



Transport von grünem Wasserstoff - Welche Akteure sind im technologischen Innovationssystem aktiv?

Ergebnisse des Projekts TransHyDE-Sys –
Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen
Wasserstoff

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Autorinnen und Autoren

Uta Burghard – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Aline Scherrer – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Jana Jung – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Disclaimer

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



Impressum

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE
Geschäftsstelle Kommunikation und Koordination
E-Mail: koordination@transhyde.de

cruh21 GmbH
Erste Brunnenstraße 1
20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen
und Geothermie IEG
Gulbener Straße 23
03046 Cottbus

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Stiftstraße 34-36
45470 Mülheim an der Ruhr

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	S.6	05 Diskussion und Schlussfolgerungen	S.20
01 Einleitung	S.7	5.1 Zusammenfassung und inhaltliche Diskussion	S.20
02 Hintergrund: Technologisches Innovationssystem von Transporttechnologien für grünen Wasserstoff	S.9	5.2 Methodische Diskussion, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf	S.21
2.1 Transporttechnologien für grünen Wasserstoff	S.10	5.3 Fazit und Ausblick	S.21
2.2 Technologisches Innovationssystem	S.11	5.4 Danksagung	S.21
03 Methode	S.13	A Anhang	S.22
3.1 Akteursidentifikation: Google-Suche und Medienanalyse	S.13	A.1 Akteurstabelle	S.22
3.2 Akteurskategorisierung	S.14	A.2 TransHyDE-Partner	S.27
04 Ergebnisse: Akteure im technologischen Innovationssystem zum Transport von (grünem) Wasserstoff	S.15	Literaturverzeichnis	S.28
4.1 Akteure im TIS zu Transport von (grünem) Wasserstoff	S.15		
4.2 Akteurstypen im TIS zu Transport von (grünem) Wasserstoff	S.16		
4.2.1 Akteurstypen in Forschung und Beratung	S.17		
4.2.2 Akteurstypen in der Produktion	S.17		
4.2.3 Akteurstypen im Transport	S.18		
4.2.4 Akteurstypen in den Verbrauchssektoren	S.19		

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
LOHC	liquid organic hydrogen carriers
TIS	technologisches Innovationssystem
H ₂	Wasserstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick über Wasserstoffprojekte in Deutschland(GRA_IPCEI_Standorte_A2_07_Bildnachweis (bmwk.de))	S.8
Abbildung 2:	Vorgehen und Ziele der einzelnen Arbeitsschritte	S.11
Abbildung 3:	System für die Akteurskategorisierung, weiterentwickelt basierend auf Hekkert et al. 2011	S.12
Abbildung 4:	Identifizierte Einzelakteure im TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff	S.13
Abbildung 5:	Identifizierte Akteurstypen im TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff	S.14
Abbildung 6:	Identifizierte Akteurstypen in Forschung & Beratung	S.15
Abbildung 7:	Identifizierte Akteurstypen in der Produktion von (grünem) Wasserstoff	S.15
Abbildung 8:	Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: Verteilung, Handel und Infrastruktur	S.16
Abbildung 9:	Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: bestehende Gasleitungen und neue H ₂ -Pipelines	S.16
Abbildung 10:	Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: LOHC, Ammoniak und Hochdruckbehälter	S.17
Abbildung 11:	Identifizierte Akteurstypen in den Verbrauchssektoren von (grünem) Wasserstoff	S.17

Executive Summary

Deutschland wird langfristig fast die Hälfte seines Energieverbrauchs durch chemische Energieträger, wie Wasserstoff, decken. Wasserstoff kann dabei sowohl direkt als Energieträger dienen, oder den Ausgangspunkt für Wasserstofffolgeprodukte darstellen, wie bspw. Ammoniak oder synthetisches Methan. Die Nutzung von Wasserstoff bedingt die Integration neuer Energie- und Rohstoffinfrastrukturen, aber auch die Umwandlung oder Stilllegung von Infrastrukturen. Für den Wasserstofftransport wird die Nutzung bestehender Erdgasleitungen sowie der Transport in gasförmiger Form in Hochdruckbehältern in Lkw oder Schiffen diskutiert. Aber auch der Transport von flüssigem Wasserstoff, chemisch gebundenem Wasserstoff (LOHC) sowie der Transport über sogenannte Wasserstofffolgeprodukte wie Ammoniak oder Methanol wird erprobt. Diese sind oft leichter zu transportieren als Wasserstoff selbst. Ein flächendeckendes Wasserstoffpipelinennetz, das über regionale Lösungen hinausgeht, wird in der nahen Zukunft noch nicht realisiert werden können.

In diesem Working Paper wird mittels einer Medienanalyse untersucht, welche Akteure aus welchen gesellschaftlichen Teilsystemen beim Thema Transport von (grünem) Wasserstoff in Deutschland aktiv sind. Daraus werden erste Erkenntnisse für die Voraussetzungen einer zukünftigen Verbreitung des Energieträgers abgeleitet. Dieses Papier richtet sich an politische Entscheider:innen, aber auch an Akteure aus Forschung und Industrie, etwa, um neue Netzwerke im Thema Wasserstofftransport zu initiieren.

Dieses Working Paper ist im Rahmen des Teilvorhabens "TransHyDE-Sys - Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff" entstanden und ist damit Teil von "TransHyDE", eines der drei Wasserstoff-Leitprojekte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie.

Die Ergebnisse der Medienanalyse zeigen, dass im Technologischen Innovationssystem (TIS) zu Transporttechnologien für (grünen) Wasserstoff aktuell insbesondere Akteure aus dem Bereich Forschung und Beratung, aus der Kategorie Wasserstoffproduktion und in der Kategorie Verkehr als Teil des Nachfragesystems aktiv sind. Auch existieren bereits einige Netzwerke und Industrieverbände zu diesem Thema, während das Thema in der breiten Öffentlichkeit noch kaum angekommen ist. Einige der Industrieakteure sind bereits in mehreren Bereichen der Wertschöpfungskette von Wasserstoff aktiv oder erweitern durch ihre Aktivitäten im Bereich Wasserstofftransport ihre bisherigen Aktivitäten in der Energie- oder Gasbereitstellung. In Summe zeigt sich, dass zum Thema Wasserstofftransport in Deutschland bereits eine vielfältige Gruppe von Akteuren und Akteurstypen kommunizieren und aktiv sind.

1

Einleitung

Für die Energiewende und zur Erreichung der Klimaschutzziele stellt grüner Wasserstoff einen wichtigen Energieträger dar. Denn Deutschland wird langfristig fast die Hälfte seines Energieverbrauchs durch chemische Energieträger, wie Wasserstoff, decken. Diese müssen aufgrund der Klimaschutzziele auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt werden (EWI 2021). Laut Prognosen wird Wasserstoff im Jahr 2050 durchschnittlich 4-11 % des Endenergieverbrauchs erreichen. Wasserstoff wird insbesondere in der Industrie und im Verkehr benötigt, während der Energieträger in der Gebäudeheizung nur eine untergeordnete Rolle spielen wird (bspw. wo eine dezentrale Einspeisung von Wasserstoff in das Gasnetz erfolgt) (Riemer et al. 2022). Wasserstoff kann sowohl direkt als Energieträger dienen, als auch den Ausgangspunkt für Wasserstofffolgeprodukte darstellen, wie bspw. Ammoniak oder synthetisches Methan (EWI 2021). Die im Juni 2020 veröffentlichte Nationale Wasserstoffstrategie weist Wasserstoff insofern eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Energiewende zu (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020).

Die Nutzung von Wasserstoff bedingt die Integration neuer Energie- und Rohstoffinfrastrukturen, aber auch die Umwandlung oder Stilllegung von Infrastrukturen. Gleichzeitig ändert sich auf der Nachfrageseite von grünem Wasserstoff, bspw. in den energie- und emissionsintensiven Grundstoffindustrien, durch die Nutzung neuer Technologien auch der Bedarf nach Art und Menge des Energieträgers. Das bedeutet, beide Seiten – Angebot und Nachfrage – müssen gemeinsam betrachtet werden.

Für den Transport des Wasserstoffs wird die Nutzung bestehender Erdgasleitungen sowie der Transport in gasförmiger Form in Hochdruckbehältern in Lkw oder Schiffen diskutiert. Aber auch der Transport von flüssigem Wasserstoff wird erprobt. Ein flächendeckendes Wasserstoffpipelinenetz, das über regionale Lösungen hinausgeht, wird in der nahen Zukunft jedoch noch nicht realisiert werden kön-

nen, u.a. aus Kostengründen und aufgrund eines fehlenden sicheren regulatorischen Rahmens (EWI 2021). So existieren bisher nur drei reine Wasserstoff-Netze in Deutschland: im Ruhrgebiet, in Leuna (Sachsen-Anhalt) und in Höchst bei Frankfurt. Bis zum Jahr 2025 sollen die Wasserstoffnetze auf eine Länge von 500 Kilometern ausgebaut werden (Kühl 2022). Die Bundesregierung plant den Aufbau eines Wasserstoff-Kernetzes. Hierzu haben die Fernleitungsnetzbetreiber im Juli 2023 einen Planungsstand für ein überregionales Wasserstoff-Kernetz mit einer Länge von rund 11.200 km für das Jahr 2032 veröffentlicht, das ein Grundgerüst der Wasserstoff-Infrastruktur bilden soll (Deutscher Bundestag 2023). Sogenannte Wasserstofffolgeprodukte wie Ammoniak oder Methanol sind mit den bestehenden Infrastrukturen oft leichter zu transportieren als Wasserstoff selbst, denn diese liegen bei Umgebungstemperaturen in flüssiger bzw. leicht zu verflüssigender und nicht, wie Wasserstoff, in gasförmiger Form vor. Dies trifft auch für die organische Trägerflüssigkeit LOHC zu. Für ausgewählte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wird auch der Flüssigwasserstofftransport mit hoher Energiedichte adressiert. Es gibt jedoch noch keine allgemeingültige Festlegung darauf, welcher Energieträger in welcher Form zukünftig als Haupttransportmedium in der Wasserstoffwirtschaft eingesetzt werden soll.

Das Projekt "TransHyDE" stellt eines der drei Wasserstoff-Leitprojekte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie dar. Innerhalb der Technologieplattform TransHyDE ermittelt das Projekt "TransHyDE-Sys - Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff" zum einen durch Modellierung und Simulation, wie Energieinfrastrukturen aufgebaut und gekoppelt werden müssen. Zum anderen werden Ergebnisse der Umsetzungs- und Forschungsprojekte gesammelt und eingeordnet. Dies mündet in die Entwicklung einer Roadmap.

