ca. 70 % des Bedarfs an Raum- und Prozesswärme) die Energie-Backbone mit der höchsten Kapazität. Mit 810 TWh ausgespeister Energie in 2023 (BNetzA 2024) wird über das Gasnetz immer noch fast doppelt so viel Energie bereitgestellt wie über das Stromnetz.

Mit ca. 220 TWh Speicherkapazität, hauptsächlich in Kavernen und Porenspeichern, stellt das Gasnetz zudem die größte Energiereserve in Deutschland bereit.

Aufgrund der beim Transport sowie durch die thermische (Verbrennung) und auch stoffliche Verwendung (bspw. Dampfreformierung) des Gases freigesetzten Klimagase, vorrangig Methan und CO<sub>2</sub>, musste der Phase-Out fossilen Methans beschlossen werden. Geplant ist nunmehr der Aufbau eines 100 %-Wasserstoffnetzes (Die Bundesregierung 2023). Dabei sollen möglichst bestehende Gasleitungen genutzt werden, weshalb sich die Frage nach der Eignung des bestehenden Gasnetzes für den Transport von Wasserstoff stellt. Der Verbund der Fernleitungsnetzbetreiber FNB Gas hat im Juli 2024 den Bau des optimierten Kernnetzes mit ca. 9666 km Länge beantragt (FNB Gas 2024). Dabei sollen vorrangig (ca. 60 %) bestehende Leitungen des Fernleitungsnetzes umgewidmet und genutzt werden. Intensiv diskutiert wird derzeit die Umstellung bzw. alternativ der (partielle) Rückbau des Verteilernetzes, das nicht Gegenstand des Antrages ist und für dessen Umstellung derzeit keine Förderung bzw. Geschäftsmodell vorhanden ist. Dennoch ist die Bedeutung des Verteilernetzes für die dezentrale Einspeisung von grünem Wasserstoff und die Anbindung mittelgroßer Verbraucher bis 100 MW wie Blockheizkraftwerke für die dezentrale Verstromung in Kraft-Wärme-Kopplung und Spitzenlastkessel für Wärmenetze ab mehreren 10 MW Leistung sowie von kleineren bis mittleren Betrieben mit schwer elektrifizierbaren Prozessen sowie ggf. Tankstellen unbestritten.

## 2 Das Schleswig-Holsteinische Netz

Von den Mitgliedsunternehmen des Projektpartners VSHEW (Verband der Schleswig-Holsteinischen Energie- und Wasserwirtschaft) wurden vollständige Daten zum Gasnetz von insgesamt 16 Verteilernetz-Betreibern übermittelt und ausgewertet. Abb. 1a zeigt den Anteil und Baujahr der zumeist aus Stahl bestehenden Hochdruckleitungen des Verteilernetzes. Der größte Teil der Gasleitungen im Schleswig-Holsteinischen Verteilernetz wurde nach den 1970er Jahren im Rahmen der Ertüchtigungs- und Erweiterungsmaßnahmen verlegt.

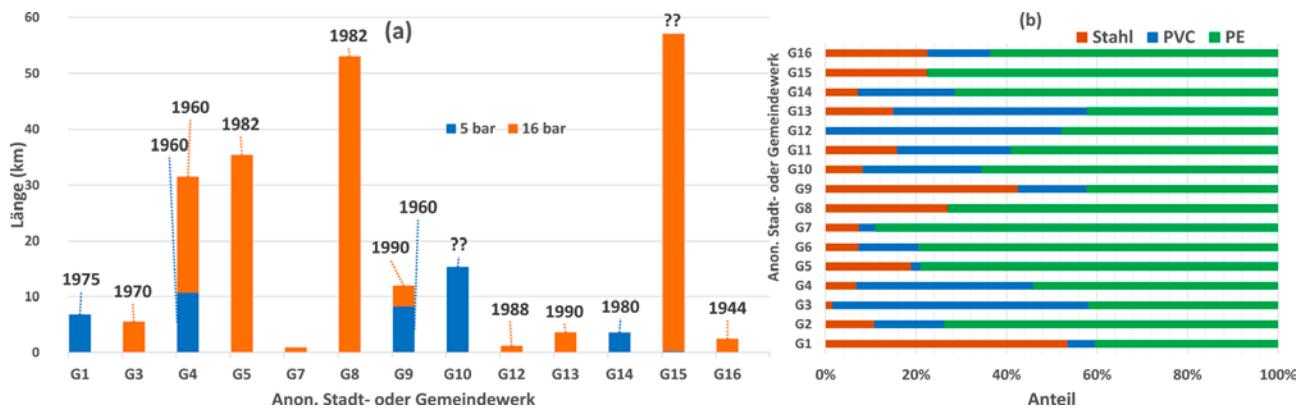


Abbildung 1: (a) Hochdruckleitungen und Baujahre der Gasverteilernetze, (b) Materialien im Mittel- und Niederdrucknetz in Schleswig-Holstein. Eigene Datenerhebung.

Der starke Zubau wurde nicht nur wegen der Verfügbarkeit des Erdgases, sondern auch durch den Einsatz von Kunststoffrohren beschleunigt. Die letzteren zeichnen sich durch mehrere Vorteile aus: Ihre Verlegung und Verbindung sind technisch und wirtschaftlich günstiger als Stahlrohre. Zudem sind sie korrosionsresistent. Abbildung 1b zeigt die Materialzusammensetzung im Überblick. Im Mittel- und Niederdrucknetz nehmen Kunststoffe (PVC-U, PE63, PE80 (MDPE), PE100 (HDPE), PE100-RC) den größten Anteil ein.

Deutlich ist der hohe Anteil an moderneren, für Wasserstoff uneingeschränkt geeigneten PE-Rohrleitungen. Regional sind jedoch auch noch hohe Anteile an Stahlrohrleitungen und PVC verlegt.

### 3 Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Wasserstoff

Das Wasserstoffmolekül ( $H_2$ ) kann an der Stahloberfläche unter Abgabe seiner Elektronen aufgespalten und in das Stahlgefüge aufgenommen werden. Durch die geringe Größe der sich bei dieser Oberflächenreaktion bildenden einzelnen Protonen, deren Ladung durch die in das Leiterband des Stahls aufgenommenen Elektronen des Wasserstoffs ausgeglichen wird, ist er in der Lage, im Stahlgefüge gelöst zu werden und in ihm zu diffundieren. Kommt es durch einen Konzentrationsgradienten bspw. auf der Außenseite einer Wasserstoffleitung zu einer Abgabe von Wasserstoff, kommt es zu einer Permeation. (Wiegleb 2016)

Geschwindigkeitsbestimmend ist zunächst die oberflächenkatalysierte Aufnahme des Wasserstoffs, die weniger (nur in der Quadratwurzel, gemäß Sievert's Gesetz) vom Wasserstoff (partial) druck und stärker (nach Arrhenius negativ logarithmisch proportional zu  $1/T$ ) von der Temperatur abhängt (Barrer 1941). Einige Stoffe, z.B. Sauerstoff und auch Kohlenmonoxid zeigen eine Konkurrenz zur Bindung von Wasserstoff an der Stahloberfläche, weshalb sie die Aufnahme von Wasserstoff verringern.

Die Bewegung im Stahl und auch die ggf. strukturschädigende Wirkung ist insbesondere von der Mikrostruktur der Stahlsorte abhängig: Je feinkörniger und dichter das Stahlgefüge, desto langsamer ist die Permeation durch den Stahl und desto höher ist die versprödende Wirkung in Relation zur wasserstoffunbeeinflussten Festigkeit: Die Bruchzähigkeit sinkt zwar mit zunehmendem Wasserstoffpartialdruck, bleibt für die verwendeten Stahlsorten aber oberhalb der geforderten Mindestwerte (Steiner et al. 2023). Weiter zeigt sich, dass unter Wasserstoffeinwirkung alle Werkstoffe ein ähnliches, erhöhtes Risswachstum nahezu unabhängig vom Wasserstoff-Partialdruck aufweisen (Marchi et al. 2021, Slifka et al. 2014).

Aufgrund der geringen Drücke im Verteilernetz ist die Gefahr eines mechanischen Versagens aufgrund von Versprödung im Allgemeinen eher gering. Teilweise liegen an den Schweißnähten stärker vulnerable Strukturen vor. Die inzwischen erarbeiteten technischen Regeln sehen jedoch höhere Sicherheiten und geringere Druckschwankungsgrenzen für Wasserstoffleitungen vor, um die mechanische Belastung gering zu halten. Außenkorrosion an Stahlleitungen ohne kathodischen Korrosionsschutz hat im Mittel- und Niederdrucknetz in der Praxis nach den im Projekt erhobenen Daten eine deutlich höhere Bedeutung (s. Abb. 2). Für eine Umstellung auf Wasserstoff muss der Zustand des betreffenden Leitungsabschnittes erfasst, die verbleibende Lebensdauer ermittelt und auf dieser Basis eine erneute Betriebserlaubnis beantragt werden.



Abbildung 2: Korrosionsschutz an Mittel- und Niederdruckleitungen

Kunststoffleitungen zeigen mindestens bis 20 % Wasserstoffbeimischung keine chemischen Wechselwirkungen. Auch bei höheren Anteilen ist dies nicht zu erwarten. Zudem sind sie aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit in einem insgesamt besseren Zustand als Stahlleitungen. Aufgrund der Dichtheit ihrer Verbindungsstellen stellen sich jedoch verschweißte Leitungen aus Polyethylen insgesamt besser dar als verklebte Leitungen aus PVC-U.

Vielfach wird von einer hohen Gaspermeation des Wasserstoffs durch Kunststoff- und auch Stahlrohrleitungen ausgegangen. Tatsächlich sind die Leckraten in Volumen- bzw. Stoffmengeneinheiten etwas höher als bspw. bei Methan. Aufgrund der geringeren Dichte relativiert sich dieser Unterschied jedoch in Masseneinheiten. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Gaspermeation durch die Wandung einer Leitung mit 1 km Länge.

Tabelle 1: Gasleckraten an Leitungen mit 1 km Länge pro Jahr im Verteilernetz (nach Krieg 2012, AGA 2006)

Material	Dimension	Druck	Methan	Wasserstoff
PVC-U	DN100	0,1 Bar		2,15 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,19 kg/a
HDPE	DN100	0,1 Bar	0,35 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,28 kg/a	2,39 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,21 kg/a
MDPE	DN100	0,1 Bar	0,63 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,5 kg/a	3,13 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,28 kg/a
Schwarzstahl	DN100	0,1 Bar	/	0,04 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,0035 kg/a
Stahl (St37)	DN100	10 Bar	/	1,86 m <sup>3</sup> /a ≈ 0,17 kg/a

Die Leckraten von Wasserstoff aufgrund der Permeation durch Rohrleitungsmaterialien bewegen sich damit auf ökologisch und technisch vernachlässigbarem Niveau von großenordnungsmäßig 0,001 % oder darunter wie bspw. im Falle einer Hochdruckleitung 10 Bar aus Stahl mit 100 km Länge oder einer Hausanschlussleitung aus Kunststoff 0,02 Bar mit 12 m Länge. Auch die Klimawirkung des austretenden unverbrannten Wasserstoffs ist mit einem GWP100 von 4,3-11 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg H<sub>2</sub> (Clausen et al. 2024) deutlich geringer als derjenige von unverbranntem Methan mit einem GWP100 von 28 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg CH<sub>4</sub>.

Die Gasdichtigkeit und Wasserstofftauglichkeit von Hausanschlüssen, soweit zukünftig noch relevant, wurde inzwischen in mehreren Feldtests ermittelt. Diese stellen ebenfalls kein Hemmnis für die Umstellung dar.

## 4 Fazit

Für eine Betrachtung der Wasserstofftauglichkeit von Bestandnetzen muss nach Betriebsdruck und Materialien unterschieden werden. Für das Fernleitungsnetz spielt aufgrund der höheren Drücke und mechanischen Belastungen der Einfluss des Mediums Wasserstoff auf den Werkstoff eine bedeutend größere Rolle als im Verteilernetz.

Der DVGW hat in 2023 neue technische Regeln für den Betrieb von Wasserstoffleitungen erarbeitet, die im Kern auf einen gesenkten Druck und geringere Druckschwankungen abzielen, um ggf. verringerte mechanische Belastungsfähigkeiten von Stahlwerkstoffen hinreichend zu berücksichtigen. In der Praxis werden diese Regeln als vergleichsweise konservativ zu betrachten sein, da anders als im Labor die Wasserstoffaufnahme in die Stahlmatrix durch gealterte Stahloberflächen verringert ist.

Für das Verteilernetz spielt insbesondere der Alterungszustand der Leitungen eine Rolle, der vor allem bei Stahlleitungen ohne kathodischen Korrosionsschutz zu berücksichtigen und vor Umstellung zu erheben ist.

Haupthindernis einer Umstellung des Verteilernetzes ist damit nicht die Materialverträglichkeit sondern die sich aus einer Kombination von Faktoren (gesicherte Nachfrage, Verfügbarkeit, Preis) einerseits und einer bislang fehlenden Förderung einer Umstellung andererseits ergeben.

Zudem muss für eine Umstellung von im Verteilernetz häufig anzutreffenden nicht-redundanten Leitungen während einer Parallelversorgung mit Wasserstoff und Erdgas oftmals Netztopologien verändert werden. Trotz dieser Hürden stellt sich die Umwidmung von Leitungen insgesamt jedoch weiterhin deutlich günstiger dar als ein etwaiger Neubau.

## Literaturverzeichnis

AGA (2006): PLASTIC PIPE MANUAL FOR GAS SERVICE. AGA Catalog No. XR0603

Barrer, R. M. (1941): Diffusion in and through solids. The Cambridge Series of physical Chemistry

BNetzA 2024 (letzter Zugriff 29.09.2024): [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/a\\_Gasversorgung\\_2023/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/a_Gasversorgung_2023/start.html)

Clausen, Jens; Huber, Michael; Kemfert, Claudia; Klafka, Peter (2024): Das Erdgasnetz, das Heizen mit Wasserstoff und die Wärmepumpe. Borderstep Institut. Berlin.

C. San Marchi, R. Shrestha, J. Ronevich (2021) (SAND2021-8820C).

FNB Gas (2024): Gemeinsamer Antrag für das Wasserstoff-Kernnetz. 22.07.2024, FNB Gas, Berlin.

Krieg, Dennis (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. Dissertation FZ Jülich, Vol. 144.

A. J. Slifka, E. S. Drexler, R. L. Amaro, D. S. Lauria, L. E. Hayden, D. G. Stalheim, Y. Chen (2014). In *Volume 6B: Materials and Fabrication*, American Society of Mechanical Engineers 2014.

Steiner, M., Marewski, U., & Silcher, H. (2023). DVGW Project SyWeSt H2: "Investigation of Steel Materials for Gas Pipelines and Plants for Assessment of their Suitability with Hydrogen". *Final report*, Bonn, Germany.

Wiegleb, G. (2016). Gasmesstechnik in Theorie und Praxis: Messgeräte, Sensoren, Anwendungen. Springer-Verlag.

# Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff zur Defossilisierung des Schwerlastverkehrs in der EU

Susanne Royer, Sebastian Wirth

Abteilung Strategisches und Internationales Management, Europa-Universität Flensburg

## Abstract

Grüner Wasserstoff ( $H_2$ )<sup>1</sup> kann für den Schwerlastverkehr<sup>2</sup> besonders auf langen Strecken eine umweltfreundliche Alternative zu Diesel darstellen und zur Minderung der  $CO_2$ -Emissionen beitragen. Das Nordsee Interreg-Projekt H2ignite – „Igniting H2 transport innovation ecosystems in the North Sea Region“ verfolgt das Ziel, Potenziale von grünem Wasserstoff im Schwerlastverkehr zu identifizieren. Es werden regionale Ökosysteme analysiert, die bereits Wasserstoff zur Defossilisierung<sup>3</sup> des Schwerlastverkehrs einsetzen oder das in naher Zukunft planen. Die Ergebnisse sollen deutlich machen, welche Möglichkeiten in diesem Sektor bestehen und welche Herausforderungen gerade privaten Investitionen entgegenstehen. Ziel ist die Unterstützung der wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung auf regionaler sowie transnationaler Ebene.

## 1 Ausgangslage

Der Verkehrssektor spielt eine bedeutende Rolle bei der Erreichung der Klimaschutzziele, auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene (LR.SH, 2024; UBA, 2023; eurostat, 2024). Mit 803 Millionen Tonnen  $CO_2$ -Äquivalenten machte der Verkehrssektor im Jahr 2022 rund ein Viertel der Gesamtemissionen der EU aus. Gleichzeitig verringerte sich der  $CO_2$ -Fußabdruck im Vergleich zum Jahr 1990 im Gegensatz zu den übrigen Sektoren nicht, sondern verkehrsbedingte Emissionen stiegen um 19,5 Prozent. 26,2 Prozent der verkehrsbedingten Emissionen gehen in der EU auf Gütertransportfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 Tonnen und Personentransportfahrzeuge mit mehr als acht Sitzplätzen zurück (eurostat, 2024). Es wird deutlich, dass eine Fokussierung auf diesen Teil des Verkehrssektors im Hinblick auf Defossilisierung sehr relevant ist.

