

Multimodaler Wasserstoff-Hub in der Innovationsregion Fessenheim

Thomas Jordan*

DOI: 10.1002/cite.202300240

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Im Rahmen einer binationalen Machbarkeitsstudie wurden Konzepte zur Einführung nachhaltiger Technologien in der Innovationsregion Fessenheim und darauf aufbauend verschiedene Handlungsansätze für deutsch-französische Demonstrationsprojekte entwickelt. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung einer nachhaltigen und zukunftsorientierten CO₂-neutralen Wirtschaftsregion. Der Umbau von Gesellschaft und Wirtschaft hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung und einer nachhaltigen Ressourcennutzung, verbunden mit der Schaffung von zukunftsorientierten Arbeitsplätzen, wird durch den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger stark gefördert. Nachhaltig produzierter „grüner“ Wasserstoff ermöglicht die nahezu sofortige Substitution von fossilem Wasserstoff in industriellen Prozessen, die saisonale Speicherung von erneuerbarem Strom und die flexible und effiziente Kopplung verschiedener Energiesektoren. Die vorgeschlagenen Pilotprojekte decken die gesamte Wertschöpfungskette mit grünem Wasserstoff ab und bauen dabei auf den besonderen regionalen Eigenschaften und Gegebenheiten auf.

Schlagwörter: Grenzüberschreitende Zusammenarbeit, Pilotprojekte, Wasserstoff, Wertschöpfungskette

Eingegangen: 13. Dezember 2023; *akzeptiert:* 20. Dezember 2023

Multimodal Hydrogen Hub in the Fessenheim Innovation Region

Within the framework of a binational feasibility study, concepts for the introduction of sustainable technologies in the innovation region of Fessenheim and, based on these, various approaches to action for Franco-German demonstration projects were developed. The overarching goal is the development of a sustainable and future-oriented CO₂-neutral economic region. The transformation of society and the economy towards a renewable energy supply and sustainable use of resources, combined with the creation of future-oriented jobs, is strongly promoted by the use of hydrogen as an energy carrier. Sustainably produced “green” hydrogen enables the almost immediate substitution of fossil hydrogen in industrial processes, the seasonal storage of renewable electricity and the flexible and efficient coupling of different energy sectors. The proposed pilot projects cover the entire value chain with green hydrogen, building on the specific regional characteristics and conditions.

Keywords: Cross-border cooperation, Hydrogen, Pilot projects, Value chain

1 Einführung

Im Rahmen einer binationalen Machbarkeitsstudie[1] wurden Konzepte zur Einführung nachhaltiger Technologien in der Innovationsregion Fessenheim und darauf aufbauend verschiedene Handlungsansätze für deutsch-französische Demonstrationsprojekte entwickelt. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung einer nachhaltigen und zukunftsorientierten CO₂-neutralen, grenzüberschreitenden Wirtschaftsregion.

Die Transformation von Gesellschaft und Wirtschaft hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung und einer nachhaltigen Ressourcennutzung, verbunden mit der Schaffung

von zukunftsfähigen Arbeitsplätzen, wird durch den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger stark gefördert. Grüner Wasserstoff, d.h. Wasserstoff, der mit nur geringen CO₂-Emissionen erzeugt und verteilt wird, kann für industrielle Prozesse konventionell aus Erdgas hergestellten Wasserstoff

¹Dr.-Ing. Thomas Jordan
 <https://orcid.org/0000-0002-1903-7490>
(thomas.jordan@kit.edu)

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit, Kaiserstraße 12, 76021 Karlsruhe, Deutschland.

relativ einfach ersetzen. Er bietet eine wirtschaftlich attraktive Möglichkeit zur saisonalen Speicherung von erneuerbarem Strom, kann als kohlenstofffreier Kraftstoff in der Mobilität eingesetzt werden und ermöglicht eine flexible und effiziente Kopplung verschiedener Energiesektoren, insbesondere des Strom- und Gassektors.

Dieser Artikel stellt die Wasserstoff-spezifischen Teile der Machbarkeitsstudie im Detail vor. Es werden zunächst die regionalen Vorzüge des Oberrheintals unter infrastrukturellen und energetischen Gesichtspunkten beschrieben. Dann wird ein Überblick über die Wasserstofftechnologien gegeben, die für die langfristige Vision eines „regionalen Wasserstoff-Hubs“ relevant sind. Daraus werden die vorgeschlagenen Pilotprojekte abgeleitet und in ihrer Wechselwirkung beschrieben.

2 Eigenschaften der Region

2.1 Infrastruktur und Industrie in der Region Fessenheim

Fessenheim ist eine französische Gemeinde mit etwa 2300 Einwohnern im Département Haut-Rhin in der Region Grand Est. Fessenheim liegt etwa 25 Kilometer nordöstlich von Mulhouse am Grand Canal d'Alsace und damit an der Grenze zu Deutschland. Der Rhein stellt eine wichtige Verkehrsinfrastruktur dar und verbindet die Region mit Straßburg und Karlsruhe im Norden sowie mit Basel in der Schweiz im Süden.

Am Rheinkanal betreibt die Électricité de France (EdF) das Wasserkraftwerk Fessenheim mit einer nominellen Leistung von 180 MW elektrisch. Oberhalb des Wasserkraftwerks – etwa anderthalb Kilometer südöstlich des Ortskerns – befindet sich das älteste Kernkraftwerk Frankreichs, das Kernkraftwerk Fessenheim (1760 MW elektrisch), das ebenfalls von der EdF von 1978 bis 2020 betrieben wurde. Mit 2000 Beschäftigten war dieses Kraftwerk der größte Arbeitgeber in der Region. Vor allem für das Kernkraftwerk wurde eine recht leistungsfähige Hafeninfrastuktur errichtet. Im engeren Umkreis von Fessenheim gibt es kleinere Brücken über den Rhein, auf deutscher Seite einen Anschluss an die Bundesautobahn A5 und den kleinen Flugplatz Bremgarten mit angeschlossenen Gewerbepark.

Die Gemeinden Neuf-Brisach auf französischer Seite und Breisach auf deutscher Seite liegen etwa 12 km nördlich von Fessenheim, auf halbem Weg zwischen den Städten Colmar und Freiburg im Breisgau. Die Brücke zwischen Vogelgrun und Breisach ist eine der vier großen Brücken über den Rhein in der Region Oberrhein. Auf jeder Seite des Flusses befindet sich ein Hafen, der Rheinhafen Breisach und der Port Rhenan. Drei Transportunternehmen befinden sich in einem Umkreis von etwa 5 km. Die Region Grand Est und das Land Baden-Württemberg prüfen derzeit die Reaktivierung einer Bahnverbindung zwischen Colmar und Freiburg im Breisgau über Neuf-Brisach und Breisach. In dem Gebiet

sind auch mehrere Industrieunternehmen tätig: der Aluminiumhersteller Constellium, das Sägewerk Schilliger Bois und der Verpackungshersteller DS Smith. Auch wenn diese Unternehmen derzeit keine direkten Abnehmer von Wasserstoff sind, haben sie doch einen großen Bedarf an Energie, der zumindest teilweise mit grünem Wasserstoff gedeckt werden könnte.

Der vielversprechendste Standort für einen Sammelpunkt zur Demonstration zentraler Bausteine einer Wasserstoffwirtschaft, einem multimodalen Wasserstoff-Hub, ist jedoch Ottmarsheim/Neuenburg am Rhein. Dieses Gebiet liegt 12 km südlich von Fessenheim und 15 km nordwestlich von Mulhouse. Hier befinden sich die besten Verkehrsinfrastrukturen. Der Hafen von Ottmarsheim mit seinen zwei Terminals ist einer der größten Binnenhäfen Frankreichs. Er liegt im Herzen des Industriegebiets Mulhouse-Rhin und verfügt über einen leistungsfähigen Bahnanschluss. Die Eisenbahnlinie Mulhouse-Chalampé ist auch an das deutsche Schienennetz angeschlossen. Sowohl Güter- als auch Personentransporte werden bereits betrieben. Die Autobahn A36, die Mulhouse mit der A5 auf der deutschen Seite des Rheins verbindet, ist eine der meist genutzten Straßenverbindungen zwischen Frankreich und Deutschland, insbesondere auch für den Güterverkehr.

Es gibt ein enormes Potenzial für die Nutzung von grünem Wasserstoff in der Industrie rund um dieses Zentrum. In Chalampé stellt die Firma Alsachimie Nylonsalze her. In Ottmarsheim verarbeitet ArcelorMittal Stahlprodukte für die Automobilindustrie und Boréalès Pec-Rhin stellt chemische Produkte und Düngemittel her. Euroglas SA, ein Glashersteller, befindet sich in Hombourg, nur 4 km südlich von Ottmarsheim. Das Werk von PSA in Mulhouse schließlich, wo sich eine der vier französischen Gießereien befindet, ist direkt an die Eisenbahn angeschlossen.

Aufgrund der umfangreichen industriellen Tätigkeit und der Nähe zur A35 sind zahlreiche Transportunternehmen auf beiden Seiten der Autobahn angesiedelt, in Ottmarsheim und Hombourg, aber auch in Neuenburg, 5 km nördlich der Autobahnbrücke.

2.2 Energie in der Region Fessenheim

Die derzeitigen Verbrauchs- und Versorgungssysteme in der Region liefern wichtige Erkenntnisse über die potenziellen Abnehmer von grünem Wasserstoff und über potenzielle erneuerbare Energiequellen zu dessen Herstellung. Die meisten relevanten Informationen für die Region wurden im Trinationalen Klima- und Energiebericht TRION [2] und im Rahmen des Interreg-Projekts RES-TMO von Trion aufbereitet.

2.2.1 Sekundärenergie-Bedarf

Der Gesamtsekundärenergieverbrauch am Oberrhein im Jahr 2016 betrug 38,7 MWh pro Kopf, was leicht über dem

deutschen Durchschnitt liegt. 52 % der Sekundärenergie wurde von der Industrie und dem Energiesektor verbraucht, 27 % von Wohngebäuden und Wohngebäuden und 19 % vom Straßenverkehr.