Dieses Working Paper ist als Teil von Arbeitspaket 6 "Integration und Kommunikation" im Rahmen des Teilvorhabens von TransHyDE-System des Fraunhofer ISI entstanden. Das Ziel dieses Papers ist es, die Akteure im Bereich Transport von grünem Wasserstoff in Deutschland zu bestimmen. Ein besseres Verständnis der Akteurslandschaft trägt dazu bei, das technologische Innovationssystem und die Entwicklung der Technologien zu beschreiben und zu bewerten sowie mögliche Barrieren für die weitere Entwicklung zu identifizieren. Denn Akteure sind maßgeblich für die Entwicklung von Technologien, indem sie diese schaffen, verbreiten oder nutzen (Hekkert et al. 2011).

2

Hintergrund: Technologisches Innovationssystem von Transporttechnologien für grünen Wasserstoff

In Deutschland werden insgesamt 62 Wasserstoff-Großprojekte durch das BMWK und BMDV im Rahmen eines gemeinsamen europäischen Wasserstoffprojekts (sog. Wasserstoff-IPCEI – Important Projects of Common European Interest) als Teil der Nationalen Wasserstoffstrategie gefördert (BMWK 2021). 15 dieser Projekte beschäftigen sich mit dem Thema Wasserstoffinfrastruktur (Abbildung 1).

In diesem Kapitel werden zunächst die im Projekt TransHyDE-Sys betrachteten Transporttechnologien für Wasserstoff beschrieben. Im Anschluss wird der theoretische Rahmen der Untersuchung, das technologische Innovationssystem, ein Konzept aus der Innovationssystemforschung zu nachhaltigen Transitionen, dargestellt.



Abbildung 1: Überblick über Wasserstoffprojekte in Deutschland (GRA_IPCEI_Standorte_A2_07_Bildnachweis (bmwk.de))

2.1 Transporttechnologien für grünen Wasserstoff

In TransHyDE werden die folgenden fünf Transporttechnologien für (grünen) Wasserstoff betrachtet (BMBF 2023):

1. Wasserstofftransport in Hochdruckbehältern
2. Wasserstofftransport in bestehenden Gasleitungen
3. Transport von flüssigem Wasserstoff
4. Transport von in Ammoniak gebundenem Wasserstoff
5. Wasserstofftransport mittels LOHC

Wasserstofftransport in Hochdruckbehältern

In Hochdruckbehältern oder -tanks wird Wasserstoff in gasförmiger Form gespeichert und transportiert. Weil Wasserstoffmoleküle auch durch Feststoffe hindurchdiffundieren und bei Metallen zur Versprödung führen können, sind Tanks aus speziellen Werkstoffen mit einem hohen Widerstand gegen Permeation des Gases notwendig. Die am Markt für Wasserstofftransport üblichen Druckbehälter können Wasserstoff mit einem Druck zwischen 200 bis 350 oder teilweise 500 bar standhalten; an Tanks für den Wasserstofftransport mit einem Druck bis zu 1.000 bar wird noch geforscht (Kühl 2022). Diese Behälter werden bereits in Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen sowie für den Transport von Wasserstoff auf Lkw und Schiffen genutzt. Sofern der Wasserstoff in flüssiger Form vorliegt, wird dieser nicht in Hochdruckbehältern, sondern in Isolierbehältern transportiert.

In dem TransHyDE-Projekt "Mukran" werden zwei Hochdruck-Kugelspeicher entwickelt, welche per LKW, Schiff und Zug transportiert werden können. Der Transport der Behälter mittels Lkw wird exemplarisch demonstriert (BMBF 2023).

Wasserstofftransport in bestehenden Gasleitungen

Das Ziel bei dieser Technologie ist in den meisten Fällen die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes, das bedeutet, es werden keine neuen Pipelines errichtet. Dies bringt gegenüber dem Neubau einer Infrastruktur ökonomische Vorteile und eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz (van Ackeren 2021). Für die Nutzung bestehender Erdgasleitungen besteht jedoch noch Forschungsbedarf und es müssen Normen und Sicherheitsvorschriften geschaffen werden. Aktuell wird daher im TransHyDE-Projekt "GET-H2" ein Demonstrationsumfeld um eine Versuchspipeline aufgebaut (BMBF 2023). Weitere Projekte beschäftigen sich zudem mit der Fragestellung, wie viel Prozent Wasserstoff dem Erdgas beigemischt werden kann, ohne größere Veränderungen an der Infrastruktur vornehmen zu müssen. Daneben gibt es Projekte zur Frage, wie Wasserstoff an der Abnahmestelle wieder vom Erdgas getrennt werden kann.

In dem Projekt "Wasserstoffnetz 2050" führen die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) eine detaillierte Netzplanung für ein Wasserstoffnetz für ein klimaneutrales Deutschland 2050 durch (Wasserstoffnetz 2050: für ein klimaneutrales Deutschland - FNB GAS (fnb-gas.de)). Das bedeutet, die Transportbedarfe von Wasserstoff für ein klimaneutrales Energiesystem im Jahre 2050 bzw. auch schon 2045 werden berücksichtigt.

15 von 62 der IPCEI-Projekte beschäftigen sich mit Wasserstoff-Transport.

Den größten Anteil des Netzes (11.000 der 13.300 Leitungskilometer) macht eine Umstellung bestehender Gasleitungen aus; der Neubau von Wasserstoffpipelines macht dagegen nur einen kleinen Teil aus. Auf europäischer Ebene befasst sich das Projekt "European Hydrogen Backbone" (<https://gasforclimate2050.eu/ehb/>) mit dem Aufbau einer europaweiten Wasserstoffinfrastruktur. Auch hier wird davon ausgegangen, dass den Hauptteil eine umgewidmete Erdgasinfrastruktur darstellt, welche mit gezielten Investitionen in neue Wasserstoffpipelines und Verdichterstationen kombiniert wird.

Parallel werden im TransHyDE-Verbund "Sichere Infrastruktur" die Auslegungskriterien für Transportbehälter optimiert. Mithilfe dieser neuen Erkenntnisse wird ein Röhrenspeicher konstruiert, gebaut und getestet (TransHyDE H2-Mare).

Transport von flüssigem Wasserstoff

Weil flüssiger Wasserstoff (Siedetemperatur bei Umgebungsdruck - 252,9 °C) eine ca. 800-mal größere Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff (bei Raumtemperatur) aufweist, bringt das Verflüssigen von Wasserstoff zum Transport und zur Speicherung Vorteile mit sich. Dafür werden speziell isolierte Tanks oder Speicher genutzt. Dies stellt eine etablierte Technologie dar, aber die Verflüssigung von Wasserstoff impliziert einen hohen Energieaufwand (9,5 kWh/kg_{LH₂}) (Alekseev et al. 2023). Nicht nur zur Effizienzsteigerung, auch bezüglich der Skalierung der Anlagen und positiven Wechselwirkungen mit dem weiteren Energiesystem und Anwendern besteht noch Forschungsbedarf (BMBF 2023).

In dem TransHyDE-Projekt "ApplHy!" wird untersucht, wie die Kälte des Flüssigwasserstoffs für die Industrie oder zur effizienten Stromleitung genutzt werden könnte. Dabei werden der Transport, die Speicherung und die Anwendung von flüssigem Wasserstoff (insbesondere in der Mobilität) einbezogen und u.a. eine LH₂-Pumpe und ein Speicher getestet.

Transport von in Ammoniak gebundenem Wasserstoff

Ammoniak ist in flüssiger Form bei höheren Temperaturen zu transportieren als reiner Wasserstoff, da Ammoniak bereits bei -33 Grad Celsius verflüssigt werden kann (Wasserstoff erst bei -253 Grad Celsius) (Scheuermann 2022). Flüssiges Ammoniak hat zudem eine höhere volumenbezogene Energiedichte als Wasserstoff. Die Synthese von Ammoniak aus Elektrolyse-Wasserstoff erfordert jedoch einen zusätzlichen Energieaufwand (1,72 kWh pro kg Ammoniak, Geres et al. 2019) und erzeugt damit auch zusätzliche Kosten (EWI 2021).

Zur Erzeugung von "grünem" Ammoniak, werden je drei Volumeneinheiten "grüner" Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen mit einer Volumeneinheit Stickstoff verbunden. Nach dem Transport wird der Energieträger entweder in seine Bestandteile zerlegt, wobei dann Wasserstoff gewonnen wird, oder das Ammoniak wird direkt genutzt, z.B. in Kraftwerken als Brennstoff.

In den TransHyDE-Projekten "AmmoRef" und "CAMPFIRE" wird das Potenzial von Ammoniak als Mittel für den Transport von Wasserstoff untersucht. Das TransHyDE-Projekt "AmmoRef" erforscht Verfahren für eine effiziente und kostengünstige Herauslösung des Wasserstoffs aus Ammoniak (Hoch- oder Niederdruck-Verfahren). Im Projekt "CAMPFIRE" wird ein Verfahren entwickelt, mit dem Wasserstoff in Ammoniak für den Transport gebunden und anschließend wieder ausgelöst werden kann. Zudem wird im Projekt die gesamte Transportkette für Wasserstoff auf der Basis von grünem Ammoniak demonstriert, u.a. Schiffstransport von flüssigem Ammoniak und Schiffsbetankung mit Ammoniak (BMBF 2023).

Wasserstofftransport mittels LOHC

LOHC steht für "liquid organic hydrogen carriers". Das heißt, flüssige organische Verbindungen dienen als Speichermedium für Wasserstoff. Der Vorteil ist, dass diese weder explosiv noch hochgiftig sind. Das System enthält immer eine wasserstoffarme und eine wasserstoffreiche Verbindung. Bei der Hydrierung erfolgt eine Reaktion des unbeladenen LOHC mit Wasserstoff und ein beladener Wasserstoffträger entsteht. Hierbei wird Wärme freigesetzt. Der beladene LOHC kann gelagert und transportiert werden. Bei der Dehydrierung wird der Wasserstoff wieder freigesetzt, wenn er benötigt wird. Hier muss Wärme zugeführt werden. Der Nachteil des Wasserstofftransports mit LOHC sind die benötigten Konversions- und Rekonversionsanlagen (Geißelbrecht 2021).

Das TransHyDE-Projekt "Helgoland" hat das Ziel, eine modellhafte Transportkette zwischen Helgoland und dem Hamburger Hafen zu entwickeln. Dabei wird davon ausgegangen, dass auf der Insel Helgoland Wasserstoff, der an Offshore-Windenergieanlagen erzeugt wurde, an die organische Trägerflüssigkeit gebunden wird. In der Folge soll das LOHC in den Hamburger Hafen transportiert werden, wo der Wasserstoff in einer Dehydrieranlage vom LOHC gelöst wird (BMBF 2023).