Die Umstellung auf alternative Antriebstechnologien gestaltet sich im Schwerlastverkehr aufgrund einer tiefgreifenden Abhängigkeit von fossilen Technologien als schwierig. Im Jahr 2022 wurden 96 Prozent aller Schwerlastfahrzeuge mit Diesel angetrieben (acea, 2024, S. 17). Zudem gibt es in der EU kaum Fortschritte bei der Verlagerung des Straßen-Schwerlastverkehrs auf die Schiene (Destatis, 2024). In den Mitgliedstaaten der EU herrschten lange Zeit Unstimmigkeiten bezüglich der Förderung klimaneutraler Antriebstechnologien für den Verkehrssektor. Inzwischen besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass batterieelektrische als auch  $H_2$ -Lastkraftwagen (LKW) Teil der möglichen Lösung sind. Eine dominierende Rolle des Wasserstoffs im gesamten Straßenverkehr ist aufgrund der technologischen Weiterentwicklung von Batterien, der fortlaufenden Erweiterung der Ladeinfrastruktur und der kontinuierlichen Kostensenkung batterieelektrischer Fahrzeuge als eher unwahrscheinlich einzuschätzen. Allerdings wird die Verwendung von  $H_2$ -LKW in bestimmten Bereichen wie beispielsweise in abgelegenen Gebieten sowie beim Transport von übergroßen und außerordentlich schweren Gütern weiterhin als vielversprechend eingeschätzt (Plötz et al., 2022).

Bislang ist der Markt für die  $H_2$ -Mobilität im Schwerlasttransport jedoch kaum angesprungen. Die Anzahl der  $H_2$ -Tankstellen ist sehr überschaubar (H2.LIVE, 2024) und die Verbreitung von  $H_2$ -LKW schreitet (mit lediglich 109 zugelassenen Fahrzeugen in Europa im Jahr 2022) ebenfalls schleppend voran (EHO, 2023, S. 51).

1 „Grüner Wasserstoff“ auf Basis der Definition für „Erneuerbaren Wasserstoff“ nach RED II DA vom 13. Februar 2023 wird aus erneuerbarer Energie außer Biomasse (mittels Elektrolyse) hergestellt (EU-Kom., 2023).

2 „Schwerlastverkehr“ nach EU-Fahrzeugtyp-Klassifizierung N3 umfasst Fahrzeuge, die für den Transport von Gütern mit einem Gewicht von mehr als 12t bestimmt sind (EU-Kom., 2013)

3 „Defossilisierung“ beschreibt die Umstellung von fossilen Kraftstoffen auf erneuerbare Alternativen, ohne allg. Kohlenstoffverbindungen biogenen Ursprungs auszuschließen (Forschungsnetzwerk Energie, 2024).

## 2 Das H2ignite-Projekt

Um Anstrengungen zur Nutzung von Wasserstoff im Schwerlastverkehr zu unterstützen, wurde das Projektkonsortium H2ignite gegründet. Die Idee ist, nationenübergreifend die Nutzung von grünem Wasserstoff in entstehenden H<sub>2</sub>-Ökosystemen zu untersuchen und zu erproben. Die Ziele von H2ignite korrespondieren mit diversen EU-Strategien, die den Markthochlauf von Wasserstoff befördern sollen: Der European Green Deal wird hierbei als übergeordnete klimapolitische Strategie betrachtet. Hauptziel ist, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 90 Prozent zum Vergleichsjahr 1990 zu reduzieren. Die Umsetzung soll mithilfe des Europäischen Klimagesetzes erfolgen (EU-Kom., 2020). Das Klimaschutzpaket Fit-for-55 ist ein bedeutender Bestandteil dieses Gesetzes, der die Mitgliedsstaaten verpflichtet, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um 55 Prozent zu reduzieren (EU-Rat, 2024). Ein für den Verkehrssektor besonders relevanter Bestandteil von Fit-for-55 ist die Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, bekannter als AFIR (*Alternative Fuels Infrastructure Regulation*). Die AFIR legt für die Mitgliedstaaten verbindliche nationale Ziele fest, die den Aufbau einer öffentlich zugänglichen Infrastruktur für alternative Kraftstoffe für Straßenfahrzeuge, Schiffe im Hafen und stationäre Luftfahrzeuge befördern sollen. Ein besonderer Fokus liegt bei Straßenfahrzeugen auf dem trans-europäischen Verkehrskernnetz (TEN-V-Kernnetz). H<sub>2</sub>-Tankstellen mit einem maximalen Abstand von 200 Kilometern zueinander sollen bis zum 31. Dezember 2030 entlang des TEN-V errichtet werden und zur Nutzung durch verschiedene Fahrzeugtypen über 350 und 700 bar Dispenser verfügen (EUR-Lex, 2024).

Im Rahmen des H2ignite-Projekts werden Nutzungsbeispiele in entstehenden H<sub>2</sub>-Ökosystemen identifiziert und analysiert, damit unternehmerische und politische Entscheidungen in diesem Sektor besser informiert getroffen werden können.

## 3 Der Beitrag der Europa-Universität Flensburg zu H2ignite

Die Europa-Universität Flensburg übernimmt die Analyse von Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodellen rund um relevante Akteure in Wasserstoffökosystemen. Es soll zu einem tiefen Verständnis beigetragen werden, wie Unternehmen sich strategisch in diesen entstehenden Ökosystemen positionieren, Wettbewerb und Kooperation steuern und gemeinsam die Erzeugung, den Transport und die Nutzung von grünem Wasserstoff etablieren können. Aus einer strategischen Management Perspektive ist der Einsatz von grünem Wasserstoff im Schwerlastverkehr insofern interessant, da weder eine umfangreiche Tankinfrastruktur betrieben wird noch ausreichende Angebote für H<sub>2</sub>-LKW von Herstellerseite vorhanden sind. Mit dieser klassischen Henne-Ei-Situation sind unterschiedliche Unternehmen und öffentliche Akteure in entstehenden H<sub>2</sub>-Ökosystemen konfrontiert. Eine zweckmäßige Beschreibung der Marktbesonderheiten und -charakteristika, kann hier Potenziale für die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen offenlegen. Das Fundament dieser Betrachtung ist eine erste Konzeptionalisierung von Royer (2023), die im Folgenden skizziert wird: H<sub>2</sub>-Mobilität im Schwerlastverkehr wird in Anlehnung an die Abgrenzungen von Gawer & Cusumano (2014) als Industrie-Plattform konzipiert. Zur Nutzung von Wasserstoff im Schwerlastverkehr reicht es - einfach gesagt - nicht aus, wenn potenzielle Nutzer Zugang zu H<sub>2</sub>-LKW erhalten. Es ist eine zweite Marktseite von Bedeutung, die komplementäre Infrastruktur zugänglich macht. Im Anfangsstadium einer solchen Marktkonstellation warten die Akteure auf jeder Marktseite darauf, dass die andere Marktseite als erste ins Risiko geht. Veränderungen auf einer Seite haben Auswirkungen auf der anderen Seite. Das Wachstum des Marktes hängt von der erfolgreichen Etablierung beider Marktseiten ab: Gibt es keine H<sub>2</sub>-Tankstellen, werden auch keine H<sub>2</sub>-LKW auf die Straße kommen. Gibt es keine H<sub>2</sub>-LKW, gibt es kein Geschäft für die dazu passenden Tankstellen (vgl. Dietl et al., 2013, zu ähnlichen Überlegungen bzgl. der E-Mobilität). Die Hauptfunktion des Plattformmarktes, um den es hier geht und im Rahmen dessen indirekte Netzwerkeffekte zentral sind, ist die Etablierung der notwendigen Komplementenvielfalt auf beiden Marktseiten (Dietl, 2010, S. 66f.; Katz & Shapiro, 1985, S. 424). Im Bereich der H<sub>2</sub>-Mobilität im Schwerlastverkehr führen diese indirekten Netzwerkeffekte bislang dazu, dass keine der Marktseiten ausreichend entwickelt ist.

Um den Marktbesonderheiten gerecht zu werden, wird die Betrachtung des zweiseitigen Marktes für H<sub>2</sub>-Mobilität im Schwerlastverkehr analytisch erweitert. Alle Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette der H<sub>2</sub>-Mobilität werden aus dieser Perspektive analysiert.

Es geht also nicht nur um Tankstellen, die Wasserstoff anbieten und LKW, die ihn nutzen, sondern um ein entstehendes H<sub>2</sub>-Ökosystem entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit komplementären Produkten, innovativen Technologien und spezialisierten Dienstleistungen. Daymond et al. (2023) differenzieren verschiedene Typen von Ökosystemen und systematisieren Strategien für öffentliche und private Ökosystemarchitekten, die auf Charakteristika des jeweiligen Ökosystems zugeschnitten sind und hilfreich für die geplante Untersuchung sein können. Ein weiterer fruchtbare Ansatzpunkt liegt in der Auswertung bereits erzielter Erkenntnisse für von indirekten Netzwerkeffekten betroffene Märkte. Hier wird z. B. auf den Markt für E-Mobilität geschaut, den Dietl et al. (2013) untersucht haben. Hannah & Eisenhardt (2018) kommen in einer empirischen Untersuchung junger Ökosysteme in der US-Solarbranche zu dem Ergebnis, dass ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Kooperation und Wettbewerb eine entscheidende Bedeutung für unternehmerischen Erfolg in entstehenden Ökosystemen haben kann. Dabei geht es um die kooperative Erschaffung von Werten (*value creation*) und die wettbewerbliche Auseinandersetzung bezüglich der Aneignung (*value capture*) eben dieser Werte (Hannah & Eisenhardt, 2018). Hier ergeben sich ebenfalls Bezugspunkte für die vorliegende Untersuchung.

Um Möglichkeiten der Wertschöpfung und -aneignung im H<sub>2</sub>-Ökosystem zu kategorisieren, bietet es sich an, mögliche Geschäftsmodelle rund um relevante Akteure, die eine oder mehrere der zuvor identifizierten Wertschöpfungsaktivitäten durchführen, zu skizzieren und näher zu durchleuchten. Ein erster Ansatzpunkt könnten die von Trapp et al. (2022) in einer explorativen Untersuchung von Geschäftsmodellen im Bereich der H<sub>2</sub>-Mobilität in Deutschland identifizierten 12 Idealtypen sein. Tab. 1 zeigt ausgewählte Idealtypen aus dem Bereich des Energiesektors, der Fahrzeughersteller und des Technologie- und Dienstleistungssektors und illustriert die Kernelemente der jeweiligen Geschäftsmodelle.

Tabelle 1: Idealtypische Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff nach Trapp et al. (2022)

	Typ A (Energiesektor)	Typ B (Energiesektor)	Typ C (Fahrzeughersteller)	Typ D (Technologie- und Dienstleistungssektor)
	<b>Green Windrogener</b>	<b>Hydrefueling</b>	<b>Vehicle manufacturer</b>	<b>Logistics service provider</b>
Value proposition	Grüne Wasserstoffproduktion aus erneuerbarer Energie	Angebot von grünem Wasserstoff an H <sub>2</sub> -Tankstellen	Fahrzeugproduktion mit Schwerpunkt auf Emissionsreduzierung	Umwstellung der bestehenden Betriebsflotte auf erneuerbare Kraftstoffe & Angebot nachhaltiger Logistikdienstleistungen
Value creation	Gemeinsame Wertschöpfung mit diversen Akteuren im Markt für grüne H <sub>2</sub> -Produktion über die gesamte Wertschöpfungskette (B2B)	Aufbau eines Netzwerks von H <sub>2</sub> -Tankstellen durch Zusammenarbeit mit verschiedenen relevanten Interessengruppen, die an der Errichtung von H <sub>2</sub> -Tankstelleninfrastrukturen interessiert sind	Sektorenübergreifende, kooperative Vereinbarungen sowie Ressourcen- und Wissensaustausch	B2B-Aktivitäten mit Kunden, die an Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette interessiert sind, Differenzierung von anderen Anbietern durch umweltfreundlichere Betriebsabläufe
Value capture	Ökologischer Wert, der zu einem Gewinn an Reputation führen kann, was wiederum ökonomischen Wert schafft	Schaffung einer grundlegenden H <sub>2</sub> -Tankstelleninfrastruktur, um zukünftigen Wert zu ermöglichen	Ökologischer Wert & Vorbereitung auf zukünftige Skalierungsaktivitäten	Ökonomischer Wert (wenn Kunden einen Preisaufschlag für umweltfreundlichen Transport zahlen) und Potenzial für sozialen Wert, wenn sich Lkw-Fahrer durch ihren Beitrag zum ökologischen Wert motivieren lassen

Quelle: Übersetzte Tabelle aus Royer, 2023, S. 19f. mit Zusammenfassung der Ergebnis- und Diskussionsanteile von Trapp et al., 2022.

## 4 Zusammenfassung & Ausblick

Der Beitrag der EUF zu H2ignite befasst sich systematisch mit Besonderheiten des Marktes für H<sub>2</sub>-Mobilität im Schwerlastverkehr, um lebensfähige Geschäftsmodellentwürfe in entstehenden H<sub>2</sub>-Ökosystemen zu identifizieren. Der Fokus liegt auf dem Bereich der schweren LKW. Der Wasserstoff-Schwerlastverkehr wird als Plattformmarkt in einem frühen Entwicklungsstadium konzipiert. Entsprechend sind indirekte Netzwerkeffekte hinsichtlich des Geschäftsmodellentwurfs von Bedeutung. Nachhaltigkeitsziele sind die Haupttreiber für grüne Wasserstoff-Geschäftsmodelle, die in aufstrebenden Ökosystemen eingebettet sind. Eine systematische Literaturrecherche bildet das Fundament, um das Potenzial für Wertschöpfung und Wertaneignung im grünen Wasserstoff-Schwerlastverkehr besser zu verstehen. Ein konzeptioneller Rahmen wird abgeleitet, um als Muster zur Reflexion realer Fälle entlang der identifizierten relevanten Elementen verwendet zu werden. Beispielhafte Geschäftsmodelle veranschaulichen, wie sich die in der Literatur identifizierten Elemente in einem realen Fall wiederfinden können. Implikationen für den Geschäftsmodellentwurf werden abgeleitet, die für private sowie öffentliche Akteure von Relevanz sind.

## Literaturverzeichnis

acea. (2024, Februar 14). *Vehicles on European Roads*. Von European Automobile Manufacturers' Association: <https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Daymond, J., Knight, E., Rumyantseva, M., & Maguire, S. (2023). Managing ecosystem emergence and evolution: Strategies for ecosystem architects. *Strategic Management Journal*, 44(4), S. O1-O27.

Destatis. (2024, Juli 17). Deutsches Statistisches Bundesamt. Von Güterverkehr in der EU: Keine Verlagerung auf Bahn und Schiff: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/gueterverkehr-eisenbahn.html> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Dietl, H. (2010). Erfolgsstrategien im Plattformwettbewerb. *Schmalenbach Journal of Business Research*, 62(10), S. 63-83.

Dietl, H., Royer, S., & Beckmann, O. (2013). Die Bedeutung von Netzwerkkreuzeffekten für den Erfolg der Elektromobilität. *Zeitschrift für Automobilwirtschaft (ZfAW)*, 16(3), S. 14--26.

EHO. (2023, November). The European hydrogen market landscape. Von European Hydrogen Observatory: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-11/Report%2001%20-%20November%202023%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape.pdf> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

EU-Kom. (2013, Januar 15). *EU classification of vehicle types*. Von European Alternative Fuels Observatory: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

EU-Kom. (2020, Dezember 9). *Verkehrsbedingte Emissionen sollen bis 2050 um 90 Prozent sinken*. Von Vertretung der Europäischen Kommission in Deutschland: [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/verkehrsbedingte-emissionen-sollen-bis-2050-um-90-prozent-sinken-2020-12-09\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/verkehrsbedingte-emissionen-sollen-bis-2050-um-90-prozent-sinken-2020-12-09_de) (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

EU-Kom. (2023, Februar 13). *Kommission legt Vorschriften für erneuerbaren Wasserstoff fest*. Von Press Corner: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip\\_23\\_594](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_594) (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

EU-Rat. (2024, April 12). „Fit für 55“. Von Ein europäischer grüner Deal: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55/> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

EUR-Lex. (2024, Februar 1). *Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*. Von Summaries of EU legislation: <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/deployment-of-alternative-fuels-infrastructure.html> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

eurostat. (2024, April 18). *Treibhausgasemissionen nach Quellsektor*. Von eurostat: [https://doi.org/10.2908/ENV\\_AIR\\_GGE](https://doi.org/10.2908/ENV_AIR_GGE) (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Forschungsnetzwerk Energie. (2024). *Glossar zur angewandten Energieforschung*. Von Forschungsnetzwerk Energie: <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/glossar>

Gawer, A., & Cusumano, M. A. (2014). Industry Platforms and Ecosystem Innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 31(3), S. 417-433 (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

H2.LIVE. (2024). *H2 tanken*. Von H2 MOBILITY Deutschland: <https://h2.live/> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Hannah, D. P., & Eisenhardt, K. M. (2018). How firms navigate cooperation and competition in nascent ecosystems. *Strategic Management Journal*, 39(12), S. 3163-3192.

Katz, M. L., & Shapiro, C. (1985). Network Externalities, Competition, and Compatibility. *The American Economic Review*, Vol. 75(3), S. 424-440.