Der zuletzt nur moderate Rückgang des Endenergieverbrauchs ist auf das Bevölkerungswachstum, die wirtschaftliche Entwicklung sowie auf die Wetterlage im Betrachtungszeitraum zurückzuführen. In allen Teilregionen des Oberrheins haben die Haushalte, das Gewerbe und die Industrie den größten Beitrag zur Effizienzsteigerung geleistet. Der Verbrauch im Verkehrssektor ist jedoch mehr oder weniger konstant geblieben, so dass hier ein Energieeinsparpotenzial gesehen wird.

2.2.2 Grüne Potenziale der Region

Im Jahr 2016 belief sich die Gesamterzeugung erneuerbarer Energien in der Oberrheinregion auf 28,5 TWh, wobei der größte Beitrag zu den erneuerbaren Energien die Wasserkraft (56 %) geleistet hat, gefolgt von Biomasse und Abfall (30 %) und Solarwärme und Photovoltaik (4 %). In Deutschland liegt der Schwerpunkt auf der Photovoltaik und der Windenergie, während in Frankreich und der Schweiz die Wasserkraft stärker im Vordergrund steht. Biomasse wird in Frankreich und Deutschland gleich stark genutzt.

Die Wasserkraft ist damit eindeutig die wichtigste Quelle für erneuerbaren Strom in der Oberrheinregion. Entlang des Rheins und seiner Nebenflüsse gibt es 118 Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 2534 MWel, von denen 45 von deutschen, 30 von französischen und 43 von Schweizer Unternehmen betrieben werden. Die Leistung der 26 großen Laufwasserkraftwerke mit jeweils mehr als 10 MW Leistung summiert sich auf 2438 MWel. Die an der deutsch-französischen Grenze installierten 10 Laufwasserkraftwerke leisten insgesamt nominell 1450 MWel. Nur die Kraftwerke in Gamsheim und Iffezheim werden gemeinsam von Frankreich und Deutschland (EdF und Energie Baden-Württemberg EnBW) betrieben, die anderen ausschließlich von Frankreich. Diese Kraftwerke erzeugen im Durchschnitt über 8 Mrd kWh pro Jahr, was einer Auslastung von ca. 5000 Volllaststunden und zwei Drittel des Stromverbrauchs im Elsass mit seinen 1,8 Millionen Einwohnern entspricht.

Auch bei der Photovoltaik ist die Situation auf beiden Seiten des Rheins unterschiedlich. Im Rahmen des Interreg-Projekts RES-TMO wurden 27 Freiflächenanlagen mit einer Gesamtleistung von 70 MW erfasst, von denen sich 24 auf deutscher Seite befinden. Vier Solarparks haben eine Kapazität von mehr als 5 MW: Hohberg (9,9 MW), Vogtsburg (7,7 MW) und Iffezheim (6,9 MW) in Deutschland und Ungersheim (5,3 MW) in Frankreich. Zu diesen Freiflächenanlagen gehörte auch die schwimmende PV-Anlage der Erdgas Südwest AG in Renchen, die mit ihren 2300 Modulen und einer Leistung von 750 kW zum Zeitpunkt ihrer Errichtung im Jahr 2019 die größte auf einem See errichtete

PV-Anlage in Deutschland war. Eine ähnliche Anlage, allerdings mit 25 MWel Nennleistung, soll demnächst auf einem Baggersee in der Nähe von Straßburg errichtet werden.

Für die gebäudegestützte Photovoltaik wurden 183 Anlagen mit einer Mindestleistung von 300 kW erfasst, die eine Gesamtleistung von 144 MW aufweisen. 108 davon befinden sich auf der deutschen Seite des Oberrheins, 67 auf der Schweizer Seite und 8 Anlagen dieser Größenordnung wurden im Elsass ermittelt.

Durch diverse öffentliche Fördermaßnahmen und durch eine 2022 eingeführte Photovoltaikpflicht hat sich der gegenwärtige jährliche Zubau in Baden-Württemberg seit 2019 (440 MW) ca. verdoppelt. Das Programm Climaxion der Region Grand Est fördert Photovoltaik-Projekte außerhalb von nationalen Ausschreibungen. Auch die Basler Kantone bieten Möglichkeiten zur Förderung von PV-Anlagen. Eine attraktive Option für PV-Anlagen könnten landwirtschaftliche Flächen oder andere bebaute Gebiete wie Straßen oder Flughäfen sein.

Zahlreiche Biomasse-Verbrennungsanlagen (Holz oder andere Bioabfälle) erzeugen Wärme, darunter zehn besonders große mit einer Mindestkapazität von 10 MWth, davon vier auf der deutschen, vier auf der Schweizer und zwei auf der französischen Seite des Oberrheins. Die drei größten Biomasse-Verbrennungsanlagen sind die der Bio Energie Baden GmbH in Kehl (68 MWth + 12 MWel), die Holz- und Abfallverbrennungsanlage der Industriellen Werke Basel (50 MWth) und die der Firma Roquette in Beinheim, Elsass (50 MWth). Das Biomassekraftwerk in St. Louis (5,2 MWth) kann durch seinen grenzüberschreitenden Charakter hervorgehoben werden. Es befindet sich in unmittelbarer Nähe der französisch-schweizerischen Grenze und wird von der R-CUA, einer Tochtergesellschaft der elsässischen R-GDS und der schweizerischen Primeo Energie, betrieben. Darüber hinaus produzieren in der Oberrheinregion fast 40 Biogasanlagen Wärme und Strom aus Biomasse oder Klärschlamm, von denen jeweils etwa ein Drittel auf den deutschen, französischen oder schweizerischen Teil der Oberrheinregion verteilt ist.

2.3 Regionale Nachfrage und Nachfragepotenziale nach grünem Wasserstoff

Die regionale Nachfrage und Nachfragepotenziale nach grünem Wasserstoff wird im Wesentlichen aus der bereits bestehenden industriellen Verwendung von konventionell hergestelltem Wasserstoff und aus Anwendungen fossiler Energieträger, insbesondere Erdgas, abgeleitet. Weitere potenzielle Nachfrage aus neuen, verteilten Anwendungen – z. B. im Transport und in der Landwirtschaft – sind durch eher kleinere Bedarfe gekennzeichnet.

2.3.1 Verwendung in der Industrie

Derzeit wird der größte Teil des weltweit produzierten Wasserstoffs für chemische Prozesse, insbesondere für die Ammoniak- und Methanolsynthese und die Raffination von Rohöl, verwendet [3]. Der größte Teil davon wird direkt am Ort der Verwendung durch Methandampfreformierung mit typischen CO₂-Emissionen von 10 kg CO₂ pro kg Wasserstoff erzeugt („grauer“ Wasserstoff). Dies spiegelt sich auch so in der untersuchten Region wider. Viele der industriellen Betriebe in der Region nutzen zudem die infrastrukturellen Vorteile und die Kühlkapazitäten, die der Rhein bietet. So befinden sich entlang und auf beiden Seiten des Rheins entsprechende Industrieansiedlungen (Straßburg, Mulhouse, Colmar, Cernay, Chalampé/Ottmarsheim/Neuenburg-am-Rhein und Neuf-Brisach/Breisach-am-Rhein).

Durch den Ersatz des grauen Wasserstoffes durch grünen können mit relativ geringem Aufwand große Effekte hinsichtlich der Reduktion von CO₂-Emissionen in diesen chemischen Prozessen erzielt werden. Zusätzliche Bedarfe können durch den Ersatz von Erdgas für Hochtemperaturprozessen, wie zum Beispiel bei der Glas- oder Zementherstellung, entstehen. Die Einführung neuer Verfahren zur Defossilisierung industrieller Produktionsprozesse, z. B. bei der Stahlerzeugung, generieren zusätzlichen Bedarf. Diese neuen Verfahren erfordern jedoch weitere Entwicklungen und müssen auf industrielle Dimensionen hochskaliert werden. Neue Anlagen erfordern relativ größere Investitionen. Daher werden diese Bedarfe erst in einer späteren Phase relevant.

In der erweiterten Region Fessenheim sind insbesondere Evonik Rheinfelden, BASF, Borealis und Linde France in Chalampé, die vielversprechendsten potenziellen frühen Nutzer von grünem Wasserstoff. Die BASF betreibt am Standort Chalampé in Frankreich, etwa 10 km südlich von Fessenheim, eine Polyamidanlage. Der Bedarf in der Größenordnung von 10 000 t pro Jahr wird ggw. mit grauem Wasserstoff gedeckt. Die geschätzten Kosten für den grauen Wasserstoff liegen derzeit in der Größenordnung von 2 € kg⁻¹. Dabei ist zu beachten, dass die für diesen singulären industriellen Anwendungsfall benötigten Wasserstoffmengen in der gleichen Größenordnung liegen wie der sonstige geschätzte Bedarf für ganz Baden-Württemberg [4].

Evonik Industries stellt am Standort Rheinfelden Bleich- und Oxidationsmittel, Waschmittelgrundstoffe, Füllstoffe und Mattierungsmittel sowie Silane für unterschiedlichste Anwendungen her. Viele der Vor- und Zwischenprodukte, aus denen die hochwertigen Endprodukte entstehen, werden in Rheinfelden selbst hergestellt. Auch hier werden große Mengen Wasserstoff eingesetzt, wobei der tatsächliche Bedarf nicht öffentlich bekannt ist. Auch bei der Ammoniak-Herstellung von Borealis lässt sich nur über die Produktmengen ein Bedarf abschätzen.