Innovations- und Transitionsforschung als Grundlage zur Identifikation und Analyse aktiver Akteure im Bereich Transport von grünem Wasserstoff.

2.2 Technologisches Innovationssystem

Für die Identifikation und Analyse aktiver Akteure im Bereich Transport von grünem Wasserstoff wird ein Ansatz aus dem Bereich der Innovations- und Transitionsforschung genutzt.

Innovationen und ihre Marktentwicklung haben eine gesellschaftliche Komponente, welche im Konzept des sog. sozio-technischen Systems abgebildet wird. Solch ein System ist eine „miteinander verbundene Kombination aus Technologien, Infrastrukturen, Organisationen, Märkten, Regelungen und Nutzungspraktiken, die gemeinsam gesellschaftliche Funktionen, wie beispielsweise persönliche Mobilität, liefern“ (Geels et al. 2017, S. 1242). Die Transitionsforschung beschäftigt sich mit weitreichenden Veränderungen in diesen sozio-technischen Systemen. Ein relevanter Teil der Forschung fokussiert sich auf nachhaltige Transitionen, so genannte „sustainability transitions“, d.h. auf die radikalen Systemveränderungen, die in Verbindung mit politischen Nachhaltigkeitszielen ausgelöst werden. Durch die weitreichenden sozio-technischen Veränderungen, die eine Systemumstellung auf Wasserstoff mit sich zieht, stellt diese Forschungsrichtung eine passende Perspektive für den vorliegenden Anwendungsfall dar.

Einen wichtigen Ansatz in dieser Literatur stellt das „technologische Innovationssystem“ (TIS) dar. Ein technologisches Innovationssystem kann wie folgt definiert werden: "[...] the set of actors and rules that influence the speed and direction of technological change in a specific technological area." (Hekkert et al. 2011, S. 3). Hierbei wird eine (statische) Analyse von strukturellen Komponenten oder Teilsystemen eines TIS – Akteure, Netzwerke und Institutionen – mit einer (dynamischen) funktionellen Analyse der Entwicklung eines TIS kombiniert (Bergek et al. 2008; Markard und Truffer 2008). Mit einer solchen Analyse soll die Art und die Geschwindigkeit technologischen Wandels erklärt werden (Hekkert et al. 2011). TIS-Analysen können so Aufschluss darüber geben, welche Entwicklungschancen es für neue Technologien gibt und wo mögliche Barrieren für die Entwicklung liegen können.

In der vorliegenden Analyse liegt der Fokus zunächst auf der Identifizierung der ersten strukturellen Komponente, der Akteure. Diese kann perspektivisch durch weitere Forschung um eine funktionelle Analyse ergänzt werden, bspw. zu Prozessen der Wissensentwicklung, dem Umfang von Industrieaktivitäten für eine Marktentwicklung oder Legitimations- und Unterstützungsdynamiken. Die einzelnen Teilsysteme im Bereich der Akteure des TIS lassen sich weiter untergliedern. So unterscheidet ein von Hekkert et al. (2011) entwickelter Ansatz auf der Akteursseite beispielsweise die Kategorien Angebot, Nachfrage, Forschung und Bildung, Politik und Institutionen sowie unterstützende Organisationen wie Kapitalgeber und spezifische Netzwerke.

3

Methode

Um die Frage zu beantworten, welche Akteure im Bereich Transport von grünem Wasserstoff in Deutschland aktiv sind, wurden drei Arbeitsschritte durchgeführt: (1) Akteursidentifikation, (2) Akteurskategorisierung und (3) Akteursmapping (Abbildung 2).

Ein Akteur wird verstanden als eine Organisation, also bspw. ein bestimmtes Unternehmen (Bsp. BASF) oder ein bestimmter Verein (Bsp. HYPOS e.V.). Damit werden sowohl private als auch öffentliche Akteure betrachtet sowie Akteure, die Technologien entwickeln oder sie nutzen (Hekkert et al. 2011). Ein Akteurstyp stellt eine Abstraktion einzelner Akteure zu bestimmten Typen, Bsp. Energieversorger, Bundesministerium oder Eisenbahnkonzern, dar. Die Zusammenfassung zu Akteurstypen erlaubt eine vereinfachte grafische Darstellung der Akteurslandschaft.

Im Folgenden werden die in den drei Arbeitsschritten verwendeten Methoden beschrieben.

3.1 Akteursidentifikation: Google-Suche und Medienanalyse

Zunächst erfolgte eine Google-Suche nach relevanten Projekten im

Bereich Wasserstofftransport und -speicherung. Diese diente dazu, einen ersten Überblick über das Thema zu erhalten und erste Akteure zu identifizieren. Zusätzlich wurde mit diesem Vorgehen eine erste Liste der Suchbegriffe für die nachfolgende Medienanalyse geprüft und ergänzt.²

Im Anschluss wurde eine Medienanalyse mithilfe der Zeitungsdatenbank Lexis Nexis durchgeführt. Für den Zeitraum vom 14.02.2020 bis 14.02.2022 wurden die folgenden acht großen Zeitungen in Deutschland (Leitmedien) durchsucht:

- FAZ, inkl. FAZ.net
- Süddeutsche Zeitung, inkl. Süddeutsche.de
- Die Welt, inkl. Welt am Sonntag
- Handelsblatt, inkl. Handelsblatt online
- Taz (Die Tageszeitung)
- Die Zeit
- Der Spiegel, inkl. Spiegel online
- Bild: Bild Bund, Bild am Sonntag, Regionalausgaben

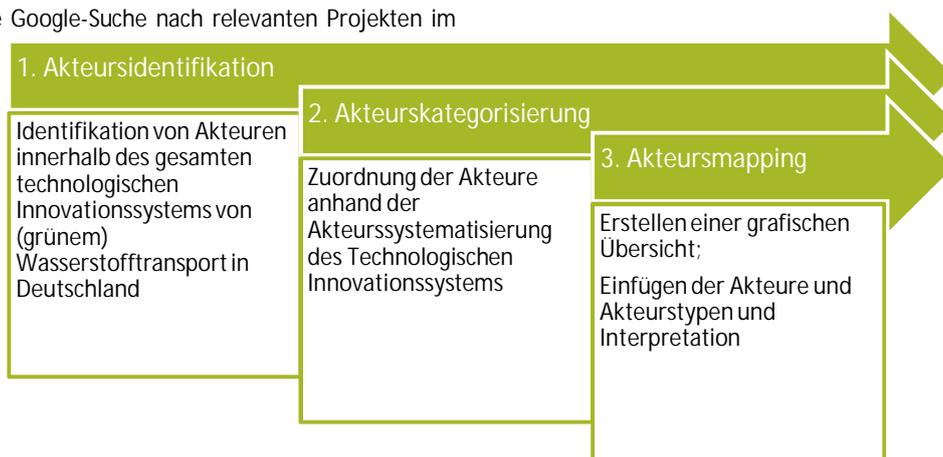


Abbildung 2: Vorgehen und Ziele der einzelnen Arbeitsschritte

²: Projektpartner im Projekt TransHyDE, die im Rahmen dieser Recherche nicht identifiziert wurden, wurden in der Analyse ausgeklammert, aber in einer Akteurstabelle (s. Anhang A.2) entsprechend ergänzt.

Hierfür wurden die folgenden Schlagworte wie folgt verknüpft: (grüner! ODER saubere!) UND (Wasserstoff ODER "H2") UND (Transport ODER Infrastruktur).³

Die gefundenen Zeitungsartikel wurden auf Dopplungen und nicht relevante Artikel geprüft. Die relevanten Artikel wurden schließlich in eine Tabelle überführt.

Abschließend wurden alle Akteure aus der Google-Recherche und der Medienanalyse zusammengeführt. Hierzu wurde eine Akteurstabelle erstellt. Im Rahmen der Zusammenführung erfolgte eine Bereinigung (Ausschluss von Dopplungen und irrelevanten Akteuren) und eine Zuordnung der Einzelakteure zu einem Akteurstyp bzw. einer Abstraktionsgruppe. Alle Einzelakteure wurden außerdem einem Akteurstyp zugeordnet.

Die Datenbasis stellen 129 Akteure dar.

3.2 Akteurskategorisierung

Ziel dieses Arbeitsschritts war es, mit Hilfe eines Kategoriensystems einen Akteursüberblick zu erstellen. Zur Kategorisierung der Akteure wurde die Akteurssystematisierung von Hekkert und Kollegen für TIS (Hekkert et al. 2011) weiterentwickelt, um sie für die vorliegende Innovation (Wasserstofftransporttechnologien) nutzen zu können (Abbildung 3).

Die Hauptachse des Kategoriensystems stellen die Kategorien *Forschung und Beratung*, sowie das *Angebots- und Nachfragesystem* dar. Im Angebotssystem erfolgte eine Differenzierung in *Produktion* und *Transport*. In die *Produktionsphase* wurden Akteure im Bereich Wasserstoffherstellung einsortiert. Innerhalb der *Transportphase* wurde die *Verteilung, Handel und Infrastruktur* für Wasserstoff beschrieben. Dabei wurde zwischen sechs Technologien unterschieden: *Bestehende Gasleitungen und -terminals, LOHC, Ammoniak* und *Hochdruckbehälter, neue Wasserstoffpipelines* und *Flüssigtransport*. Hierfür wurden die fünf Wasserstofftransporttechnologien aus

TransHyDE verwendet und um eine weitere, "neue Wasserstoffpipelines" erweitert. Diese Erweiterung erfolgte auf Basis der Recherche zu relevanten Akteuren. Das *Nachfragesystem* zu Wasserstoff(transport) wurde in die Verbrauchssektoren *Energiewirtschaft, Gebäude, Industrie* und *Verkehr* unterteilt.

Über der Hauptachse ist die politische Dimension dargestellt (*Staat*), die durch die *Legislative* (Fördermechanismen und Regulierungen) Rahmenbedingungen setzt. Die Umsetzung dieser erfolgt durch die *Exekutive*. Darunter fällt die *Gubernative* als Regierungsgewalt und die *Administrative*, die öffentliche Verwaltung. Für diese Studie wurde jedoch nur die Oberkategorie der Exekutive genutzt. Die jeweiligen Dimensionen sind jeweils auf verschiedenen Ebenen verankert (international, national, regional und kommunal). Die staatliche Gewaltenteilung umfasst außerdem die *Judikative* als unabhängigen rechtssprechenden Akteur. Flankiert werden diese Subsysteme durch *unterstützende Organisationen* (*Finanzierung und Kapital*, z.B. Investoren; sowie *Netzwerke und Industrieverbände*, z. B. Branchenverbände) und *Beeinflussende* (z.B. Bürgerinnen und Bürger, Medien oder NGOs).