LR.SH. (2024, Mai 29). *Klimaschutzprogramm 2030*. Von Landesregierung Schleswig-Holstein: [https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/themen/energie/klimaschutzprogramm2030/klimaschutzprogramm2030\\_node.html](https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/themen/energie/klimaschutzprogramm2030/klimaschutzprogramm2030_node.html) (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Plötz, P., Wietschel, M., Döscher, H., & Thielmann, A. (2022, Februar 25). *Status Quo und Zukunft von Wasserstoff im Verkehrssektor*. Von Wasserstoff im Verkehrssektor: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/status-quo-und-zukunft-h2-Verkehrssektor.html> (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

Royer, S. (2023). Challenges and drivers of green hydrogen business models in the heavy truck sector - The role of platform market characteristics and indirect network effects. *Diskussionspapier, angenommen und präsentiert auf dem 27. Nordic Workshop on Interorganizational Research an der Uniwersytet Jagielloński. Krakau, Polen, 26.-28. April, 2023*.

Trapp, C. T., Kanbach, D. K., & Kraus, S. (2022). Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1(2) S. 100014.

UBA. (2024). *Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Von Umweltbundesamt: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2\\_abb\\_thg-emissionen-zielpfade-de\\_2024-08-16.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_thg-emissionen-zielpfade-de_2024-08-16.pdf) (zuletzt abgerufen am 8. Oktober 2024).

## Danksagung

H2ignite erhielt im Rahmen des Interreg-Nordsee Programms eine Förderzusage, welche sich u. a. auf die Förderung einer zukunftsähnlichen, robusten und intelligenten Wirtschaft in der Nordseeregion (NSR) bezieht. H2ignite ist Teil der Interreg-Prio 1.1, die sich gezielt für die Entwicklung und den Ausbau von Forschungs- und Innovationskapazitäten und die Weiterentwicklung und Implementierung von Zukunftstechnologien einsetzt.  
Mehr Informationen unter: <https://www.interregnorthsea.eu/h2ignite>

# Research towards hydrogen-based decarbonization of ships and maritime transport systems

Florian Schlieker, Martin Bergström and Ishan Sontakke

German Aerospace Center (DLR), Institute of Maritime Energy Systems, Department Ship integration

Corresponding author: [florian.schlieker@dlr.de](mailto:florian.schlieker@dlr.de)

## Abstract

Some 90 percent of global trade is conducted by ships, making the shipping industry the backbone of the global economy. At the same time, although shipping is recognized as the most efficient form of commercial transport, it is responsible for some 1,000 million tons of greenhouse gas emissions (GHGs) per year, representing around 3 percent of the global total. This is explained by the fact that ships are powered to 95 percent by oil-based fuels such as heavy fuel oil and marine diesel oil. To bring the emissions down, while maintaining a high level of cost-efficiency and safety, new technical solutions are needed. To this end, the DLR Institute of Maritime Energy Systems researches and develops innovative solutions for the decarbonization of the maritime industry to reduce its emissions. Our Department of Ship Integration is concerned with the integration of innovative emission-reducing technologies, many of which are hydrogen-based, into ship design, maritime transport systems, and ship lifecycle processes.

## 1 Hydrogen as a fuel for the shipping industry

Hydrogen fuel has a number of advantages over carbon-based fuels. If used to power a fuel cell, the only rest product is pure water. If so-called green hydrogen is used, produced using renewable energy such as wind power, net zero emissions are achieved. Another advantage of hydrogen is its chemical properties. Hydrogen is non-toxic, non-corrosive and nonirritating. Furthermore, the fuel is neither radioactive nor carcinogenic. Therefore, according to the current state of knowledge, if used safely so that no accidents occur, it has no immediate negative effects on human health. Hydrogen is lighter than air and highly volatile. The high calorific value of hydrogen is also of technical importance. The calorific value of hydrogen by mass is 120 MJ/kg. In comparison, the calorific value of diesel fuel is 43.1 MJ/kg.<sup>1</sup> The numerous of advantages make hydrogen a sustainable and interesting fuel for the shipping industry. For this reason, we conduct research towards the implementation of hydrogen-based ship propulsion systems.

Hydrogen technology is expected to be paramount to reach the ambitious decarbonization set by the International Maritime Organization (IMO). The IMO is a United Nations agency that is responsible for the safety and security of shipping and the prevention of marine and atmospheric pollution by ships. To achieve its decarbonization targets, the IMO has developed a strategy aiming for zero, or net zero, GHG emissions by 2050. Various national circumstances are considering to reach the goal. Two further IMO goals should be also pointed out. First, the IMO aims to increase the share of zero or near-zero GHG technologies in the shipping industry to at least 5 percent by 2030. Second, the IMO has defined indicative checkpoints. The first checkpoint is to reduce the total annual GHG emissions from the international shipping by at least 20 percent, striving for 30 percent by the year of 2030 compare to 2008. The next checkpoint is in year 2040, by which the target is to reduce the total annual GHG emissions from international shipping by least 70 percent, striving for 80 percent, compare to 2008.<sup>2</sup>

1 Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF). Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, entnommen am 16.09.2024, <https://www.tz.bayern.de/biokraftstoffe/wasserstoff/index.php>

2 International Maritime Organization, Resolution MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. MEPC 80/WP.12, Annex 1

## 2 Fuel cells as a propulsion system for emission-free shipping

The Hereon research institute, located in Geestacht, is currently in the process of acquiring a research vessel, named Coriolis, which is intended for costal research. A special feature of the ship is that it has several different types of energy systems. These include three 300 kW diesel engines, a 45 kW harbor generator engine for research purposes, a 100 kW battery storage system, and a PEM hydrogen fuel cell. In cooperation with us, the DLR Institute of Maritime Energy Systems, the ship will be used for the development, optimization and testing of new technologies. One of the focus areas of the research is the interaction and fine-tuning of the individual hydrogen components of the energy system.

The vessel's hydrogen energy system consists of a bunker station to safely store the hydrogen on board. The hydrogen is stored in various types of metal hydride storage tanks in the bow area of the ship. The basic structure of a metal hydride storage tank consists of a pressurized container in which metal hydride is stored in the form of a bulk powder. The hydrogen is incorporated into the metal powder, the rate of absorption depends on the temperature and the loading pressure. The absorption is an exothermic reaction, which means heat must be removed from the system. The faster the heat can be removed, the faster hydrogen is absorbed. This signifies the bunkering time is connected to the remove of the heat power. This is a key component for conventional marine applications to reduce the loading time. Because hydrogen is extracted from the metal hydride endothermically, heat must be added during normal operation to the system. This has the advantage that the metal hydride storage tanks are a very safe way of storing hydrogen. In the event of a fault, such as a leak, the system is cooling down itself and the release of hydrogen is prevented. Naturally, this requires that the mechanized heat supply is stopped.

Various physical effects place high demands on the control system. Among others, the tanks must always provide a sufficient quantity of hydrogen for the operation of the fuel cell. This applies in particular to maneuvering journeys where rapid load changes are common. Related safety questions form an important research area for DLR. The interaction with the fuel cell is another interesting area of research. This is because the waste heat from the cell is to be used to recover the hydrogen from the storage tanks, resulting in an ideal thermal energy balance. The effects of the maritime environment on the function of the fuel cell are being investigated. Particular attention is paid to undesirable chemical reactions of the cell due to for instants the presents of external process gases, such as sulphur or salty media.

Fuel cells will only be widely implemented in the maritime industry if they reach the same level of reliability, availability and service life as the established technologies currently in use. For this reason, we are in the process of developing a condition monitoring system to monitor the fuel cell and its auxiliary units in order to detect faults and component wear at an early stage. The condition monitoring system is intended to assist the ship's crew in troubleshooting and fault rectification. Naturally, early detection of deviations and faults also contributes towards improved onboard safety.

## 3 Risk analyses of fuel cells and new technologies

New technologies always require a risk assessment to ensure an adequate level of safety for people, the environment, and assets. To this end, the IMO has issued interim guidelines for the use of fuel cells on board ships. Among others, the guidelines require a risk assessment considering possible azards associated with the installation, maintenance and use of the fuel cell.<sup>1</sup> Officially, the main engines of the Coriolis research vessel consist of three diesel engines. However, to support the future use of the fuel cell as the vessel's main energy source, our risk analysis assume that the ship is solely powered by a fuel cell.

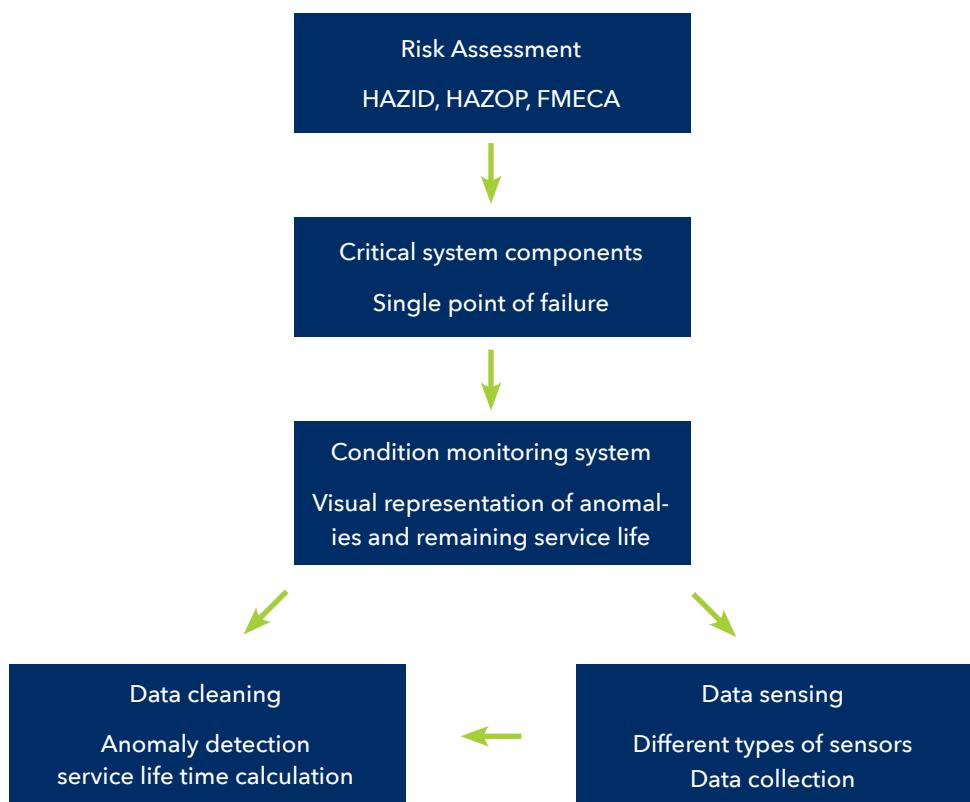
<sup>1</sup> International Maritime Organization, MSC.1/Circ. 1647, 15 June 2022, Interim guidelines for the safety of ships using fuel cell power installations

Following IMO requirements, the risk analysis must be carried out using accepted risk analysis techniques, and must consider a minimum level of hazards, such as fire, severe weather and unintended chemical reactions. The IMO regulations are incorporated into the regulations of classification societies. The Coriolis vessel is built to Bureau Veritas regulations, including special provisions for hydrogen-fueled ships and ships using fuel cells. If a fuel cell is used to power essential onboard systems and components, meeting the regulations require the application of specific established analysis techniques, such as Hazard Identification (HAZID), Hazard and Operability (HAZOP), and Failure Mode Effects and Critically Analysis (FMECA).<sup>2,3</sup>

#### 4 Research frameworks and goals

Risk analyses are used to identify critical system components of the propulsion system, the failure of which result in a shutdown of the entire system. Such critical system components referred to as single point of failure (SPF). Furthermore, the risk analyses are used to identify potential systematic failures in the system and to eliminate them in advance. Due to their importance, we think SPF system components must be subject to condition monitoring. Different types of sensor technologies can be used for the monitoring. The best known and most common technology is vibrations sensors. By monitoring critical system elements, the probability of occurrence of unexpected high-consequence failures could be reduced. The crew on board should be informed of possible damage through early detection of anomalies. This will help the crew to identify and address faults in advance, resulting in reduced downtime and improved the safety. Another area of our research is the calculation of the remaining service life of units and components based on the sensor data collected. The aim of the research is to provide the crew with a visual representation of the remaining service life of components.

The process flow is briefly explained in the below diagram.



2 Bureau Veritas, Rule Note NR 547 DT R01 E, January 2022, Ships using Fuel Cells

3 Bureau Veritas, NR 678, November 2023, Hydrogen-Fuelled ships.

# Künstliche Intelligenz für die Serienfertigung von H<sub>2</sub>-Speichern bei thyssenkrupp Marine Systems

Moritz Jens<sup>1</sup>, Jonas Neustock<sup>2</sup>, Marvin Timm<sup>2</sup> und Alexander Mattes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fachhochschule Kiel, Institut für Produktionstechnik und CIMTT, Kiel, Deutschland

<sup>2</sup> thyssenkrupp Marine Systems, Kiel, Deutschland

## Abstract

Im Rahmen des Projekts „ProMe-KI“ wird die Fertigung von H<sub>2</sub>-Speichern bei thyssenkrupp Marine Systems optimiert, um die Produktion zu skalieren und den Fachkräftemangel zu kompensieren. Der Schwerpunkt liegt auf der Implementierung eines KI-gestützten Assistenzsystems zur Überwachung und Qualitätskontrolle des WIG-Schweißprozesses, speziell bei der Fertigung der Wurzelschweißnaht. Durch die frühzeitige Erkennung von Schweißfehlern mithilfe von Echtzeit-Daten aus Prozessparametern können Nacharbeiten minimiert und Ausschüsse vermieden werden. Der Einsatz eines 3D-Profilsensors ermöglichte die präzise Ermittlung eines Qualitätswertes für WIG-Schweißnähte, indem Fehler wie Risse und Poren zuverlässig detektiert und bewertet wurden. Die im Projekt entwickelte Lösung soll eine Effizienzsteigerung in der Serienproduktion ermöglichen und dient als Vorbild für den Einsatz von KI in ähnlichen Fertigungsprozessen.

## 1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende spielt die sichere und effiziente Speicherung von Wasserstoff eine zentrale Rolle, insbesondere im Hinblick auf die Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne. Eine vielversprechende Lösung stellen Metallhydridspeicher dar, die es ermöglichen, Wasserstoff sicher und effizient bei niedrigem Druck zu speichern und bei Bedarf wieder freizusetzen (Bellosta von Colbe et al., 2019). Schleswig-Holstein als Vorreiter der Energiewende würde direkt von optimierten Fertigungsprozessen profitieren, die einen wirtschaftlichen Hochlauf des Produktionsvolumens für Metallhydridspeicher ermöglichen.

Der Industriepartner, Weltmarktführer für wasserstoffbetriebene U-Boote, ist potenzieller Hersteller für das Energiewendeland Schleswig-Holstein. Derzeit werden die Speicher jedoch noch in geringen Stückzahlen mit vorwiegend manuellen Prozessen gefertigt.

Das Schweißen ist dabei von zentraler Bedeutung in der Wertschöpfungskette. Deshalb soll es im Rahmen des Projekts „ProMe-KI“ mit Künstlicher Intelligenz (KI) für die Herstellung hoher Stückzahlen optimiert werden, indem Prozesswissen in ein KI-Assistenzsystem überführt wird. Ziel ist mit KI den Mitarbeiter zu unterstützen, indem dieser unabhängig von seinem Erfahrungsgrad zuverlässig die Qualitätsanforderungen sicherstellen kann. Die angestrebte Lösung zielt vor allem auf die Bewältigung der Herausforderungen durch den Fachkräftemangel sowie den langen manuellen Prozesszeiten ab, welche gegenwärtig eine wirtschaftliche Skalierung der Produktionsmengen verhindern. Das größte Potenzial besteht darin die Zeit zwischen Fehlerentstehung und -detektion zu minimieren, um Nacharbeit und Ausschuss zu vermeiden.

## 2 Optimierungspotenzial beim Schweißen von H<sub>2</sub>-Speichern

Der Spalt zwischen den zu fügenden Komponenten am H<sub>2</sub>-Speichertank wird durch die sogenannte Wurzelschweißnaht geschlossen. Diesbezüglich ist eine sorgfältige Planung der Reihenfolge der Schweißabschnitte und Führung der Schweißelektrode auf Basis der variablen Spaltbreite erforderlich. Unter diesen Umständen kann eine maschinelle Lösung lediglich für die Lagen nach der Wurzellage in Betracht gezogen werden. Die Abhängigkeit vom Faktor Mensch, hier dem Schweißfacharbeiter in Kombination mit der späten Fehlererkennung durch die manuelle Qualitätsprüfung, verdeutlichen das hohe Risiko für Verschwendungen. Aus diesem Grund

liegt der Schwerpunkt dieses Projekts auf der Reduzierung von Verzögerungen in der Produktion, die durch Fehler während der Wurzelschweißnaht verursacht werden. Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die einzelnen, notwendigen Schritte für die Erstellung einer fehlerfreien Wurzelschweißnaht.