Mit ihrem hohen Wärmebedarf – insbesondere für den Schmelzprozess – ist die Glasindustrie eine der energie-

intensivsten Industrien. Derzeit werden mehr als 70 % der notwendigen Energie durch fossile Brennstoffe wie Erdgas gedeckt. Darüber hinaus wird beim Schmelzen der Rohstoffe, zu denen auch Carbonate gehören, CO₂ freigesetzt. Bis zu 80 % der Gesamtemissionen dieser Industrie sind energiebedingt. Mit grünem Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, könnte der Anteil der Emissionen deutlich reduziert werden. Der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff in dieser Industrie ist jedoch noch kein technischer Standard, so dass die Auswirkungen auf den sehr sensiblen Schmelzprozess in der Glasproduktion, die Produktqualität und die Schadstoffemissionen noch untersucht werden müssen. Erste Schritte zum Einsatz von grünem Wasserstoff in der Glasproduktion könnten auch über die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas als Brennstoff für die Brenner realisiert werden. Neben Wasserstoff könnte auch der in der Elektrolyse als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff in der Glasproduktion eingesetzt werden. Die Zugabe von Sauerstoff in den Schmelzöfen erhöht die Prozesseffizienz (Oxyfuel-Brenner oder sauerstoffbeheizte Schmelzöfen) und reduziert weitere Luftschadstoffe wie NO_x oder Feinstaub erheblich. Auch die Produktqualität kann durch die direkte Zugabe von Sauerstoff im Ofenprozess erhöht werden. Daher ist die Kombination von Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff und die direkte Verwendung beider Produkte in der Glasproduktion eine vielversprechende Lösung zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bei der Glasherstellung. Aufgrund der Abwärme der Schmelzprozesse könnten in Zukunft auch Hochtemperatur (HT)-Festkörperelektrolyseure eingesetzt werden, die unter Druck stehenden Dampf benötigen, aber im Vergleich zu Niedertemperaturlösungen wie PEM- oder Alkalielektrolyseuren deutlich höhere Wirkungsgrade in Bezug auf den Aufwand in Form von elektrischer Energie. Der technologische Reifegrad, Technology Readiness Level (TRL), von etwa 7 für die HT-Elektrolyse ist jedoch noch nicht auf kommerziellem Niveau [5].

In Hombourg, 3 km südlich von Ottmarsheim, stellt Euroglas S.A., ein Unternehmen der Schweizer Glas Trösch Gruppe [6], Flachglas her. Der tatsächliche Bedarf an grünem Wasserstoff kann auch hier aus der Produktmenge abgeleitet werden. Die tägliche Produktionsmenge von Euroglas beträgt ca. 580 t. Der durchschnittliche Energiebedarf liegt bei etwa 3 MWh t⁻¹, wovon 2,6 MWh typischerweise durch Erdgas gedeckt werden [7]. Dies entspricht einer spezifischen CO₂-Emission von 0,5 t pro t Glas. Die tatsächlichen CO₂-Emissionen sind um etwa 30 % höher, da CO₂-emittierende Rohstoffe, z. B. Kalk, am Produktionsprozess beteiligt sind. Um das Erdgas in der betreffenden Anlage zu ersetzen, werden täglich etwa 45 t grüner Wasserstoff benötigt, was einem Jahresbedarf von etwa 16 000 t entspricht. Für ein auf Oxyfuel basierendes Verfahren, das die NO_x-Emissionen ohne eine komplexe Abgasbehandlung reduzieren würde, wären äquivalent 128 000 t Sauerstoff pro Jahr erforderlich.

2.3.2 Schwerlasttransport

Die Transportunternehmen haben eine relativ homogene geografische Verteilung in der Region. Minimale Gesamtkosten, Total Costs of Ownership (TCO), sind in dem stark wettbewerblichen Umfeld ein sehr wichtiges Kriterium für eine erfolgreiche Entwicklung dieser Unternehmen. Mit dem Anstieg der Steuern auf fossile Brennstoffe und der Autobahngebühren suchen sie nach Alternativen zu ihren konventionellen, dieselbetriebenen Fahrzeugflotten, und einige von ihnen haben bereits Erfahrungen z. B. mit dem Einsatz von Biogas für ihre Lastkraftwagen (LKW) oder mit elektrischen Fahrzeugen für ihre Logistikzentren gesammelt.

Längerfristig zwingen die europäischen Flottenemissionsvorschriften die LKW-Anbieter dazu, ihren Kunden mehr emissionsfreie Optionen anzubieten. Darüber hinaus hat Frankreich das Verbot neuer schwerer Dieselfahrzeuge ab 2040 beschlossen: Das bedeutet, dass die Transportunternehmen aktiv nach Alternativen suchen werden. Obwohl die ersten Batterie-elektrischen LKW bereits auf dem Markt sind, leiden sie noch immer unter relativ hohen Investitionskosten, geringerer Nutzlast und Einschränkungen bei der Ladezeit. Die meisten dieser Einschränkungen werden durch die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellen- oder Wasserstoffmotorantriebe insbesondere für Langstreckentransporte überwunden.

Während die technischen Aspekte dieser neuen Technologie direkt mit der konventionellen Technologie konkurrieren (große Reichweite der Fahrzeuge, Betankungszeit, Wartung...), halten die derzeitigen Kosten, insbesondere für die brennstoffzellenbasierte Version, und die fehlende Infrastruktur für die Wasserstoffversorgung die Transportunternehmen davon ab, sie kurzfristig als Option in Betracht zu ziehen. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge können ab 2027 gegenüber dem Dieselfahrzeug wettbewerbsfähig werden, LKWs mit Wasserstoffmotor etwas früher [8] [9]. Hyundai hat in der Schweiz ab 2020 ein Pay-per-Use-Modell für seine Kunden zur Nutzung ihrer LKW eingeführt [10]. Dieses Modell sieht feste Tarife für das Transportunternehmen pro Kilometer vor, was die Einstiegshürden, den Aufwand und die finanziellen Risiken für diese Unternehmen reduziert. Das erfolgreiche Modelle könnte bei ähnlichen steuerrechtlichen Voraussetzungen auch auf die betrachtete Region übertragen werden. Die Umstellung auf eine emissionsfreie Technologie ist dann ein überschaubarer, strategischer Schritt zur Senkung der Gesamtbetriebskosten. Damit würde insbesondere im Dreiländereck mit dem erheblichen Transportbedarf in wenigen Jahren ein erheblicher Bedarf an grünem Wasserstoff als Treibstoff entstehen. Voraussetzung, dass dieser Bedarf sich auch realisiert, ist jedoch die rechtzeitige Bereitstellung von Versorgungsinfrastrukturen, wie mit der Verordnung (EU) über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) [11] bis 2030 gefordert.

In Ottmarsheim wird derzeit eine LKW-Wasserstofftankstelle aufgebaut. Die von der Firma H2V entwickelte Anlage soll in 2024 in Betrieb genommen werden. Zu Beginn werden etwa 20 kg pro Tag mit Tankwagen aus Dünkirchen angeliefert und für schwere Nutzfahrzeuge reserviert. Damit ist diese Anlage noch weit von der in der AFIR geforderten Kapazität von 1 t pro Tag entfernt. H2V plant jedoch, dies über eine Produktion vor Ort mit entsprechend skalierten Elektrolyse zu erreichen.

2.3.3 Flussschifffahrt

Der Transport nicht nur auf der Straße, sondern auch auf dem Rhein per Binnenschiff stellt ein wichtiges Anwendungsfeld für grünen Wasserstoff in der Region dar. Das betrifft sowohl die Umstellung der Antriebe der Binnenschiffe wie auch den Transport von Wasserstoff selbst. Es gibt bereits einige Initiativen wie das Projekt Rhine Hydrogen Integration Network of Excellence RH2INE[12] zwischen der Provinz Südholland und dem Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, das darauf abzielt, eine Wasserstoffinfrastruktur entlang des Flusses mit den verschiedenen Akteuren des Marktes aufzubauen. Eine ähnliche Initiative könnte zwischen der Region Grand-Est und dem Land Baden-Württemberg umgesetzt werden, da es auch einen regen Binnenschiffsverkehr zwischen den Knotenpunkten Straßburg und Basel gibt.

2.3.4 Landwirtschaft

Wasserstoff eine zentrale Rolle bei der Defossilisierung der Landwirtschaft spielen. Dies ist besonders interessant, da landwirtschaftliche Betriebe mit Wasserstoff zu selbstversorgenden Prosumern (d. h. sowohl Erzeugern als auch Verbrauchern) oder zu regionalen Energieversorgern werden können. Das Geschäftsmodell eines Energieversorgers ist bereits in landwirtschaftlichen Genossenschaften etabliert. Sie vertreiben ggw. jedoch noch vorrangig fossile Treibstoffe.

Die moderne Landwirtschaft ist in hohem Maße auf den Einsatz energieintensiver Maschinen angewiesen, darunter Mähdrescher, Häcksel- und Schneidemaschinen usw. Selbst erzeugter Wasserstoff könnte in der Landwirtschaft Transport von Energie minimieren und CO₂-Emissionen reduzieren. Als besonders attraktiver Antrieb für die langsam bewegten Hochleistungsanwendungen gilt der Wasserstoffmotor. Diese Antriebstechnik baut auf bewährten Konzepten auf, ist robust, tolerant bezüglich der Wasserstoffreinheit und kostengünstig. Ggf. lassen sich sogar vorhandene Motoren umrüsten, was die notwendigen Investitionen deutlich verringert. So hat zum Beispiel die Firma Deutz einen Wasserstoffmotor zur Integration in landwirtschaftlichen Maschinen und Baumaschinen entwickelt [13].

2.3.5 Öffentliche Verkehrsmittel

Im öffentlichen Nahverkehr, insbesondere bei Busflotten, gibt es bereits weit reichende Erfahrungen. Die Technologie ist anwendungsreif, die Preise für wasserstoffbetriebene Busse sind beträchtlich gesunken und die Industrie hat ihre Produktionskapazitäten ausgeweitet. Im Juli 2019 wurde die europäische Richtlinie 2019/1161 über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge [14] veröffentlicht. Sie verpflichtet die Kommunen, ihre Busflotten mit saubereren Fahrzeugen zu erneuern.

Straßburg verfügt derzeit über rund 275 Busse, von denen 148 bereits mit Biogas und 61 mit Elektroantrieb betrieben werden. Im Jahr 2024 wird die Stadt keine Dieselsebusse mehr haben. Mulhouse hat derzeit etwa 105 Busse, davon 90 Dieselsebusse. Die Stadt will 2024 44 mit Biogas betriebene Busse einsetzen. Colmar hat derzeit 37 von 41 Bussen, die mit Erdgas betrieben werden. Aus diesen Zahlen lässt sich die Anzahl von Bussen ableiten, die potenziell mit Wasserstoff betrieben werden könnten.

Was Nahverkehrszüge anbelangt, so hat die Region Grand Est mindestens drei Wasserstoffzüge für die Strecke Mulhouse-Tann-Kruth bestellt. Die ersten Tests sollen in 2024 stattfinden.