Für die Akteurskategorisierung wurden alle in Arbeitsschritt 1 identifizierten Einzelakteure und Akteurstypen in die Kategorie eingetragen, die ihrer hauptsächlichen Aktivität im sozio-technischen System um Wasserstofftransport entspricht. Diese Information zur Art der Aktivität im Zusammenhang mit Wasserstofftransport wurde den analysierten Zeitungsartikeln und Publikationen entnommen. Akteure mit Aktivitäten in mehreren Kategorien wurden entsprechend mehrfach zugeordnet und andersfarbig kenntlich gemacht.

Die ermittelten Einzelakteure sowie die Akteurstypen wurden zunächst in einer Tabelle einer, zwei oder drei Kategorien des Systems in Abbildung 3 zugeordnet. Eine Kategorie ist bspw. „Forschung und Beratung“ oder das „Angebotssystem“.

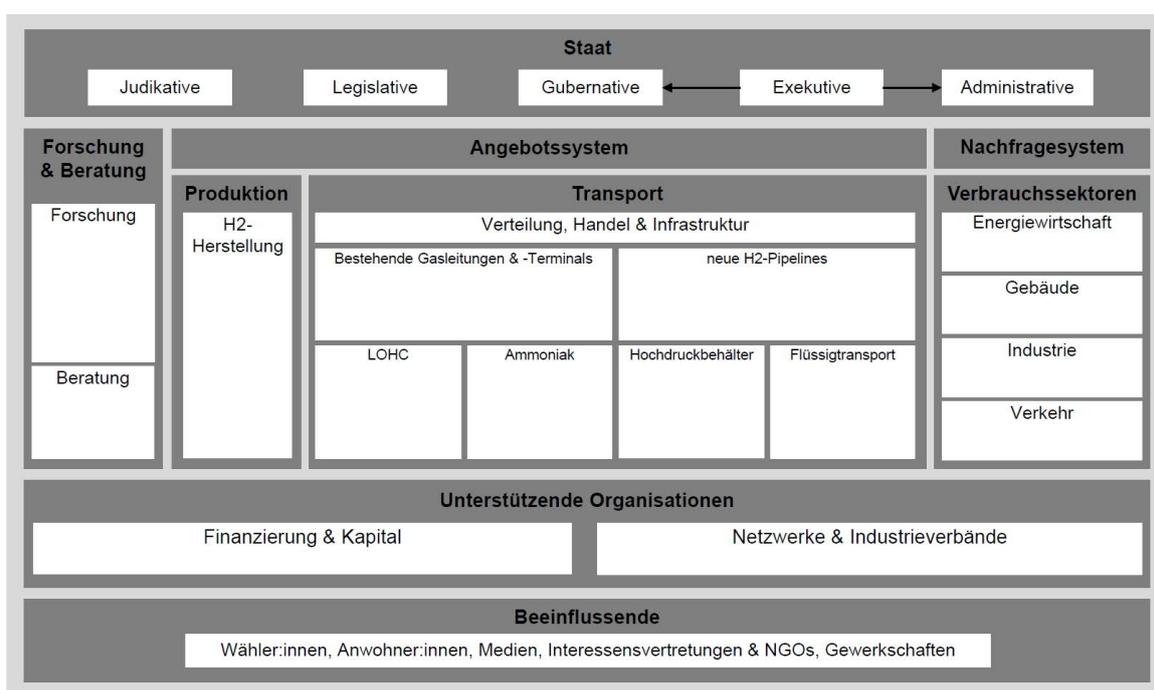


Abbildung 3: System für die Akteurskategorisierung, weiterentwickelt basierend auf Hekkert et al. (2011)

³: Das Ausrufezeichen bedeutet, dass verschiedene Wortendungen berücksichtigt werden, sodass bspw. neben "grüner" auch "grüne" gefunden wird.

4

Ergebnisse: Akteure im technologischen Innovationssystem zum Transport von (grünem) Wasserstoff

Im Folgenden werden zunächst die identifizierten Einzelakteure und im Anschluss die Akteurstypen des TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff beschrieben.

4.1 Akteure im TIS zu Transport von (grünem) Wasserstoff

Abbildung 4 zeigt die identifizierten einzelnen Akteure des TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff. Wie die Legende im unteren Teil der Abbildung zeigt, sind Akteure entweder einer oder mehreren Kategorien zugeordnet. Die Namen der einzelnen Akteure inkl. der Zuordnung zu Akteurstypen und Kategorien sind in Tabelle A.1 in Anhang A.1 enthalten.

Im Überblick wird deutlich, dass sich die Akteure in einigen Kategorien konzentrieren, während andere Kategorien leer oder nur wenig gefüllt sind. Die dominierenden Kategorien sind die Unterkategorie *Verkehr* in der Kategorie *Nachfragesystem* (22 Akteure),

die Kategorie *Produktion - H₂-Herstellung* (21 Akteure) im *Angebotsystem*, die Unterkategorie *Forschung* in der Kategorie *Forschung & Beratung* (17 Akteure), sowie die Unterkategorie *Netzwerke & Industrieverbände* in der Kategorie *unterstützende Organisationen* (14 Akteure).

Bei einer detaillierteren Betrachtung der einzelnen Teilsysteme im Schema ist ersichtlich, dass die meisten in der Kategorie *Forschung* identifizierten Akteure nur in dieser Kategorie aktiv sind.

Im Bereich *Produktion von (grünem) Wasserstoff* sind relativ viele Akteure zu verzeichnen, von denen knapp die Hälfte in mehreren Kategorien aktiv ist. Hier sind bspw. die Firmen RWE, Uniper, Linde, Siemens Energy oder AquaVentus e.V. zu nennen. Diese Firmen beschäftigen sich neben der Produktion von Wasserstoff u.a. auch mit dem Transport von Wasserstoff oder sind im Bereich Nachfrage aktiv in der Kategorie *Industrie*.

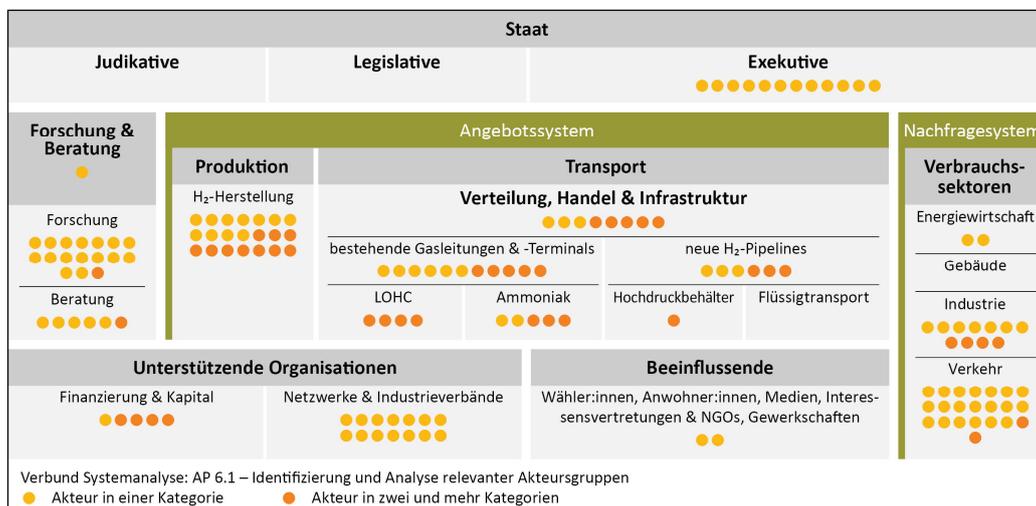


Abbildung 4: Identifizierte Einzelakteure im TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff



Abbildung 6: Identifizierte Akteurstypen in Forschung & Beratung

Dies weist darauf hin, dass die Akteurslandschaft zum Transport von (grünem) Wasserstoff aus vielen verschiedenen Arten von Organisationen besteht, die sich um einen Platz in diesem neuen System bemühen. Eine Ausnahme stellen die Bereiche *Forschung* und *Netzwerke & Industrieverbände* – hier sind weniger unterschiedliche Akteurstypen aktiv. Weitere Kategorien ohne oder mit sehr wenigen Akteurstypen sind *Beeinflussende*, die *Judikative* und *Legislative* in der Kategorie *Staat* sowie die Kategorie *Gebäude* im *Nachfragesystem*.

Insgesamt zeigt sich insbesondere in der Industrie, d.h. im Angebotsystem, eine hohe Anzahl von Akteurstypen, was auf eine hohe Ausdifferenzierung der Wasserstofftransportwirtschaft hinweist.

4.2.1 Akteurstypen in Forschung und Beratung

Abbildung 6 zeigt die identifizierten Akteurstypen in der Kategorie *Forschung und Beratung*. Die Zahlen in Klammern veranschaulichen die Anzahl der identifizierten Einzelakteure hinter jedem Akteurstyp. Die meisten in der Kategorie *Forschung* identifizierten Akteurstypen sind nur in dieser Kategorie aktiv. Hier sind, ihrer Kernaktivität entsprechend, vor allem Forschungsinstitute mit ihrem größeren Anwendungsbezug vertreten. Aber auch einige Universitäten finden sich in dieser Kategorie. Viele dieser Organisationen führen Studien und Projekte mit Bezug zum Wasserstofftransport durch und/oder

Vertreter:innen wurden durch die Presse zum Thema interviewt. Ein Forschungsinstitut, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ist zusätzlich in der Kategorie *Nachfragesystem – Verkehr* tätig, denn dieses Institut führt sowohl Studien zum Thema Wasserstoff(transport) durch, ist gleichzeitig aber auch einer der größten Nachfrager von Wasserstoff in Europa.

Im Bereich *Beratung* sind ebenfalls die meisten Akteurstypen in nur einer Kategorie aktiv, d.h. sie sind in einem Feld tätig, das ihrer Kernaktivität entspricht. Dies trifft für die Unternehmensberatungen und zwei Beratungsgremien zu. Ein Gastechnikentwickler (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH) beschäftigt sich neben der Beratung auch mit Verteilung, Handel & Infrastruktur von Wasserstoff (Entwicklung einer röhrenförmigen Kohlenstoff-Membran, die Wasserstoff und Erdgas voneinander trennen, zum Transport von Wasserstoff im Erdgasnetz).