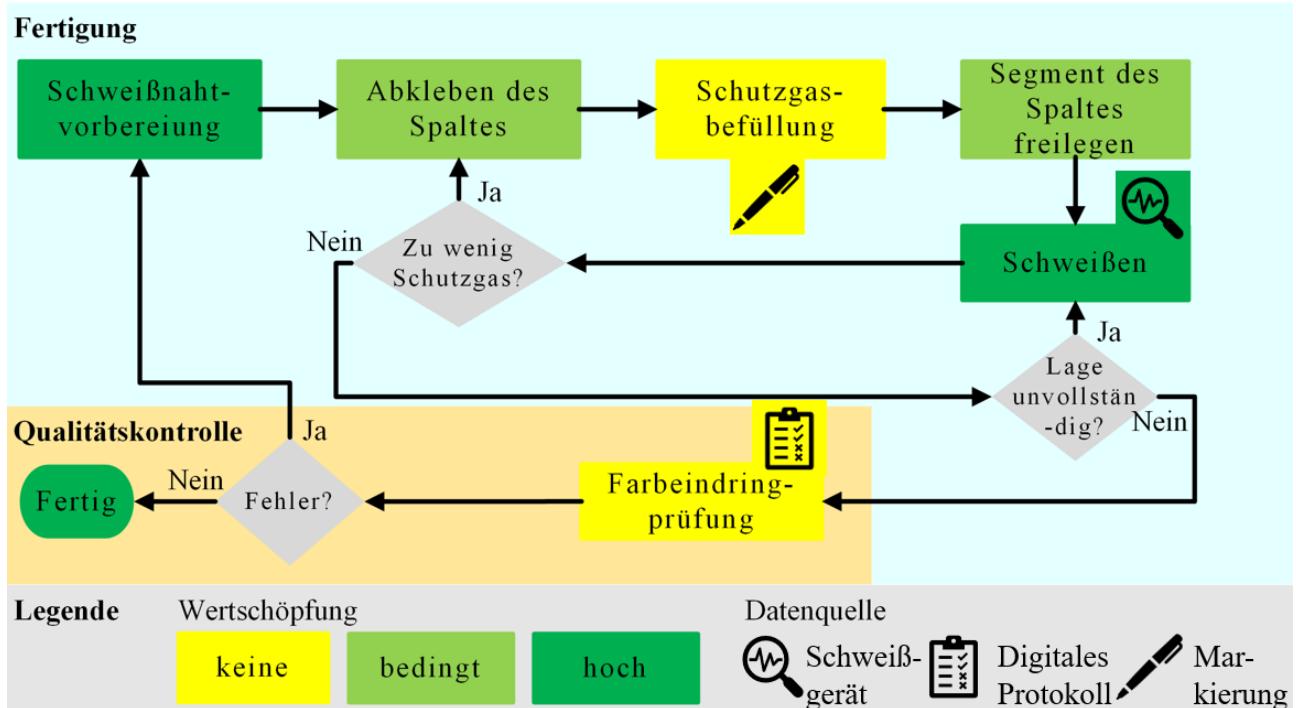


Abbildung 1: Fertigungsprozess der Wurzellage mit möglichen Datenquellen für den KI-Einsatz.

Im Rahmen der Wurzellagenschweißung kommt es während des Prozesses zu häufigen Unterbrechungen, um Oxidationen des Werkstoffs an der inneren, schwer zugänglichen Tankseite zu verhindern. Obgleich zahlreiche Unterbrechungen zu verzeichnen sind, werden potenzielle Fehler, wie etwa Risse oder Poren, erst deutlich, sobald die Wurzellage abgeschlossen ist und das sogenannte Farbeindringungsverfahren als zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt wurde.

### 3 Datenerfassung für ein KI-Assistenzsystem

Die Implementierung eines KI-Assistenzsystems, welches das Ergebnis der Farbeindringprüfung prognostiziert, bietet das Potenzial einer Rückmeldung zur Qualität in den prozessbedingten Unterbrechungen. Die Eingangsdaten für das Vorhersagemodell werden aus den Schweißprozessparametern Stromstärke und Spannung gewonnen.

Die Datenquelle für die Zielgröße ist die Qualitätskontrolle (hier Farbeindringprüfung). Hierbei muss eine digitale Dokumentation der Position unzulässiger Defekte sichergestellt werden. Eine Zuordnung von Prozessparametern und Defekten kann nur erfolgen, wenn für jeden geschweißten Abschnitt Start, Ende und fortlaufende Nummer markiert wird. Die Markierung kann ohne Zeitverlust in der Prozessnebenzeit, während der Schutzgasbefüllung erfolgen (vgl. Abbildung 1). Dadurch ist es möglich, die Strecke mit dem zugehörigen Zeitraum zu kombinieren und jedem Zeitabschnitt die Zielgröße, d. h. einen Qualitätswert auf Basis der Schweißnahtprüfung, zuzuordnen. Die Fehlerquote bei der Fertigung durch Fachkräfte ist äußerst gering, sodass die in Abbildung 1 dargestellte Datenerfassung zu einem stark unausgewogenen Datensatz mit einem großen Anteil an Daten mit einem guten Qualitätswert führen würde. Die kritischen Fehler wären im Datensatz somit stark unterrepräsentiert. Entsprechend dem aktuellen Forschungsstand weisen Deep-Learning-Modelle eine größere Generalisierungslücke für die Minderheitenklasse

auf, da sie keine aussagekräftigen Merkmale für diese unterrepräsentierten Instanzen erfassen können (Dablain et al., 2022).

Um dennoch genug Daten für die sichere Detektion fehlerhafter Schweißnähte zu sammeln, wurden die Bedingungen am H<sub>2</sub>-Speicher im Versuchsfeld nachgestellt und gezielt Fehler provoziert. Der Einsatz des Farbeindringverfahrens im Prozess sowie bei den Versuchen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund wurde ein effizienteres Prüfverfahren gewählt (vgl. Abbildung 2a). Ein 3D-Profilsensor wird verwendet, um Fehler und dessen Position exakt zu detektieren (Chu & Wang, 2016). Neben einem Graustufenbild liefert dieser zu jedem Pixel eine Höhenkoordinate. Asymmetrische Nähte, Poren und Risse können so detektiert und zum bestimmen des Qualitätswertes (Zielgröße) verwendet werden.

Abbildung 2b zeigt das 3D-Profil einer WIG-Schweißnaht (oben) und das Höhenprofil im Bereich eines Risses (unten). Der Fehler entstand durch zu schnelles Abkühlen des Schmelzbades. Der plötzliche Abfall der Stromstärke ist ein wesentliches Merkmal der Prozessparameter, dessen Erkennung durch den KI-Assistenten zukünftig erfolgen soll.

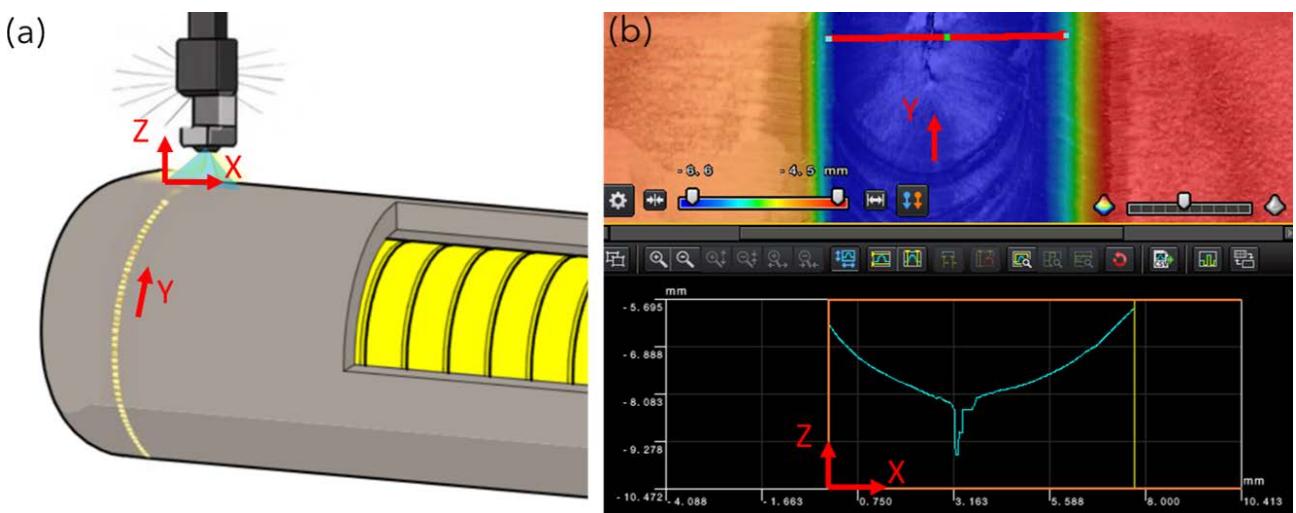


Abbildung 2: Qualitätsdatenerfassung von Schweißnaht am H<sub>2</sub>-Tank mit Metallhydridpellets mittels 3D Profilsensor (a). Höhenprofil der roten Linie in WIG-Schweißnaht visualisiert einen Riss mit Hilfe der Daten vom 3D Profilsensor (b).

#### 4 Implementierung eines KI-gestützten Assistenzsystems

Die Implementierung ist anzustreben, um Fehler frühzeitig zu erkennen und mit minimaler Zeitverzögerung zu beheben. Der erste Schritt, der mit geringstem Aufwand zu realisieren ist, besteht in der Integration der Qualitätsdatenaufzeichnung in die H<sub>2</sub>-Speicherfertigung. Im digitalen Prüfbericht wird zu jedem Fehler die fortlaufende Nummer des Abschnittes vermerkt. So wird die Datenbasis zur stetigen Verbesserung des KI-Modells mit jeder Prüfung erweitert.

Die Einführung des KI-Modells sollte erst nach einer gründlichen Evaluierung seiner Funktionalität erfolgen. Dabei ist sicherzustellen, dass das Tool fehlerfreie Schweißnähte zuverlässig erkennt. Die zuverlässige Vorhersage eines fehlerhaften Abschnitts ist unproblematisch während des Hochlaufs, da nicht erkannte Fehler während der Farbeindringprüfung aufgedeckt werden. Eine Nacharbeitung fehlerfreier Abschnitte, die durch das KI-Modell verursacht wurden, wäre jedoch mit einer Verschwendungen von Ressourcen verbunden und würde zu einer Verschlechterung des Ist-Prozesses führen. Dies hätte eine signifikante Verschlechterung der Akzeptanz des Systems in der Fertigung zur Folge. Deshalb sollte ein Modell, welches alle fehlerfreien Abschnitte als solche identifiziert und kaum fehlerbehaftete Abschnitte aufdeckt bevorzugt werden.

Mit dem Nachweis der Zuverlässigkeit der Vorhersage von guten Schweißabschnitten kann das Modell mittels des Reporting-Tools in die Fertigung implementiert werden. Das Reporting-Tool gibt Rückmeldung zur Qualität nach jedem Abschnitt. Der optimierte Prozess durch die frühzeitige Detektion und Nacharbeit während der Wurzelschweißung wird zu einer signifikanten Reduktion der Verzögerung durch Fehler führen.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Analyse des Ist-Prozesses zeigt ein erhebliches Potenzial für die Nutzung eines KI-gestützten Assistenzsystems beim Wurzelschweißen mit dem WIG-Schweißverfahren. Während bereits ein KI-Modell mit hoher Genauigkeit für den MAG-Schweißprozess existiert, erfordern die spezifischen Anforderungen des WIG-Schweißens eine Optimierung des Modells mittels neu gewonnener Trainingsdaten. Für die Entwicklung eines solchen KI-Modells bieten die unter realen Bedingungen durchgeführten Schweißversuche inklusive Fehlerprovokationen und die erfassten Qualitätsdaten mittels 3D-Profilsensoren eine solide Grundlage. Ein Vergleich der 3D-Profilprüfung mit der etablierten Farbeindringprüfung ist ebenfalls geplant, um die Effektivität der Prüfmethoden weiter zu evaluieren. Sobald die Genauigkeit des Farbeindringverfahrens mittels 3D-Profilsensor oder KI-Modell nachgewiesen wird, können die nötigen Schritte zur vollständigen Substitution des manuellen Prüfens eingeleitet werden. Die erfolgreiche Integration eines solchen Modells wird die Verschwendungen durch Fehler signifikant reduzieren und die Effizienz des Produktionsprozesses, insbesondere bei wachsendem Produktionsvolumen, steigern.

Zukünftig bietet die Applikation von KI-basierten Überwachungssystemen für die Skalierung von Schweißprozessen große Chancen. Es wird empfohlen, bereits bei der Prozessauslegung auf die Möglichkeit zur umfassenden Datenerfassung zu achten. Die hier angewendete Methodik lässt sich in folgende Handlungsempfehlungen zusammenfassen:

1. Datenaufzeichnung und -aufbereitung in Fertigung integrieren
2. KI-Modell kontinuierlich trainieren bis zur ausreichenden Zuverlässigkeit
3. Automation der Qualitätssicherung mit KI-basiertem Assistenzsystem.

## Literaturverzeichnis

Bellotta von Colbe, J., Ares, J.-R., Barale, J., Baricco, M., Buckley, C., Capurso, G., Gallandat, N., Grant, D. M., Guzik, M. N., Jacob, I., Jensen, E. H., Jensen, T., Jepsen, J., Klassen, T., Lototskyy, M. V., Manickam, K., Montone, A., Puszkiel, J., Sartori, S., Sheppard, D. A., Stuart, A., Walker, G., Webb, C. J., Yang, H., Yartys, V., Züttel, A., & Dornheim, M. (2019). Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. \*International Journal of Hydrogen Energy, 44\*(15), 7780-7808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.104>

Chu, H. H., & Wang, Z. Y. (2016). A vision-based system for post-welding quality measurement and defect detection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86, 3007-3014.

Damien, Dablain., Colin, Bellinger., Bartosz, Krawczyk., Nitesh, V., Chawla. (2022). Efficient Augmentation for Imbalanced Deep Learning. arXiv.org, abs/2207.06080 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.06080>

# Erneuerbare Energieträger für die maritime Wirtschaft in Schleswig-Holstein: Ergebnisse einer Expert:innen-Befragung

Jan Simon Bischoff, Sebastian Scholz, Frank Meisel  
Christian-Albrechts-Universität, Kiel

## Abstract

Für die Energiewende und die Erreichung der Klimaziele spielt die Dekarbonisierung des Schiffsverkehrs, der für erhebliche Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, eine entscheidende Rolle. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten WIR!-Bündnisses ‚CAPTN Energy‘ wird in Schleswig-Holstein auf dem Gebiet der maritimen Energiewende geforscht. Im Fokus dieses Bündnisses steht insbesondere die Frage, wie die Schifffahrt mit erneuerbaren Energieträgern wie Wasserstoff, Methanol oder Ammoniak versorgt werden kann. In diesem Zusammenhang wurde bereits in 2021 eine erste Befragung von Expert:innen durchgeführt. In 2024 wurden nun neun weitere qualitative Interviews mit einschlägigen Expert:innen durchgeführt, die hier in der nachfolgenden Arbeit ausgewertet werden. Es zeigt sich, dass die Notwendigkeit des Umstiegs auf eine nachhaltige Energieversorgung in der maritimen Wirtschaft von den Unternehmen und Entscheidungsträgern erkannt wird, gleichzeitig aber viel Unsicherheit eine schnellere Entwicklung hemmt. Dies liegt zum einen an der Unklarheit, welche Energieträger sich durchsetzen werden, zum anderen an offenen politischen und regulatorischen Aspekten. Um die maritime Energiewende zu beschleunigen, muss den relevanten Akteuren mehr Sicherheit gegeben werden, so dass sich die Bereitschaft zu entsprechenden Investitionsmaßnahmen erhöht.

## 1 Einleitung

Der Schiffsverkehr ist für erhebliche Treibhausgasemissionen verantwortlich. Im Jahr 2018 lagen diese bei ca. 3 % der gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen (IMO, 2020). Durch den resultierenden Einfluss auf den Klimawandel spielt die Dekarbonisierung dieses Sektors eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der Klimaziele. Diese Relevanz wird auch zunehmend auf regulatorischer Ebene erkannt. So verabschiedete die EU in jüngster Zeit mehrere Klimaschutzverordnungen mit maritimem Bezug, wie z. B. das Maßnahmenpaket EU Fit for 55, die FuelEU Maritime Regulation, die Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) oder auch die Einbeziehung von Schiffsemissionen in das Emissionshandelssystem (EU ETS). In Deutschland hat Schleswig-Holstein aufgrund des Nord-Ostsee-Kanals ein besonderes Interesse an dieser Thematik. Der Kanal stellt mit jährlich rund 27.000 Schiffsquerungen die meistbefahrene künstliche Wasserstraße der Welt dar (Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt, o.D.). Auch das vom BMBF geförderte WIR!-Bündnis CAPTN Energy befasst sich mit der Dekarbonisierung des Schiffsverkehrs entlang des Nord-Ostsee-Kanals. Dabei wird der Fokus vor dem Hintergrund der Erzeugung erneuerbaren Stroms in Schleswig-Holstein insbesondere auf die Energiebereitstellungskette von erneuerbaren Energieträgern hin zu den maritimen Verbrauchern gelegt. Gleichzeitig ist das Thema noch relativ jung, weshalb sich insbesondere in den letzten Jahren eine zunehmende Dynamik entwickelt hat. Ziel dieser Studie ist es daher, durch die Befragung von Expert:innen aktuelle Entwicklungen der maritimen Energiewende in Schleswig-Holstein zu erfassen und ein besseres Verständnis für zukünftige Chancen und Herausforderungen zu entwickeln.