2.3.6 Tourismus

Auch der Tourismus muss den CO₂-Fußabdruck berücksichtigen. Das Oberrheintal ist ein sehr attraktives touristisches Gebiet, das die lokalen Besonderheiten, z. B. den Weinbau, mit besonderen touristischen Elementen verbindet. Die Vogesen und der Schwarzwald mit ihren Naturparks tragen zu dieser Attraktivität bei. Das wachsende Interesse an nachhaltigem Tourismus erfordert eine konsequente Einbettung all dieser touristischen Elemente in ein nachhaltiges Umfeld, und Wasserstofftechnologien können ein solches ganzheitliches Konzept ermöglichen und demonstrieren.

2.3.7 Zusammenfassung der Nachfrage und Priorisierung der Deckung

In der Oberrheinregion ist die industrielle Nachfrage nach kostengünstigem, grünem Wasserstoff mit etwa 20 000 bis 30 000 t pro Jahr größer als der in den anderen Sektoren. Die Reduktion der CO₂-Emissionen lässt sich am effizientesten mit wenigen, aber großen Investitionen in der Industrie erreichen und hochskalieren. Linde France plant beispielsweise bereits einen 40-MW-Elektrolyseur auf dem Industriegelände von Chalampé, um die dort angesiedelten Industriebetriebe mit grünem Wasserstoff zu versorgen. Borealis und Hynamics haben ähnliche Pläne für einen 30-MW-Elektrolyseur zur Herstellung von kohlenstoffarmem Ammoniak. Die Communauté Européenne d'Alsace hat kürzlich angekündigt, dass sie eine Elektrolysekapazität von 200 bis 300 MW an den beiden Standorten Chalampé und Fessenheim anstrebt. Sie arbeiten an einem „Wasser-

stoffnetz“, das von Neuf-Brisach bis Basel reichen soll. Zur Orientierung: 1-MW Elektrolyseure erlauben bei etwa 5000 Volllaststunden (nur über Wasserkraft grün realisierbar) eine jährliche Produktion von ca. 100 t Wasserstoff. Das niedrige akzeptable Preisniveau in der Industrie erfordert jedoch noch entsprechend hohe Subventionen, um einen Markteintritt früh zu erreichen.

Die eher dezentralen Anwendungen können in kleinem Maßstab beginnen. Geht man für den öffentlichen Nahverkehr und Transport in der Region z. B. von 100 Bussen, 25 Schwerlastkraftwagen, zwei Zügen und zwei Schiffen aus, so werden täglich 7,5 t oder 2800 t pro Jahr benötigt. Die dezentralen Anwendungen erfordern höhere Investitionen in Bezug auf die CO₂-Einsparungen, können aber auch höhere Wasserstoffpreise akzeptieren; bei 5 € kg⁻¹ abgegebener Wasserstoff wären Wasserstoffanwendungen in schweren Nutzfahrzeugen und im öffentlichen Nahverkehr bereits wettbewerbsfähig. Die notwendige Skalierung für die Industrieanwendung wird die Kosten für die Produktion von grünem Wasserstoff schnell auf ein für die verteilten Anwendungen attraktives Niveau senken. Die damit implizierte Reihenfolge für die Einführung von grünem Wasserstoff ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Verteilte Produktion kann verteilte Anwendungen auch schon früher fördern, nur sind damit nicht so große Emissionsreduktionen einfach zu realisieren. Die Vorstellung der empfohlenen Pilotprojekte im Folgenden orientiert sich daher an der Reihenfolge: von großen industriellen hin zu verteilten Anwendungen in der Region.

3 Pilotprojekte

Der multimodale Wasserstoff-Hub in der Region Fessenheim soll im Wesentlichen durch die folgenden vier Pilotprojekte realisiert werden (Abb. 1):

- Pilotprojekt H2_A „Großindustrierversorgung mit grünem Wasserstoff“
- Pilotprojekt H2_B „Virtuelle Pipeline“
- Pilotprojekt H2_C „Schwerlasttransport“
- Pilotprojekt H2_D „Dezentrale Produktion und Nutzung in der Landwirtschaft“

Die Projekte basieren auf den regionalen Besonderheiten und ihre Implementierung folgt der zuvor beschriebenen Strategie. Obwohl die Projekte in Beziehung stehen und sich wechselseitig stützen, können sie dennoch unabhängig voneinander oder in einer anderen Reihenfolge durchgeführt werden.

Der Zeitplan für die Einrichtung des regionalen Wasserstoff-Hubs ist grob in zwei Phasen unterteilt. Die erste Phase ist geprägt von Planung, Bau und Installation der entsprechenden Anlagen. In der zweiten Phase wird der kommerzielle Betrieb kontinuierlich optimiert und der Hub ggf. mit anderen Anwendungen erweitert. Grundsätzlich ist diese betriebliche Phase offen hinsichtlich ihres Endes.



Abbildung 1. Wasserstoff-Pilotprojekte für die Innovationsregion Fessenheim in der vorgeschlagenen Reihenfolge ihrer Implementierung.

Die Projekte sollen zwar die wirtschaftliche Tragfähigkeit von Wasserstoffanwendungen möglichst schnell demonstrieren, dennoch sollen sie auch kleinere Testkapazitäten für die weitere Forschung und Entwicklung der eingesetzten Technologien ermöglichen. Die folgende detaillierte Beschreibung der Projekte geht auch auf diesen Aspekt ein.

3.1 Pilotprojekt H2_A „Großindustrierversorgung mit grünem Wasserstoff“

Die Region Fessenheim bietet hervorragende Möglichkeiten zur Produktion von grünem Strom aus Wasserkraft und ein großes Potenzial zur Nutzung von grünem Wasserstoff in der Industrie, was die Installation von großskaligen Elektrolyseanlagen nahelegt (Abb. 2). Der mit lokal erzeugtem erneuerbarem Strom hergestellte Wasserstoff kann direkt über die vorhandene Wasserstoffpipeline an etablierte Industrieunternehmen, wie z. B. mit BASF, Borealis in Chalampé und EUROGLAS in Hombourg abgegeben werden. Der Bedarf dieser Unternehmen beläuft sich auf mehrere $10\,000\text{ t a}^{-1}$. Die dafür notwendige Elektrolyseleistung liegt mit einem Kapazitätsfaktor von etwa 70 % in der Größenordnung von 200 MW.

Der Betreiber könnte entweder ein Industriegaslieferant wie Linde France oder ein Unternehmen, das dem Stromsektor nähersteht (z. B. EDF/Hynamics), sein. Der erneuerbare Strom würde idealerweise in einer Kombination aus Wasserkraft – hauptsächlich für die Nacht und an bewölk-

Der Betreiber könnte entweder ein Industriegaslieferant wie Linde France oder ein Unternehmen, das dem Stromsektor nähersteht (z. B. EDF/Hynamics), sein. Der erneuerbare Strom würde idealerweise in einer Kombination aus Wasserkraft – hauptsächlich für die Nacht und an bewölk-

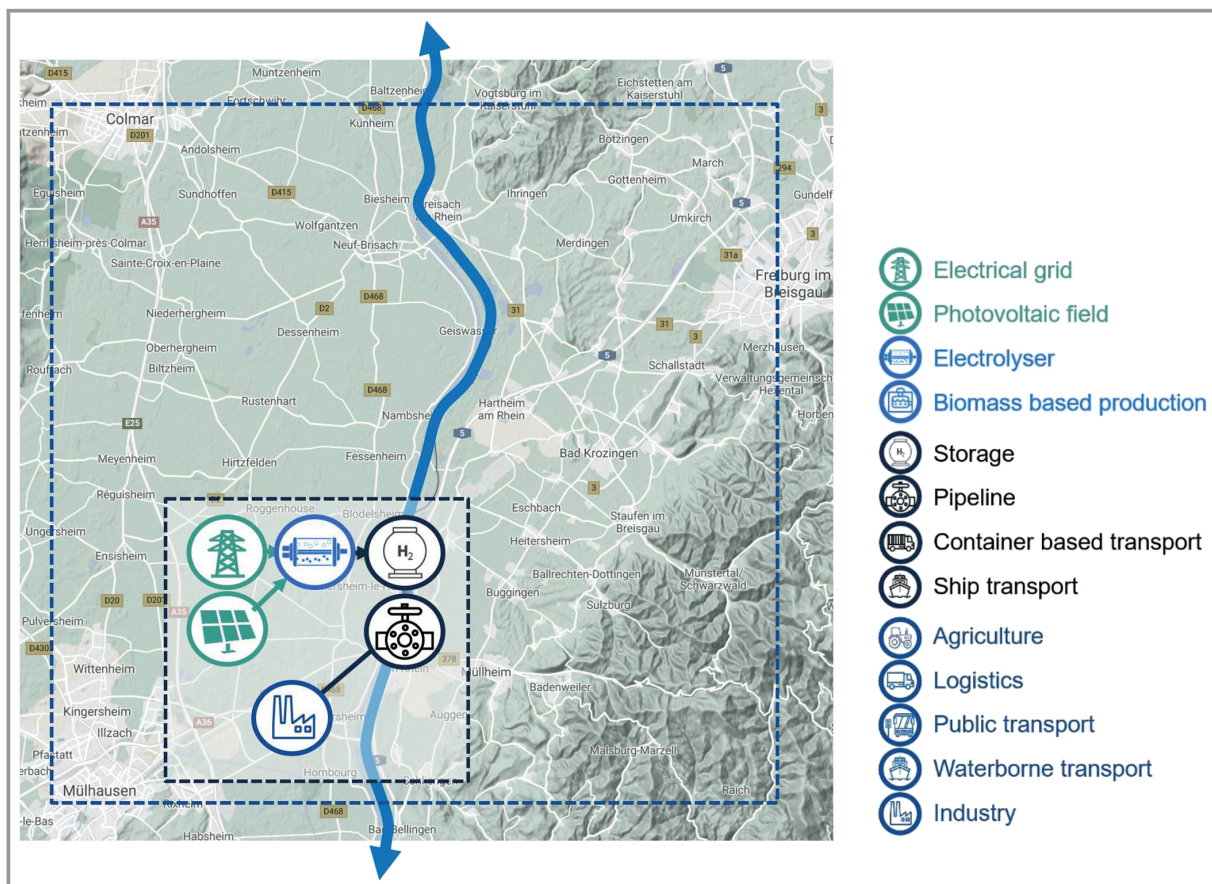


Abbildung 2. Pilotprojekt H2_A „Großindustrierversorgung mit grünem Wasserstoff“.

ten Tagen – und schwimmender Photovoltaik als zusätzliche erneuerbare Stromquelle mit begrenzter Kapazität (typischerweise 1000 h a^{-1}) am Tag erzeugt. Mit dieser Kombination lassen sich wirtschaftlich attraktivere Kapazitätsfaktoren erreichen.