4.2.2 Akteurstypen in der Produktion

Im Bereich *Produktion von (grünem) Wasserstoff* sind relativ viele Akteurstypen zu verzeichnen, was auch der recht hohen Anzahl der identifizierten Einzelakteure entspricht. Abbildung 7 zeigt, dass unter den 16 verschiedenen Akteurstypen im Bereich Produktion von (grünem) Wasserstoff am häufigsten Energieversorger vertreten sind.⁵

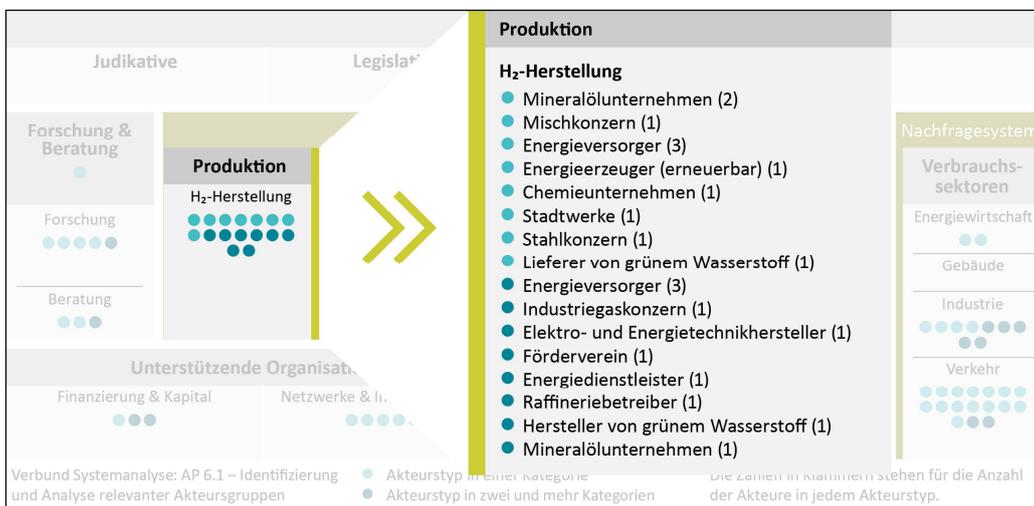


Abbildung 7: Identifizierte Akteurstypen in der Produktion von (grünem) Wasserstoff

⁵: Auch in dieser Abbildung zeigen die Zahlen in Klammern die Anzahl der Einzelakteure pro Akteurstypen.

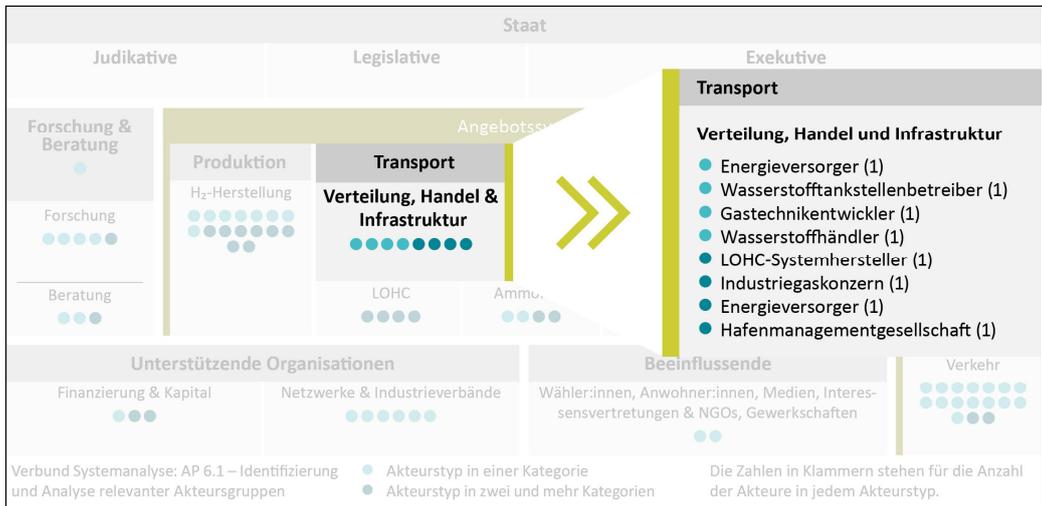


Abbildung 8: Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: Verteilung, Handel und Infrastruktur

Die Hälfte der Akteurstypen sind in mehreren Kategorien aktiv. Dies stellen bspw. Energieversorger, Industriegaskonzerne, Energiedienstleister oder Raffineriebetreiber dar, die Elektrolyseure und Demonstrationsanlagen zur Produktion von grünem Wasserstoff errichten. Diese Firmen beschäftigen sich neben der Produktion von Wasserstoff u.a. auch mit dem Transport von Wasserstoff oder sind im Bereich Nachfrage aktiv in der Kategorie Industrie, indem sie bspw. den selbst erzeugten Wasserstoff in ihrer Produktion nutzen. Dies zeigt, dass viele der Akteure entlang der Wertschöpfungskette von Wasserstoff aktiv sind und sich nicht auf einen Bereich beschränken.

4.2.3 Akteurstypen im Transport

Abbildung 8 zeigt die Akteurstypen im *Transport von (grünem) Wasserstoff* und der Oberkategorie *Verteilung, Handel und Infrastruktur*. Hier wurden die Akteurstypen Energieversorger, Wasserstoffhändler oder -tankstellenbetreiber, Gastechnikentwickler und weitere gefunden. Aktivitätsbereiche dieser Akteurstypen sind bspw. der Bau von Wasserstoff- oder Erdgasspeichern, die auf Wasserstoff umgerüstet werden, oder die Entwicklung von Membranen zum Trennen von Wasserstoff und Erdgas als Vorbereitung für den Wasserstofftransport.

Die Hälfte der Akteurstypen ist in mehr als einer Kategorie aktiv, wie bspw. zusätzlich im Bereich Beratung, Wasserstoffherstellung, Ver-

kehr oder im Bereich der Transporttechnologie LOHC.

In Abbildung 9 sind die gefundenen Akteurstypen bei den Transporttechnologien *bestehende Gasleitungen und -Terminals* sowie *neue Wasserstoffpipelines* dargestellt.

Es zeigt sich, dass Fernleitungsnetzbetreiber sowohl bei *bestehenden Gasleitungen* als auch bei *neuen H₂-Pipelines* aktiv sind; Energieversorger dagegen nur bei bestehenden Gasleitungen. Bei bestehenden Gasleitungen sind u.a. auch Erdgasförderer oder Energiedienstleister aktiv. Neue Wasserstoffpipelines werden von Industriegaskonzernen, Rohrleitungsbauern und einem Förderverein vorangetrieben.

Sowohl bei bestehenden Gasleitungen und -Terminals als auch bei neuen Wasserstoffpipelines sind mehr Akteurstypen vertreten, die nur in dieser Kategorie aktiv sind. Das bedeutet, hier sind vor allem Akteure in ihren Kernaktivitäten aktiv. Akteurstypen in mehr als einer Kategorie (neben den Fernleitungsnetzbetreibern) sind zusätzlich im Bereich weiterer Transporttechnologien, wie Ammoniak oder LOHC aktiv, wie z.B. der Energieversorger E.ON. Zwei Akteurstypen sind im Bereich bestehende Gasleitungen aktiv und zusätzlich im Thema *Nachfrage - Industrie* oder *Wasserstoffherstellung*.

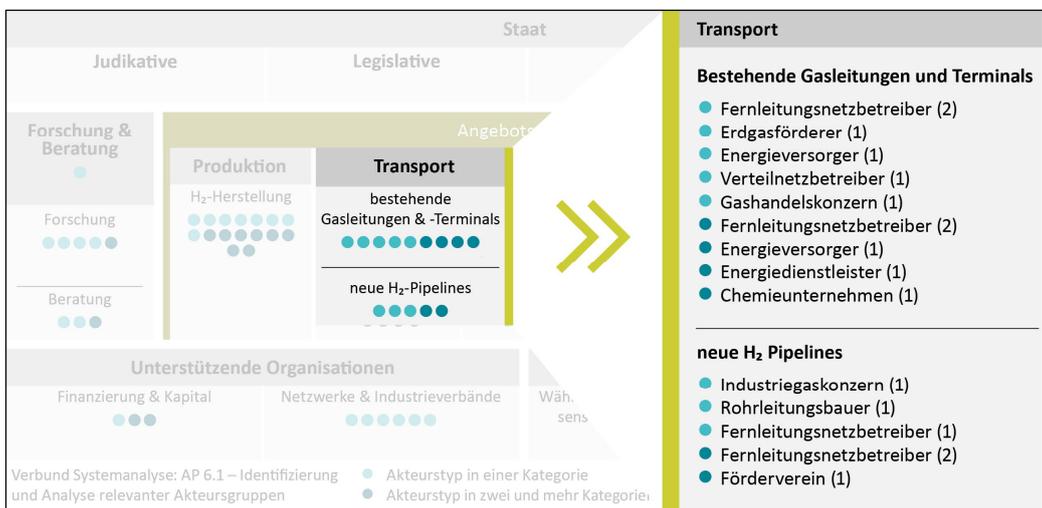


Abbildung 9: Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: bestehende Gasleitungen und neue H₂-Pipelines

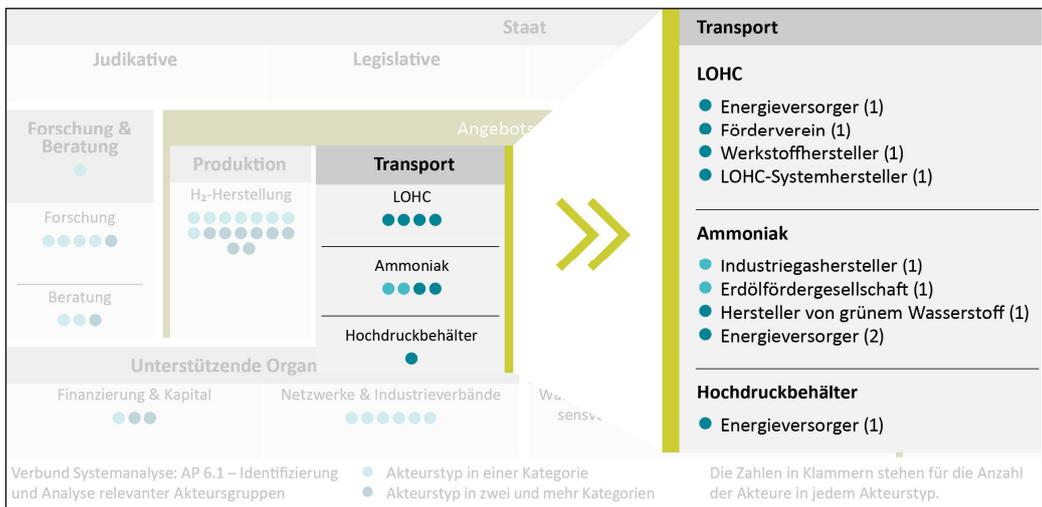


Abbildung 10: Identifizierte Akteurstypen im Transport von (grünem) Wasserstoff: LOHC, Ammoniak und Hochdruckbehälter

Abbildung 10 zeigt die identifizierten Akteurstypen bei den Wasserstofftransporttechnologien LOHC, Ammoniak und Hochdruckbehälter. Auch hier zeigt sich, dass Energieversorger in allen drei Technologien aktiv sind. LOHC wird nur von Akteurstypen vorangetrieben, die in mehr als einer Kategorie aktiv sind. Bei einem LOHC-Systemhersteller stellt dies zusätzlich Verteilung, Handel und Infrastruktur dar; ein anderer Akteurstyp (Förderverein) ist zusätzlich im Bereich Wasserstoffherstellung aktiv.