## 2 Methodik

Im Zuge der Befragung wurden neun Expert:innen ausgewählt, welche Fachkenntnisse im Bereich der erneuerbaren Energien und einen Bezug zu dieser Thematik in Schleswig-Holstein haben. Davon kommen fünf der befragten Personen aus der Wirtschaft, zwei aus der öffentlichen Verwaltung, eine aus der Forschung und eine aus der Politik. Eine anonymisierte Übersicht und Kodierung der Interviewpartner:innen findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über Altersspanne und Fachbereich der Interviewpartner

Kodierung	Altersspanne in Jahren	Bereich
IP 1	31 – 40	Wirtschaft: Vertriebsleitung
IP 2	51 – 60	Politik: Landtag Schleswig-Holstein
IP 3	51 – 60	Wirtschaft: Ingenieurwesen – Maritime Beratung
IP 4	31 – 40	Wirtschaft: Nachhaltigkeitsmanagement
IP 5	51 – 60	Wirtschaft: Ingenieurwesen – Projektmanagement
IP 6	31 – 40	Verwaltung: Wirtschaftsförderung – Erneuerbare Energieträger
IP 7	51 – 60	Forschung: Forschungseinrichtung – Maritimer Bezug
IP 8	31 – 40	Wirtschaft: Projektmanagement – Erneuerbare Energieträger
IP 9	61 - 70	Verwaltung: Schifffahrtsbehörde

Die Interviews dauerten zwischen 30 und 60 Minuten und wurden online per Zoom durchgeführt. Die Interviews wurden semi-strukturiert gestaltet, d. h. es wurden zwar Fragen vorbereitet, neue Fragen konnten aber auch hinzugefügt und andere verworfen werden. Es gab fünf Fragenkomplexe: Standort Schleswig-Holstein; Wirtschaft; Technologie; Gesellschaft sowie Politik und Recht. Eine Übersicht über beispielhafte Fragen aus jeder Kategorie sind in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Beispielfrage je Kategorie

Kategorie	Beispielfrage
Wirtschaft	In der Vergangenheit wurde häufig darauf verwiesen, dass für viele Unternehmen das Entwicklungsrisiko neuer Konzepte oder Technologien durch Unsicherheit zu hoch ist. Ist dies immer noch der Fall oder ist die Bereitschaft bei den Unternehmen mittlerweile vorhanden?
Technologie	In Bezug auf Energieträger wie Ammoniak, Methanol oder reinen Wasserstoff: Welcher Teil der Energiebereitstellungskette stellt für Sie die größte Herausforderung dar?
Gesellschaft	Sehen Sie gesellschaftliche Hindernisse (bspw. Akzeptanz) hinsichtlich neuer Antriebs- oder Speicherungstechnologien für erneuerbare Energieträger in der maritimen Anwendung? Falls ja, wie nimmt man die Bürger:innen am besten mit?
Politik und Recht	In der Vergangenheit wurde häufig auf fehlende Regularien und politische Vorgaben verwiesen: Hat sich Ihrer Ansicht nach in der Zwischenzeit etwas geändert oder besteht weiterhin eine hohe Unsicherheit bei der Anwendung von erneuerbaren Energieträgern in der maritimen Wirtschaft?
Standort Schleswig-Holstein	Wo sehen Sie zukünftige Chancen in Schleswig-Holstein in Bezug auf die Bereitstellungskette von erneuerbaren Kraftstoffen vom Erzeuger zur maritimen Anwendung?

### 3 Ergebnisse der Befragungen

Bei den **wirtschaftlichen** Fragen ergibt sich ein recht eindeutiges Bild. Sechs der neun Befragten gaben an, dass für die Unternehmen ein hohes Unsicherheitsrisiko bei der Entwicklung neuer Technologien und Konzepte im Kontext der maritimen Energiewende besteht. Gleichzeitig wur-

de die Notwendigkeit erkannt und die Bereitschaft, dieses Risiko einzugehen, ist vorhanden. Interviewpartner:in IP 6 erklärte hierzu, dass die zunehmende Sichtbarkeit der Folgen des Klimawandels, im Sinne von Überschwemmungen oder Hitzewellen, zu einer höheren Akzeptanz von Veränderungen bei den Unternehmen führe. IP 4 wies darauf hin, dass einige Unternehmen die Unsicherheit in der Branche als Chance nutzen, um sich als Vorreiter zu positionieren. Gleichzeitig weisen fünf der Befragten darauf hin, dass die Nutzung fossiler Energieträger in der maritimen Industrie derzeit noch sehr attraktiv ist. Insbesondere die hohen Kosten für die Umstellung auf erneuerbare Antriebe seien ein hemmender Faktor. Dies beziehe sich einerseits auf die Investitionsvolumina für die Schifffahrt, andererseits auf die reinen operativen Treibstoffkosten. Die Bekämpfung des Klimawandels müsse mit dem Geldverdienen einhergehen, z. B. wenn Kunden von den Unternehmen umweltfreundliche Reisen einfordern würden (IP 3). In diesem Zusammenhang erläuterte IP 7, dass es bereits heute möglich wäre, ein Schiff zu bauen, das den Emissionsanforderungen von 2050 entspricht, aber aufgrund der hohen Kosten bislang nicht wettbewerbsfähig wäre. Drei Befragte wiesen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Schiffe sehr lange im Betrieb sind, so dass Umbauten an der bestehenden Flotte unumgänglich sind. Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Schiffen liegt bei 30, in Einzelfällen bis zu 40 Jahren (IEA Bioenergy, 2017).

Auf **technologischer** Ebene wurde von mehreren Befragten auf eine notwendige Veränderung des Innovationsfelds hingewiesen. So erklärte IP 7, dass in der Schifffahrt bisher sehr lange Entwicklungszyklen vorherrschen und daher ein Umdenken, auch aufgrund der langen Nutzungsdauer von Schiffen, erforderlich sei. Auch IP 8 beschrieb in Bezug auf Wasserstoff als Energieträger im Allgemeinen, dass in kurzer Zeit ein bestehendes Energiesystem abgelöst und ein neues aufgebaut werden müsse, was eine hohe Dynamik erzeugen würde. Gerade aufgrund der langen Entwicklungszyklen und der bestehenden Unsicherheiten sind bisher jedoch nur inkrementelle Innovationen erfolgt (IP 7). Bei der Frage nach dem Energieträger bestand unter den Befragten ein allgemeiner Konsens, dass in der Schifffahrt, wenn möglich eine direkte Elektrifizierung erfolgen sollte und ansonsten zunächst Wasserstoff-Derivate verwendet werden sollten. Zwei Befragte gaben an, dass sich der Energieträger durchsetzen wird, der am einfachsten mit der vorhandenen Infrastruktur zu realisieren ist. Auch verwiesen zwei Befragte auf den Faktor Mensch: Insbesondere bei neuen Technologien würden Fehler in der Handhabung auftreten, die auch bei der Frage der Handhabbarkeit der Energieträger eine Rolle spielen könnten.

Im Bereich **Gesellschaft** wurden vor allem mögliche Akzeptanzprobleme angesprochen. Hier sahen die Befragten weniger Hindernisse bei der Schifffahrt, da diese oft außerhalb der Sichtweite der Bürger:innen erfolgt. Probleme entstünden erst, wenn persönliche Einschränkungen, wie z. B. steigende Ticketpreise, auftreten würden (IP 4). Fehlende Akzeptanz könnte eher bei den Schiffsbetreibern und den beteiligten Unternehmen aufgrund der Kosten auftreten (IP 6). Bei den Bürger:innen sahen die Befragten vor allem Hindernisse bei Windkraftanlagen und empfahlen eine Möglichkeit der finanziellen Beteiligung, um die Akzeptanz zu steigern. Allgemein sahen sechs der neun Befragten eine gute Kommunikation und Mitnahme der Bürger:innen als erforderlich an. So müssten Fehlinformationen im Vorfeld ausgeschlossen werden und notwendige Veränderungen erklärt werden (IP 2). Auch müssten den Bürger:innen Sicherheitsbedenken bzgl. Wasserstoff genommen werden (IP 3). So würden viele diesen immer noch mit der Katastrophe des Zeppelins „Hindenburg“ im Jahre 1937 in Verbindung bringen.

Zu den **politischen und rechtlichen** Aspekten wurden unterschiedliche Meinungen geäußert. So wünschten sich zwei Befragte politische Vorgaben für den weiteren Entwicklungspfad, insbesondere hinsichtlich der zu verwendenden Energieträger. Zwei andere Befragte hingegen sahen den bisherigen Verzicht auf politische Regulierung als etwas Positives an, da sich hierdurch das wirtschaftlich und technologisch sinnvollste Konzept durchsetzen würde. Auch aus diesen Gründen müsste eine mögliche Regulierung möglichst technologieoffen gestaltet werden. IP 8 sprach von einem Henne-Ei-Problem, die Wirtschaft fordere Vorgaben, der Staat habe aber nicht die fachliche Kompetenz diese zu liefern. In Anbetracht der bereits bestehenden Vorgaben äußerten sich die Befragten kritisch. So verwies IP 7 auf den Carbon Intensity Indicator (CII) der IMO, welcher

derzeit nur bis 2027 definiert sei, so dass viele maritime Akteure die Neudefinition abwarten würden, um weitere Strafkosten zu vermeiden. Zudem gäbe es derzeit hohe Sicherheitsstandards im operativen Umgang mit neuen Treibstoffen, die deren Einsatz erschweren. Des Weiteren wurde auf die Zulassung von Bunkerprozessen für erneuerbare Kraftstoffe verwiesen. So sind die Vorgaben hierfür derzeit noch uneinheitlich, häufig werden spezifische Risikoanalysen gefordert und mit Ausnahmeregelungen gearbeitet (Ramboll, 2024).

In der Befragung wurde abschließend der **Standort Schleswig-Holstein** betrachtet. Dabei wurde insbesondere die regenerative Stromerzeugung als Standortvorteil hervorgehoben. Außerdem seien gute Ausbildungsmöglichkeiten und viel Fachwissen durch die verschiedenen Hochschulstandorte vorhanden. Dies gilt insbesondere für den maritimen Bereich durch den regen Schiffsverkehr und die gute Wasserstraßenanbindung. Als Standortschwäche wurden hingegen vor allem langwierige Bürokratie und regulatorische Herausforderungen genannt. Problematisch seien auch die bestehenden Unsicherheiten bei den erneuerbaren Energien und der generelle Fachkräftemangel.

## 4 Fazit

Ein Vergleich der Ergebnisse der hier durchgeführten Interviews mit der in 2021 durchgeführten Befragung von Expert:innen zeigt, dass in der maritimen Branche ein Umdenken stattfindet. Es gibt weiterhin noch viele Unsicherheiten, aber die Bereitschaft zu alternativen Antriebskonzepten steigt. Auch wenn die hier vorgestellten Ergebnisse aufgrund der geringen Anzahl an befragten Expert:innen nicht repräsentativ sind, können sie als Impulsgeber für verschiedene Segmente der maritimen Energiewende dienen. So zeigt sich insgesamt, dass technologieoffene politische Rahmenbedingungen zu einer höheren Investitionsbereitschaft führen können. Dennoch sollte sich das Innovationsumfeld der Branche in Richtung kürzerer Entwicklungszyklen verändern, um die notwendige Dynamik zur Erreichung der Klimaziele zu erzeugen.

## Literaturverzeichnis

IEA Bioenergy. (2017). Biofuels for the marine shipping sector.  
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>, abgerufen am 10. September 2024.

IMO. (2020). Fourth IMO Greenhouse Gas Study.  
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>, abgerufen am 10. September 2024.

Ramboll. (2024). Potenzialstudie zu Betankungsinfrastrukturen für kohlenstoffarme und erneuerbare Schiffskraftstoffe in Deutschland.  
[https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW\\_Abschlussbericht-Potenzialstudie-Betankungsstrukturen.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW_Abschlussbericht-Potenzialstudie-Betankungsstrukturen.pdf), abgerufen am 10. September 2024.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt. (o.D.). Nord-Ostsee-Kanal.  
<https://www.wsa-nord-ostsee-kanal.wsv.de/webcode/1787310>, abgerufen am 10. September 2024.

## Danksagung

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderung des Projektes „WIR! - CAPTN Energy - Strategieentwicklung“ (Förderkennzeichen 03WIR7703) sowie dem BMBF und Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN) im Rahmen der Förderung des Projektes „WIR! - CAPTN Energy - Innovationsmanagement“ (Förderkennzeichen 03WIR7702).

# Ausgewählte Inhalte des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes

Sina Freitag, LL.B., M.Sc.

Institut für die Transformation des Energiesystems, Fachhochschule Westküste, Heide

## Abstract

Für das Erreichen des in § 3 Abs. 2 S. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Netto-Treibhausgasneutralitätsziels 2045 bedarf es einer deutlichen Erhöhung der bisherigen Geschwindigkeit bei der Minderung der Treibhausgasemissionen. Dabei ist auch die Versorgung Deutschlands mit ausreichend (grünem) Wasserstoff unabdingbar. Allerdings verläuft der Markthochlauf von Wasserstoff bislang auch aufgrund regulatorischer Hürden nicht in ausreichendem Tempo. An dieser Problematik setzt das Wasserstoffbeschleunigungsgesetz an, das mit einem bunten Strauß an Beschleunigungsinstrumenten die Planungs-, Genehmigungs- und Vergabeverfahren in den Bereichen Erzeugung, Speicherung, Transport und Import von Wasserstoff vereinfachen soll.

## 1 Einleitung

Ziel des „Gesetzentwurfs der Bundesregierung zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf sowie zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften“ (WasserstoffBG-E) ist gemäß § 1 S. 1 WasserstoffBG-E die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen für den beschleunigten Auf- und Ausbau der Erzeugungs- und Versorgungskapazitäten von Wasserstoff. Seinen Ursprung findet das Gesetz in der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie aus dem Jahr 2023, in der die Entwicklung eines Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes vorgesehen ist.<sup>1</sup>

Das WasserstoffBG-E legt fest, dass bestimmte Vorhaben im überragenden öffentlichen Interesse liegen und der öffentlichen Sicherheit dienen.<sup>2</sup> Für den beschleunigten Auf- und Ausbau dieser Infrastrukturen verankert die Bundesregierung in den §§ 5 – 18 WasserstoffBG-E zahlreiche Beschleunigungsinstrumente. Der vorliegende Beitrag stellt die Inhalte des Gesetzentwurfs vor und ordnet diese ein.

## 2 Anwendungsbereich

§ 2 WasserstoffBG-E enthält eine abschließende Auflistung der Anlagen und Leitungen sowie der dazugehörigen Nebenanlagen, die in den sachlichen Anwendungsbereich des Gesetzes fallen. Erfasst werden gemäß § 2 Abs. 1 WasserstoffBG-E Elektrolyseure an Land zur Erzeugung von Wasserstoff (im Folgenden Elektrolyseure); Anlagen zur Speicherung von Wasserstoff; Anlagen zum Import von Wasserstoff, Ammoniak und flüssigen organischen Wasserstoffträgern; Anlagen zur Aufspaltung von Ammoniak; Anlagen zur Dehydrierung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern; Verdichter, die für den Betrieb von Wasserstoffleitungen erforderlich sind; Dampf- oder Wasserleitungen, die für den Betrieb der genannten Anlagen nach den Nummern 1 bis 7 erforderlich sind und Stromleitungen, die eine Anlage zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien mit dem Standort einer Anlage nach den Nummern 1 bis 7 zum Zweck der direkten Versorgung verbinden. Der Anwendungsbereich erstreckt sich darüber hinaus gemäß § 2 Abs. 2 WasserstoffBG-E auch auf die Vergabe öffentlicher Aufträge und Konzessionen für Infrastrukturen i.S.v. § 2 Abs. 1 WasserstoffBG-E.

1 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, Juli 2023, S. 18, 27; Freitag/Kisker, Die Nationale Wasserstoffstrategie 2.0, 2023, S. 17, 25.

2 BT-Drs. 20/11899, S. 2.

### 3 Überragendes öffentliches Interesse

Zur Flankierung der Beschleunigungsinstrumente legt § 4 Abs. 1 WasserstoffBG-E fest, dass die Errichtung und der Betrieb der Infrastrukturen i.S.v. § 2 WasserstoffBG-E im überragenden öffentlichen Interesse<sup>3</sup> liegen und der öffentlichen Sicherheit dienen. Die zuständige Behörde erhält dadurch die Möglichkeit, die Infrastrukturen als vorrangigen Belang in die Schutzgüterabwägung eines Genehmigungsprozesses einzubringen.<sup>4</sup> Damit knüpft das WasserstoffBG-E konsequent an andere Regelungen zum überragenden öffentlichen Interesse an. Solche bestehen bereits für den Ausbau erneuerbarer Energien in § 2 des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes, den beschleunigten Netzausbau nach dem Netzausbaubeschleunigungsgesetz und Energieleitungsausbau- gesetz sowie den Ausbau von Leitungen für Wasserstoff nach dem Energiewirtschaftsgesetz.<sup>5</sup>

Für Elektrolyseure sieht § 4 Abs. 3 WasserstoffBG-E bis zum Ablauf des Jahres 2029 erweiterte Anforderungen für das überragende öffentliche Interesse vor. Demzufolge muss entweder eine Direktleitung zwischen dem Elektrolyseur und der EE-Stromerzeugungsanlage bestehen (§ 4 Abs. 3 Nr. 1 WasserstoffBG-E) oder für den Betrieb der Anlage ein oder mehrere Stromlieferverträge mit einem EE-Anteil von mehr als 80 % über eine Laufzeit bis zum 31.12.2029 abgeschlossen werden (§ 4 Abs. 3 Nr. 2 WasserstoffBG-E). Dieses Datum wurde unter Berücksichtigung der Zielsetzung des § 1 Abs. 2 Erneuerbaren-Energien-Gesetz gewählt, wonach der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch 2030 mindestens 80 % betragen soll.<sup>6</sup> Eine weitere Einschränkung des überragenden öffentlichen Interesses von Elektrolyseuren verankert § 4 Abs. 2 WasserstoffBG-E. Die Regelung adressiert Fälle, in denen aufgrund der Wasserentnahme für die Wasserstoffherstellung die Gefahr einer erheblichen Beeinträchtigung für den Wasserhaushalt oder die öffentliche Wasserversorgung entsteht.