Die Wasserkraftwerke in Kembs, Fessenheim und Ottmarsheim liefern nominell 500 MW elektrische Leistung mit einem Kapazitätsfaktor von ca. 60 %, was dem erforderlichen Wert auch ohne zusätzliche Photovoltaikanlagen sehr nahekommt. Der Zugang zu dieser Wasserkraft würde jedoch weitreichende Änderungen von den bestehenden Stromversorgungsstrukturen und Verträgen des Betreibers der Wasserkraftwerke bedeuten. Ein weiterer kritischer Aspekt ist der regulatorische Rahmen, der diese erneuerbaren Stromquellen als „grüne“ Quellen anerkennen lässt, was für eine öffentliche Förderung maßgeblich ist. Die derzeitige Regelung würde es nicht erlauben, grünen Wasserstoff mit vorhandener Wasserkraft zu erzeugen. So werden Zusätzlichkeit und Gleichzeitigkeit bei der Erzeugung von Wasserstoff aus grünem Strom in den europäischen und teilweise auch in den nationalen Vorschriften vorausgesetzt.

Die geschätzten Kosten für diesen grünen Wasserstoff ($\sim 5 \text{ € kg}^{-1}$) sind immer noch deutlich höher als die des grauen Wasserstoffs (derzeit $\sim 2 \text{ € kg}^{-1}$). Die Investitionskosten einer Elektrolyseanlage für große alkalische Elektrolyseure belaufen sich auf ca. 1 Mio. € MW^{-1} ohne Produktgasreinigung, Druckaufbereitung und Lagerung. Für PEM-Elektrolyseure muss ein Aufschlag von ca. 20 % kalkuliert werden. Aufgrund der geringeren Investitionskosten und der größeren Erfahrung ist die alkalische Technologie zumindest in der Anfangsphase zu empfehlen. Die tatsächlichen Kosten für grünen Wasserstoff werden jedoch nach wie vor von den Betriebskosten bestimmt. So ist öffentliche Unterstützung, wie zum Beispiel ein geförderter grüner Strompreis, die Ausnahme bezüglich Netzentgelte etc., erforderlich, um den Preis für grünen Wasserstoff auf ein wettbewerbsfähig attraktives Niveau zu senken. Ein mittelfristig auf 200 € t^{-1} angehobener CO_2 -Emissionspreis würde nicht nachhaltige Alternativen weniger attraktiv machen und strategische Investitionsentscheidungen für grünen Wasserstoff erleichtern.

In den folgenden Kapiteln werden die geplanten Arbeitspakete beschrieben.

3.1.1 Planungsphase

Der künftige Betreiber des Elektrolyseurs wird einen Finanzplan erstellen, in dem regionale, nationale und europäische Förderprogramme für die grüne Wasserstoff-erzeugung berücksichtigt werden. Die Spezifikation des Elektrolyseurs (dynamisches Verhalten, Lebensdauer, elektrischer Bedarf, Platzbedarf, Wartung, Hilfseinrichtungen usw.) wird weiter detailliert, und der tatsächliche Standort wird festgelegt. Die bestehende Wasserstoffpipeline erlaubt die Anforderung, dass die Großelektrolyse möglichst nah an den Großverbraucher(n) positioniert sein sollte, flexibel

auszulegen. Jeder Standort in der Nähe der Pipeline erlaubt eine Versorgung der angeschlossenen Großverbraucher. So kann der Standort in der Nähe des bestehenden Erdgas-Dampfreformers von Linde France auf dem Industriegelände von Chalampé zusätzliche Investitionen in die Wasserstoffinfrastruktur minimieren. Möglicherweise könnten sogar Reinigungs- und Verdichterstationen wieder verwendet werden. Ein Standort in unmittelbarer Nähe des Wasserkraftwerks Ottmarsheim könnte die Kosten für den Bau einer neuen 200-MW-Übertragungsleitung einsparen, da das bestehende Stromnetz, das den Industriepark Chalampé verbindet, möglicherweise nicht leistungsfähig genug ist.

Die gesamte Planung wird eng mit den regionalen Behörden, den Stromversorgern und den potenziellen Abnehmern des Wasserstoffs sowie den Abnehmern von Sauerstoff und Niedertemperaturwärme abgestimmt.

3.1.2 Aufbau des Elektrolyseurs

In einem ersten Schritt soll ein 40-MW-Elektrolyseur installiert werden, um die umliegenden Industrien mit grünem Wasserstoff zu versorgen. In einem zweiten Schritt soll die Anlage um weitere 160 MW ergänzt werden, um die erforderlichen 200 MW zu erreichen. Die Communauté Européenne d'Alsace hat kürzlich angekündigt, dass sie eine Elektrolysekapazität von 200 bis 300 MW an den beiden Standorten Chalampé und Fessenheim anstrebt. Sie arbeiten an einem Wasserstoffnetz, das von Neuf-Brisach bis Basel reichen soll.

Für die großtechnische Produktion von Elektrolyseuren könnte die alkalische Technologie die bevorzugte Option sein. PEM-Elektrolyseure sind in den Betriebsarten etwas flexibler und verursachen geringere Betriebskosten und haben einen kleineren Platzbedarf, aber großtechnische Anwendungen sind noch selten, es fehlt an Erfahrung und die Gesamtbetriebskosten könnten höher sein als bei der alkalischen Technologie.

3.1.3 Aufbau einer Ökostromversorgung

In der Anfangsphase sollte eine der vier Turbinen des Kraftwerks Ottmarsheim für den 40-MW-Elektrolyseur reserviert werden. Für die spätere Phase sollte zusätzliche Leistung aus dem Kraftwerk Ottmarsheim sowie aus Kembs und Fessenheim gesichert werden.

Für die zusätzliche Versorgung mit grünem Strom wird eine schwimmende PV mit 20 MW Nennleistung im Staubecken des Wasserkraftwerks Ottmarsheim (s. Abb. 3) vorgeschlagen. Der Betrieb durch die EdF reduziert die Schnittstellen zu anderen potenziellen Stromlieferanten. Die Investitionskosten werden auf weniger als 20 Mio. Euro geschätzt. In der zweiten Phase soll diese Leistung durch den Erwerb von Flächen im Rumerheimer Ochsengrund und in der Kiesgrube Neuenburg-Grieffheim verdoppelt werden. Für letztere muss jedoch eine eigene Stromübertragungsleitung geplant werden.



Abbildung 3. Fläche des Staubereichs des Kraftwerks Ottmarsheim.

3.1.4 Zusätzliche Funktionen, Möglichkeiten und Verbindungen zu den anderen Pilotprojekten

Der belgische Konzern John Cockerill baut eine Gigafactory für Elektrolyseure in Aspach-Michelbach, etwa 30 km Luftlinie von Ottmarsheim entfernt. Es besteht somit eine interessante Möglichkeit, ein Testfeld mit den realen Anforderungen aus dem Betrieb von Großelektrolyseuren in der Nachbarschaft einer Großproduktionsanlage für Elektrolyseure zu errichten. Ein Teststand für innovative Elektrolyseur-Designs und Netzintegrationsstrategien würde auch Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten für die Einbettung von Elektrolyseuren in ein Smart Grid bieten. Dieses Testfeld könnte anfangs von der Europäischen Kommission kofinanziert werden, indem es Test-Dienstleistungen über ein Open Innovation Test Bed-Modell anbietet.

Die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseurbetriebs soll verbessert werden, indem auch seine Nebenprodukte vermarktet werden: zum einen Sauerstoff (mit Anwendungen im medizinischen Bereich, in der Abwasserbehandlung und in der Stahl-, Glas- und Chemieindustrie) und zum anderen

die Verwertung der erzeugten Abwärme. Im Projekt e-farm in Norddeutschland wird die Abwärme für die Beheizung von Wohnhäusern und für die landwirtschaftliche Produktion genutzt, was die Wirtschaftlichkeit des Systems deutlich verbessert hat.

3.2 Pilotprojekt H2_B „Virtuelle Pipeline“

Es wird davon ausgegangen, dass in Deutschland und insbesondere in Baden-Württemberg nur ein begrenzter Teil des benötigten grünen Wasserstoffs mit lokalen grünen Ressourcen erzeugt werden kann [15]. Ähnliche Grenzen werden für energieintensive Regionen Frankreichs wie die Grand-Est-Region angenommen. Für die Versorgung des größeren verbleibenden Teils wäre ein Pipeline-Transport von grünem Wasserstoff aus Südeuropa, z. B. Portugal oder Spanien [16], wirtschaftlich attraktiv, die tatsächliche Umsetzung wird jedoch erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Entsprechend den Planungen für den European Hydrogen Backbone [17] und das deutsche Kernnetz [18] wird das Oberrheingebiet weitläufig wohl erst nach 2040 mit einer Wasserstoff-Transportpipeline erschlossen. Fessenheim selbst soll über das Projekt RHYn koordiniert von GRTgaz [19] bis 2028 an die bestehende Wasserstoff-Pipeline angeschlossen werden, dennoch fehlt ein Anschluss für den Import. Zudem bedeuten Pipelines relativ hohe spezifische Investitionen und stellen eine wenig flexible Versorgungsinfrastruktur dar.

Zur möglichst schnellen Deckung des bereits bestehenden Bedarfs an grünem Wasserstoff wird daher eine „virtuelle Pipeline“, realisiert mittels leicht skalierbaren Schiffstransport von Wasserstoff über den Rhein, vorgeschlagen (Abb. 4). Die Region könnte so mit anderen großen Industriestandorten mit hohem Wasserstoffbedarf (Köln, Ludwigshafen, Karlsruhe, ...) und mit Rotterdam, dem wohl wichtigsten europäischen Anlandungspunkt für Flüssigwasserstoff (LH₂), verbunden werden. Air Products betreibt in Rotterdam einen der drei europäischen Verflüssiger in Europa und der Hafen ist an wichtigen Wasserstoffimportprojekten beteiligt.