4.2.4 Akteurstypen in den Verbrauchssektoren

In Abbildung 11 sind die gefundenen Akteurstypen in den Verbrauchssektoren *Energiewirtschaft*, *(Gebäude)*, *Industrie* und *Verkehr* dargestellt.

Hier ist ersichtlich, dass die meisten im *Verkehrsbereich* aktiven Akteurstypen in nur einer Kategorie aktiv sind, wie bspw. Flugzeug-, Nutzfahrzeug-, Lkw- oder Automobilhersteller, aber auch Logistikunternehmen, Verkehrsunternehmen oder Motorenhersteller. Diese Akteurstypen stellen Pkw, Lkw, Busse, Schiffe, Züge oder Flugzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzellenantrieb her. Das heißt, Verkehr ist aktuell einer der Hauptnachfragesektoren für grünen Wasserstoff, in dem Akteure sich rund um das Thema Wasserstofftransport einbringen. In der *Industrie* zeigt sich insbesondere die Stahlerzeugung als wichtiger Nachfrager von Wasserstoff und geeigneten Transportopti-

onen. Aber auch bspw. die Nutzung von Wasserstoff in Raffinerien oder für die Kupferproduktion wurden hier als wichtige Nachfragebereiche ermittelt. Hier sind ebenfalls einige Akteurstypen zu verzeichnen, die teils in mehreren Kategorien aktiv sind. Dies stellen bspw. Mineralöl- und Chemieunternehmen sowie Raffineriebetreiber, (zusätzlich in den Kategorien H₂-Herstellung und bestehende Gasleitungen & Terminals aktiv) sowie Werkstoffhersteller (zusätzlich in der Kategorie Transport - LOHC aktiv) dar.

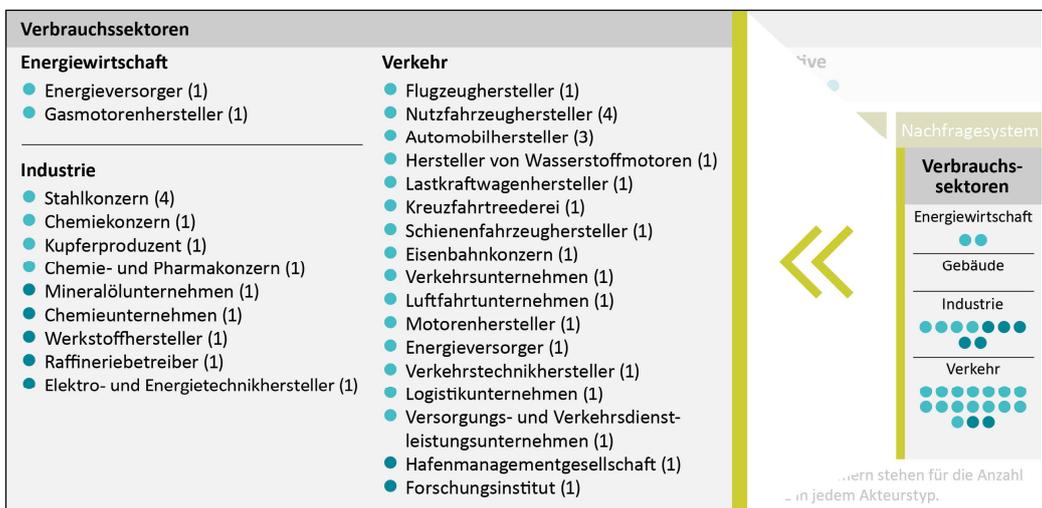


Abbildung 11: Identifizierte Akteurstypen in den Verbrauchssektoren von (grünem) Wasserstoff

5

Diskussion und Schlussfolgerungen

5.1 Zusammenfassung und inhaltliche Diskussion

Die Ermittlung der zurzeit schon aktiven oder bereits kommunizierenden Akteure im sozio-technischen System rund um den Transport von (grünem) Wasserstoff zeigt eine Vielzahl von Akteuren und Akteurstypen, insbesondere in den Kategorien Forschung & Beratung, Wasserstoffproduktion und im Verkehr als Teil des Nachfragesystems. Außerdem hat sich gezeigt, dass es bereits viele Netzwerke & Industrieverbände zum Thema Wasserstofftransport gibt. Der Verkehrssektor wurde demnach als einer der Hauptnachfragesektoren für grünen Wasserstoff identifiziert; häufig fallen darunter Lkw, aber teilweise auch Schiffe. Akteure aus diesem Bereich beteiligen sich also bereits an der Diskussion rund um den Transport von Wasserstoff und damit an der zukünftigen Sicherstellung ihres Bedarfs, unter der Annahme, dass dieser nicht vollständig lokal abgedeckt werden kann. Akteure im Bereich der Nachfrage nach Wasserstoff wurden – wie alle im Rahmen dieses Working Papers identifizierten Akteure – aus Medienberichten ermittelt, die sich speziell mit dem Transport von Wasserstoff beschäftigten.

Im Bereich Produktion von (grünem) Wasserstoff sind die meisten Akteure und Akteurstypen im Angebotssystem zu verzeichnen. Rund die Hälfte ist außerdem in mehreren Kategorien aktiv. Diese Akteure beschäftigen sich neben der Produktion von Wasserstoff u.a. auch selbst mit dem Transport von Wasserstoff oder sind im Bereich Nachfrage in der Kategorie Industrie aktiv.

Die im Vergleich zu weiteren Kategorien große Zahl von Akteuren bzw. Akteurstypen in den Kategorien Forschung und Beratung lässt sich darauf zurückführen, dass es sich beim Transport von Wasserstoff um neue Technologien bzw. einen neuen Anwendungsfall für einen neuen Energieträger handelt. Die in dieser Kategorie identifizierten Akteure sind in den meisten Fällen nur in dieser Kategorie

aktiv, d.h. in ihren Kernaktivitäten der sowohl öffentlich als auch industrie-geförderten Forschung.

Wenig vertretene Kategorien sind Beeinflussende, die Judikative und Legislative. Das bedeutet, Wasserstofftransporttechnologien werden bisher fast ausschließlich durch direkt an den Technologien, deren Entwicklung und Nutzung beteiligte Akteure diskutiert und noch kaum in der breiten Öffentlichkeit. Zudem zeigt das Nichtvorkommen von Akteuren in der Kategorie Judikative und Legislative die frühe Phase, in der sich diese Technologien befinden – d.h. es existieren bisher kaum Anlagen und Infrastrukturen, die bspw. Widerstände vor Ort hervorrufen könnten.

Einige (Industrie-)Akteure sind in mehreren Kategorien entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff, d.h. von der Produktion über den Transport bis zur Nachfrage, aktiv. So sind einige Akteure sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite von Wasserstoff aktiv. Dies könnte dadurch motiviert sein, die Verfügbarkeit von Wasserstoff vor Ort, d.h. dort, wo der Wasserstoff benötigt und nachgefragt wird, durch die eigene Involvierung auf der Angebots- und Transportseite sicherstellen zu wollen.

In der Kategorie Angebotssystem - Transport wurden viele Akteure und Akteurstypen insbesondere bei der Technologie der bestehenden Gasleitungen identifiziert. Dies entspricht den vielen laufenden Projekten zur Zukunft dieser Infrastruktur und weist auf die aktuelle gesellschaftliche Debatte zur potenziellen Weiternutzung bereits bestehender Gasleitungen hin. Akteure, die die Gasleitungen bisher errichtet und betrieben haben, haben ein großes Interesse an der Umstellung des Leitungsinhalts auf klimaneutrale Energieträger.

Einige der aktiven Akteure im Bereich Wasserstofftransport sind zusätzlich zu ihren Kernaktivitäten in weiteren Bereichen aktiv, insbesondere in anderen Transporttechnologien. Hier gibt es sowohl Akteure, die in einer etablierten (bestehende Gasnetze) und in einer neuen Transporttechnologie (bspw. Ammoniak oder LOHC) aktiv sind als auch Akteure, die in sich verschiedenen der neuen Transporttechnologien engagieren. Diese Doppelfunktionen der Akteure, insbesondere der Industrieakteure, könnten in dem frühen Stadium begründet sein, in dem sich das Innovationssystem für Wasserstofftransport aktuell befindet. In einem solchen frühen Stadium sind viele der Akteure noch in ihren bisherigen Funktionen tätig, sehen aber auch Chancen in neuen Technologien und Geschäftsmodellen, die es zu etablieren gilt. Akteure, die sowohl bei der Technologie der bestehenden Gasleitungen als auch bei neuen H₂-Pipelines aktiv sind, könnten damit ihre bestehenden Kompetenzen auf einen neuen, aber verwandten Bereich übertragen wollen.

Energieversorger haben sich als eine zentrale Akteursgruppe in der Wasserstofftransportwirtschaft herausgestellt. Sie sind in fast allen Transporttechnologien aktiv, mit Ausnahme der neuen Wasserstoffpipelines. Ein Motiv für dieses Aktivitätsmuster kann der Wunsch sein, sich für die Zukunft technologisch breiter aufzustellen, um für verschiedene Szenarien gerüstet zu sein. Dass Energieversorger noch nicht im Bereich neue Wasserstoffpipelines aktiv sind, kann regulatorische Gründe (bspw. Finanzierungs- oder Betreiberfrager) haben (Bundesnetzagentur 2023).