### 4 Beschleunigungsinstrumente

Die Beschleunigungsinstrumente des WasserstoffBG-E lassen sich in sechs Beschleunigungsbereiche untergliedern. Als einen wesentlichen Hemmschuh für den beschleunigten Auf- und Ausbau identifiziert das WasserstoffBG-E die wasserrechtlichen Zulassungsverfahren für Anlagen i.S.v. § 2 Abs. 1 WasserstoffBG-E.<sup>7</sup> Abhilfe schaffen sollen die Regelungsinhalte der §§ 4 – 8 WasserstoffBG-E, die neben Bearbeitungshöchstfristen für wasserrechtliche Zulassungsverfahren auch Vorgaben zur Digitalisierung der Verwaltungsverfahren umfassen.

Derartige Digitalisierungsvorschriften sind gemäß § 10 Abs. 2 und § 11 Abs. 2 und 3 WasserstoffBG-E auch für Verwaltungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz vorgesehen.

Des Weiteren verankert § 9 WasserstoffBG-E Erleichterungen für den vorzeitigen Maßnahmenbeginn. Dabei wird Anlagen i.S.v. § 2 Abs. 1 WasserstoffBG-E das gemäß § 8a Abs. 1 Nr. 2 Bundes-Immissionsschutzgesetz erforderliche öffentliche Interesse zuteil. Die Zuordnung eröffnet die Möglichkeit, auf Antrag noch vor der eigentlichen Genehmigungserteilung mit der Maßnahme zu beginnen. Davon umfasst sind neben der Anlagenerrichtung auch weitere Maßnahmen, die zur Prüfung der Betriebstüchtigkeit der entsprechenden Anlage erforderlich sind.

Eine spezielle Erleichterung für Elektrolyseure i.S.v. § 2 Abs. 1 Nr. 1 WasserstoffBG-E enthält § 12 WasserstoffBG-E, der die Anwendbarkeit der Regelung zum Repowering von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien des § 16b Bundes-Immissionsschutzgesetz auf Modernisierungsvorhaben für Elektrolyseure ausdehnt. Konkret reduziert sich dadurch der Prüfungs-

3 Das überragende öffentliche Interesse ergibt sich aus dem besonderen Interesse am beschleunigten Hochlauf der nationalen Wasserstoffwirtschaft und der sehr schnellen Versorgung mit Wasserstoff, siehe dazu: BT-Drs. 20/11899, S. 34.

4 BT-Drs. 20/11899, S. 34.

5 BT-Drs. 20/11899, S. 34.

6 BT-Drs. 20/11899, S. 35.

7 Vgl. dafür BT-Drs. 20/11899, S. 36.

umfang auf Auswirkungen, die sich durch das Repowering ergeben und sich im Vergleich zum bisherigen Anlagenzustand negativ auswirken können.<sup>8</sup>

Das WasserstoffBG-E konstituiert darüber hinaus in § 16 WasserstoffBG-E Erleichterungen für die Vergabe von Vorhaben i.S.d. § 2 WasserstoffBG-E durch öffentliche Auftraggeber und Sektorenauftraggeber. Vor Vertragsabschluss entstehende Verzögerungen bei Vergabe- und Nachprüfungsverfahren sollen fortan durch erhebliche vergaberechtliche Verfahrenserleichterungen verhindert werden.<sup>9</sup>

Zuletzt enthält das WasserstoffBG-E in § 18 WasserstoffBG-E Beschleunigungsregelungen für Rechtswegverkürzungen und beschleunigte Eilverfahren. Dazu zählt gemäß § 18 Abs. 1 Nr. 1 WasserstoffBG-E die Zuständigkeit des Oberverwaltungsgerichts im ersten Rechtszug bei sämtlichen Streitigkeiten über die Errichtung, den Betrieb und die Änderungen von Elektrolyseuren ab einer elektrischen Leistung von mindestens 30 Megawatt. Gleiches gilt nach § 18 Abs. 1 Nr. 2 WasserstoffBG-E für Anlagen zur Speicherung von Wasserstoff, Verdichter, Dampf- und Wasserleitungen<sup>10</sup> sowie Stromleitungen i.S.v. § 2 Abs. 1 Nr. 8 - 10 WasserstoffBG-E. Für Anlage nach § 2 Abs. 1 Nr. 3 - 7 WasserstoffBG-E entscheidet gemäß § 18 Abs. 2 S. 1 WasserstoffBG-E das Bundesverwaltungsgericht im ersten und letzten Rechtszug.

## 5 Einordnung und Ausblick

Das WasserstoffBG-E enthält zahlreiche Beschleunigungsinstrumente, die potenziell zeitliche und/oder finanzielle Einsparpotenziale mit sich bringen und demzufolge dem beschleunigten Wasserstoffhochlauf dienen können. Trotzdem weist der Entwurf zahlreiche Schwachstellen auf.

So erfasst der Anwendungsbereich nur die Infrastruktur für die Wasserstoffderivate Ammoniak und LOHC, nicht aber für weitere Importoptionen wie Methanol. Auch Elektrolyseure auf See fallen ausdrücklich nicht in den sachlichen Anwendungsbereich des WasserstoffBG-E.<sup>11</sup> Des Weiteren erstaunt die Vorgabe, dass netzgebundene Elektrolyseure bis einschließlich 2029 Stromlieferverträge mit einem EE-Stromanteil von lediglich mehr als 80 % abschließen müssen. Mit Blick auf den vorgesehenen Beitrag des WasserstoffBG für die Erreichung des Netto-Treibhausgasneutralitätsziels 2045 wären strengere EE-Vorgaben folgerichtig gewesen.<sup>12</sup> Obwohl das WasserstoffBG-E die unterirdische Wasserstoffspeicherung als vornehmliche Speicheroption anerkennt,<sup>13</sup> umfasst es keinerlei Beschleunigungsinstrumente für Genehmigungsprozesse nach dem diesbezüglich einschlägigen Bundesberggesetz. Vor dem Hintergrund der engen Verknüpfung des WasserstoffBG mit der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, die die Notwendigkeit der Systemdienlichkeit von Elektrolyseuren an zahlreichen Stellen betont, verwundert es ebenso, dass der Gesetzesentwurf keine dahingehenden Anforderungen enthält.

Das WasserstoffBG ist zum Zeitpunkt der Erstellung des Beitrags<sup>14</sup> noch nicht in Kraft getreten und demzufolge noch nicht anzuwenden. Das Inkrafttreten des Gesetzes ist noch für das Jahr 2024 vorgesehen.<sup>15</sup>

---

8 BT-Drs. 20/11899, S. 41.

9 BT-Drs. 20/11899, S. 42.

10 Sofern sie nicht der Zuständigkeit des Bundesverwaltungsgerichts nach § 2 Abs. 2 WasserstoffBG-E unterfallen.

11 BT-Drs. 20/11899, S. 33.

12 Vgl. dafür BT-Drs. 20/11899, S. 23.

13 BT-Drs. 20/11899, S. 33.

14 Stand bei Einreichung des Beitrags am 27.09.2024.

15 BMWK, Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, August 2024, S. 14.

## **Literaturverzeichnis**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter: [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024). Schlaglichter der Wirtschaftspolitik – Wachstumsinitiative der Bundesregierung. Online verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/schlaglichter-der-wirtschaftspolitik-2024-08.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/schlaglichter-der-wirtschaftspolitik-2024-08.pdf?__blob=publicationFile&v=7)

Freitag, S., Kisker, C. (2023). Die Nationale Wasserstoffstrategie 2.0. Online verfügbar unter: [https://www.fh-westküste.de/fileadmin/Dateien/Forschung/ITE/ite\\_sief\\_heft011.pdf](https://www.fh-westküste.de/fileadmin/Dateien/Forschung/ITE/ite_sief_heft011.pdf)

# Die Rolle von Wasserstoff in der kommunalen Wärmeplanung – Rechtsrahmen und Planungsrealitäten in Schleswig-Holstein

Marina Blohm<sup>1</sup>, Ilka Hoffmann<sup>2</sup>, Josephine Semb<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Europa-Universität Flensburg, Flensburg, Deutschland

<sup>2</sup> Fachhochschule Westküste, Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE), Heide, Deutschland

<sup>3</sup> Reiner Lemoine Stiftung, Berlin, Deutschland

## Abstract

Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) sieht vor, dass Wasserstoff auch im Wärmesektor zur Dekarbonisierung eingesetzt werden soll. Dementsprechend enthalten wärmerelevante Gesetze wie das Gebäudeenergiegesetz (GEG)<sup>1</sup> und das (Bundes-) Wärmeplanungsgesetz (WPG),<sup>2</sup> die zum 01.01.2024 in Kraft getreten sind, auch Regelungen zur Wasserstoffnutzung. Zu diesem Zeitpunkt war die Wärmeplanung in Kommunen der sog. „Vorreiter-Länder“ wie Schleswig-Holstein, die bereits vor Inkrafttreten des WPG eigene Wärmeplanungsvorgaben eingeführt hatten, zum Teil weit fortgeschritten.

Um die Bedeutung von Wasserstoff in der bisherigen Wärmeplanungspraxis in Schleswig-Holstein zu erfassen, wurden umfangreiche Interviews mit unterschiedlichen Akteur:innen der Wärmeplanung durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse stellt die Planungsrealitäten der Kommunen dar, die in diesem Artikel mit einem Überblick über die wasserstoffrelevanten Regelungen im WPG und deren Auswirkungen auf das schleswig-holsteinische Energiewende- und Klimaschutzgesetz (EWKG)<sup>3</sup> verknüpft werden.

## 1 Einleitung

Das WPG verpflichtet die Länder sicherzustellen, dass Wärmepläne je nach Größe der Kommunen bis zum 30.06.2026 bzw. 30.06.2028 erstellt<sup>4</sup> und Entscheidungen über die Rolle von Wasserstoff in dem jeweiligen Gebiet getroffen werden.<sup>5</sup> Gleichzeitig sind im Moment jedoch weder die Regeln für die Umrüstung der Erdgasinfrastruktur auf Wasserstoff abschließend geklärt<sup>6</sup> noch der Bezug von Wasserstoff gesichert.<sup>7</sup>

Nach Landesrecht müssen Kommunen in Schleswig-Holstein ihre Wärmeplanungsprozesse hingegen bereits früher beendet haben: „Größere“ Kommunen bis zum 31.12.2024, „kleinere“ bis zum 31.12.2027.<sup>8</sup> Im Gegensatz zum WPG enthält das EWKG keinerlei Vorgaben zu Wasserstoff, d.h. Kommunen waren bislang nicht zur Berücksichtigung von Wasserstoff verpflichtet. Um zu ermitteln, welche Rolle Wasserstoff bislang in der Wärmeplanung spielt und wie sich der Diskurs zum Thema Wasserstoff in der Gebäudewärme darstellt, wurden zwischen Februar und Juli 2024 zwölf semistrukturierte Interviews geführt. Befragt wurden Akteur:innen der Wärmeplanung

1 Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 280).

2 Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz – WPG) vom 20. Dezember (BGBl. 2023I, Nr. 394).

3 Energiewende- und Klimaschutzgesetz Schleswig-Holstein (EWKG) vom 2. Dezember 2021, GVBl. S-H 2021 Nr. 16, S. 1339 ff.

4 Die Fristen für die Erstellung von Wärmeplänen finden sich in § 4 WPG.

5 § 14 WPG.

6 Kabinettsentwurf zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) vom 17. Mai 2023, S. 142. Referentenentwurf zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) vom 03. April 2023, S. 131.

7 Kabinettsentwurf zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG vom 17. Mai 2023, S. 142. Referentenentwurf zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) vom 03. April 2023, S. 130.

8 Die Frist zur Erstellung von Wärmeplänen richtet sich im EWKG nicht nach der Größe, sondern der Einordnung der Kommune im Zentralörtlichen System. Mit „größeren“ Kommunen sind Mittel- und Oberzentren und Unterzentren mit Teifunktion von Mittelzentren und mit „kleineren“ Kommunen Unterzentren und Stadtrandkernen 1. Ordnung gemeint.

(Stadtwerke, kommunale Entscheidungsträger:innen, Planungsbüros, etc.), die mit der Erstellung von Wärmeplänen mit Frist bis Ende 2024 befasst waren.

Eine detaillierte Darstellung der hier beschriebenen Forschungsergebnisse wird in einer Broschüre zur Rolle von Wasserstoff in der Wärmeversorgung in Schleswig-Holstein voraussichtlich im November 2024 veröffentlicht.

## 2 Rechtsrahmen

Für Kommunen in Schleswig-Holstein stellt sich die Frage, ob und inwieweit sie Wasserstoff in ihre Wärmeplanung einbeziehen müssen, denn einerseits sieht das WPG im Gegensatz zum EWKG die Berücksichtigung von Wasserstoff vor,<sup>1</sup> andererseits hat der Bundesgesetzgeber Sonderregelungen für die sog. „Vorreiter-Länder“ verankert, um deren Wärmeplanungsprozesse nicht zu beeinträchtigen.<sup>2</sup> Danach genießen bestehende Wärmepläne Bestandsschutz und große Kommunen können ihre Wärmeplanung bis 01.07.2026 und kleine Kommunen bis 01.07.2028 nach Landesrecht fortsetzen.<sup>3</sup> Strengere Anforderungen aus dem WPG, aber auch Vorgaben zur Berücksichtigung von Wasserstoff, können bei der Wärmeplanerstellung daher zunächst außen vor bleiben. Allerdings müssen Kommunen ihre Wärmepläne bis zum 01.07.2030 im Rahmen der Fortschreibung dem Bundesstandard anpassen<sup>4</sup> und u.a. prüfen, ob und inwieweit sich (Teil-)Gebiete für die Versorgung durch ein Wasserstoffnetz eignen.

Eine Anpassung der Wärmepläne muss im Hinblick auf die Ausweisung von Wasserstoffnetzausbaugebieten nur dann früher erfolgen, wenn eine Kommune die Pflicht zur Nutzung von 65 Prozent erneuerbarer Energien bereits vor dem 01.07.2026 bzw. 2028, also vorzeitig, auslösen möchte.<sup>5</sup> Da sich die Gebietsausweisung und die damit verbundene EE-Nutzungspflicht jedoch ausschließlich auf die jeweiligen Grundstücke in den ausgewiesenen Gebieten bezieht,<sup>6</sup> dürfte der Kreis der Verpflichteten verhältnismäßig überschaubar bleiben.

Gegenwärtig befindet sich das EWKG im Novellierungsprozess. Am 18.06.2024 hat das schleswig-holsteinische Kabinett den Entwurf eines Gesetzes über die Energiewende, den Klimaschutz und die Folgen an die Anpassung des Klimawandels beschlossen, der u.a. den bereits zuvor verpflichteten Kommunen ein Wahlrecht einräumt, ob sie ihre Wärmeplanung nach dem bisherigen EWKG (Ende 2024 oder Ende 2027) oder dem WPG (2026 bzw. 2028) durchführen wollen. Das Gesetz soll im Herbst verabschiedet werden und zum 01.01.2025 in Kraft treten.<sup>7</sup> Kommunen, die sich auf dieser Grundlage für eine Wärmeplanerstellung nach den Vorgaben und Fristen des WPG entscheiden, müssten zu Beginn des Wärmeplanungsprozesses die Eignung einer Versorgung durch ein Wasserstoffnetz prüfen.<sup>8</sup>

## 3 Planungsrealitäten

Da eine wirtschaftlich sinnvolle Beschaffung und ein weitreichender Transport von Wasserstoff<sup>9</sup> zum Verbrauchsort nötig sind, um seine Nutzung zu ermöglichen, sind die im folgenden dargestellten Ergebnisse der Interviews danach strukturiert, ob Kommunen in der Nähe des geplanten

1 § 14 WPG.

2 Kabinettsentwurf zum WPG vom 16.08.2023, S. 101.

3 § 5 Abs. 1 S. 2 WPG.

4 § 25 Abs. 3 WPG.

5 §§ 26 Abs. 4 S. 1 WPG.

6 Die Ausweisung gem. § 26 Abs. 1 S. 2 WPG erfolgt grundstücksbezogen.

7 Zu den Einzelheiten vgl. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/V/Presse/PI/2024/06/240618\\_EWKG](https://www.schleswig-holstein.de/DE/landesregierung/ministerien-behoerden/V/Presse/PI/2024/06/240618_EWKG).

8 § 13 WPG.

9 In diesem Kapitel wird Wasserstoff als grüner Wasserstoff verstanden, welche per Elektrolyse hergestellt wird. Andere Herstellungsverfahren führen zur Emission von Treibhausgasen, weshalb sie für eine vollständige Dekarbonisierung nicht geeignet sind.

Wasserstoff-Kernnetzes oder der schleswig-holsteinischen Vision eines Wasserstoff-Verteilnetzes liegen oder nicht.