Gegenüber Druckwasserstoff bietet LH₂ deutlich höhere Dichten und zusätzliche Vorteile bei der Nutzung der eingebauten Kühlkapazität für den Transport. Die Transportschiffe könnten mit dem Boil-off betrieben werden und die Energiewandler, Motor oder Brennstoffzelle, könnten effizient gekühlt werden, s.a. [25]. Zuletzt gibt es zunehmend bedeutende Anwendungen, die Wasserstoff im tiefkalten Zustand benötigen. Hierzu zählen die Luftfahrtanwendungen oder auch die Versorgung von Schwerlast-Transportanwendungen (s. Abschn. 3.3).

3.2.1 Container für den multimodalen Transport

Der Einsatz eines multimodalen Transports auf der Grundlage von genormten (ISO-)Containern für kurze bis mittlere Entfernungen ist ein schnell implementierbares

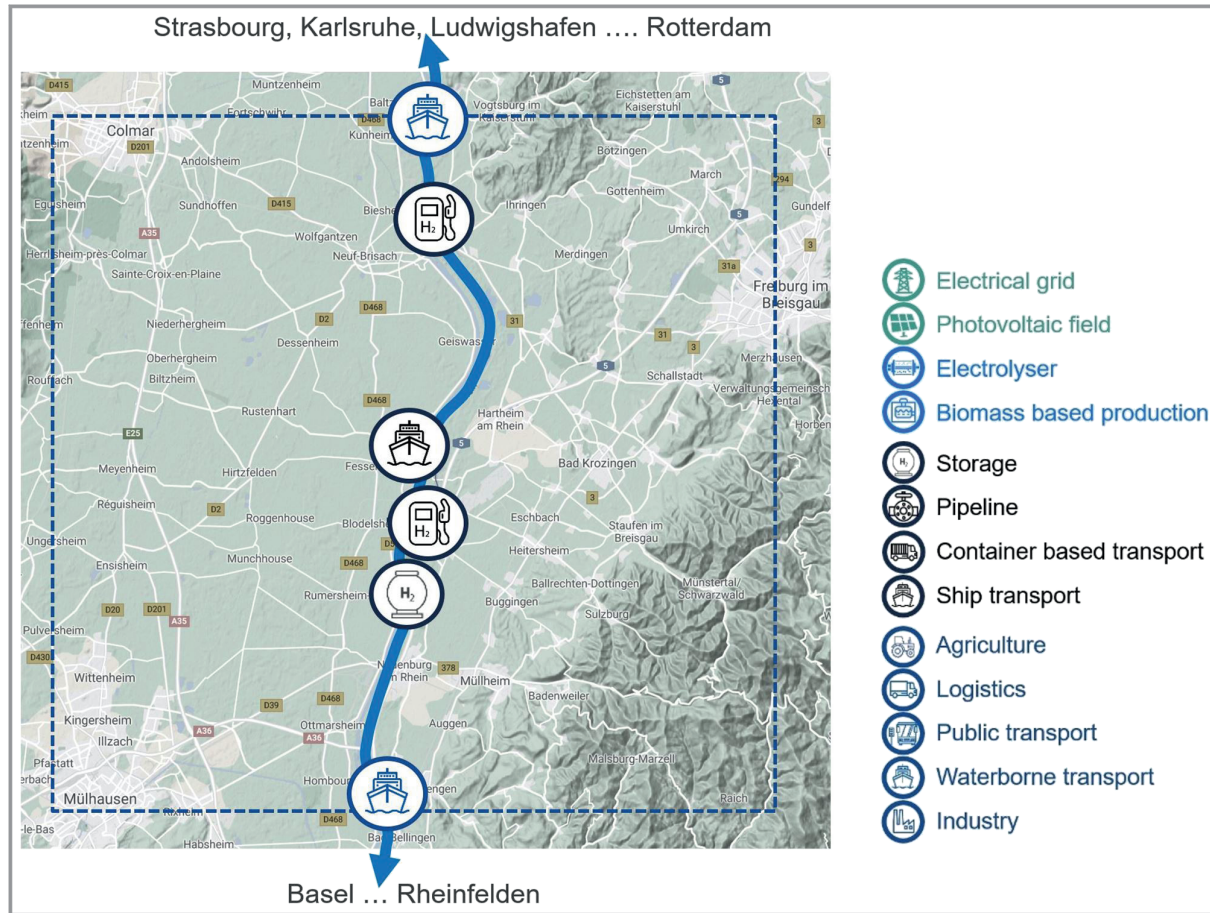


Abbildung 4. Pilotprojekt H2_B „Virtuelle Pipeline“.

und weniger kapitalintensives Konzept im Vergleich zu einer speziellen neuen Wasserstoffpipeline. Der containerbasierte, multimodale Transport kombiniert Transport auf dem Wasser, auf der Schiene und Straße (s. Abschn. 3.3) flexibel und effizient. Die Containerlösung baut auf verfügbaren Technologien auf und vermeidet Verluste beim Umfüllen von Transport- und stationären Behältern. Letztere Verluste entstehen im Wesentlichen durch die Druckverluste beim Befüllen von Druckbehältern und das notwendige Herunterkühlen der kryogenen Anlagenteile beim LH2. Der multimodale Transport erlaubt so z. B. eine flexible Versorgung von Tankstellen für den Schwerlasttransport und von in der Fläche verteilten Nutzanwendungen mit bereits entsprechend vorkonditionierten Wasserstoff – hochverdichtet oder tiefgekühlt.

3.2.2 Wasserstoff als Treibstoff für die virtuelle Pipeline

Die ISO-Container für Druck- und Flüssigwasserstoff können auf jedem herkömmlichen Containerschiff transportiert werden. Mittel- bis langfristig wäre jedoch auch der Einsatz von Wasserstoff selbst als sauberer Treibstoff in der Binnen-

schifffahrt anzustreben. Die Umrüstung bestehender Containerschiffe auf Wasserstoffmotoren oder Brennstoffzellenantriebe, wie zum Beispiel von der Holland Shipyards Group (HSG) für Future Proof Shipping (FPS)[20] demonstriert, könnte hier eine kostengünstige und schnelle Umstellung einer kleineren Flotte ermöglichen.

Für die wasserstoffbetriebenen Containerschiffe ist jedoch eine geeignete Betankungsinfrastruktur („Bunkering“) erforderlich. Die für dieses Schiff vorgeschlagene Technologie zur Treibstoffversorgung basiert auf austauschbaren („swappable“) Containern, möglicherweise vom gleichen Typ wie die transportierten Container selbst. Es werden zwei Tankstellen vorgeschlagen, eine in Ottmarsheim und eine weiter flussabwärts in Karlsruhe. Weitere Tankstellen könnten weiter flussabwärts entstehen, zum Beispiel in Ludwigshafen. Schließlich sollte der gesamte Rhein über genügend Tankstellen verfügen, die den gleichen Standards entsprechen, um einen nahtlosen wasserstoffbasierten Transport auf dieser wichtigen mitteleuropäischen Binnenschifffahrtsroute zu ermöglichen.

An den Tankstellen werden die benötigten größeren Inventare anfänglich als LH2 in Transportcontainern, später in entsprechend dimensionierten stationären Kryostaten

als LH2 gespeichert. Dies reduziert gegenüber einer Druckgas-basierten Tankstelleninfrastruktur den Platzbedarf, bietet die höchste Flexibilität hinsichtlich Betankungsprotokollen, maximiert die Leistungsfähigkeit und minimiert die Kosten.

AirLiquide wird eine Lösung für eine solche containerbasierte Kraftstoffversorgung anbieten, die bereits in einem belgischen Hafen getestet wurde. MTU hat Interesse an der Bereitstellung von Technologien für alle Arten von umweltfreundlichen Hafenausrüstungen bekundet und will Technologieanbieter für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Transportschiffe werden.

3.2.3 Zusatznutzen

Die Kühlkapazität von LH2 kann genutzt werden, um einige wichtige elektrische Systeme oder Übertrager supra-leitend zu machen. Eine Kombination des LH2-Speichers mit einem supraleitenden magnetischen Energiespeicher (SMES) könnte äußerst attraktive Möglichkeiten für die hybride Energiespeicherung mit einer engen Verbindung zu den geplanten intelligenten Netzlösungen eröffnen.

Die Schiffsbetankungs- bzw. Bunkering-Anlagen könnten mit kleineren Wasserstoffverflüssiger (anfänglichen Kapazität von 1 t d^{-1}) kombiniert werden um Boil-off-Verluste rückzuverflüssigen oder kleinere regional produzierte Wasserstoffmengen „transportfähig“ zu machen. Damit könnten die entsprechend ausgerüsteten Häfen sich zu regional verknüpften Umschlags- bzw. Handelszentren für Wasserstoff entwickeln.

3.3 Pilotprojekt H2_C „Schwerlast-Straßentransport“

Die von der europäischen Gesetzgebung geforderte CO₂-Reduzierung und die konkreten Anforderungen aus der Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) wird die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff für den Schwerlastverkehr, insbesondere für Langstrecken und energieintensive Transporte auf der Straße, stark unterstützen.

Auf der französischen Autobahn A36 Höhe Mulhouse verkehren täglich 13 000 Schwerlastkraftwagen. Dies ist das höchste Verkehrsaufkommen in der Oberrheinregion. Die wichtige und stark genutzte Verkehrsinfrastruktur, die die Nordschweiz, den Grand-Est Frankreichs mit dem Südwesten Deutschlands verbindet, hat viele Transportunternehmen bewegt, Niederlassungen in diesem Gebiet zu betreiben. Die Politik und die steuerliche Bewertung hinsichtlich wasserstoffgetriebenen Schwerlastverkehr unterscheiden sich deutlich in den drei betroffenen Nationen. Deutschland hat eine Steuer auf den Schwerlastverkehr eingeführt: die LKW-Maut im Jahr 2005. Die Schweiz führte 2008 eine Steuer auf den Transit-Schwerlastverkehr ein. Auf französischer Seite wurde das Projekt einer Ökosteuer 2013 aufgegeben, was zusammen mit anderen Entwicklungen zu

einer erheblichen Verlagerung des Schwerlastverkehrs auf die französische Seite führte. Die Einführung einer Schwerlastverkehrsabgabe wird derzeit geprüft.