Ein Vergleich zwischen der Verteilung der Einzelakteure und der Akteurstypen im TIS zum Transport von (grünem) Wasserstoff zeigt eine relativ hohe Übereinstimmung. Mehr Einzelakteure in einem Bereich bedeuten in vielen Fällen folglich auch mehr verschiedene Akteurstypen. Dies trifft insbesondere für Industrieakteure zu und deutet auf eine hohe Ausdifferenzierung der Wasserstofftransportwirtschaft hin.

5.2 Methodische Diskussion, Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Für die Identifizierung der Akteure wurde eine Medien- und Publikationsanalyse genutzt. Damit kann zügig umfangreiches Datenmaterial zur Aktivität von Akteuren gesammelt und ausgewertet werden. Gleichzeitig muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass möglicherweise nicht alle bereits aktiven Akteure dadurch identifiziert werden können, falls diese medial oder in wissenschaftlichen Veröffentlichungen (noch) nicht erscheinen. So könnte durch die Medienanalyse die Industrie- und Forschungsperspektive stärker repräsentiert sein, wohingegen die Perspektiven der breiten Bevölkerung, der Zivilgesellschaft und/oder politischen Akteure und damit ggf. auch kritischere Stimmen, unterrepräsentiert sein könnten. In diesem Working Paper wurde ein ausschließlich beschreibender struktureller Ansatz rund um das Akteurssystem zum Transport von (grünem) Wasserstoff gewählt. Damit ist ein systematischer Überblick über die Akteure, die in diesem TIS aktiv sind, möglich. Um eine Einschätzung der Entwicklung des sozio-technischen Systems rund um den Transport von Wasserstoff zu ermöglichen, kann in weiteren Arbeiten eine Einordnung der Akteure

Wasserstofftransport
kommt eine bedeutende
Rolle zur Vernetzung von
Bedarf und Produktion
zu.

in Funktionen der verschiedenen Marktphasen vorgenommen werden. Damit ist es möglich, zu analysieren, ob die gefundene Akteurslandschaft in Anbetracht der politischen Ziele ausreicht bzw. passend ist oder ob diese Barrieren für eine weitere Marktentwicklung aufweist (Hekkert et al. 2011). Um zusätzlich die Dynamik eines solchen Systems noch besser abbilden zu können, könnten weiterhin verschiedene Entwicklungsphasen analytisch begleitet und verglichen werden. Hier könnte auch ein Vergleich mit der Entwicklung ähnlicher Innovationen in der Vergangenheit einen analytischen Mehrwert bringen sowie eine Analyse aller TIS-Funktionen im Zeitverlauf.

5.3 Fazit und Ausblick

Für grünen Wasserstoff kann eine große Kluft zwischen Bedarf und Produktion festgestellt werden, denn die weltweit installierte erneuerbare Stromproduktion ist aktuell noch begrenzt, genau wie die Elektrolyseleistung. Auch die Transportkapazitäten für Wasserstoff sind für den zukünftigen Bedarf noch nicht ausgelegt (IEA 2021). Das bedeutet, dem Wasserstofftransport wird in Zukunft eine bedeutende Rolle zukommen. Die hier durchgeführte Analyse konnte zeigen, dass sich in Deutschland viele Industrieakteure, vor allem aus dem Bereich der Energieerzeugung, aber auch weitere Akteursgruppen, in den verschiedenen Technologieoptionen für den Transport von Wasserstoff positionieren und Perspektiven und Interessen aus ihren bisherigen Kernaktivitäten mit in das neue System einbringen.

5.4 Danksagung

Die hier dargestellten Ergebnisse sind im Rahmen des Teilvorhabens "TransHyDE-Sys - Systemanalyse zu Transportlösungen für grünen Wasserstoff" entstanden, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

A.1

Anhang

Tabelle A.1: Einzelakteure und Akteurstypen, die im Transport von (grünem) Wasserstoff aktiv sind

Akteur	TIS-Kategorie 1	TIS-Kategorie 2	TIS-Kategorie 3	Akteurstyp
Agora Energiewende	Forschung			Denkfabrik
Aida	Verkehr			Kreuzfahrtreederei
Air Liquide	Bau von H2-Pipelines			Industriegaskonzern
Air Products & Chemicals	Ammoniak			Industriegashersteller
Airbus	Verkehr			Flugzeughersteller
Alstom	Verkehr			Schienefahrzeughersteller
AquaVentus e.V.	H2-Herstellung	LOHC	neue H2-Pipelines	Förderverein
Arcelor Mittal	Industrie			Stahlkonzern
Aurubis	Industrie			Kupferproduzent
Avacon	Bestehende Gasleitungen			Energieversorger
BASF	Industrie			Chemiekonzern
Bayer	Industrie			Chemie- und Pharmakonzern
Bayernoil	H2-Herstellung			Mineralölunternehmen
BMW	Verkehr			Automobilhersteller
BP	Industrie	H2-Herstellung		Mineralölunternehmen
Bremenports	Verkehr	Verteilung, Handel & Infrastruktur		Hafenmanagementgesellschaft
Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung	Finanzierung und Kapital			Wirtschaftsförderungsgesellschaft
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	Administrative			Bundesamt
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	Forschung			Bundesanstalt
Bundesministerium für Digitales und Verkehr	Finanzierung und Kapital	Administrative		Bundesministerium
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Finanzierung und Kapital	Administrative		Bundesministerium
Bundesministerium für Bildung und Forschung	Finanzierung und Kapital	Administrative		Bundesministerium
Bundesnetzagentur	Administrative			Bundes(ober)behörde
Bundesregierung	Gubernative			Bundesregierung

Akteur	TIS-Kategorie 1	TIS-Kategorie 2	TIS-Kategorie 3	Akteurstyp
Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)	Netzwerke & Industrieverbände			Branchenverband
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft	Netzwerke & Industrieverbände			Branchenverband
Capgemini Invent	Beratung			Unternehmensberatung
Covestro	Industrie	LOHC		Werkstoffhersteller
Daimler Trucks	Verkehr			Nutzfahrzeughersteller
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH	Verteilung, Handel & Infrastruktur	Beratung		Gastechnikentwickler
Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Acatech)	Forschung/Beratung			Wissenschaftsförderung
Deutsche Bahn	Verkehr			Eisenbahnkonzern
Deutsche Energie-Argentur (Dena)	Netzwerke & Industrieverbände			Bundeseigenes Unternehmen
Deutsche Umwelthilfe	Beeinflussende			Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutzorganisation
Deutscher Industrie- und Handelskammertag (DIHK)	Netzwerke & Industrieverbände			Wirtschaftsverband
Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW)	Netzwerke & Industrieverbände			Branchenverband
Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV)	Netzwerke & Industrieverbände			Branchenverband
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Forschung	Verkehr		Forschungsinstitut
E.ON	Bestehende Gasleitungen	Ammoniak	LOHC	Energieversorger
EnBW	Energiewirtschaft			Energieversorger
Energiedienst	H2-Herstellung			Energieversorger
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln	Forschung			Forschungsinstitut
ENERTRAG	H2-Herstellung			Energieerzeuger (erneuerbar)
Engie	H2-Herstellung			Energieversorger
Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff (ECH2A)	Netzwerke & Industrieverbände			Industrieallianz
Europäische Union - Europäische Kommission	Gubernative			Staatenverbund
Evonik	Industrie	Bestehende Gasleitungen		Chemieunternehmen
EWE	Verteilung, Handel & Infrastruktur			Energieversorger
Fortescue Future Industries	Ammoniak	H2-Herstellung		Hersteller von grünem Wasserstoff
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)	Forschung			Forschungsinstitut
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)	Forschung			Forschungsinstitut
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)	Forschung			Forschungsinstitut
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES)	Forschung			Forschungsinstitut

Akteur	TIS-Kategorie 1	TIS-Kategorie 2	TIS-Kategorie 3	Akteurstyp
Friedrich Vorwerk	Bau von H2-Pipelines			Rohrleitungsbauer
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	Forschung			Universität
GASCADE Gastransport	Bestehende Gasleitungen	neue H2-Pipelines		Fernleitungsnetzbetreiber
Gasunie	neue H2-Pipelines			Fernleitungsnetzbetreiber
Gazprom	Bestehende Gasleitungen			Erdgasförderer
H&R Ölwerke Schindler	H2-Herstellung	Industrie		Raffineriebetreiber
H2 Mobility	Verteilung, Handel & Infrastruktur			Wasserstofftankstellenbetreiber
Hamburger Hochbahn	Verkehr			Verkehrsunternehmen
Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien	Forschung			Forschungsinstitut
Hino Motors	Verkehr			Nutzfahrzeughersteller
Hydrogen Council	Netzwerke & Industrieverbände			Wirtschaftsverband
Hydrogen Europe	Netzwerke & Industrieverbände			Wirtschaftsverband
Hydrogen Intermediary Network Company (HINT.CO)	Verteilung, Handel & Infrastruktur			Wasserstoffhändler
Hydrogenious LOHC Technologies	LOHC	Verteilung, Handel & Infrastruktur		LOHC-Systemhersteller
HYPOS e.V. (Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany e.V.)	Netzwerke & Industrieverbände			Netzwerk
Hyundai	Verkehr			Automobilhersteller
Ineos	H2-Herstellung			Chemieunternehmen
INNIO	Energiewirtschaft			Gasmotorenhersteller
Innovations- und Technologiezentrum Wasserstoff (ITZ)	Forschung			Forschungsinstitut
Iveco	Verkehr			Nutzfahrzeughersteller
Keyou	Verkehr			Hersteller von Wasserstoffmotoren
Land Baden-Württemberg	Finanzierung und Kapital	Gubernative		Landesregierung
Landkreis Ebersberg	Exekutive			Landkreis
Landkreis Erding	Exekutive			Landkreis
Landkreis Landshut	Exekutive			Landkreis
Landkreis München	Exekutive			Landkreis
Linde	H2-Herstellung	Verteilung, Handel & Infrastruktur		Industriegaskonzern
Lufthansa	Verkehr			Luftfahrtunternehmen
Mainzer Stadtwerke	H2-Herstellung			Stadtwerke
MAN	Verkehr			Nutzfahrzeughersteller
MAN Energy Solutions	Verkehr			Motorenhersteller
Markt Peffenhausen	Exekutive			Marktgemeinde
McKinsey	Beratung			Unternehmensberatung
MVV (Münchener Verkehrs- und Tarifverbund)	Verkehr			Energieversorger
Nationaler Wasserstoffrat	Beratung			Beratungsgremium
Netze BW	Bestehende Gasleitungen			Verteilnetzbetreiber