Aufgrund der unterschiedlichen Tätigkeitsfelder der Befragten Akteur:innen und den damit verbundenen unterschiedlichen Schwerpunktthemen der Interviews, liegen nicht für alle befragten Kommunen die gleichen Ergebnisse vor, jedoch konnten Trends erkannt werden. Einer dieser Trends sind die infrastrukturellen Herausforderungen, die die Verwendung von Wasserstoff im Planungsprozess birgt. Liegt eine Kommune am geplanten Kern- oder Verteilnetz, wäre der Bezug von Wasserstoff theoretisch möglich, jedoch passen die unterschiedlichen Zeithorizonte der Planung des Wasserstoff-Kernnetzes und der zeitnahen Nutzung von Wasserstoff in der Gebäudewärme nicht zusammen. Das geplante und für die Wärmeversorgung notwendige Verteilnetz kann frühestens mit der Fertigstellung des Kernnetzes (Fertigstellung bis 2032 geplant) in Betrieb genommen werden, die Planungen hierfür befinden sich jedoch noch bis Oktober 2024 in der Genehmigungsphase. Da per LKW nur kleinere Mengen an Wasserstoff transportiert werden können und regional erzeugter Wasserstoff derzeit nicht in ausreichenden Mengen verfügbar ist, können größere Bedarfe nur durch einen Anschluss an das geplante Verteil- bzw. Transportnetz ermöglicht werden. Die zweite Hürde ist, dass die regionalen Stadtwerke und Kommunen nach Aussagen einiger Interviewpartner:innen bisher nicht in die Planung des Wasserstoff-Verteilnetzes mit einbezogen wurden. Plant eine Kommune oder ein Stadtwerk den zukünftigen Bezug von Wasserstoff, so müsste dieser Bedarf zeitnah in die Planungen des Netzes mit einfließen, um den Verlauf des Netzes anzupassen. Der Anschluss eines Stadtgebietes an das Wasserstoff-Kernnetz oder -Verteilnetz ist jedoch bisher nach Aussagen der Interviewpartner:innen in keiner der befragten Städte geplant, obwohl einige der geplanten Kommunen an der geplanten Wasserstoff-Infrastruktur liegen. Eine großflächige direkte Nutzung von Wasserstoff, beispielsweise als Ersatz von Erdgas, ist aus diesem Grund derzeit in keiner Kommune möglich oder geplant. Lediglich eines der befragten Stadtwerke kann sich die direkte Nutzung von Wasserstoff zur Gebäudewärmeproduktion vorstellen, wenn es ein quartierbezogenes Pilotprojekt zur Nutzung von Wasserstoff in einem Teilgebiet gäbe. Während die meisten Akteure keine Notwendigkeit für die Nutzung von Wasserstoff in der zukünftigen dezentralen Wärmeversorgung sehen, prüfen solche mit Fernwärmnetzen die Nutzung von Wasserstoff zur Deckung der Spitzenlast. In diesem Fall würde der Wasserstoff aber nicht direkt zur Wärmeerzeugung bei den Endkund:innen genutzt werden, sondern zur Herstellung von Wärme, welche dann in Wärmenetzen zu den Endkund:innen transportiert wird.

Alle befragten Kommunen, die nicht an der geplanten Wasserstoff-Infrastruktur liegen, planen derzeit keine Nutzung von Wasserstoff in der Wärmeversorgung. Wie viel Wasserstoff zukünftig zu welchen Preisen verfügbar seien wird, ist derzeit aufgrund der noch geringen Erzeugungskapazitäten nicht absehbar und stellt ein wirtschaftliches und unplanbares Risiko dar. Wird allerdings ein Elektrolyseur zur Produktion von Wasserstoff von anderen Akteur:innen oder Investor:innen in einem Stadtgebiet unabhängig von den kommunalen Plänen errichtet, kann beispielsweise die Nutzung der Abwärme aus der Elektrolyse in ein bestehendes oder neu geplantes Wärmenetz eine nutzbare Energiequelle darstellen. Somit könnte die Effizienz der Wasserstoffherstellung erhöht und eine weitere regenerative Quelle zur Erzeugung von Wärme erschlossen werden, so wie es bereits in einer Kommune angedacht ist.

## 4 Fazit

Kommunen in Schleswig-Holstein werden nach dem derzeitigen Novellierungsentwurf des EWKG's weiterhin die Möglichkeit haben, ihre Wärmeplanung nach den landesgesetzlichen Vorgaben von 2021 und damit ohne die Berücksichtigung von Wasserstoff durchzuführen. Allerdings müssen sie dann ihre Wärmepläne bis spätestens 01.07.2030 vollständig überarbeiten und an die WPG-Standards anpassen. Da eine Entscheidung über die jeweilige Rolle von Wasserstoff regelmäßig in der Eignungsprüfung und damit zu Beginn einer Wärmeplanung zu treffen ist, wird eine Auseinandersetzung mit der Frage bereits vor 2030 erfor-

derlich. Für Kommunen, die ihre Wärmepläne von Anfang an nach WPG-Vorgaben erstellen, fällt die Eignungsprüfung entsprechend früher an (vor 01.07.2026 bzw. 01.07.2028). Angesichts der gegenwärtigen Unsicherheiten in Bezug auf eine gesicherte und wirtschaftliche Versorgung mit Wasserstoff dürfte es für Kommunen, die eine Entscheidung in den nächsten Jahren treffen wollen oder müssen, vor allem darum gehen, Wasserstoff im Rahmen der Eignungsprüfung rechtssicher auszuschließen.

Laut den Aussagen der befragten Akteur:innen wird die Nutzung von Wasserstoff in der kommunalen Wärmeversorgung in Schleswig-Holstein aus heutiger Sicht in Zukunft keine große Rolle spielen. Wenn diese Ergebnisse so umgesetzt würden, ergibt sich in Schleswig-Holstein nur ein sehr kleiner Bedarf an Wasserstoff für die zukünftige Wärmeversorgung. Sollten sich die Planungen für das Verteilnetz an höheren Bedarfen orientiert haben, wäre eine Anpassung der Infrastrukturplanung notwendig, um kostenintensive Lock-in-Effekte zu vermeiden.

# Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability\*

Marina Blohm, Franziska Dettner  
Europa-Universität Flensburg, Flensburg

\* This article is a short summary of the original article with the same title, which can be retrieved under <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100112>

## Abstract

Hydrogen is experiencing an unprecedented global hype. Hydrogen is globally discussed as a possible future energy carrier and regarded as the urgently needed building block for the much needed carbon-neutral energy transition of hard-to-abate sectors to mitigate the effects of global warming. This article provides synthesised, measurable sustainability criteria for analysing green hydrogen production proposals and strategies. Drawn from expert interviews and an extensive literature review this article proposes that a sustainable hydrogen production should consider six impact categories; *Energy transition, Environment, Basic needs, Socio-economy, Electricity supply, and Project planning*. The categories are broken down into sixteen measurable sustainability criteria, which are determined with related indicators. The article concludes that low economic costs can never be the only decisive criterion for the hydrogen production; social aspects must be integrated along the entire value chain. The compliance with the criteria may avoid social and ecological injustices in the planning of green hydrogen projects and increases *inter alia* the social welfare of the affected population.

## 1 Introduction

The life-cycle emissions of hydrogen are solely determined by the energy carrier used for production. Currently, nearly the total global supply of hydrogen is produced from fossil fuels, especially natural gas. Hydrogen is proving to be attractive for the energy transition as it can be produced carbon neutral from renewable energy sources as well as store electricity from volatile renewable energy sources.

We understand sustainability as a combination of the five pillars; people, planet, prosperity, peace, and partnership, which form the basis for the Sustainable Development Goals (SDG) in the Agenda 2030 (United Nations General Assembly, 2015). The pillars are of equal value and serve to eradicate global poverty. The increasing number of hydrogen partnerships and agreements between countries of the Global North and Global South, necessitate the development of sustainability criteria.

The aim of this article is to develop sustainability criteria for the production of green hydrogen and to strengthen the social science perspective in hydrogen research. These criteria can be used by decision-makers for planning and implementing hydrogen projects as well as for analyzing national hydrogen strategies, to determine whether the planned hydrogen project meets set sustainability standards.

## 2 Method

The development of measurable sustainability criteria for the production of green hydrogen is carried out with the help of a mix-method approach consisting of a literature review and expert interviews. The following list summarises the methodological steps.

1. **Literature review** Identification of relevant literature.
2. **Criteria development** Identification of criteria interrelations and dependencies to develop criteria clusters.
3. **Criteria evaluation** Interviews with stakeholders in the hydrogen sector (Germany and Morocco).
4. **Criteria quantification** Establish measurability of criteria using *inter alia* Sustainable Development Goal benchmarks.

The literature review is necessary to identify existing research on sustainability criteria for the production of green hydrogen and to determine corresponding quantitative and qualitative indicators. Sixteen relevant criteria were identified (see long version of the article). The pre-developed, clustered sustainability criteria form the basis for semi-structured expert interviews, which were conducted with relevant stakeholders of the hydrogen sector in Germany and Morocco. A total of 15 anonymised interviews were conducted between February and July 2022 with stakeholders from the industrial sector, the energy industry, politics and civil society. An analysis of input and output parameters related to environmental and social impacts and effects of the electrolysis was carried out to capture all relevant criteria that should be included in the sustainability assessment (see Figure 1). The strict economics of the green hydrogen production were not considered, as an economic feasible production will be a prerequisite to produce green hydrogen and sell it at competitive prices on the global market.

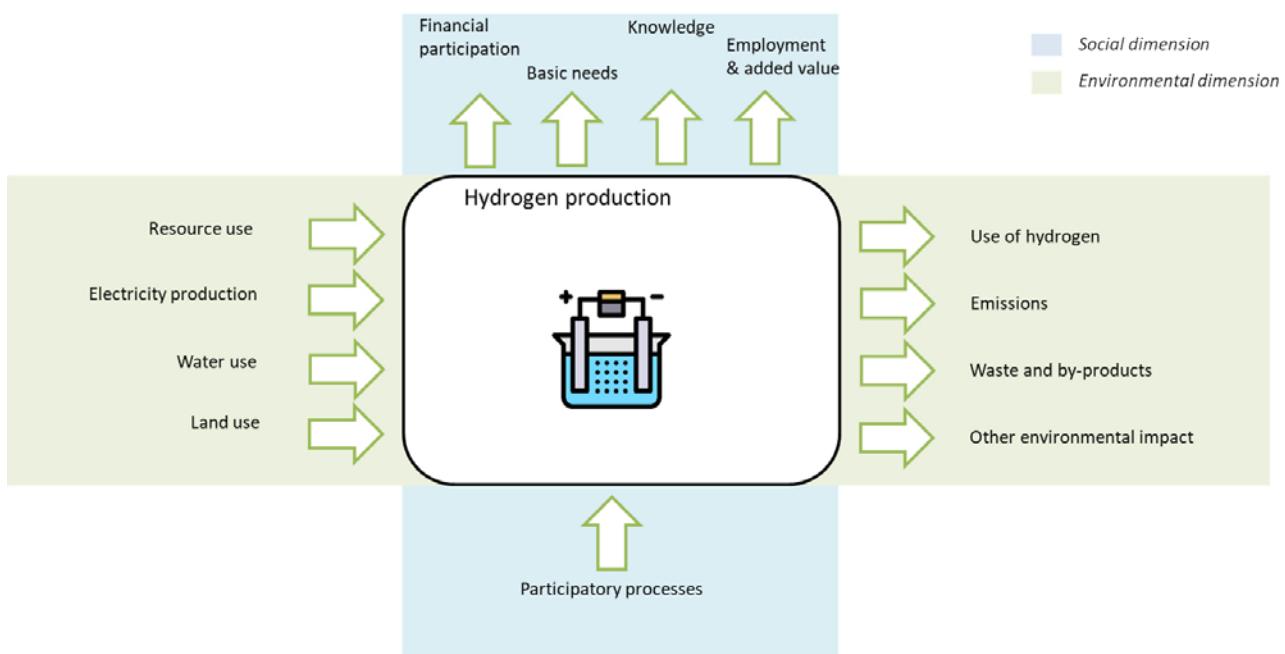


Figure 1: Inputs and outputs of a sustainable production of green hydrogen; environmental dimension depicted in green, social dimension depicted in blue.

The inputs and outputs – hereafter referred to as sustainability criteria – were clustered to focus on criteria that affect similar areas. Five areas of impact – hereinafter referred to as impact categories – were identified: Environment, Basic needs, Socio-economy, Electricity supply, Project planning and Energy transition.

### 3 Results

Sustainability criteria can be applied at different stages of the value chain of green hydrogen production or be used to develop national hydrogen strategies. Figure 2 gives a graphical overview on the impact categories and the developed sustainability criteria.

Every sustainability criterion consists of several indicators, which precisely define, how the criterion can be measured and fulfilled. A detailed overview and description of all indicators can be found in the long version of this article.



Figure 2: Sustainability criteria (outer circle) and related impact categories (inner circle).

### 4 Discussion

Hydrogen has the potential to help solve several critical energy problems. It offers opportunities to decarbonise a number of sectors, where emissions reductions are proving difficult. However, the increasing demand needs to be met by sustainably and socially just produced hydrogen. The literature review (see long version of the article) found that a complete set of criteria to support a sustainability assessment of a hydrogen production is missing. Measurable sustainability criteria can enable decision makers and project planners to establish environmentally friendly and socially just green hydrogen production. However, when defining sustainability criteria, it should be noted that a quantitative sustainability assessment is critical, because, according to Morse et al. (2001), a classification of sustainability contains an element of subjectivity and can be strongly influenced by value judgements of decision makers (Morse et al., 2001). For this reason, this article focuses exclusively on the development of quantifiable criteria that are met or not met. Therefore, the question of how sustainable a project is cannot be answered on the basis of this study.

The establishment and global implementation of sustainability criteria for green hydrogen production are imperative to ensure fair competition between different countries. Intercontinental trade relationships are likely to be limited to destinations that are not too far apart as transportation costs have an important impact on end-user costs (Sens et al., 2022; Staiß et al., 2022). However, trade of green hydrogen between European and African countries is already under discussion.

## 5 Conclusion

The adoption of sustainable criteria for green hydrogen is crucial for promoting a responsible and sustainable approach to hydrogen production. It creates confidence in the technology, encourages investments in renewable energy infrastructure and green hydrogen projects, while avoiding social injustices and balancing the interests of all parties involved. As green hydrogen experiences significant political and economic momentum worldwide, this research highlights the need to consider socio-ecological factors in its production to prevent potential market failures and ensures a just energy transition.

The study presents 16 sustainability criteria in six impact categories, that can serve as a guideline for decision-makers and hydrogen stakeholders in evaluating green hydrogen projects and strategies. The study emphasises the importance of integrating social aspects across the entire value chain

## References

Morse, S., McNamara, N., Acholo, M., & Okwoli, B. (2001). Sustainability indicators: The problem of integration. *Sustainable Development*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/sd.148>

Sens, L., Piguel, Y., Neuling, U., Timmerberg, S., Wilbrand, K., & Kaltschmitt, M. (2022). Cost minimized hydrogen from solar and wind – Production and supply in the European catchment area. *Energy Conversion and Management*, 265, 115742. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115742>

Staiß, F., Adolf, J., Ausfelder, F., Erdmann, C., Hebling, C., Jordan, T., Klepper, G., Müller, T., Palkovits, R., Poganietz, W.-R., Schill, W.-P., Schmidt, M., Stephanos, C., Stöcker, P., Wagner, U., Westphal, K., & Wurbs, S. (2022). *Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030: Transportwege - Länderbewertungen - Realisierungserfordernisse* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).

United Nations General Assembly. (2015, Oktober 21). Transforming our world: *The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>

# Berufe und Kompetenzen für die Wasserstoffwirtschaft

Lena Thiessen M.Sc., Dr. Frank Schiller, Prof. T. Warszta, Dr. Kaire Holts  
Institut für die Transformation des Energiesystems, Fachhochschule Westküste, Heide

## Abstract

Das Wissen darüber, welche Kompetenzen in Berufsfeldern aktuell gebraucht werden und wie sich diese verändern, ist für alle Stakeholder des Arbeitsmarktes von Relevanz. Es kann dafür eingesetzt werden, die Transparenz des Arbeitsmarktes zu erhöhen, Weiterbildungsprogramme strukturierter zu planen und die zukünftig benötigten personellen Ressourcen in den Unternehmen besser zu ermitteln. Auch im Bereich Wasserstoff, der aufgrund seines Potenzials für die Dekarbonisierung zahlreicher fossiler Anwendungen von Bedeutung ist, sind Informationen darüber erforderlich, welche Berufe sowie damit verbundene Kompetenzen und Qualifikationen benötigt werden.

## 1 Einleitung

Für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende sind die Erneuerbaren Energien von entscheidender Bedeutung (Steeg et al., 2022). Bisherige Erkenntnisse legen nahe, dass, um die klimaneutrale Energieversorgung in den nächsten Jahren erreichen zu können, die Anzahl der Fachkräfte in diesem Bereich sich deutlich erhöhen muss (Koneberg et al., 2022).