In der Schweiz haben steuerrechtliche Besonderheiten es einem von der Industrie geführten Konsortium bereits ermöglicht, eine Flotte von Hyundai-Brennstoffzellen-Lkw kommerziell zu betreiben. Die Region Fessenheim könnte als strategische Ergänzung zu diesem Projekt oder unabhängig davon entwickelt werden. Der vorliegende Projektvorschlag baut auf den positiven Erfahrungen mit dem Schweizer Projekt auf.

3.3.1 Versorgungsinfrastruktur

Der Schwerlastverkehr ist auf eine leistungsfähige Betankungsinfrastruktur angewiesen, die in geografischer Nähe zu den großen infrastrukturellen Produktions- und Transporteinrichtungen aufgebaut sein muss (s. z. B. Abschn. 3.2). Ein LKW mit einer täglichen Fahrleistung von 1000 km benötigt etwa 100 kg d^{-1} . Eine AFIR-kompatible Tankstelle ist so in der Lage, mindestens 10 LKW oder ca. 30 Busse täglich mit Kraftstoff zu versorgen. Ähnlich wie bei den Wasserstofftankstellen für die Schifffahrt sollte eine so dimensionierte Tankstelle selbst mit Flüssigwasserstoff versorgt werden oder einen Anschluss an eine Wasserstoffpipeline haben. Letzteres ist aus den zuvor beschriebenen Beschränkungen (s. Abschn. 3.2) jedoch für die Region nicht relevant. Darüber hinaus bietet eine Flüssigwasserstofftankstelle die größte Flexibilität für die Betankung mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff, kryokomprimiertem Wasserstoff oder flüssigem Wasserstoff.

Eine AFIR-kompatible Tankstellen muss öffentlich zugänglich sein und bietet auch Projekten mit Wasserstoff-Busflotten und PKW-Flotten, z. B. Taxi-Unternehmen, ausreichende Betankungskapazität.

Neben der Funktion als eine hochverfügbare Betankungsinfrastruktur bereit zu stellen, sollte die avisierte Wasserstofftankstelle auch der Weiterentwicklung der Betankungstechnologie für den Schwerlastverkehr dienen. Ein modulares Konzept sollte die Erprobung kritischer Komponenten (z. B. Hochdruckkühler, Verdampfer, Kompressoren usw.), von Betankungsprotokollen und der zugehörigen Messtechnik (z. B. Massenstrom, abgegebene Masse, sicherheitskritische Parameter usw.) an einem parallelen unabhängigen Strang der Tankstelle ermöglichen.

Bei der Wahl des Standorts sollten die Erreichbarkeit (Autobahnanbindung), die Anbindung an die Großchemie und etwaige Synergien mit dem Schiffs- und/oder Bahntransport berücksichtigt werden, um der multimodalen Vision des eng verknüpften Pilotprojekts H2_B gerecht zu werden.

3.3.2 Fahrzeugflotte

Derzeit bereiten sich einige Unternehmen darauf vor, mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen- oder Verbrennungsmotoren auf den Markt zu kommen (Hyundai, Daim-

ler/Volvo, IVECO/Nicola, Toyota, etc.). Das einzige Unternehmen mit einer größeren Anzahl von Fahrzeugen auf dem Markt ist Hyundai mit seinen XCIENT-LKW. Daimler Truck hat Interesse den Wasserstoff-Hub in der Region zu unterstützen und wird ab 2027 GenH2-LKW anbieten.

In der Region gibt es mehrere größere Speditionen mit großen Fuhrparks (z. B. Grieshaber, Schenker und JCL Logistics). Da es jedoch einfacher sein wird, die Kräfte für die Verhandlungen über den Kauf und das Management der LKW-Flotte und der Tankinfrastruktur zu bündeln, wird vorgeschlagen, ein ähnliches Geschäftskonzept wie beim Schweizer Projekt Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) anzuwenden. Für dieses Projekt hat Hyundai 2019 ein Joint Venture mit dem Schweizer Unternehmen H2 Energy gegründet[21]. Das Joint Venture vermietet die Fahrzeuge an gewerbliche LKW-Betreiber auf einer Pay-per-Use-Basis. Dieses Leasingmodell umfasst auch die Wasserstoffversorgung. Der Vorteil für gewerbliche Flottenkunden besteht darin, dass keine Investitionen anfallen und sie sich nicht um die Kraftstoffversorgung kümmern müssen.

3.4 Pilotprojekt H2_D „Dezentrale Produktion und Nutzung in der Landwirtschaft“

Die Gesamtpotenziale der Land- und Forstwirtschaft als Rückgrat einer wasserstoffbasierten Gesellschaft und Wirtschaft sind komplex, bedeutend und werden oft unterschätzt. Mit einem durchdachten Ansatz ist es möglich, in der Region um Fessenheim sowohl Anwendungsmöglichkeiten der Wasserstofftechnologie als auch Synergieeffekte in konkreten Demonstrationsprojekten aufzuzeigen (Abb. 5). Dabei sollen folgende Themen im Vordergrund stehen:

- 1) die energetische Verwertung von Biomasse durch die Erzeugung von Wasserstoff,
- 2) die Verwendung von Wasserstoff in der Landwirtschaft,
- 3) Synergieeffekte bei der Nutzung auf landwirtschaftlichen Flächen erzeugten PV-Stroms,
- 4) Dezentralisierung hin zu energetisch selbsttragenden und unabhängigen landwirtschaftlichen Standorten.

Die Nutzung von Biomasse kann gegenüber der Elektrolyse unter Umständen sogar CO₂-negative Pfade zur Wasserstoffherstellung eröffnen und die hohen Anforderungen aus der weiteren Defossilisierung des Stromnetzes entlasten. Abhängig von der Menge und Qualität der Biomasse können unterschiedliche Verfahren zur Herstellung eines

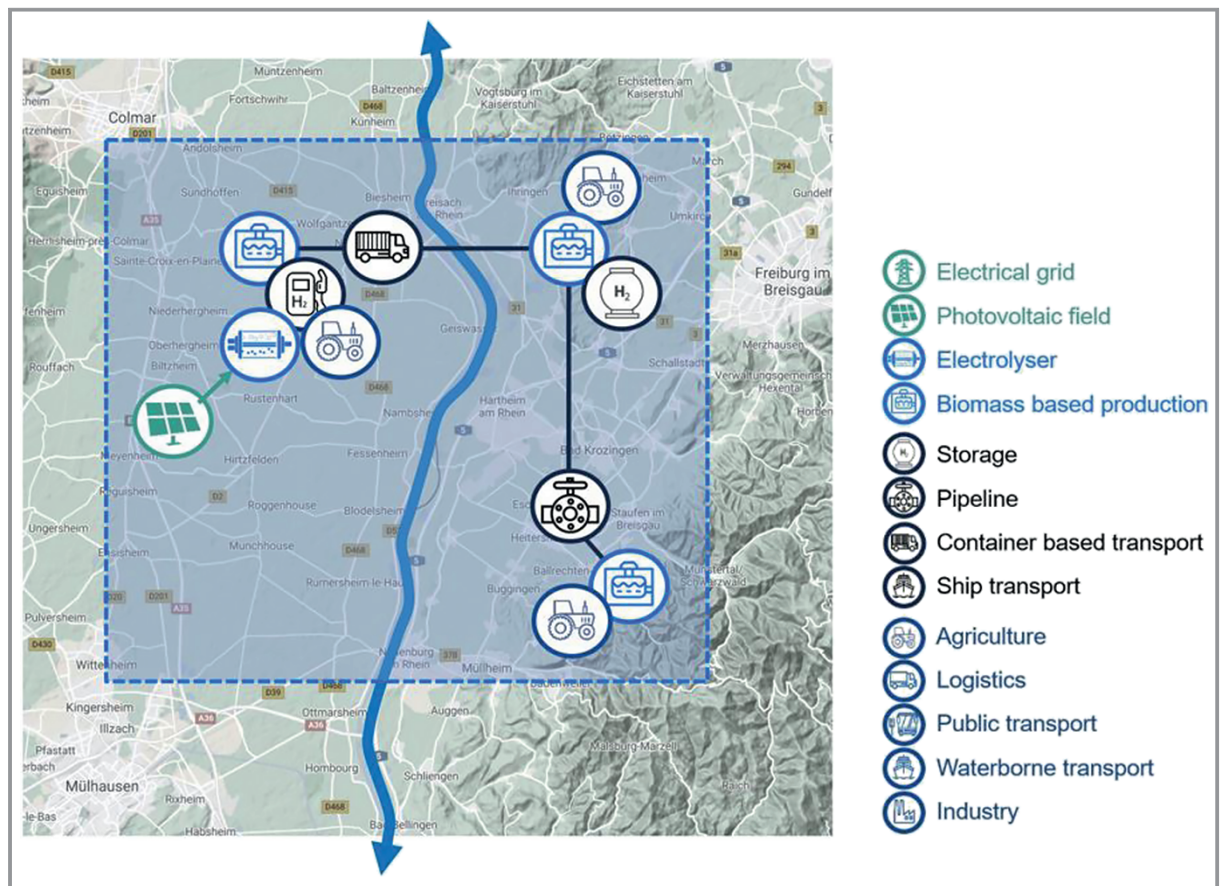


Abbildung 5. Pilotprojekt H2_D „Dezentrale Produktion und Nutzung in der Landwirtschaft“.

Biogases in einem ersten Verfahren und zur Herstellung von Wasserstoff in einem zweiten Verfahren gewählt werden und ggf. mit lokal erzeugtem grünem Strom kombiniert werden. Die Vergasung von bestimmten Pflanzen oder auch organischen Abfällen ist in der Region schon breit etabliert. Die weitere Verarbeitung zu Wasserstoff, zum Beispiel über Dampfreformierung oder Methanpyrolyse ist jedoch noch mit technologischen Hürden verbunden. Insbesondere die Nebenprodukte bzw. Verunreinigungen erfordern zusätzliche aufwändige Reinigungsschritte.

Der Weinbau als bedeutender Wirtschaftszweig in der Region generiert große Mengen an biogenen Reststoffen, z. B. unverkaufte Trauben, Trester, Weintrub und Abwasser. Die Abfälle aus Weinkellereien sind aufgrund der vorhandenen Mikrobenstämme und des hohen Zuckergehalts, der den Gärungsprozess begünstigt, als Substrat für die Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Dunkelfermentation (DF) besonders interessant. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens sind die moderaten Betriebstemperaturen und -drücke. Außerdem ist der Prozess im Vergleich zur anaeroben Vergärung schnell (mehrere Stunden) und kann kontinuierlich betrieben werden. Dennoch ist die DF derzeit auf den Labormaßstab (TRL 3–5) beschränkt und muss erst noch skaliert werden.