Akteur	TIS-Kategorie 1	TIS-Kategorie 2	TIS-Kategorie 3	Akteurstyp
Nikola	Verkehr			Lastkraftwagenhersteller
Nowega GmbH	Bestehende Gasleitungen			Fernleitungsnetzbetreiber
OGE	Bestehende Gasleitungen			Fernleitungsnetzbetreiber
Öko-Institut	Forschung			Forschungsinstitut
ONTRAS Gastransport	Bestehende Gasleitungen	neue H2-Pipelines		Fernleitungsnetzbetreiber
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	Forschung			Forschungsinstitut
Roland Berger	Beratung			Unternehmensberatung
Ruhr-Universität Bochum	Forschung			Universität
RWE	H2-Herstellung	Verteilung, Handel & Infrastruktur (Ammoniak; Speicher)		Energieversorger
Saarstahl	Industrie			Stahlkonzern
Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)	Beratung			Beratungsgremium
Salzgitter AG	Industrie			Stahlkonzern
Salzgitter Mannesmann	H2-Herstellung			Stahlkonzern
Saudi Aramco	Ammoniak			Erdölfördergesellschaft
Shell	H2-Herstellung			Mineralölunternehmen
Siemens	H2-Herstellung			Mischkonzern
Siemens Energy	H2-Herstellung	Industrie		Elektro- und Energietechnikhersteller
Siemens Mobility	Verkehr			Verkehrstechnikhersteller
Stadt Chemnitz	Exekutive			Stadt
Stadt Duisburg	Exekutive			Stadt
Stadt Hamburg	Exekutive			Stadt
Stiftung Klimaneutralität	Beeinflussende			Thinktank
ThyssenKrupp	Industrie			Stahlkonzern
Toyota	Verkehr			Automobilhersteller
Tree Energy Solutions	H2-Herstellung			Lieferer von grünem Wasserstoff
TÜV Nord				Technische Prüforganisation
Uniper	H2-Herstellung	Ammoniak		Energieversorger
Universität Bremen	Forschung			Universität
Universität Erlangen	Forschung			Universität
Vattenfall	H2-Herstellung			Energieversorger
Verband der Chemischen Industrie (VCI)	Netzwerke & Industrieverbände			Interessensverband
Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK)	Netzwerke & Industrieverbände			Interessensverband
Verband der Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA)	Netzwerke & Industrieverbände			Interessensverband
Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas	Netzwerke & Industrieverbände			Branchenverband
VNG	Bestehende Gasleitungen			Gashandelskonzern
Voigt Logistik	Verkehr			Logistikunternehmen
Westenergie	H2-Herstellung	Bestehende Gasleitungen		Energiedienstleister
Wuppertaler Stadtwerke	Verkehr			Versorgungs- und Verkehrsdienstleistungsunternehmen

Akteur	TIS-Kategorie 1	TIS-Kategorie 2	TIS-Kategorie 3	Akteurstyp
ZEAG Energie	Hochdruckbehälter	H2-Herstellung		Energieversorger
Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW)	Forschung			Forschungsinstitut

A.2

Anhang

Tabelle A.2: TransHyDE-Partner

Akteur
ADLARES GmbH
BASF SE - Public Funding Europe RC/OFP - C006
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg - Fachgebiet Energiewirtschaft
DVGW CERT GmbH
Evonik Operations GmbH - Standort Marl
Göhler GmbH & Co. KG
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg - Fachbereich Elektrotechnik
Hochschule Wismar University of Applied Sciences Technology
SCHIFFSDIESELTECHNIK KIEL GmbH
Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel - Institut für Anorganische Chemie
Clariant Produkte (Deutschland) GmbH - Katalyselabor Heufeld
cruh21 GmbH
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Dr. Ryll Lab GmbH
DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. - Technisch-wissenschaftlicher Verein
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
ELAFLEX HIBY GmbH & Co. KG
Endress+Hauser Process Solutions (Deutschland) GmbH
Energie Südbayern GmbH
Energy Systems Analysis Associates - ESA2 GmbH
Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.
Exentis Tooling GmbH
Fährhafen Sassnitz GmbH
FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE GmbH)
Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH
Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG)
Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI)
Fraunhofer-Institut für angewandte Polymerforschung (IAP)
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE)
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)

Akteur
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM)
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
GASCADE Gastransport GmbH
Gemeinde Helgoland
Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft
Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg
HGH Hafenprojektgesellschaft Helgoland mbH
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG)
HYDROGENIOUS LOHC TECHNOLOGIES GMBH
Inherent Solutions Consult GmbH & Co. KG
Institut für Klimaschutz
Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V. (ISV)
ISC Inspection GmbH
IZES gGmbH
Jenbacher GmbH
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – verschiedene Institute
Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.
Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V.
Liebherr-Elektronik GmbH
Linde GmbH - Gases Division
Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Meter-Q Solutions GmbH
Nowega GmbH
Open Grid Europe GmbH
Papiertechnische Stiftung (PTS)
PSL Technik GmbH
Reuther STC GmbH
RMA Rheinau GmbH & Co. KG
ROSEN Technology and Research Center GmbH
RWE Generation SE
RWE Power Aktiengesellschaft - Forschung und Entwicklung - Werkstoffe und Analytik
RWE Supply and Trading GmbH
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
SciDre Scientific Instruments Dresden GmbH
Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Technische Universität Berlin
Technische Universität Dresden - Institut für Energietechnik
Tewis Projektmanagement GmbH
Theva Dünnschichttechnik GmbH
Thüga Aktiengesellschaft
Uniper Hydrogen GmbH
Universität Kassel - Fachbereich Elektrotechnik / Informatik
Universität Potsdam - Institut für Chemie
Universität Rostock
VDEh-Betriebsforschungsinstitut Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Versorgungsbetriebe Helgoland Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Vision Electric Super Conductors GmbH
VNG AG
Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH
ZwickRoell GmbH & C. KG

Literaturangaben

Alekseev, Alexander; Arndt, Tabea; Haberstroh, Christoph; Jordan, Thomas; Lindackers, Dirk; Palacios, Sebastian et al. (2023): Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff. Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE, 2023. Online verfügbar unter https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/F4941D1CBA383928E0537E695E862E63/live/document/Wasserstoff-Verfl%C3%BCssigung,_Speicherung,_Transport_und_Anwendung_von_fl%C3%BCssigem_Wasserstoff__2_.pdf, zuletzt geprüft am 2.11.23.

Bergek, Anna; Jacobsson, Staffan; Carlsson, Bo; Lindmark, Sven; Rickne, Annika (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. In: Research Policy 37 (3), S. 407–429. DOI: 10.1016/j.respol.2007.12.003.

BMBF (2023): TRANSHYDE. Wie das Leitprojekt TransHyDE eine Wasserstoff-Transport-Infrastruktur entwickeln will. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

BMWK (2021): Deutschland wird Wasserstoff-Land. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2021/07/Meldung/direkt-erfasst_infografik.html, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin.

Bundesnetzagentur (2023): Entflechtung. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Entflechtung/start.html>, zuletzt geprüft am 29.9.23.

Deutscher Bundestag (2023): Zwischenbericht zum Aufbau eines Wasserstoffnetzes. Klimaschutz und Energie — Unterrichtung — hib 587/2023. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-959692>, zuletzt geprüft am 29.9.23.

EWI (2021): Grünes Ammoniak: Bezugsoptionen für Deutschland. Kostenvergleich von importiertem und inländisch produziertem grünem Ammoniak. EWI Policy Brief. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH. Köln. Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/11/EWI_Policy_Brief_Gruenes_Ammoniak_fuer_Deutschland.pdf, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

Geels, Frank W.; Sovacool, Benjamin K.; Schwanen, Tim; Sorrell, Steve (2017): Sociotechnical transitions for deep decarbonization. In: Science (New York, N.Y.) 357 (6357), S. 1242–1244. DOI: 10.1126/science.aao3760.

Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis Michael; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Hg. v. FutureCamp Climate GmbH. München. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> zuletzt geprüft am 08.11.23.

Geißelbrecht, Michael (2021): Aktueller Stand LOHC-Wasserstoffspeicher. Living Lab Energy Campus. Forschungszentrum Jülich. Online verfügbar unter <https://blogs.fz-juelich.de/llcc/2021/09/23/aktueller-stand-lohc-wasserstoffspeicher/>, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

Hekkert, Marko P.; Negro, Simona O.; Heimeriks, Gaston; Harmsen, Robert (2011): Technological Innovation System Analysis. A manual for analysts. Online verfügbar unter http://www.innovation-system.net/wp-content/uploads/2013/03/UU_02rapport_Technological_Innovation_System_Analysis.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2018.

IEA (Hg.) (2021): Global Hydrogen Review 2021. IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

Kühl, Andreas (2022): Transport und Speicherung von Wasserstoff – Alternativen im Vergleich. Hg. v. energynet.de. Online verfügbar unter <https://www.energinet.de/2022/03/31/transport-speicherung-wasserstoff/>, zuletzt geprüft am 28.03.2023.

Markard, Jochen; Truffer, Bernhard (2008): Actor-oriented analysis of innovation systems: exploring micro–meso level linkages in the case of stationary fuel cells. In: Technology Analysis & Strategic Management 20 (4), S. 443–464. DOI: 10.1080/09537320802141429.

Riemer, Matia; Zheng, Lin; Eckstein, Johannes; Wietschel, Martin; Pieton, Natalia; Kunze, Robert (2022): Future hydrogen demand: A cross-sectoral, global meta-analysis. HYPAT Working Paper 04/2022. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2022/HYPAT%20WP_04_2022_Future%20hydrogen%20demand_V02.pdf, zuletzt geprüft am 27.6.23.

Scheuermann, Armin (2022): Flüssiger Wasserstoff, Ammoniak oder LOHC – was spricht für welchen H₂-Träger? Grünes Gas auf großer Fahrt. Online verfügbar unter <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/wasserstoff/fluessiger-wasserstoff-ammoniak-oder-lohc-was-spricht-fuer-welchen-h2-traeger-381.html>, zuletzt geprüft am 5.6.23.

van Ackeren, Janine (2021): Gasleitungen: Schnellstraßen für Wasserstoff? 16. Dezember 2021 | Ein Expertengespräch mit Dr. Thomas Hüwener, Open Grid Europe GmbH, und Prof. Dr. Alexander Martin, Fraunhofer IIS. Hg. v. Fraunhofer IIS. Erlangen. Online verfügbar unter <https://www.iis.fraunhofer.de/de/magazin/serien/serie-wasserstoff/wasserstoff-gasleitungen.html>, zuletzt geprüft am 27.6.23.