Wasserstoff ist als Energieträger für die klimaneutrale Energieversorgung von Bedeutung, um Stromengpässe ausgleichen zu können (Steeg et al., 2022 & Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Da die damit am Arbeitsmarkt einhergehenden Veränderungen häufig in den Anforderungen von Berufen schneller auftreten als sich Weiterbildungsinstitute und Arbeitnehmer\*innen anpassen können (Anelli, 2023), werden hier aktuelle Erkenntnisse darüber benötigt, welche Berufe und welche ihnen zugehörige Kompetenzen und Qualifikationen gebraucht werden, um Fachkräfteengpässe zu verhindern, die die Energiewende ausbremsen könnten (Zenk et al., 2023). Um diese Lücke für den Bereich Wasserstoff perspektivisch zu schließen, wurden im Zuge des BMBF-geförderten Projektes Fach2 Stellenanzeigen aus dem Bereich Wasserstoff untersucht und Interviews mit Expert\*innen aus Unternehmen geführt. Ziel dabei war es, die benötigten Kompetenzen und die ihnen zugehörigen Berufe zu erfassen und miteinander zu vergleichen.

## 2 Hintergrund der Studien

Die Ergebnisse einer Studie des Kompetenzzentrum Fachkräfteförderung im Jahr 2022 zeigten auf, dass in 190 der für den Ausbau von Wind- und Solarenergie identifizierten relevanten Berufen eine hohe Anzahl von Stellen nicht besetzt werden konnte (Koneberg et al., 2022). Hierbei stellt im Speziellen der Bereich der Elektrik eine Herausforderung dar (Koneberg et al., 2022).

Für den Bereich Wasserstoff wird damit gerechnet, dass insbesondere im Baugewerbe ein erhöhter Arbeitskräftebedarf entwickeln wird (Ronsiek et al., 2024 & Steeg et al., 2022). Überdies wird angenommen, dass sich in den Bereichen technische Unterstützung (Ronsiek et al., 2024), Maschinenbau (Ronsiek et al., 2024 & Steeg et al., 2022), Erziehung und Unterricht sowie Ingenieur- und Architektenbüros die Bedarfe erhöhen werden (Ronsiek et al., 2024). Ebenfalls wird den Bereichen Elektro- und Energietechnik, Chemie und Technischer Forschung Bedeutung zugesprochen (Steeg et al., 2022). Insbesondere Ingenieur\*innen werden als relevant angesehen (Bezdek, 2019). Dies gilt in besonderer Form für die Bereiche Chemie, Elektrotechnik und Energietechnik (Krichewsky-Wegener et al., 2020).

Entwickelt sich insgesamt ein Mehrbedarf für Berufe und Bereiche, in denen bereits ein geringes Angebot an Fachkräften vorliegt, wie es in 2022 in den Bereichen Handwerk, Energietechnik und Bau der Fall war, kann dies das Erreichen des Ziels der Klimaneutralität erschweren (Zika et al., 2022).

Hierbei ist zu beachten, dass Fachkräfte in der Vergangenheit bei einem Berufswechsel in aller Regel in ihrem vorherigen Berufssegment (vgl. Bundesagentur für Arbeit, 2020a & 2020b) geblieben sind (Bundesagentur für Arbeit, 2024). Daraus wiederum lässt sich annehmen, dass Quereinstiege in andere Berufssegmente aktuell in der Praxis nicht gängig sind.

### 3 Studie 1

Im Zuge des Projektes FacH2 wurden 2459 Stellenanzeigen von der Jobbörse der Agentur für Arbeit über den Zeitraum Januar bis Juni 2023 für den Bereich Wasserstoff erfasst und quantitativ analysiert. Der Zeitraum wurde gewählt, um mehrere Quartale und mögliche saisonale Schwankungen zu berücksichtigen (Stops et al., 2021). Über Stellenanzeigen können nicht nur die nachgefragten Berufe, sondern auch benötigte Qualifikationen und Anforderungen von Berufen und Berufsfeldern erfasst werden (Stops et al., 2021). Von den erfassten Stellenanzeigen erfüllten 1512 die Rahmenbedingungen, um tiefergehend analysiert werden zu können.

Die Daten wurden unter Zurhilfenahme der Software MAXQDA automatisiert codiert auf Grundlage eines Diktionsärs. Bei der Analyse von Stellenanzeigen birgt die Nutzung eines Diktionsärs, einer Liste zuvor definierter Sätze oder Schlagwörter, dahingehend Vorteile, dass es aufgrund seiner festgelegten Definitionen von Begriffen replizierbar ist und ohne erneuten Zeitaufwand auf zusätzliche Stellenausschreibungen desselben Gebiets angewendet werden kann (Sodhi & Son, 2010). Die Analysemethode orientiert sich an der induktiv-quantitativen Inhaltsanalyse (Schneijderberg et al., 2022) und wurde aufgrund des Umfangs des Datenmaterials gewählt (Schneijderberg et al., 2022). Der Diktionsär ist auf das Erfassen von fachlichen Kompetenzen fokussiert (vgl. Heyse & Erpenbeck 2009). Dieser basiert auf der quantitativen Analyse von Stellenanzeigen, der gezielten Recherche im Berufenet der Bundesagentur für Arbeit (Bundesagentur für Arbeit, 2020c) und manueller Codierung von Stellenanzeigen. Die Ergebnisse der automatischen Codierung wurden mit den Berufen in einer Zusammenhangsmatrix gegenübergestellt und die Daten in ein durchsuchbares Netzwerk (vgl. Borgatti et al., 2022) übertragen, dies ist ausschnittsweise in Abbildung 1 & 2 dargestellt.

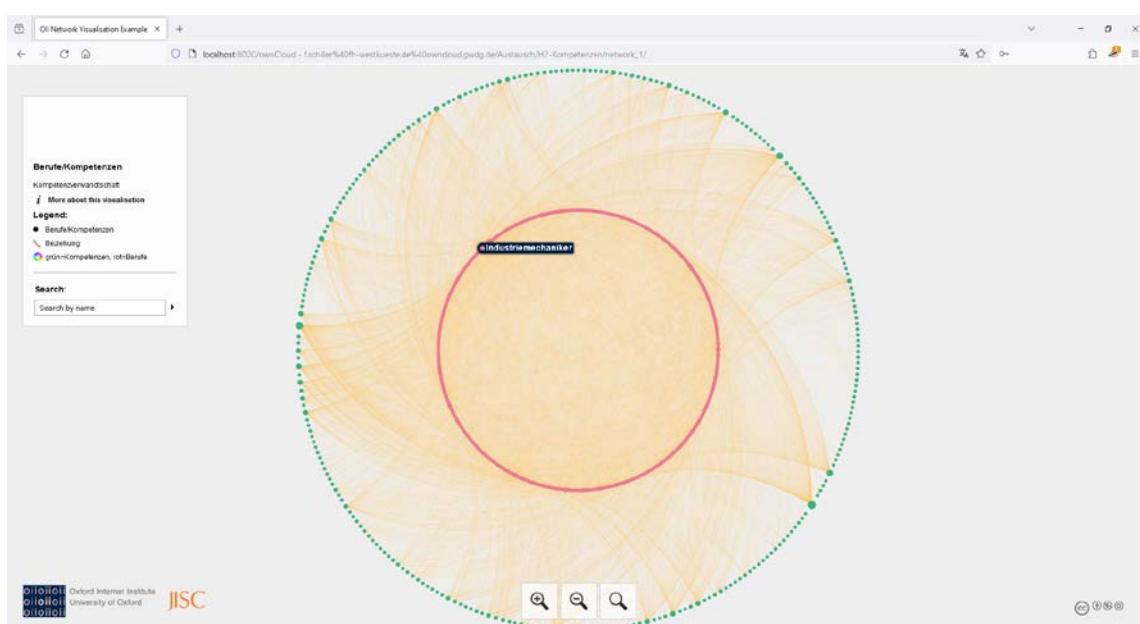


Abbildung 1: Darstellung im bi-partite Netzwerk



Abbildung 2: Fachliche Kompetenzen am Beispiel Projektingenieur

Die Ergebnisse der Analyse der Stellenanzeigen bieten einen fundierten und durchsuchbaren Überblick über die benötigten Kompetenzen und die ihnen zugehörigen nachgefragten Berufe im Bereich Wasserstoff. Dies bietet eine erhöhte Transparenz des Status quo des Arbeitsmarktes für Arbeitgeber, sowie Arbeitnehmer\*innen und Bildungsträger. Durch die Vergleichbarkeit von Berufen und Kompetenzen können ggf. Potenziale sichtbar werden, die helfen können Fachkräftelücken zu schließen. Die erhöhte Transparenz in den Kompetenz- und Berufsbedarfen kann überdies unter anderem im Bereich der Bildung eine bessere Planung ermöglichen (vgl. Stops et al., 2021).

Auffallend in der Analyse der nachgefragten Berufe (Stand 1. Halbjahr 2023) ist, dass im hohen Maße Berufe im Bereich Elektrik nachgefragt wurden. Dieser Umstand lässt eine zukünftige Konkurrenzsituation zum Energiesektor denkbar werden und wirft die Frage auf, wie diese abgeschwächt werden kann. Weiterhin spricht das Ergebnis gegen die bisherige Vorannahme der hohen Bedeutung des Chemiebereichs (Krichewsky-Wegener et al., 2020), da dieser im deutlich geringeren Maße nachgefragt wurde. Zugleich bestätigt es die Annahme der H2 Literatur zur erhöhten Nachfrage von Ingenieur\*innen (Bezdek, 2019).

Bemerkenswert ist, dass ein großer Anteil der ausgeschriebenen Stellen auf Arbeitnehmerüberlassungen bzw. Personaldienstleister zurückzuführen ist. Weiterhin können bei einigen Berufen und Spezialisierungen erhöhte Nachfragen in einzelnen Bundesländern festgestellt werden.

## 4 Studie 2

Die Methode der zweiten Studie fokussiert sich auf das beobachtbare Verhalten von Personen, um verhaltensbasierte Anforderungsprofile etablierter Berufe in Bezug auf Wasserstoff zu erstellen und ihre Dynamiken zu analysieren. Die Methodik beruht auf der Critical Incident Technique von Flanagan (1954). Es wurden bisher mit Expert\*innen aus insgesamt 19 Unternehmen Interviews durchgeführt. Von diesen stammten 11 aus Deutschland und 8 aus Estland. Die Ergebnisse wiesen keine für die Anforderungsprofile relevanten erkennbaren länderspezifischen Unterschiede auf und können somit in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. Die vorläufigen Ergebnisse der Interviews weisen darauf hin, dass neben den fachlichen Kompetenzen, Fähigkeiten und Eigenschaften an mehr Bedeutung gewinnen. Im Speziellen sind hier Kommunikationsfähigkeit, Offenheit, die Fähigkeit ganzheitlich und vernetzt zu denken, sowie eine erhöhte Lernbereitschaft, Flexibilität, interdisziplinäres Denken und Teamfähigkeit zu nennen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die bereits etablierten fachlichen Kompetenzen der Berufe weiterhin von Relevanz sind. Ebenso sind Zuverlässigkeit und Sicherheitsbewusstsein nach wie vor von Bedeutung. Während die Ergebnisse daraufhin weisen, dass Fähigkeiten und Eigenschaften an Relevanz gewinnen.

## Literaturverzeichnis

Anelli, G. (2023). *But which skills? Work Organisation, Labour & Globalisation*, 17(2). <https://doi.org/10.13169/workorgalaboglob.17.2.0091>

Bezdek, R. H. (2019). The hydrogen economy and jobs of the future. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 4(1), 1-6. <https://doi.org/10.1051/rees/2018005>

Borgatti, Stephen P.; Everett, Martin G.; Johnson, Jeffrey C.; Agneessens, Filip (2022): Analyzing social network using R. Los Angeles: Sage.

Bundesagentur für Arbeit. (2024). Berufliche Mobilität von Beschäftigten - Deutschland (Jahreszahlen). Online verfügbar unter: [https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/ Einzelheftsuche\\_Formular.html?nn=1523064&topic\\_f=beschaeftigung-sozbe-bst-berufl-mobi](https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/ Einzelheftsuche_Formular.html?nn=1523064&topic_f=beschaeftigung-sozbe-bst-berufl-mobi)

Bundesagentur für Arbeit. (2020a). Klassifikation der Berufe 2010 - überarbeitete Fassung 2020: Band 1: Systematischer und alphabetischer Teil mit Erläuterungen. Bundesagentur für Arbeit. Online verfügbar unter: [https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Statischer-Content/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Berufe/KldB2010-Fassung2020/Printausgabe-KldB-2010-Fassung2020/Generische-Publikationen/KldB2010-PDF-Version-Band1-Fassung2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=23](https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Statischer-Content/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Berufe/KldB2010-Fassung2020/Printausgabe-KldB-2010-Fassung2020/Generische-Publikationen/KldB2010-PDF-Version-Band1-Fassung2020.pdf?__blob=publicationFile&v=23)

Bundesagentur für Arbeit. (2020b). Klassifikation der Berufe 2010 - überarbeitete Fassung 2020: Band 2: Definitorischer und beschreibender Teil. Bundesagentur für Arbeit. Online verfügbar unter: [https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Statischer-Content/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Berufe/KldB2010-Fassung2020/Printausgabe-KldB-2010-Fassung2020/Generische-Publikationen/KldB2010-PDF-Version-Band2-Fassung2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=21](https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Statischer-Content/Grundlagen/Klassifikationen/Klassifikation-der-Berufe/KldB2010-Fassung2020/Printausgabe-KldB-2010-Fassung2020/Generische-Publikationen/KldB2010-PDF-Version-Band2-Fassung2020.pdf?__blob=publicationFile&v=21)

Bundesagentur für Arbeit. (2020c). Startseite - BERUFENET - Bundesagentur für Arbeit. Online verfügbar unter: <https://web.arbeitsagentur.de/berufenet/>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Heyse, V. & Erpenbeck, J. (2009): Kompetenztraining: Informations- und Trainingsprogramme. Freiburg, GERMANY: Schaffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH.

Flanagan, J.C. (1954) The Critical Incident Technique. *Psychological Bulletin*, 51, (4),327-358. <https://doi.org/10.1037/h0061470>

Koneberg, F., Jansen, A. & Kutz, V. (2022). Energie aus Wind und Sonne: Welche Fachkräfte brauchen wir? Studie 03/2022. Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung. Online verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/anika-jansen-energie-aus-wind-und-sonne-welche-fachkräfte-brauchen-wir.html#:~:text=Aktuell%20fehlen%20in%20den%20auch,Fachkr%C3%A4fte%20im%20Jahresdurchschnitt%202021%2F2022>

Krichewsky-Wegener, L., Abel, S. & Bovenschulte, M. (2020). Skills Development for Hydrogen Economies - Damit aus einer Wasserstoffstrategie eine Wasserstoff(weiter)bildungsstrategie wird (Working Paper of the Institute for Innovation and Technology). Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Schneijderberg, C., Steinhardt, I. & Wieczorek, O. (2022). Qualitative und quantitative Inhaltsanalyse: digital und automatisiert: Eine anwendungsorientierte Einführung mit empirischen Beispielen und Softwareanwendungen (1. Auflage). Standards standardisierter und nichtstandardisierter Sozialforschung. Beltz Juventa. Online verfügbar unter: [http://www.content-select.com/index.php?id=bib\\_view&ean=9783779970378](http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783779970378)

Sodhi, M. S. & Son, B.-G. (2010). Content analysis of OR job advertisements to infer required

skills. Journal of the Operational Research Society, 61(9), 1315-1327. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.80>

Steeg, S., Helmrich, R., Maier, T., Schroer, J. P., Mönning, A., Wolter, M. I., Schneemann, C. & Zika, G. (2022). Die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland: Folgen für Arbeitsmarkt und Bildungssystem.: Eine erste Bestandsaufnahme (BIBB Discussion Paper). Bundesinstitut für Berufsbildung.

Stops, M., Bächmann, A.-C., Glassner, R., Janser, M., Matthes, B., Metzger, L.-J., Müller, C. & Seitz, J. (September 2021). IAB-FORSCHUNGSBERICHT: Extracting Skill Requirements from Job Ads - the "Machbarkeitsstudie Kompetenz-Kompass". Results from the project work of IAB (IAB-Forschungsbericht 7/2021). Bundesinstitut für Berufsbildung.

Zenk, J., Mönning, A., Ronsiek, L., Schneemann, C., Schur, A. C. S. & Steeg, S. (2023). Erste Abschätzung möglicher Arbeitsmarkteffekte durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bis 2030. BIBB Discussion Paper (BIBB Discussion Paper).

Zika, G., Maier, T., Mönning, A., Schneemann, Steeg, Stefanie, Weber, E., Wolter, Ingo, Marc & Krintz, J. (2022). IAB-FORSCHUNGSBERICHT: Die Folgen der neuen Klima- und Wohnungsbau- politik für Wirtschaft und Arbeitsmarkt. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. <https://www.econstor.eu/handle/10419/253704>

# Impressum

## Herausgeber

Landeskompetenzzentrum Wasserstoffforschung Schleswig-Holstein (HY.SH)  
unter dem Dach der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)

## Erscheinungsjahr

2024 anlässlich des 3. HY.SH Forschungssymposiums am 12.09.2024 in Lübeck

## Redaktion

HY.SH

## Layout, Grafik

Ulrike Heinichen, Graitypus

## Titelseite

Karte: Simeon Ortmüller, UXMA GmbH & Co. KG

Icons: AdobeStock/PaHa, Bilal, M Design

## DOI

10.38071/2024-01153-3

## Förderung

Die vorliegende Publikation wurde durch das Ministerium für Allgemeine und Berufliche Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur (MBWFK) des Landes Schleswig-Holstein gefördert.  
Die EKSH ist Projektträgerin des HY.SH.



hysh.de ➤➤➤