Die Erzeugung von Wasserstoff durch Methancracken mittels Plasmalyse oder Flüssigmetallreaktoren hat heute einen ähnlich niedrigen Reifegrad erreicht (TRL 3–5). Es wird daher vorgeschlagen, diese Technologien und ihre Potenziale in den kommenden Jahren weiter zu untersuchen und zu einer Anwendungsreife zu entwickeln. Die bei der Methanspaltung anfallenden Kohlenstoffmengen sind beträchtlich, könnten aber auf Land- und Waldflächen deponiert und somit in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt werden. Dieses Vorgehen wird als „Terra Preta“ bezeichnet. Eine Demonstration in der Region könnte die vielfältigen Studien hierzu bereichern.

Weitere Synergieeffekte mit anderen Nutzungsmöglichkeiten von erneuerbarer Energie lassen sich z. B. mittels innovativer Solarmodule bzw. -systeme erzielen. Entweder werden konventionelle Solarmodule besonders angeordnet – zum Beispiel vertikal installiert – oder teilweise transparente Module werden verwendet. So kann auf großer Fläche einerseits Strom aus der Sonneneinstrahlung produziert werden und andererseits können hochwertige Nutzpflanzen vor den indirekten Folgen des Klimawandels (Trockenheit, Hagelstürme, übermäßige Sonneneinstrahlung usw.) geschützt werden. Die so produzierte grüne Strom könnte in den Verfahren zur Wasserstoffherstellung mit eingesetzt werden, um den CO₂-Fussabdruck weiter zu reduzieren und um den Grad der Selbstversorgung zu erhöhen.

Die Doppelnutzung von landwirtschaftlichen Flächen bringt sowohl für die Landwirte selbst als auch für die lokalen Gemeinden und Kommunen wirtschaftliche Vorteile mit sich. Im europäischen Projekt „HyPERFarm, Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm“ [23], werden die Synergien zwischen der Nutzung von Photovoltaik

auf landwirtschaftlichen Flächen, Optionen und Potenziale untersucht und die Auswirkungen genauer getestet.

Die Interaktion zwischen Landwirten und Kommunen und ihre Synergien kann weitere Vorteile für die Region bedeuten. Die „wasserstoffbetriebene Landwirtschaft“ kann auch als Vorbild dienen und eine Art Attraktion für interessierte Nachbarn, Nachahmer oder Touristen sein. Die Verankerung der verteilten Produktion und Nutzung von Wasserstoff vor Ort würde helfen sich mit dieser Technologie zu identifizieren und so Verständnis und Akzeptanz für die eingesetzte Technologie in der breiten Bevölkerung fördern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen einer binationalen Machbarkeitsstudie wurden Konzepte zur Einführung nachhaltiger Technologien in der Innovationsregion Fessenheim und darauf aufbauend verschiedene Handlungsansätze für deutsch-französische Demonstrationsprojekte entwickelt. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung einer nachhaltigen und zukunftsorientierten CO₂-neutralen Wirtschaftsregion.

Der Umbau von Gesellschaft und Wirtschaft hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung und einer nachhaltigen Ressourcennutzung, verbunden mit der Schaffung von zukunftsorientierten Arbeitsplätzen, wird durch den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger stark gefördert. Nachhaltig produzierter „grüner“ Wasserstoff ermöglicht die nahezu sofortige Substitution von aus fossilen Quellen produzierten Wasserstoff in industriellen Prozessen, die saisonale Speicherung von erneuerbarem Strom und die flexible und effiziente Kopplung verschiedener Energiesektoren. Die in diesem Bericht vorgeschlagenen Pilotprojekte decken die gesamte Wertschöpfungskette mit grünem Wasserstoff ab und bauen dabei auf den besonderen regionalen Eigenschaften und Gegebenheiten auf. Obwohl sich die vier für die Region vorgeschlagenen Projekte wechselseitig unterstützen und in der vorgeschlagenen Reihenfolge – zunächst Erschließung der großen Skalen in der Industrie und dann mit reduzierten Preisen in die verteilte Produktion und Anwendung – implementiert werden sollten, können sie durchaus unabhängig voneinander realisiert werden. Dies kann insbesondere bei geänderten Rahmenbedingungen, z. B. aus der Regulatorik oder aus Förderprogrammen heraus, sinnvoll sein.

Offensichtlich muss nun insbesondere die Industrie die weitere Entwicklung der Projekte treiben. Die Einbettung der entsprechenden weiteren, regionalen Aktivitäten mit einem Bezug zu Wasserstoff in ein sogenanntes europäisches Hydrogen Valley [24] könnte dabei für Kohärenz, erweiterte Sichtbarkeit und Förderung der übergeordneten Projektarbeiten bieten. Die Region mit ihrem grenzüberschreitenden Charakter im Zentrum Europas wäre für einen solchen Antrag idealtypisch geeignet.

Danksagung

Der Autor dankt allen Mitgliedern der von ihm geleiteten Expertengruppe „Wasserstoff“ für ihre Beiträge zur Machbarkeitsstudie Innovationsregion Fessenheim, Prof. Barbara Koch, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, und Janosch Nieden, Eucor, für die Gesamtkoordination, sowie dem französischen Staat, der Région Grand Est, der Bundesrepublik Deutschland, sowie dem Land Baden-Württemberg für die Finanzierung der Arbeiten. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] B. Koch, D. Badariotti, A. Dieterlen, F. Greulet, T. Jordan, I. Krossing, Z. Najjar, M. Schmucker, L. Tachet, M. Vetter, *Machbarkeitsstudie Innovationsregion Fessenheim*, Eucor, **2022**.
- [2] F. P. Vulla Parasote-Matziri, *Trinationaler Klima- und Energiebericht*, TRION-climate e.V., Kehl **2019**.
- [3] *Global Hydrogen Review*, International Energy Agency, Paris **2023**.
- [4] C. Voglstätter, *Wasserstoff-Technologien am Südlichen Oberrhein H2SO*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE, Freiburg **2021**.
- [5] F. Bianchi, B. Bosio, Operating Principles, Performance and Technology Readiness, *Sustainability* **2021**, 13 (9), 4777.
- [6] www.euroglas.com/uploads/tx_lwgtbrochures/bro_gruppe-glas-troesch_en.pdf
- [7] B. Fleischmann, Energie- und CO₂-Bilanz einer Glasproduktion – Dekarbonisierungs- und Effizienzpotenziale, in *Rückblick digitaler Praxisworkshop Glasindustrie: Perspektiven für eine energieeffiziente und CO₂-arme Produktion*, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., Offenbach **2021**.
- [8] Y. Ruf, M. Baum, T. Zorn, A. Menzel, J. Rehberger, *Study on Fuel Cells Hydrogen Trucks*, Publications Office of the European Union, **2020**.
- [9] *February H2IQ Hour: Overview of Hydrogen Internal Combustion Engine (H2ICE) Technologies*, US DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, Washington, DC **2023**.
- [10] *Hyundai Hydrogen Mobility*, Hyundai Motor Company and H2Energy. Available: <https://hyundai-hm.com/>
- [11] EU Verordnung, *Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR)*, **2023**.
- [12] <https://rh2ine.eu/>
- [13] Pressemitteilung, *DEUTZ macht nächsten Schritt für Serienproduktion von Wasserstoffmotoren*, Deutz AG, Köln-Porz Juli **2023**. www.deutz.com/investor-relations/investor-news/deutz-macht-naechsten-schritt-fuer-serienproduktion-von-wasserstoffmotoren
- [14] *Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßensfahrzeuge*, Brüssel, Juli **2019**. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE>
- [15] *Erster Fortschrittsbericht zur Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg*, Plattform H2BW, Mai **2023**. https://stm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Fortschrittsbericht-Wasserstoff-Roadmap-BW.pdf (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [16] *Baden-Württemberg unterstützt Vorhaben zum Transport von Wasserstoff*, amo, März **2021**. www.zfk.de/energie/gas/baden-wuerttemberg-unterstuetzt-vorhaben-zum-transport-von-wasserstoff (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [17] *The European Hydrogen Backbone*, The European Hydrogen Backbone. <https://ehb.eu/> (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [18] *Wasserstoff Kernnetz*, FNB Gas, November **2023**. <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/> (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [19] *RHYn Rhine Hydrogen Network*, GRTgaz, September **2023**. www.grtgaz.com/en/medias/communiqués-de-presse/communique-de-presse-ami-rhin-superieur-septembre2023 (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [20] *Retrofit Future Proof Shipping's "Maas" to sail on H2 Power*, Holland Shipyards Group, March **2021**. www.hollandshipyardsgroup.com/news/holland-shipyardsgroup-will-retrofit-future-proof-shippings-maas-to-sail-on-h2-power (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [21] *Hyundai's Swiss hydrogen fuel cell truck fleet crosses one-million-kilometer barrier*, Automotive Testing Technology International, Juli **2021**. www.automotivetestingtechnologyinternational.com/news/fuels-integrated-systems/hyundais-swiss-hydrogen-fuel-cell-truck-fleet-crosses-one-million-kilometer-barrier.html (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [22] H. Nitsch, *Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Chancen und Herausforderungen*, Institut für ländliche Struktur-forschung e.V., Frankfurt am Main **2023**.
- [23] *HyPERFarm – Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg. www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/hyperfarm.html (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [24] *Mission Innovation Hydrogen Valley Platform*, Clean Hydrogen Partnership and Mission Innovation. <https://h2v.eu/>. (Zugriff am 11. Dezember 2023)
- [25] <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>

DOI: 10.1002/cite.202300240

Multimodaler Wasserstoff-Hub in der Innovationsregion Fessenheim

Thomas Jordan*

Essay: Am Beispiel der Innovationsregion Fessenheim wird gezeigt wie grüner Wasserstoff konventionell hergestellten Wasserstoff in industriellen Prozessen ersetzen kann, die saisonale Speicherung von erneuerbarem Strom und die flexible und effiziente Kopplung verschiedener Energiesektoren ermöglicht. ■

